

Rapport final du projet : *UTES-II Ville Mercier*

Soumis par

Maxime Claprood, ing., Ph.D., Associé de recherche

Thomas Béraud, Doctorant

Louis-Charles Boutin, ing., Agent de recherche

Erwan Gloaguen, Ph.D., Professeur

Richard Martel, Ph.D., Professeur

16 janvier 2023



Institut national
de la recherche
scientifique

Table des matières

Liste des Tableaux	IV
Liste des Figures	V
Liste des Annexes	XI
1. Introduction.....	1
1.1 Contexte hydrogéologique	1
1.2 Mandat.....	4
1.3 Objectif.....	4
1.4 Démarche générale de modélisation	5
1.5 Chronologie des tâches du projet	8
2. Compilation des données	9
2.1 Source des données utilisées	9
2.1.1 Données reliées au modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques	9
2.1.2 Données reliées au modèle hydrogéologique	11
2.2 Acquisition de données	13
2.2.1 Sismique réflexion 2019 et 2021	14
2.2.2 Forages complémentaires.....	15
2.2.3 Diagraphies en forage	16
2.2.4 Essais de perméabilité multi-niveaux	20
3. Modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques	22
3.1 Définition des unités hydrostratigraphiques sur le domaine d'étude	22
3.2 Mise en carte des unités hydrostratigraphiques.....	23
3.2.1 Surface topographique	23
3.2.2 Élévation du toit du Roc_5	25
3.2.3 Épaisseur de l'unité Till_4.....	26
3.2.4 Épaisseur de l'unité EskerSG_3.....	28
3.2.5 Hydrofaciès F1_Esker et F2_SG de l'unité EskerSG_3	30
3.2.6 Épaisseur de l'unité Argile_2.....	32
3.2.7 Épaisseur de l'unité Remblai_Organique_1	34
3.3 Représentation 3D des unités hydrostratigraphiques	35
3.4 Incertitude sur la construction du modèle conceptuel.....	36
4. Construction du modèle hydrogéologique déterministe	38
4.1 Construction du maillage 2D.....	38
4.2 Construction de la grille d'écoulement 3D	39

4.3	Représentation des propriétés hydrauliques	41
4.3.1	Valeur unique par unité hydrostratigraphique	42
4.3.2	Interpolation par krigeage	42
4.4	Conditions aux frontières	46
4.5	Représentation de la recharge	47
5	Calibration du modèle régional déterministe en régime permanent	49
5.1	Hypothèses de calibration	49
5.2	Méthode de calibration.....	49
5.3	Observations utilisées pour la calibration	50
5.4	Résultats de la calibration	54
5.4.1	Comparaison niveaux d'eau observés et niveaux d'eau simulés	54
5.4.2	Distribution spatiale de niveaux d'eau simulés	58
5.4.3	Paramètres hydrauliques calibrés.....	60
5.5	Étude de sensibilité.....	66
6	Assimilation des modèles stochastiques en régime transitoire	68
6.1	Assimilation par méthode de lissage d'ensemble	68
6.2	Hypothèses d'assimilation.....	69
6.3	Maquette numérique de la conductivité hydraulique	72
6.3.1	Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans le roc	72
6.3.2	Hétérogénéité de Kxy dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3.....	73
6.3.3	Simulations géostatistiques de Kxy par bandes tournantes	74
6.4	Essais de pompage et de remontée.....	76
6.4.1	Essai de pompage 1.....	77
6.4.2	Essai de pompage 2.....	78
6.5	Résultats de l'assimilation.....	80
6.5.1	Comparaison des niveaux d'eau observés et simulés	82
6.5.2	Paramètres hydrauliques mis à jour	88
7	Évaluation des scénarios de pompage de l'UTES-II	96
7.1	Critères d'évaluation des scénarios	97
7.2	Hypothèses et limitations de l'évaluation des scénarios	99
7.3	Processus d'évaluation des scénarios	99
7.4	Résultats des évaluations des différents scénarios	101
7.4.1	Scénario SA	103
7.4.2	Scénario A.....	106

7.4.3	Scénario B.....	109
7.4.4	Scénario B_1.....	113
7.4.5	Scénario C.....	117
7.4.6	Scénario C_1.....	119
8	Recommandations, limitations du modèle et conclusion.....	123
9	Livrables	128
10	Références.....	129
	Annexes.....	132

Liste des Tableaux

Tableau 1.	Localisation des 10 sites du programme initial de caractérisation du sol, du roc et de l'eau souterraine (TechnoRem 2021). À la suite de la campagne de terrain, aucun forage non-conventionnel n'a été effectué au site 2, et seul un forage rotosonic a été complété au site 10.....	16
Tableau 2.	Diagraphies dans les puits de Ville Mercier aménagés dans les sédiments et/ou le roc.....	16
Tableau 3.	Liste des puits avec diagraphies de forage acquises dans les puits de Ville Mercier.....	17
Tableau 4.	Sommaire des essais hydrauliques réalisés dans les puits de Ville Mercier... ..	20
Tableau 5.	Valeurs minimale, médiane, maximale de conductivité hydraulique rapportées pour les différentes unités hydrostratigraphiques à l'intérieur des limites de modélisation.....	41
Tableau 6.	Valeurs initiales de K_{xy} , K_r , et S_s assignées aux unités hydrostratigraphiques du modèle hydrogéologique des anciennes lagunes de Ville Mercier.....	42
Tableau 7.	Somme pondérée des erreurs moyennes au carré (SCE) entre les niveaux d'eau observés et niveaux d'eau simulés, selon le groupe d'observation.	54
Tableau 8.	Valeurs de K_{xy} et K_r initialement assignées et calibrées aux différentes unités hydrostratigraphiques du modèle hydrogéologique régional.....	60
Tableau 9.	Sensibilité des paramètres hydrauliques calibrés sur la fonction objective	66
Tableau 10.	Grille des critères d'évaluation des différents scénarios de l'UTES-II.	98
Tableau 11.	Coordonnées des 3 puits hypothétiques utilisés dans le schéma Nord.	100
Tableau 12.	Évaluation des différents scénarios de l'UTES-II.....	102

Liste des Figures

Figure 1. Coupe schématique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).	1
Figure 2. Schéma 3D de la représentation conceptuelle du site des anciennes lagunes de Mercier, avec les descriptions géologiques suivantes : 1A : mince couche argileuse, 1B : remblai plus perméable, 2 : matériaux argileux, 3 : unité de sable et gravier constituant l'esker de Mercier, 4A : till supérieur peu perméable, 4B : till inférieur moins perméable, 5 : roc. Figure de MDDEP, 2007.	2
Figure 3. Carte géologique de la région d'étude (modifié de Tremblay, 2008).	3
Figure 4. Séquence logique de modélisation stochastique et assimilation par méthode d'ensemble suivie dans ce projet.	6
Figure 5. Données disponibles pour la construction du modèle conceptuel régional des unités hydrostratigraphiques.	10
Figure 6. Données disponibles pour la construction et calibration du modèle hydrogéologique régional du site des anciennes lagunes de Ville Mercier.	11
Figure 7. Localisation des levés de sismique réflexion 2D par MBMS Solutions lors des campagnes de terrain de 2019 (lignes en vert pâle) et 2021 (lignes blanches) ; et position des forages complétés par TechnoRem en 2020 (carrés rouges). Les lignes rouges, roses, bleues et cyan sont des lignes sismiques présentées dans le rapport de Claprood et coll. (2021) en Annexe 3. Les carrés jaunes sont les puits de l'UTES-I. La ligne mauve est la limite ouest du modèle hydrogéologique, correspondant à la Rivière Châteauguay.	13
Figure 8. Horizons sismiques S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge) pointés sur toutes les lignes sismiques de la campagne 2019 au site de Ville Mercier.	15
Figure 9. Information lithostratigraphique obtenue à partir des diagraphies de rayonnement Gamma dans les puits au roc. La diagraphie du diamètreur (Caliper) est présentée en orange. L'échelle verticale est en élévation négative.	18
Figure 10. Diagraphies de températures (bleu à rouge) et de rayonnement Gamma (orange à brun) dans les puits au roc. L'échelle verticale est en élévation négative.	19
Figure 11. Résultats des essais de perméabilité multi-niveaux de l'automne 2020.	21
Figure 12. Carte topographique krigée de la surface. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (jaunes) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).	24
Figure 13. Carte de l'élévation régionale krigée du roc. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (carrés rouges) ; puits SIH (points jaunes) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; limites du modèle intermédiaire de Pontlevoy (2004 (polygone bleu).	26
Figure 14. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Till_4. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; épaisseurs	

- évaluées aux puits (carrés verts) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose)..... 27
- Figure 15. Diagramme croisé entre l'épaisseur de l'EskeSG_3 et l'élévation de Till_4, montrant un coefficient de corrélation $r^2 = -0.84$ 28
- Figure 16. Carte des épaisseurs krigées de l'unité EskeSG_3. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés jaunes) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où le Till_4 affleure à la surface (points verts). 29
- Figure 17. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F1_Esker. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur. 31
- Figure 18. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F2_SG. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur..... 32
- Figure 19. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Argile_2. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés rouges) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où l'unité EskeSG_3 (points jaunes) et l'unité Till_4 (points verts) affleurent à la surface. Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur..... 33
- Figure 20. Carte des épaisseurs de l'unité Remblai_Organique_1. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur. 34
- Figure 21. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques dans le modèle conceptuel régional. Exagération verticale de la vue régionale est de 40x, exagération verticale de la vue locale est de 20x. La carte de fond est la géologie de surface, avec le réseau hydrologique. Le modèle géologique local provenant du MELCCFP sur le site des lagunes de Ville Mercier est aussi présenté..... 35
- Figure 22. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques au niveau du site de l'UTES, avec une exagération verticale de 5. La carte de fond est la géologie de surface. Les puits de l'UTES PW-113, PW-112, et PW-111 sont présentés en blanc et noir de gauche à droite, respectivement. 36
- Figure 23. Représentation 2D de la grille de modélisation. Les ronds bleus représentent les nœuds des cours d'eau où sont assignées des conditions aux frontières à charge constante à la surface. Les croix jaunes présentent les points de contrôle utilisés pour bâtir la grille 2D. Les lignes vertes sont les sections verticales EW_3 et SN_3 présentées à la figure suivante. 39

Figure 24. Section verticale (EW_3 sur la Figure 23) d’ouest (gauche) vers l’est (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments. Exagération verticale de 80. De bas en haut : roc sain (marron) ; roc fracturé (rouge) ; Till_4 (vert) ; faciès F1_Esker (jaune) ; faciès F2_SG (orange) ; Argile_2 (cyan) ; et Remblais organique 1 (gris)..... 40

Figure 25. Section verticale (SN_3 sur la Figure 23) du sud (gauche) ou nord (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments. Exagération verticale de 30. De bas en haut : roc sain (marron) ; roc fracturé (rouge) ; Till_4 (vert) ; faciès F1_Esker (jaune) ; faciès F2_SG (orange) ; Argile_2 (cyan) ; et Remblais organique 1 (gris)..... 41

Figure 26. Position (losanges) des points de mesures de Kxy dans l’unité de Roc_5 servant de points-pilotes au niveau régional. 43

Figure 27. Position (losanges) des points-pilote dans les zones de fenêtres potentielles au Till_4 (zones en vert foncé) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier (rectangle rose). L’unité de Till_4 est représentée par la couleur verte, tandis que la couleur jaune représente les fenêtres au roc modélisées avec l’unité d’EskerSG_3. 44

Figure 28. Position des points de mesure (losanges noirs) et des points-pilote (losanges bleus) dans l’Esker_SG3. La couleur jaune représente le faciès F1 de l’unité EskerSG_3, l’orange représente le faciès F2 de l’unité EskerSG_3, le vert pâle est le Till_4 remanié, le cyan est l’Argile_2, et le rouge est le Roc_5. 45

Figure 29. Position des conditions aux frontières de type Dirichlet (cercles bleus) dans l’Esker_SG3 (gauche) et dans le Roc_5 (droite). La couleur cyan représente l’Argile_2, le jaune représente le faciès F1 de l’unité EskerSG_3, l’orange représente le faciès F2 de l’unité EskerSG_3, le vert pâle est le Till_4 remanié, et le rouge est le Roc_5. Les croix bleues représentent la position des grands utilisateurs d’eau du modèle..... 47

Figure 30. Distribution spatiale de la recharge efficace assignée à la première couche du modèle hydrogéologique déterministe en régime permanent. Les croix bleues représentent la position des grands utilisateurs d’eau du modèle..... 48

Figure 31. Distribution régionale des niveaux d’eau à calibrer en régime permanent sur le modèle hydrogéologique de Ville Mercier. 52

Figure 32. Distribution locale des niveaux d’eau à calibrer en régime permanent sur le modèle hydrogéologique de Ville Mercier. 53

Figure 33. Distribution régionale des niveaux d’eau (en mètres) observés (gauche), simulés avant (centre, haut), et simulés après (centre, bas) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique. Les résidus (niveaux d’eau simulés moins niveaux d’eau observés) sont affichés dans la colonne de droite, avant (droite, haut) et après (droite, bas) la calibration..... 55

Figure 34. Distribution locale des niveaux d’eau (en mètres) observés (gauche), simulés avant (centre, haut), et simulés après (centre, bas) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique. Les résidus (niveaux d’eau simulés moins niveaux d’eau

observés) sont affichés dans la colonne de droite, avant (droite, haut) et après (droite, bas) la calibration..... 56

Figure 35. Niveaux d’eau simulés en fonction des niveaux d’eau observés avant (a, c) et après (b, d) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique, pour toutes les observations régionalement (a, b) et localement (c, d)..... 57

Figure 36. Boîtes à moustache montrant les résidus entre les niveaux d’eau simulés et observés avant (a, c) et après (b, d) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique, pour toutes les observations régionalement (a, b) et localement (c, d). Les ronds représentent les erreurs extrêmes, à plus de 3 écart-types de la moyenne. 58

Figure 37. Boîtes à moustache montrant les erreurs de calibration (en pourcentage) sur les niveaux d’eau simulés avant (a, c) et après (b, d) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique, pour toutes les observations régionalement (a, b) et localement (c, d). Les ronds représentent les erreurs extrêmes, à plus de 3 écart-types de la moyenne. 58

Figure 38. Niveaux d’eau simulés et calibrés dans l’unité Roc_5 au niveau régional, couche 27 du modèle hydrogéologique. Les croix vertes sont la position des observations de niveaux d’eau qui ont servi à la calibration. Les ronds bleus sont les conditions aux frontières associées au roc. Le rectangle jaune délimite la zone représentée sur la Figure 39..... 59

Figure 39. Carte piézométrique dans le roc au printemps 2004, provenant du Service de l’aménagement du territoire et des eaux souterraines du ministère de l’environnement du Québec. 59

Figure 40. Niveaux d’eau simulés et calibrés dans l’unité Roc_5 (gauche, couche 27) et EskerSG_3 (droite, couche 8) au niveau local. Les points noirs sont la position des observations de niveaux d’eau qui ont servi à la calibration. 60

Figure 41. Distributions des conductivités hydrauliques calibrées sur les points-pilotes, avant (0 : bleu) et après (2 : vert) la calibration du modèle par PEST..... 62

Figure 42. Distribution spatiale de Kxy calibrée localement dans la fenêtre potentielle au roc dans l’unité Till_4, avec la position des points-pilotes (losanges vert). Les zones oranges sont les fenêtres au roc provenant du modèle conceptuel. Les symboles marrons représentent les 3 puits de l’UTES. Le rectangle rose est le site de l’UTES. Les lignes blanches sont la position des profils verticaux de la Figure 45. 63

Figure 43. Distribution spatiale de Kxy calibrée régionalement dans le roc, avec la position des points-pilotes (losanges marrons). Les croix bleues représentent les grands utilisateurs d’eau. Le rectangle rose est le site de l’UTES. Les lignes blanches sont la position des profils verticaux de la Figure 45. 64

Figure 44. Distribution spatiale de Kxy calibrée localement dans les faciès F1 et F2 dans une couche de l’unité EskerSG_3, avec la position des points de mesure (losanges blancs) et des points-pilotes (losanges marrons). Le rectangle rose est le site de l’UTES. 65

Figure 45. Sections verticales Est-Ouest (en haut) et Sud-Nord (bas) de la Figure 44 montrant la distribution spatiale de Kxy calibrée localement dans les faciès F1 et F2 de l’unité EskerSG_3 et du Roc_5..... 66

Figure 46. Schéma complet d’assimilation des données par méthodes d’ensemble. Figure extraite de Béraud (2022), modifiée de Raanes (2005). 68

Figure 47. Schéma de la mise à jour dans la méthode de lissage d’ensemble itératif. L’axe horizontal montre le pas d’échantillonnage des mesures temporelles. L’axe vertical est l’axe des mises à jour. La flèche bleue représente la simulation hydrogéologique de l’ensemble avec l’assimilation des observations temporelles (flèches rouges). La flèche rose est l’ensemble mis à jour par la flèche verte. Figure extraite de Béraud (2022), modifiée de Evensen (2009). 69

Figure 48. Distribution spatiale de Kxy dans une couche du modèle hydrogéologique (couche 27) montrant la limite entre le modèle local stochastique et le modèle régional déterministe. Les traits noirs sont la position de profils verticaux où sont présentés les résultats des simulations. Le carré bleu présente la zone où sont présentés les résultats des simulations en plan. 71

Figure 49. Distribution spatiale (gauche) et histogramme (droite) des mesures de Kxy dans l’unité de roc. 72

Figure 50. Distribution spatiale (gauche) et histogramme (droite) des mesures de Kxy dans le faciès F1 (haut) et F2 (bas) de l’unité EskerSG_3. 74

Figure 51. Vue en plan de 2 réalisations de Kxy dans le roc (haut) et dans les faciès F1 et F2 de l’EskerSG_3 (bas). Les lignes noires sont la position des profils verticaux. Le carré rose est le site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les points rouges sont la position des points de mesure de Kxy dans le roc. Les triangles noirs sont la position des puits d’observation pour l’essai de remontée de l’UTES (essai de pompage 1). Les triangles blancs sont la position des puits d’observation pour l’essai de pompage du puits 87-01 (essai de pompage 2). Les croix roses sont les puits de pompage. 75

Figure 52. Vue de 3 profils de 2 réalisations de Kxy du modèle hydrogéologique local. 76

Figure 53. Position des puits d’observation et de pompage pour l’essai de pompage 1, soit l’essai de remontée aux puits de l’UTES. 77

Figure 54. Débits prélevés par les puits de pompage PW112 et PW113 lors de l’essai de pompage 1. 77

Figure 55. Séries temporelles mesurées dans 4 puits d’observation lors de l’essai de pompage 1. 78

Figure 56. Position des puits d’observation et de pompage pour l’essai de pompage 2... 79

Figure 57. Débits prélevés par le puits de pompage PW87-01 lors de l’essai de pompage 2. 79

Figure 58. Séries temporelles mesurées dans 4 puits d’observation lors de l’essai de pompage 2. 80

Figure 59. Fonction objective globale en fonction de l’itération pendant l’assimilation par méthode iES. Les points bleus sont les fonctions objectives calculées sur chaque réalisation ; les points rouges sont les fonctions objectives minimale et maximale, et l’étoile rouge est la valeur moyenne. 81

Figure 60. Fonction objective selon les groupes d’observation pendant l’assimilation par méthode iES, avant la première itération (rouge), après la première itération (vert) et après la deuxième itération (orange). 82

Figure 61. Distribution locale des niveaux d’eau permanent observés et simulés avant (haut), après 1 itération (bas) d’assimilation par méthode iES. 83

Figure 62. Niveaux d’eau simulés en fonction des niveaux d’eau observés avant (gauche) et après 1 (droite) itération d’assimilation en régime permanent par la méthode iES. 84

Figure 63. Boîtes à moustache montrant les niveaux d’eau simulés et observés avant (gauche), et après 1 (droite) itération d’assimilation en régime permanent par la méthode iES. 84

Figure 64. Séries temporelles des niveaux d’eau observés (bleu) et simulés avant (rouge) et après une itération (vert) d’assimilation par méthode iES pour l’essai de pompage 1. 86

Figure 65. Séries temporelles des niveaux d’eau observés (bleu) et simulés avant (rouge) et après une itération (vert) d’assimilation par méthode iES pour l’essai de pompage 2. 87

Figure 66. Distributions des coefficients d’emménagement (Ss) avant (rouge) et après 1 (vert) itération d’assimilation par la méthode iES pour l’unité Roc_5 (gauche), et les faciès F1 (milieu) et F2 (droite) de l’unité EskerSG_3. 88

Figure 67. Distributions des Kxy avant (rouge) et après 1 (vert) itération d’assimilation par la méthode iES pour l’unité Roc_5 (gauche), et les faciès F1 (milieu) et F2 (droite) de l’unité EskerSG_3. 89

Figure 68. Distribution spatiale de la moyenne et de la variance de Kxy sur toutes les réalisations dans le roc (couche 28 du modèle) avant l’assimilation (gauche) et après 1 itération d’assimilation (droite). Les croix roses sont les points de mesures de Kxy, les points blancs sont les points d’observations des variations de niveaux d’eau, les losanges noirs sont les puits de pompage. 90

Figure 69. Distribution spatiale de la moyenne et de la variance de Kxy sur toutes les réalisations dans les faciès F1_Esker et F2_SG de l’unité EskerSG_3 (couche 12 du modèle) avant l’assimilation (gauche) et après 1 itération d’assimilation (droite). Les croix roses sont les points de mesures de Kxy, les points blancs sont les points d’observations des variations de niveaux d’eau, les losanges noirs sont les puits de pompage. 91

Figure 70. Distribution spatiale de Kxy dans le roc (couche 28 du modèle) pour 3 réalisations tirées aléatoirement, avant (haut) et après 1 itération d’assimilation (bas). Les croix roses sont les points de mesures de Kxy, les points blancs sont les points d’observation des variations de niveaux d’eau, les losanges noirs sont les puits de pompage. 92

Figure 71. Distribution spatiale de Kxy dans les faciès F1 et F2 de l’unité EskerSG_3 (couche 12 du modèle) pour 3 réalisations tirées aléatoirement, avant (haut) et après 1 itération d’assimilation (bas). Les croix roses sont les points de mesures de Kxy, les points blancs sont les points d’observation des variations de niveaux d’eau, les losanges noirs sont les puits de pompage. 93

Figure 72. Distribution spatiale (haut : régional ; bas : local) de la probabilité de dépassement d'une transmissivité au roc de $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ sur l'ensemble des modèles assimilés après une itération de la méthode iES. Les croix roses sont les points de mesures de Kxy, les points blancs sont les points d'observations des variations de niveaux d'eau, les losanges noirs sont les puits de pompage.	95
Figure 73. Composantes des différents schémas utilisés dans l'évaluation des scénarios.	101
Figure 74. Position des différentes composantes du Scénario SA.	103
Figure 75. Position des différentes composantes du Scénario A.	106
Figure 76. Position des différentes composantes du Scénario B.	110
Figure 77. Position des différentes composantes du Scénario B_1.	114
Figure 78. Position des différentes composantes des Scénarios C et C_1.	118
Figure 79. Position des puits de suivi supplémentaires proposés en 2023.	126

Liste des Annexes

Annexe 1. Rapport préliminaire du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier, juillet 2019	
Annexe 2. Rapport d'avancement 2020 du Projet UTES-II de Ville Mercier, juin 2020	
Annexe 3. Rapport du modèle d'écoulement déterministe, Projet UTES-II Ville Mercier, août 2021	
Annexe 4. Données géologiques et hydrogéologiques utilisées dans ce projet (Annexe numérique)	
Annexe 5. Document de travail du modèle conceptuel dans le logiciel SKUA-GOCAD	
Annexe 6. Document de travail du modèle hydrogéologique dans le logiciel FEFLOW	
Annexe 7. Résultats complets de l'évaluation des différents scénarios de l'UTES-II	

1. Introduction

Le 19 mars 2018, le gouvernement du Québec a annoncé la construction d'une nouvelle usine en vue d'optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier. Dans le cadre de cet engagement gouvernemental, le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) désire élaborer un modèle d'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale, c'est-à-dire couvrant le site des anciennes lagunes de Mercier et ses environs immédiats, et à l'échelle régionale, c'est-à-dire couvrant partiellement le territoire des municipalités de Mercier, de Saint-Isidore et de Sainte-Martine.

1.1 Contexte hydrogéologique

Le site des anciennes lagunes de Mercier est affecté par un mélange de nombreux contaminants constitué de liquides immiscibles légers (LIL) et denses (LID) à la suite de l'utilisation d'une ancienne sablière se trouvant dans un esker comme lieu d'entreposage d'huiles usées. Au site, une partie des LID s'est écoulée dans les sables et graviers de l'esker (aquifère granulaire local) d'une profondeur allant jusqu'à 30 m et au moins jusqu'à 15 m plus bas dans le roc fracturé sous-jacent à l'esker (aquifère rocheux régional). Afin de limiter l'écoulement des contaminants plus en aval, un système de pompage et une usine de traitement des eaux souterraines (UTES) sont en fonction au site depuis 1984. Le rôle de ce système de pompage est de contenir de façon hydraulique l'eau souterraine contaminée (panache) s'écoulant au travers des zones sources de LIL et de LID qui se situent en amont hydraulique des puits de pompage, à l'intérieur de l'esker et du till au droit du site, et plus en aval dans le roc fracturé. La Figure 1 présente en coupe un modèle conceptuel schématisé du contexte hydrogéologique et de l'état de la contamination au site.

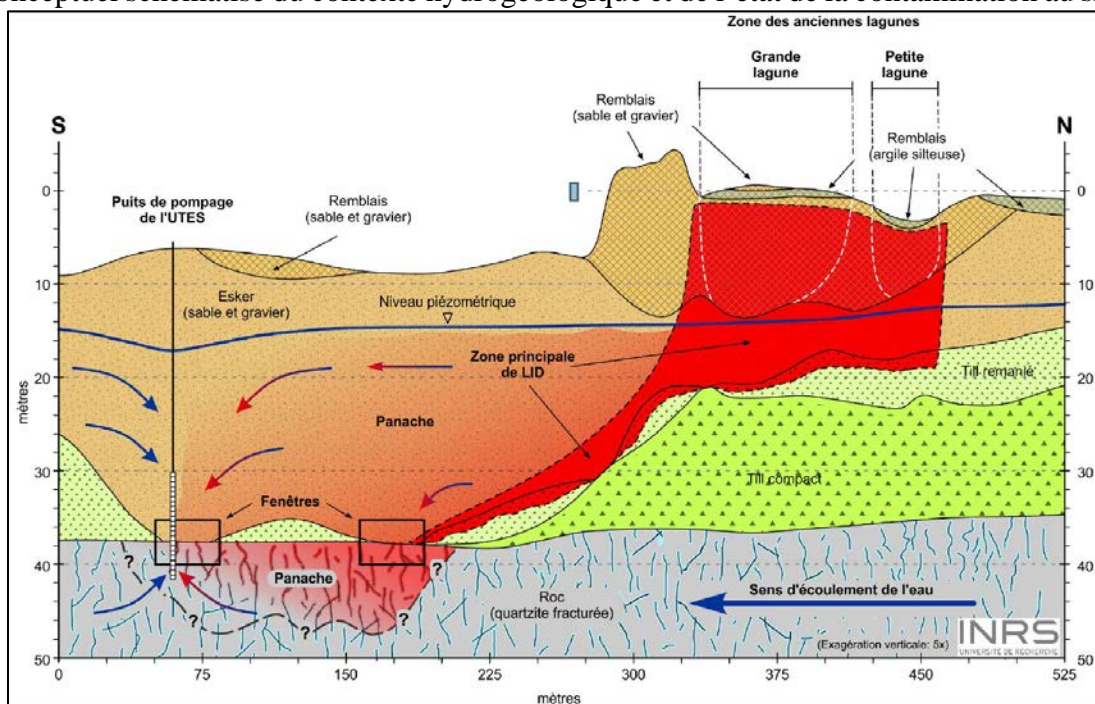


Figure 1. Coupe schématisique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).

Le schéma de la Figure 2 résume le contexte hydrogéologique local au droit du site des anciennes lagunes de Ville Mercier.

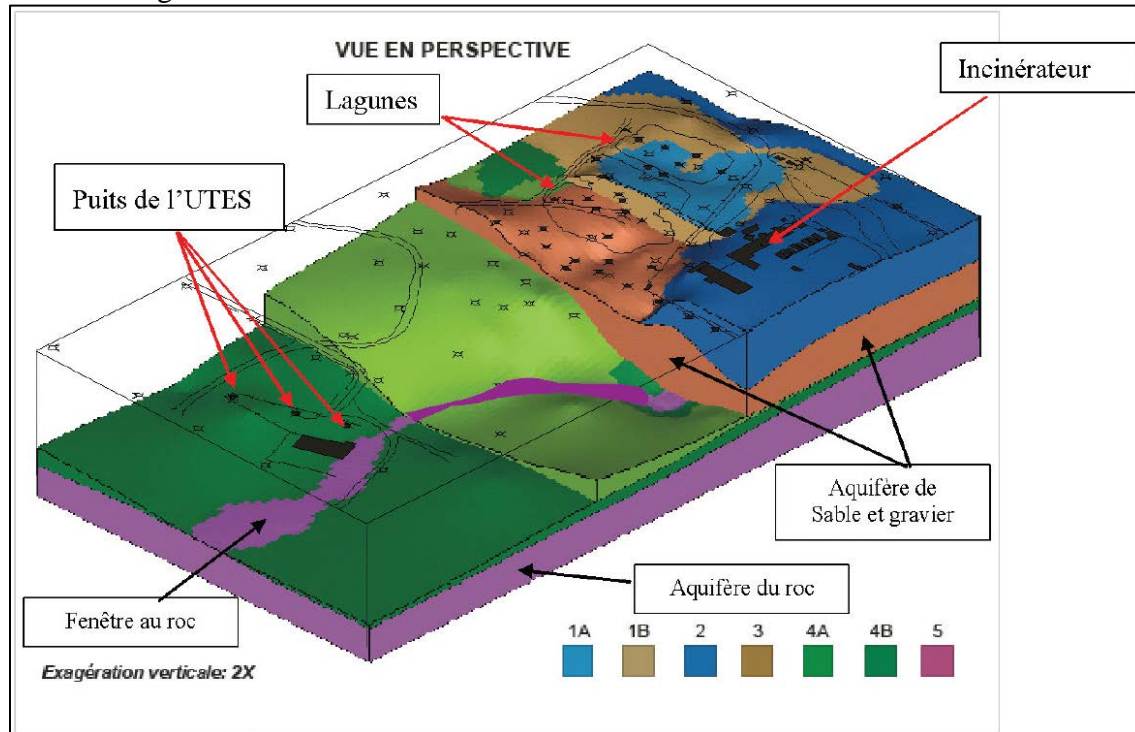


Figure 2. Schéma 3D de la représentation conceptuelle du site des anciennes lagunes de Mercier, avec les descriptions géologiques suivantes : 1A : mince couche argileuse, 1B : remblai plus perméable, 2 : matériaux argileux, 3 : unité de sable et gravier constituant l'esker de Mercier, 4A : till supérieur peu perméable, 4B : till inférieur moins perméable, 5 : roc. Figure de MDDEP, 2007.

Les anciennes lagunes de Ville Mercier reposent sur un système aquifère constitué de roc fracturé recouvert par deux unités successives de till. Des sables et graviers d'origine fluvioglaciaire déposés par-dessus les tills constituent un deuxième aquifère superficiel de type esker, faisant quelques centaines de mètres de largeur et quelques kilomètres de longueur. Au début des années 70, une ancienne gravière a été utilisée pour entreposer des liquides organiques qui ont été directement déversés dans les sables et graviers de l'esker. Les contaminants ont migré à l'intérieur de l'unité fluvioglaciaire pour ensuite pénétrer dans l'aquifère rocheux sous-jacent par l'intermédiaire des contacts directs entre les deux aquifères, là où les tills sont absents (fenêtres dans les tills créées par l'érosion associée au dépôt de l'unité fluvioglaciaire). La lente solubilisation de ces composés contamine les eaux souterraines qui y circulent et génère ainsi des panaches d'eau contaminée dans le roc et dans les sables et graviers.

Le MELCCFP a alors réagi en procédant à l'installation d'un réseau d'aqueduc pour alimenter les résidences affectées et en contrôlant la migration des eaux souterraines contaminées par la mise en place d'un piège hydraulique et d'une usine de traitement. Également, en 1984 le MELCCFP a défini par règlement une zone dans laquelle l'exploitation de l'eau souterraine est interdite. Cette zone a été révisé en 2002. Elle est définie à l'annexe V du Règlement sur le prélèvement des eaux souterraines et leur

protection (chapitre Q-2, r.35.2)¹. Depuis 1984, trois puits pompent l'eau souterraine contaminée émise au site et l'acheminent à l'usine de traitement des eaux souterraines (UTES) aménagée et exploitée par le MELCCFP. Le site des anciennes lagunes de Mercier est situé au sud-est de la municipalité de Mercier (Figure 3).

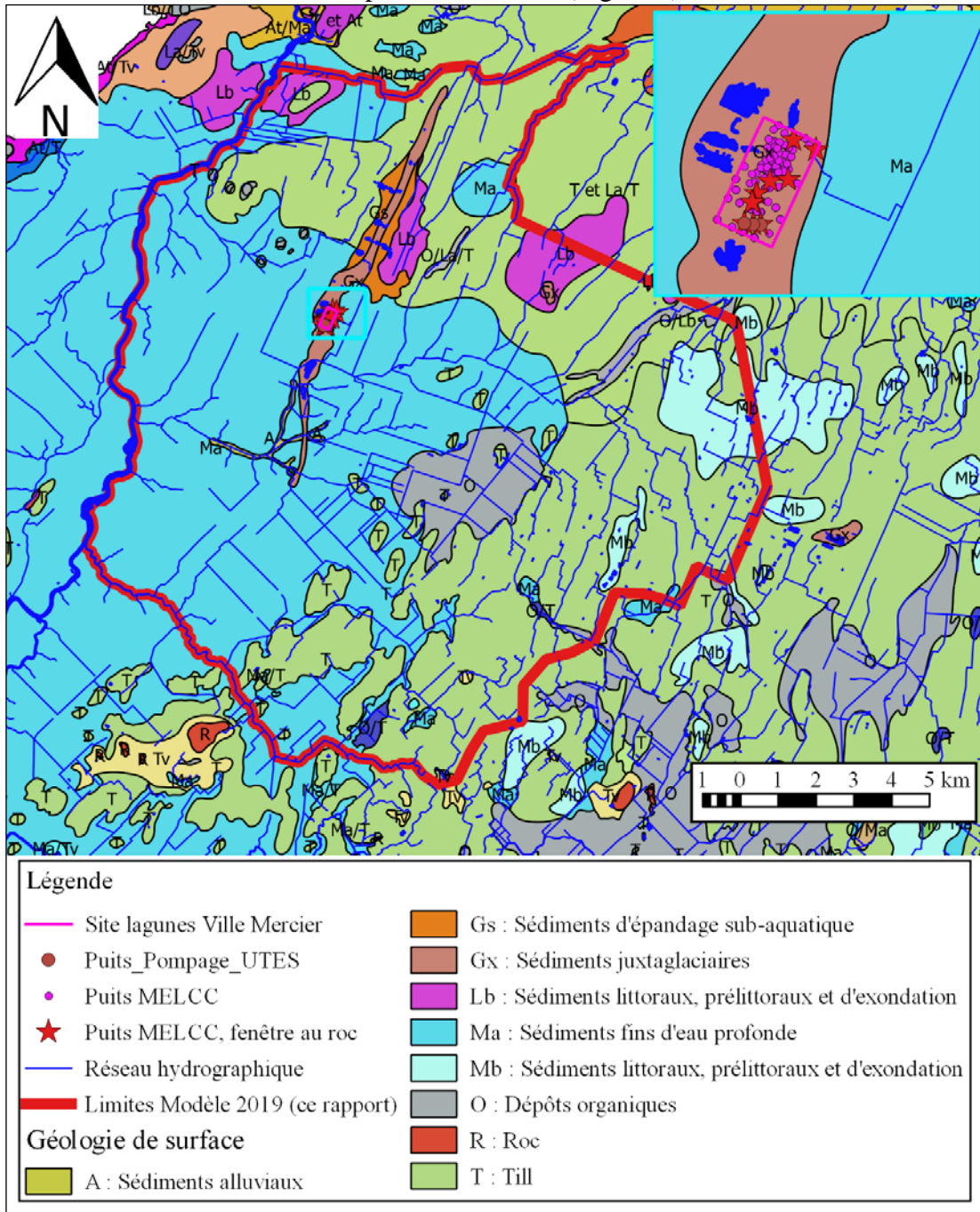


Figure 3. Carte géologique de la région d'étude (modifié de Tremblay, 2008).

La géologie de surface sur le domaine de modélisation comprend surtout les argiles marines de la Mer de Champlain (Ma et Mb sur la Figure 3), et les tills (T) provenant de l'érosion

¹ <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%2035.2%20/>

du socle rocheux par les glaciers. On y remarque également la présence de l'esker (Gs et Gx), affleurant au droit du site des anciennes lagunes de Mercier.

L'occupation du sol sur la région a principalement une vocation agricole, surtout maraîchère. Le réseau hydrographique de la région est bien développé, il coule essentiellement sur l'argile et est utilisé comme principale source d'irrigation des terres cultivées. Les rivières principales sont la rivière Châteauguay à l'ouest des lagunes et la rivière Esturgeon au sud qui sont par endroit en contact hydraulique avec le roc. Un débit à l'étiage de la rivière Esturgeon de 8640 m³/j a été mesuré par D'Anjou (1991). Il faut cependant noter que l'usine de traitement des eaux contaminées du MELCCFP (UTES) renvoie l'eau traitée dans la rivière Esturgeon, soit un débit supplémentaire de 3600 m³/j (Direction régionale de la Montérégie). Le débit réel naturel de la rivière serait donc de l'ordre de 4040 m³/j. Les précipitations annuelles moyennes sont de 822,6 mm pour Ville-Mercier et de 919 mm à Sainte-Martine.

1.2 Mandat

Le présent mandat du projet est décrit comme suit :

Site des anciennes lagunes de Ville Mercier : soutien technique pour l'élaboration du plan de caractérisation complémentaire du site et conception d'un modèle d'écoulement pour soutenir la conception d'un nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES-2).

Plus spécifiquement, le mandat couvre les tâches suivantes :

1. Compiler et structurer les données existantes ;
2. Élaborer un modèle conceptuel du contexte hydrogéologique du site des anciennes lagunes de Ville Mercier ;
3. Conseiller le MELCCFP sur l'élaboration d'un plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et de la région, puis sur sa mise en œuvre ;
4. Ajouter les données recueillies lors de la caractérisation complémentaire à la base de données et mettre à jour le modèle conceptuel ;
5. Élaborer des scénarios équiprobables (maquette numérique 3D du site) représentant la variabilité et l'incertitude des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique, porosité...) en dehors des points de mesures, mais semblables au modèle conceptuel ;
6. Concevoir un modèle d'écoulement hydrogéologique à l'échelle locale et régionale apte à répondre aux besoins décrits précédemment ;
7. Appliquer le modèle d'écoulement à trois scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier.
8. Proposer des éléments particuliers à considérer pour l'établissement d'un programme de suivi, et cela, pour chacun des scénarios étudiés.

1.3 Objectif

Le présent rapport résume l'ensemble du travail complété dans ce projet pour remplir les huit tâches énumérées ci-haut. L'objectif principal du rapport est de comparer différents scénarios de confinement hydraulique, statuer sur les avantages et inconvénients de chacun des scénarios, afin d'assister le MELCCFP concernant le choix du scénario à privilégier pour le remplacement du système de l'UTES en place. Le modèle d'écoulement de site des anciennes lagunes de Ville Mercier est élaboré de manière à permettre :

- la conception du nouveau système de confinement hydraulique (UTES-2) destiné à remplacer le système actuellement en opération depuis 1984 (UTES);
- la définition du scénario de transition entre l'UTES et l'UTES-2;
- la détermination des règles d'opération à long terme de l'UTES-2, et ce, dans une perspective de changement climatique;
- l'établissement de règles d'exploitation des eaux souterraines à l'échelle régionale, de manière à ce que l'octroi de futures autorisations de prélèvement d'eau souterraine dans la région ne compromette pas l'intégrité de l'UTES-2.

L'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale et régionale devra pouvoir être simulé de façon suffisamment précise pour répondre aux besoins décrits précédemment, mais également de manière à permettre la quantification de l'incertitude entourant les résultats. Les résultats de modélisation des divers scénarios aideront le MELCCFP à évaluer trois scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier définis dans le cadre du mandat :

- A. Les portions de milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de liquides immiscibles denses (LID) ou légers (LIL) sont confinées hydrauliquement en aménageant une composante de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker) à l'aval hydraulique de ces portions du milieu poreux et fracturé.
- B. Les portions de milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de LID et LIL sont confinées hydrauliquement en aménageant deux composantes de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker), soit une à l'amont hydraulique de ces portions et une autre à l'aval hydraulique.
- C. Les portions de milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de LID et LIL sont confinées hydrauliquement en aménageant une composante de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker) à l'amont hydraulique de ces portions, une composante d'injection (d'une partie des eaux pompées en amont) à l'aval hydraulique de ces mêmes portions, puis une composante de pompage intermédiaire (entre les deux précédentes) destinée à recueillir les eaux d'infiltration et permettant ainsi de maintenir la zone de stagnation des eaux souterraines contaminées créée par les deux autres composantes.

1.4 Démarche générale de modélisation

Les approches conventionnelles de modélisation numérique et de calibration utilisent une démarche déterministe, où un modèle hydrogéologique est construit et calibré en déterminant une combinaison unique de paramètres hydrauliques minimisant une fonction objective entre les niveaux d'eau observés et les niveaux d'eau simulés. Cette approche est efficace lorsque le nombre de paramètres hydrauliques à calibrer n'est pas trop élevé, car elle implique de rouler le modèle hydrogéologique numérique au minimum autant de fois qu'il y a de paramètres. Cette approche déterministe est efficace pour les modèles régionaux ou locaux possédant des distributions spatiales homogènes des paramètres hydrauliques, où des valeurs uniques peuvent être utilisées pour approximer les distributions spatiales des paramètres hydrauliques d'unités hydrostratigraphiques. Cette approche déterministe avait montré ses limites pendant la calibration de deux modèles hydrogéologiques régionaux situés à l'est de Ville Mercier (Technorem 2008a, b), où les valeurs de conductivité hydraulique montraient une grande variabilité et incertitude rendant leur calibration difficile sur les observations de niveaux d'eau disponibles.

La démarche employée pour faire la calibration des paramètres hydrauliques du modèle hydrogéologique des anciennes lagunes de Ville Mercier est basée sur les méthodes novatrices d'assimilation par ensemble. La démarche générale de création et d'assimilation des modèles hydrogéologiques suivie dans le cadre de ce projet est constituée de quatre phases successives, résumées schématiquement sur la Figure 4.

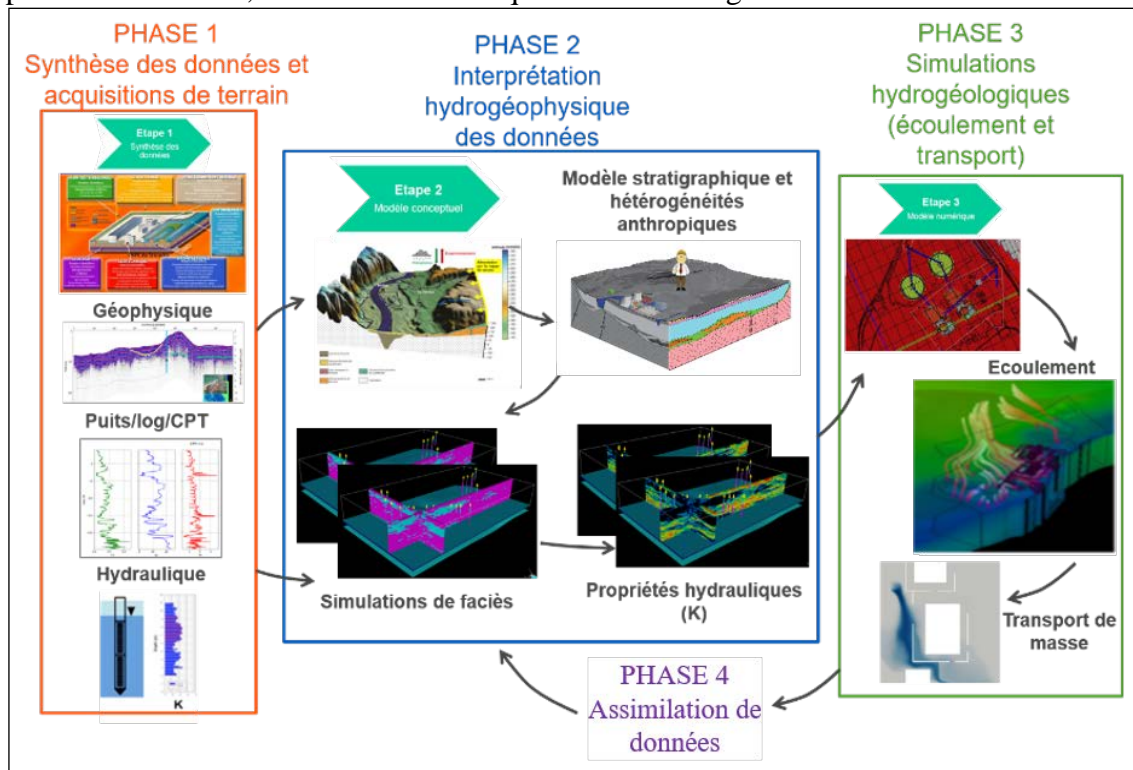


Figure 4. Séquence logique de modélisation stochastique et assimilation par méthode d'ensemble suivie dans ce projet.

La méthode proposée est stochastique dans le sens où plusieurs modèles de conductivité hydraulique sont construits avec des outils de simulation géostatistique. Il est important de noter que la méthode proposée n'est pas linéaire et, à chaque étape, les interprétations du géophysicien, de l'hydrogéologue et du modélisateur sont essentielles : elle suppose ainsi une interaction fine entre les divers intervenants.

- **Phase 1 : Acquisitions de terrain et construction de la base de données**

Tout d'abord, les données géologiques, géophysiques, hydrauliques sont filtrées et intégrées pour définir les liens pétro-hydro-physiques (rectangle orange sur la Figure 4). Une partie essentielle de la méthode est d'intégrer de manière quantitative toutes les données disponibles dans le modèle conceptuel 3D. Il est aussi important de pouvoir retrouver les données brutes acquises sur le site. Par exemple, les données géophysiques brutes de surface et entre forages peuvent être ré-analysées en fonction de l'objectif de modélisation hydrogéologique, même si elles n'avaient pas été acquises à cette fin.

- **Phase 2 : Interprétation hydrogéophysique des données**

Une fois analysées, les données géophysiques, hydrauliques et géologiques permettent de construire un modèle conceptuel hydrostratigraphique (rectangle bleu sur la Figure 4), qui

servira d'image d'entraînement pour la suite de la démarche. Des valeurs de propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique (K)) sont ensuite assignées ou simulées pour toutes les unités hydrostratigraphiques ou les hydrofaciès du modèle. La stratégie conventionnelle est d'assigner une valeur constante représentative de la propriété hydraulique pour toutes les cellules de chaque hydrofaciès. Cette stratégie ne parvient cependant pas à représenter l'hétérogénéité spatiale des propriétés hydrauliques à l'intérieur des hydrofaciès. L'interpolation par krigeage ou la simulation par simulations gaussiennes séquentielles (SGS) des propriétés hydrauliques sur les cellules de chaque hydrofaciès permet de créer des scénarios plus représentatifs des propriétés physiques des aquifères au site d'intérêt. Ainsi, après l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrostratigraphique régional autour du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, un ensemble de 100 modèles hydrogéologiques sont construits, chacun étant une réalisation équiprobable de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique simulée par méthodes géostatistiques.

- **Phase 3 : Simulations des écoulements**

Les propriétés hydrauliques sont appliquées sur une grille de simulation dans le logiciel d'écoulement Feflow (rectangle vert sur la Figure 4). Différents scénarios d'écoulement des eaux souterraines simulés sur les différentes réalisations du modèle hydrogéologiques sont évalués et comparés aux données de niveaux d'eau observés sur le terrain.

- **Phase 4 : Assimilation de données**

Les données temporelles de niveaux d'eau sont intégrées séquentiellement sur les bases de filtres de Kalman d'ensemble (EnKF) ou de filtres d'ensemble smoother (EnS). Les filtres EnKF et EnS sont deux versions des filtres de Kalman permettant de représenter la moyenne et variance des paramètres par un ensemble prédéterminé de « n » réalisations, et permettant ainsi de corriger et re-calibrer les paramètres du modèle en fonction des nouvelles observations acquises avec le temps.

La démarche utilisée est stochastique, où un ensemble de modèles hydrogéologiques équiprobables est généré avec plusieurs distributions de paramètres simulés par méthodes géostatistiques. Cette méthode dite d'assimilation par ensemble permet d'intégrer l'hétérogénéité et l'incertitude dans la modélisation et les résultats, tout en limitant le nombre de modèles hydrogéologiques à rouler afin de calibrer un nombre élevé de paramètres. Cette méthode d'assimilation permet de générer un ensemble de modèles hydrogéologiques dont les paramètres ont été mis à jour, tout en conservant une variabilité exprimant l'incertitude sur les vraies valeurs de paramètres hydrauliques. Les différents scénarios de confinement hydraulique sont donc testés sur un ensemble de modèles hydrogéologiques, permettant de juger de la robustesse de chacun des scénarios par rapport à l'incertitude existante sur les valeurs réelles des paramètres hydrauliques.

Le présent rapport n'est donc pas un rapport conventionnel traitant de la construction et calibration d'un modèle hydrogéologique standard. Il reflète plutôt le caractère innovant de la démarche stochastique utilisée en présentant la construction de l'ensemble des modèles hydrogéologiques stochastiques, leur assimilation par méthode d'ensemble, et leur utilisation pour l'évaluation des différents scénarios de confinement hydraulique.

1.5 Chronologie des tâches du projet

Date	Tâche
19 mars 2018	Le gouvernement du Québec annonce l'amorce de travaux menant à l'optimisation du système de confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier.
26 juillet 2018	L'INRS présente la proposition de recherche : Conception du modèle d'écoulement pour la mise en place du nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES 2) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier.
7 janvier 2019	Signature du contrat entre le MELCCFP et l'INRS, dont le mandat est décrit à la Section 1.2.
21 janvier 2019	Réunion de démarrage entre les représentants du MELCCFP et de l'INRS.
26 février 2019	Réunion pour discuter du plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et commencer la planification de la campagne de terrain 2019 (tâche 3 du mandat décrit à la Section 1.2).
24 juillet 2019	Soumission du Rapport d'avancement du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier (Annexe 1).
Octobre 2019	1 ^{ère} campagne d'acquisition de levés sismique réflexion.
15 novembre 2019	Visite sur le site de Ville Mercier pour répondre aux questions des soumissionnaires pour les travaux de terrain de caractérisation complémentaire.
12 février 2020	Réception du plan de travail final de TechnoRem pour la réalisation des travaux de terrain de caractérisation complémentaire.
Février 2020	Début des travaux de terrain (forages et aménagement de puits) pour la caractérisation complémentaire par TechnoRem.
13 mars 2020	Pandémie, le Québec sur pause !
Mars 2020	Mise sur pause des travaux de terrain complémentaires par TechnoRem pour le printemps 2020.
Mai 2020	Réunion de démarrage pour la campagne de diagraphies par l'Université Laval. Les travaux de terrain commenceront en juillet 2020.
30 juin 2020	Remise du Rapport d'avancement 2020 du Projet UTES-2 de Ville Mercier (Annexe 2).
Juillet 2020	1 ^{ère} campagne d'acquisition de diagraphies.
Octobre 2020	1 ^{ère} campagne d'essais de perméabilité multi-niveaux.
Janvier 2021	2 ^e campagne d'acquisition de levés sismique réflexion.
Février 2021	Complétion de la campagne de forage de TechnoRem.
Mars 2021	2 ^e campagne d'acquisition de diagraphies.
Mars 2021	Remise du rapport sur le modèle d'écoulement déterministe (Annexe 3).
Mai – Juin 2021	Remise des interprétations des levés sismiques réflexion 2021.
Juin 2021	Complétion des essais de perméabilité multi-niveaux.
31 août 2021	Remise du Rapport du modèle d'écoulement déterministe du Projet UTES-2 de Ville Mercier.
31 juillet 2022	Remise du Rapport final pour approbation.

2 Compilation des données

Cette section vise à présenter les données utilisées pour bâtir le modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques, ainsi que pour construire et calibrer le modèle hydrogéologique du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Toutes les données utilisées dans ce projet se retrouvent à l'Annexe 4, incluant les sources d'information. Cette section présente également les données complémentaires acquises dans le cadre de ce projet.

2.1 Source des données utilisées

Pour faire une synthèse du contexte général de la région des anciennes lagunes de Ville Mercier, nous avons pris connaissance de la majorité des études réalisées au site, dont les principales sont listées ici et dont la référence complète se retrouve dans la bibliographie.

- Rapports, thèses de doctorat et mémoire de maîtrise :
 - Pontlevoy, 2004
 - Lefebvre, 2007
 - Tremblay, 2008
 - Martel et coll. 2018
- Articles :
 - Croteau et coll. 2010
 - Lavigne et coll. 2010
 - Nastev et Lamontagne, 2010
 - Tremblay et coll. 2013

Les informations contenues dans ces rapports ont permis de définir les lignes directrices pour la construction du modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques et de la représentation des paramètres hydrauliques dans le modèle hydrogéologique.

2.1.1 Données reliées au modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques

La Figure 5 montre le domaine de modélisation et les données disponibles reliées au modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques.

La construction du modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques est principalement basée sur les marqueurs identifiés à 286 puits disponibles dans les environs des anciennes lagunes de Ville Mercier, à partir des données recueillies lors des programmes de caractérisation et de modélisation antérieurs. La liste des marqueurs géologiques et leur source est disponible dans la Table A4_1 de l'Annexe 4.

En plus de ces marqueurs géologiques considérés comme étant les données géologiques les plus fiables, le système d'information hydrogéologique (SIH), accédé une première fois le 1^{er} mai 2019, a permis de trouver 2679 puits dont la profondeur au roc était identifiée à l'intérieur des limites du modèle régional des anciennes lagunes de Ville Mercier (Table A4_2 de l'Annexe 4). Bien que cette information soit considérée moins fiable que les marqueurs géologiques aux puits d'observations, les puits SIH ont été utilisés afin de contraindre les variations d'élévation de l'unité de roc, à l'échelle régionale.

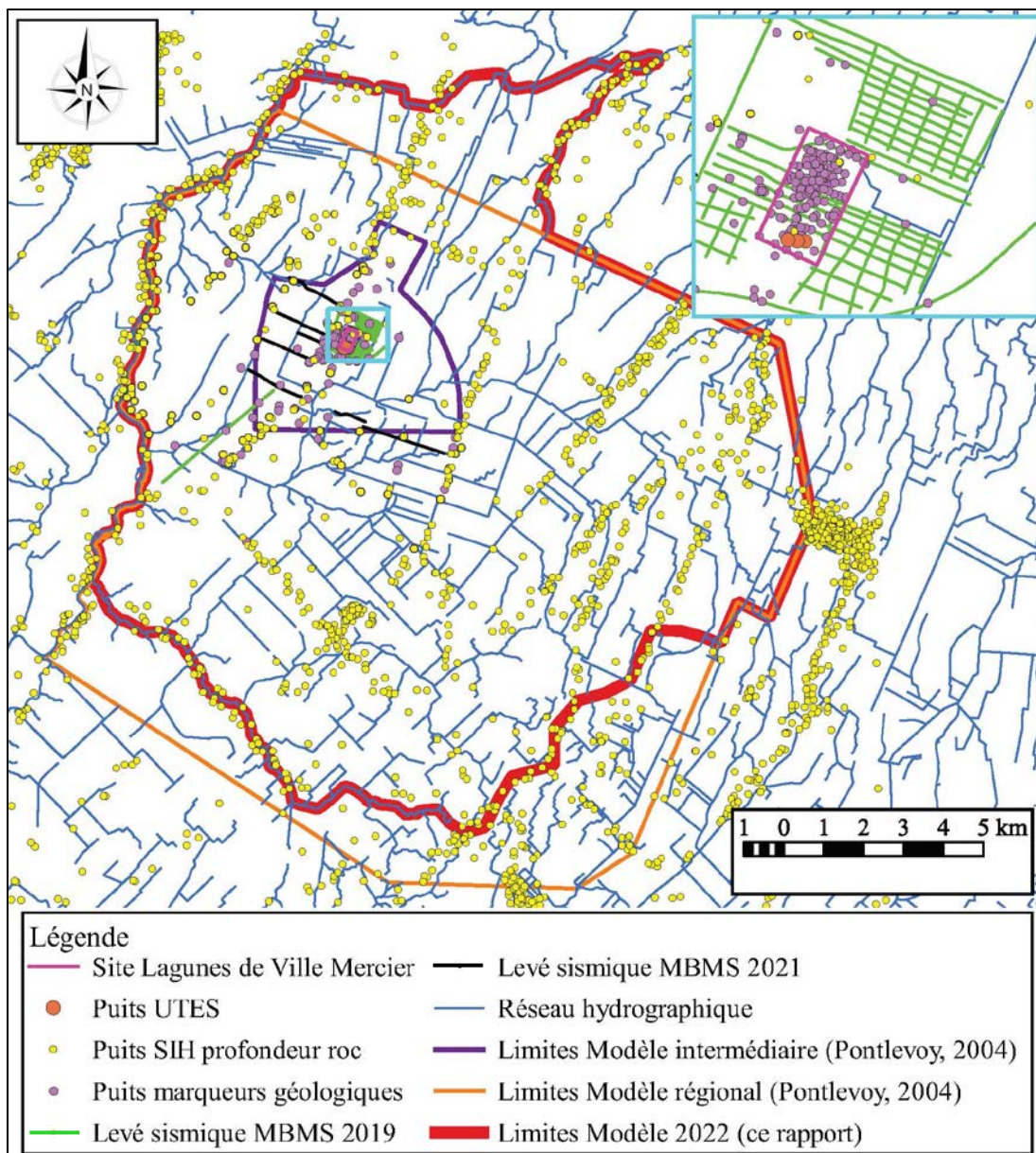


Figure 5. Données disponibles pour la construction du modèle conceptuel régional des unités hydrostratigraphiques.

Des données de sismique réflexion haute résolution ont été acquises par la Commission Géologique du Canada (CGC) en 2006 avec pour objectif d’identifier et de cartographier la présence d’eskers enfouis (Hunter et coll., 2006). Le processus d’acquisition et l’interprétation de quatre levés sismiques sont décrits dans Tremblay et coll. (2013). Bien que les données ne soient pas disponibles sous forme numérique, les images des lignes sismiques interprétées ont permis d’orienter et de valider la construction du modèle hydrostratigraphique conceptuel. Quelques modèles géologiques et hydrogéologiques ont été construits lors de la réalisation des études précédentes au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les données de certains de ces modèles sont valorisées afin de contraindre le modèle géologique 3D régional. Parmi ceux-ci, on note un modèle géologique de Pontlevoiy (2004), ainsi que différentes cartes d’épaisseurs des principales unités

géologiques au niveau du bassin versant de la rivière Châteauguay (Lavigne, 2006; Tremblay, 2008).

2.1.2 Données reliées au modèle hydrogéologique

Les données reliées au modèle hydrogéologique contiennent les données de conductivité hydraulique régionale et locale, ainsi que les niveaux d'eau utilisés dans la calibration du modèle numérique de l'écoulement des eaux souterraines (Figure 6).

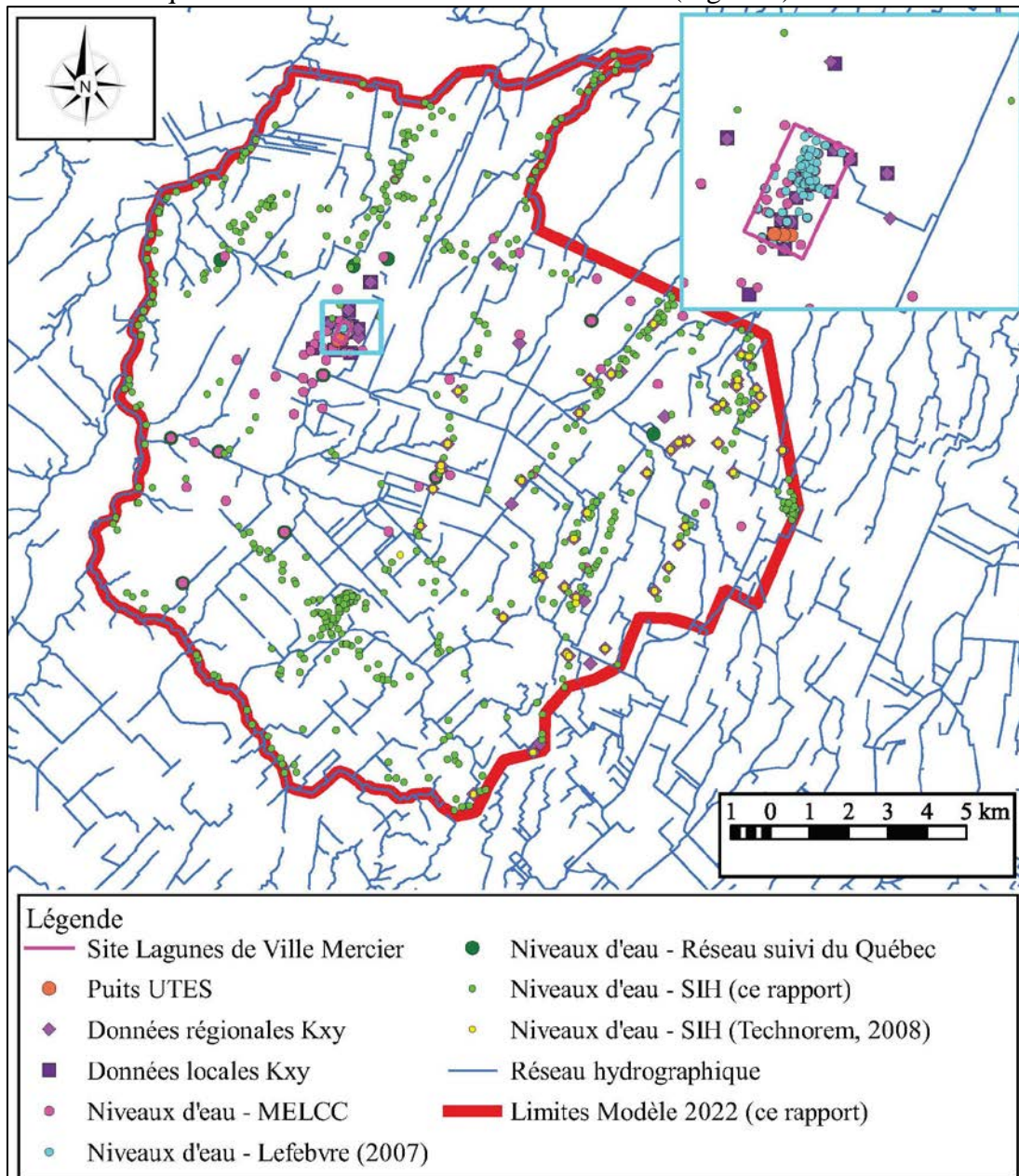


Figure 6. Données disponibles pour la construction et calibration du modèle hydrogéologique régional du site des anciennes lagunes de Ville Mercier.

Plusieurs données de conductivité hydraulique sont disponibles à l'intérieur du domaine d'intérêt (Table A4_3 de l'Annexe 4). Ces données sont intégrées au modèle hydrogéologique malgré le fait qu'elles soient acquises selon des méthodologies

différentes et qu'elles intègrent des intervalles de profondeur variables. Plusieurs de ces données représentent des valeurs moyennes obtenues à partir d'essai de pompage sur l'intervalle complet crépiné du puits, sans tenir compte des variations verticales de conductivité hydraulique pouvant exister.

En plus de ces données régionales de conductivité hydraulique au roc, plusieurs essais de perméabilité multi-niveaux ont été effectués localement afin de mesurer les variations verticales de la conductivité hydraulique dans l'unité EskerSG_3 et dans le roc. 433 points de mesures de la conductivité hydraulique sont ainsi disponibles à l'intérieur du domaine de modélisation, incluant des doublons et des mesures dont les intervalles de profondeur sont inconnus. Ces données servent de données initiales pour représenter spatialement les champs de conductivité hydraulique dans le modèle hydrogéologiques.

Plusieurs observations des niveaux d'eau mesurées dans les unités hydrostratigraphiques du modèle de Ville Mercier sont disponibles à partir de cinq sources principales qui sont décrites dans les paragraphes suivants.

Le MELCCFP fait un suivi biannuel des niveaux d'eau à plusieurs puits de suivi autour de l'UTES. Les chroniques temporelles de ces niveaux d'eau sont présentées à l'Annexe 2 du rapport de Béraud et coll. (2019) qui est présenté en Annexe 1. À partir de ces chroniques temporelles, les niveaux d'eau représentant le régime permanent autour du site des anciennes lagunes de Ville Mercier sont extraits pour 97 puits (Table A4_4 de l'Annexe 4).

Plusieurs observations des niveaux d'eau (76 puits) ont été mis à la disposition de l'INRS afin qu'elle puisse mener à bien le mandat confié. Ces niveaux d'eau proviennent de données recueillies dans le cadre de travaux réalisés en 1996 par la Direction des enquêtes du ministère de l'Environnement et de la Faune. Les niveaux d'eau représentant le régime permanent autour du site des anciennes lagunes de Ville Mercier sont présentés à la Table A4_5 de l'Annexe 4.

Les chroniques temporelles des niveaux d'eau sont disponibles à douze puits du réseau de suivi des eaux souterraines du Québec à l'intérieur du modèle régional des anciennes lagunes de Ville Mercier (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>). Ces chroniques temporelles sont présentés à l'Annexe 3 du rapport de Béraud et coll. (2019) qui est présenté en Annexe 1. Les niveaux d'eau représentant le régime permanent à ces douze puits de suivi sont extraits et présentés à la Table A4_6 de l'Annexe 4.

Les deux dernières sources de données de niveaux d'eau proviennent des puits SIH. Une première série de 45 données (Table A4_7 de l'Annexe 4) est extraite de l'évaluation des puits SIH par TechnoRem (2008). Finalement, 629 données de niveaux d'eau supplémentaires (Table A4_8 de l'Annexe 4) ont également été extraites à partir de puits du SIH situés à l'intérieur du domaine de modélisation.

Toutes ces données de puits ont été intégrées dans un format de base de données qui a initialement été mise en place pour les projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Québec. L'intégration des données propres au site des anciennes

lagunes de Ville Mercier dans cette base de données permet de faire une assurance-qualité et un contrôle-qualité (QA/QC) sur les données selon les standards normalisés préalablement établis. La base de données en format PostgreSQL, fournie au MELCCFP, est basée sur le modèle de base de données de l'Open Geospatial Consortium (OGC). La description de cette base de données se trouve dans le rapport de Béraud et coll. (2019), présenté en Annexe 1.

2.2 Acquisition de données

Pendant le déroulement du projet, quatre campagnes d'acquisition de données complémentaires ont été complétées afin de caractériser plus précisément certains aspects du site (Figure 7). On note les campagnes d'acquisition suivantes :

- Sismique réflexion 2019 et 2021
- Forages 2020 et 2021
- Diagraphies géophysiques 2020 et 2021
- Essais de perméabilité multi-niveaux 2020 et 2021



Figure 7. Localisation des levés de sismique réflexion 2D par MBMS Solutions lors des campagnes de terrain de 2019 (lignes en vert pâle) et 2021 (lignes blanches) ; et position des forages complétés par TechnoRem en 2020 (carrés rouges). Les lignes rouges, roses, bleues et cyan sont des lignes sismiques présentées dans le rapport de Claprood et coll. (2021) en Annexe 3. Les carrés jaunes sont les puits de l'UTES-I. La ligne mauve est la limite ouest du modèle hydrogéologique, correspondant à la Rivière Châteauguay.

2.2.1 Sismique réflexion 2019 et 2021

Deux campagnes d'acquisition de données de sismique réflexion 2D ont été effectuées en 2019 et en 2021 sur le site des anciennes lagunes de Ville Mercier (Figure 7). Plus de 40 km de levés ont été acquis pendant la première campagne sismique à l'automne 2018 et l'hiver 2019, incluant un quadrillage serré à proximité du site de l'UTES et quelques lignes régionales. Les objectifs de la première campagne sismique étaient de :

- améliorer la connaissance de la topographie du toit du roc sur la zone d'intérêt ;
- améliorer la connaissance de la stratigraphie sur la zone d'intérêt ;
- mieux définir la géométrie des sédiments contrôlant les processus hydrodynamiques et ;
- acquérir des nouvelles connaissances sur la topographie du toit du roc à l'échelle régionale.

La seconde campagne d'acquisition de données de sismique réflexion 2D a été effectuée afin de caractériser les extensions latérales de l'unité d'esker et de sable et gravier (Figure 7). Sept lignes sismiques supplémentaires ont été acquises, totalisant 10 km.

Les données sur les interfaces des différents horizons ont été traitées, interprétées par MBMS Solutions (MBMS, 2021) et sont utilisées pour interpoler ces horizons hydrostratigraphiques entre les données de forage. La séquence de traitement pour convertir les données brutes en données traitées utilisables pour l'interprétation inclut :

- l'assignation à la géométrie ;
- le rehaussement du signal par une série de filtres (passe-bande avant et après sommation) et de gains (AGC), et ;
- la sommation avec une vitesse de sommation vitesse simple (entre 160 m/s et 200 m/s) pour la conversion temps-profondeur.

Les levés ont été effectués avec une source à impacts et des géophones omnidirectionnels. Cette géométrie d'acquisition permet de faire le traitement et l'interprétation des ondes de cisaillement (ondes S) et des ondes de compression (ondes P). Les ondes S ont une vitesse de propagation sismique plus lente et permettent de faire une meilleure caractérisation des différentes unités présentes au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les ondes P, ont une vitesse de propagation plus élevée et sont plus énergétiques que les ondes S. Elles sont donc moins sensibles à la géologie de proche surface et de résolution plus faible mais permettent cependant d'imager des structures plus profondes, comme l'interface entre les unités granulaires et l'unité de roc.

La Figure 8 montre les horizons sismiques pointés sur toutes les lignes sismiques qui serviront de points de contrôle pour l'interpolation des cartes des épaisseurs des horizons en deux dimensions (2D). Les horizons sismiques ont été calés en profondeur à l'aide des puits géologiques disponibles à proximité.

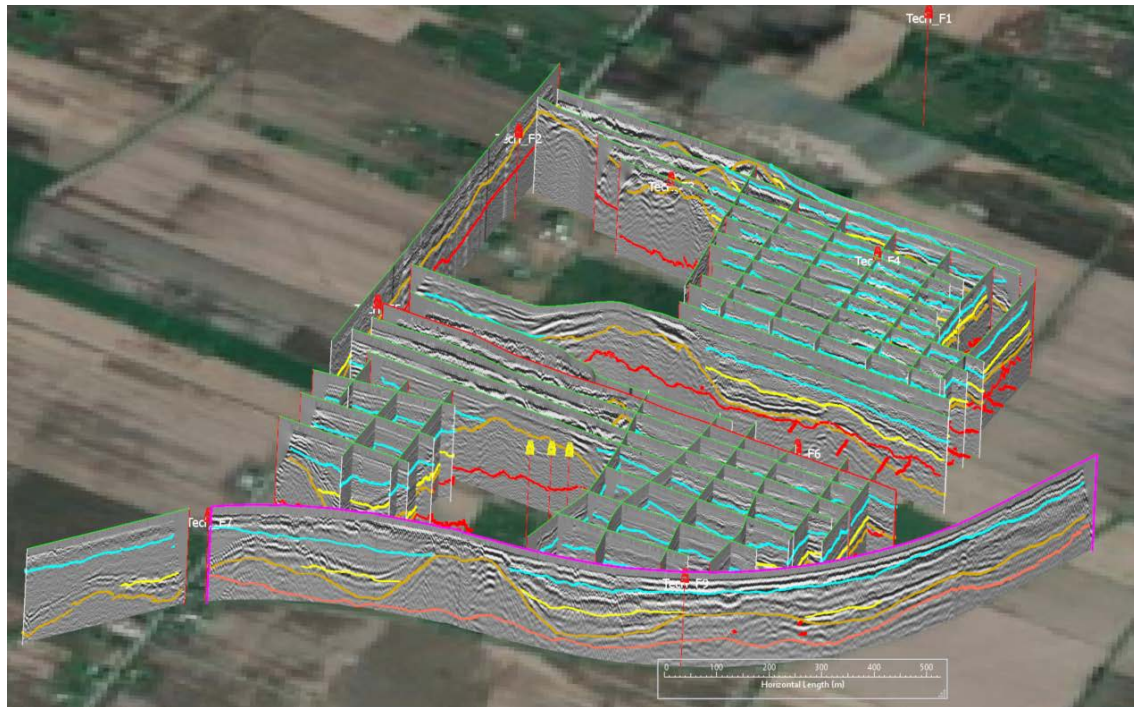


Figure 8. Horizons sismiques S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge) pointés sur toutes les lignes sismiques de la campagne 2019 au site de Ville Mercier.

Les interprétations des données sismiques provenant des deux campagnes de terrain sont utilisées afin de construire le modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques des anciennes lagunes de Ville Mercier.

2.2.2 Forages complémentaires

Un mandat a été donné à la compagnie TechnoRem afin de compléter une campagne de forages dont les objectifs principaux étaient de recueillir les données géoscientifiques nécessaires à la construction du modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques du site des anciennes lagunes de Ville Mercier (TechnoRem, 2021). Le Tableau 1 résume le mandat donné à TechnoRem. À la suite de la campagne de terrain, aucun forage non-conventionnel n'a été effectué au site 2, tandis que seul le forage rotosonic a été complété au site 10. Finalement, la campagne de forages complémentaires a mené à la réalisation, sur dix sites, de :

- dix forages par méthode « rotosonic » dans les dépôts meubles (un par site) ;
- huit forages supplémentaires dans les dépôts meubles avec aménagement de huit puits d'observation sans massif filtrant (non-conventionnels) ;
- six forages verticaux au roc avec prélèvement de carottes de roc en continu et aménagement de puits d'observation en trou ouvert au roc ;
- deux forages au roc, inclinés de 25° par rapport à la verticale, et l'aménagement de puits d'observation en trou ouvert au roc.

Tableau 1. Localisation des 10 sites du programme initial de caractérisation du sol, du roc et de l'eau souterraine (TechnoRem 2021). À la suite de la campagne de terrain, aucun forage non-conventionnel n'a été effectué au site 2, et seul un forage rotosonic a été complété au site 10.

Site	Coordonnée (Lat)	Coordonnée (Long)	Description sommaire	Type de puits d'observation	Types d'échantillons
1	45°17'43,05"N	73°43'32,63"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 1 forage roc vertical	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc eau souterraine
2	45°17'31,77"N	73°44'7,47"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 1 forage roc vertical	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc eau souterraine
3	45°17'27,90"N	73°43'53,82"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 3 forages roc (1 vertical, 2 inclinés)	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc (3) eau souterraine
4	45°17'21,90"N	73°43'35,23"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel	aucun sans massif filtrant	sol roc, eau souterraine
5	45°17'18,16"N	73°44'15,38"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 1 forage roc vertical	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc eau souterraine
6	45°17'4,08"N	73°43'40,69"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 1 forage roc vertical	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc eau souterraine
7	45°16'54,58"N	73°44'31,44"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel	aucun sans massif filtrant	sol eau souterraine
8	45°16'53,50"N	73°44'7,95"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel	aucun sans massif filtrant	sol eau souterraine
9	45°16'51,39"N	73°43'49,45"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 1 forage roc vertical	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc eau souterraine
10	45°14'38,83"N	73°46'8,91"O	1 forage rotosonic 1 forage non conventionnel 1 forage roc vertical	aucun sans massif filtrant ouvert au roc	sol roc eau souterraine

La position des 10 sites avec forages dans les dépôts meubles est présentée à la Figure 7. Ces forages ont ensuite servi de base pour plusieurs opérations subséquentes au site, soit :

- effectuer la description géologique à chaque site afin d'identifier le toit des principales unités hydrostratigraphiques du modèle conceptuel ;
- réaliser des diagraphies géophysiques en forage;
- réaliser des essais de perméabilité multi-niveaux.

Les toits de formation identifiés à partir des descriptions géologiques ont été ajoutés à la base de données permettant de construire le modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques du site.

2.2.3 Diagraphies en forage

Le Groupe d'Instrumentation Géophysique de l'Université Laval (GIGul) a réalisé des travaux de diagraphies dans 14 forages à l'été 2020 et l'hiver 2021 (Tableaux 2 et 3).

Tableau 2. Diagraphies dans les puits de Ville Mercier aménagés dans les sédiments et/ou le roc.

Sonde	Paramètre associé
IND	Résistivité électrique et susceptibilité magnétique
FWS	Vitesse des ondes de compression et de cisaillement
ELOG	Résistivité galvanique
IP	Chargeabilité
CAL	Diamètre du forage (roc)
SGR	Rayonnement Gamma (Potassium K, Uranium U et Thorium Th)
FTC	Caractéristiques du fluide
OBI	Images orientées des structures dans le forage

Tableau 3. Liste des puits avec diagraphies de forage acquises dans les puits de Ville Mercier

Site	Nom du Forage	Description du forage selon Tableau 1
1	PO20-1D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
1	PO20-1R	Forage non conventionnel ouvert au roc
2	PO20-2R	Forage non conventionnel ouvert au roc
3	PO20-3D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
3	PO20-3A	Forage non conventionnel ouvert au roc
4	PO20-4D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
5	PO20-5D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
5	PO20-5R	Forage non conventionnel ouvert au roc
6	PO20-6D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
6	PO20-6R	Forage non conventionnel ouvert au roc
7	PO20-7D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
8	PO20-8D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
9	PO20-9D	Forage non conventionnel dans les dépôts meubles
9	PO20-9R	Forage non conventionnel ouvert au roc

Les résultats des diagraphies démontrent que la nature des dépôts sédimentaires peut être identifiée à l'aide du rayonnement gamma naturel et de la température de l'eau qui se retrouve dans les puits (Dupuis, 2021). Le rayonnement gamma permet également d'identifier trois unités distinctes dans le roc ainsi qu'un marqueur de transition net entre l'unité 1 et l'unité 2 (Figure 9). Les diagraphies de température et de la conductivité de l'eau ont permis d'identifier des zones d'écoulement préférentiel ainsi que des échanges entre différents niveaux interceptés par les puits (Figure 10). La fracturation subverticale présente dans les puits à l'est (1R, 3R, 5R et 2R) semble promouvoir certains échanges alors que les puits qui se retrouvent à l'ouest (6R et 9R) sous un couvert de sédiments plus riche en argile démontrent moins d'interaction avec l'eau de surface.

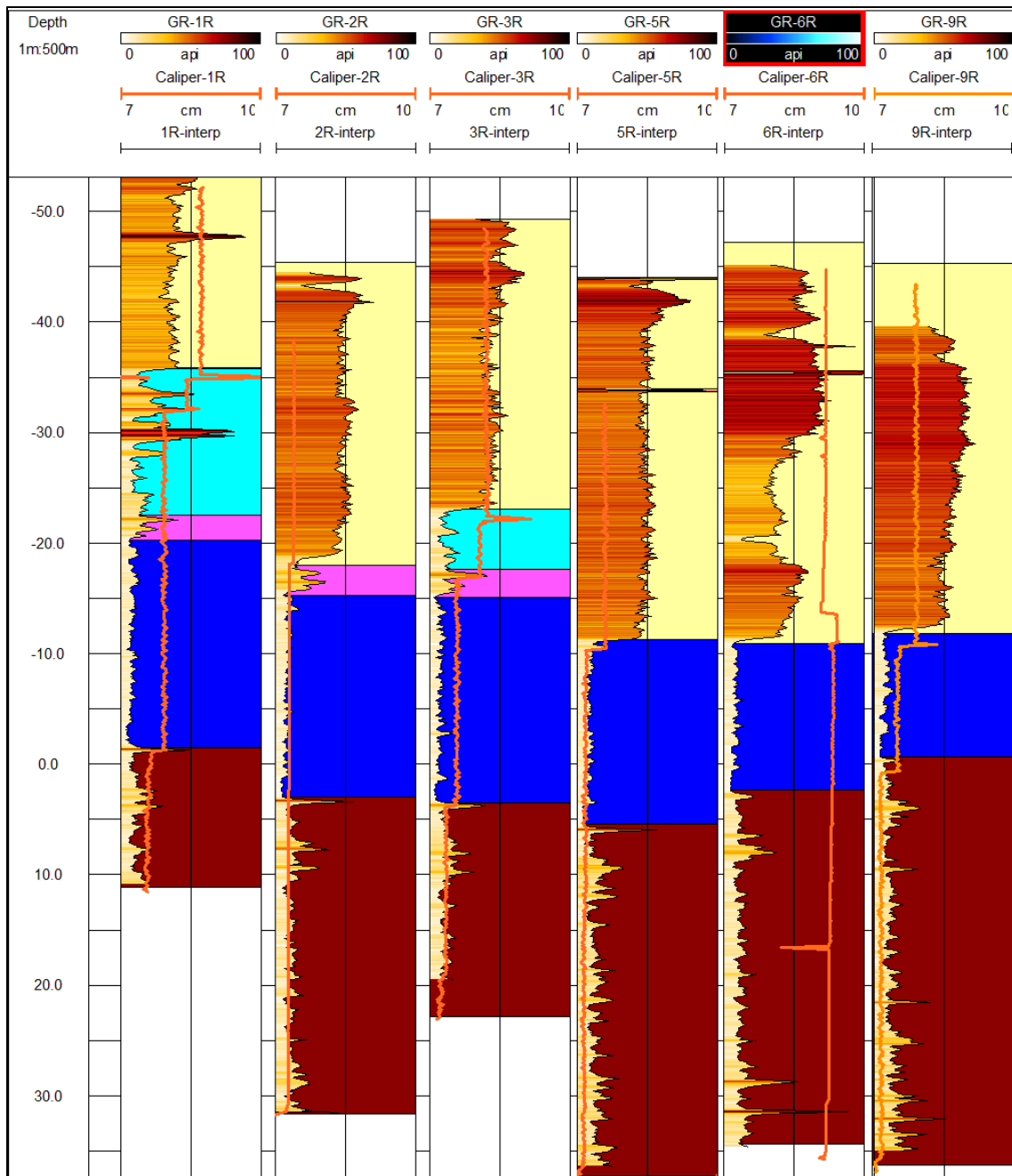


Figure 9. Information lithostratigraphique obtenue à partir des diagraphies de rayonnement Gamma dans les puits au roc. La diagraphie du diamètre (Caliper) est présentée en orange. L'échelle verticale est en élévation négative.

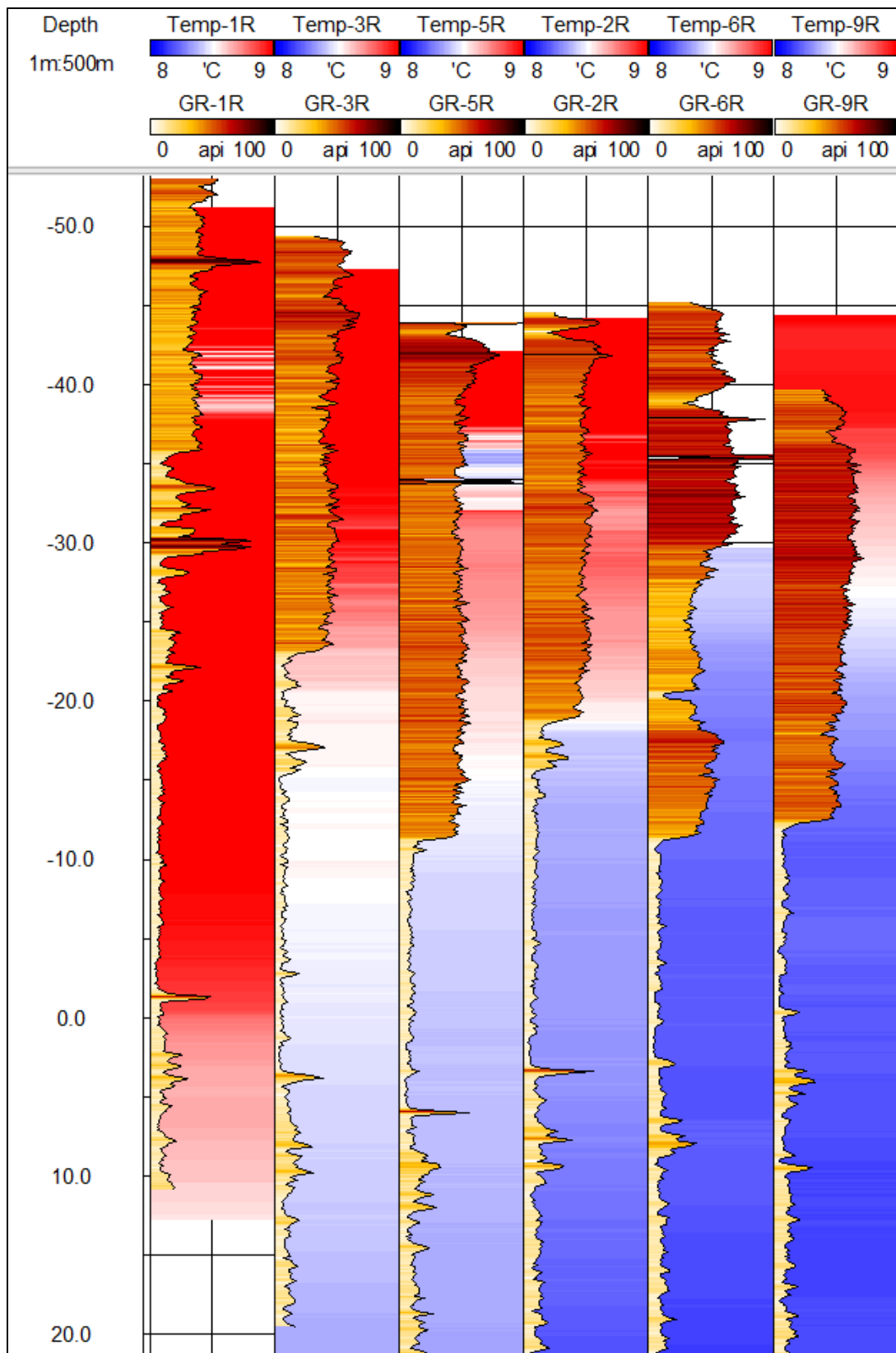


Figure 10. Diagraphies de températures (bleu à rouge) et de rayonnement Gamma (orange à brun) dans les puits au roc. L'échelle verticale est en élévation négative.

2.2.4 Essais de perméabilité multi-niveaux

Des essais de perméabilité multi-niveaux (Tableau 4) ont été effectués dans certains forages au site des anciennes lagunes de Ville Mercier (Gloaguen et Paradis, 2021).

Tableau 4. Sommaire des essais hydrauliques réalisés dans les puits de Ville Mercier

Site	Nom du Forage	Date	Type d'essai	Nombre d'intervalles	Résolution verticale (m)	Méthode d'analyse
1	PO20-1D	2021	Essai d'interférence	11	0.25	Bouwer et Rice (1976)
1	PO20-1D	2020	Essai d'interférence	14	0.5	Bouwer et Rice (1976) ; Bohling et Butler (2001)
1	PO20-1D	2020	Essai pleine crépine	1	10.67	Bouwer et Rice (1976)
1	PO20-1R	2021	Essai d'interférence	23	0.6	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
1	PO20-1R	2020	Essai d'interférence	4	1.7	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
1	PO20-1R	2021	Essai à 1 obturateur	5	10 à 50	Bouwer et Rice (1976)
3	PO20-3D	2020	Essai d'interférence	9	0.5	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
3	PO20-3D	2020	Essai pleine crépine	1	19.31	Bouwer et Rice (1976)
3	PO20-3R	2021	Essai à 1 obturateur	5	10 à 50	Bouwer et Rice (1976)
4	PO20-4D	2021	Essai d'interférence	23	0.5	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
4	PO20-4D	2021	Essai pleine crépine	1	16.76	Bouwer et Rice (1976)
5	PO20-5D	2021	Essai d'interférence	16	0.5	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
5	PO20-5D	2020	Essai d'interférence	14	0.5 et 2.0	Bouwer et Rice (1976)
5	PO20-5D	2020	Essai pleine crépine	1	24.37	Bouwer et Rice (1976)
5	PO20-5R	2021	Essai d'interférence	5	1.2	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
5	PO20-5R	2021	Essai à 1 obturateur	5	10 à 50	Bouwer et Rice (1976)
6	PO20-6D	2021	Essai d'interférence	16	0.5	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
6	PO20-6R	2021	Essai à 1 obturateur	5	10 à 50	Bouwer et Rice (1976)
7	PO20-7D	2020	Essai d'interférence	21	0.5 et 1.0	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
7	PO20-7D	2020	Essai pleine crépine	1	15.85	Bouwer et Rice (1976)
8	PO20-8D	2020	Essai d'interférence	25	0.5	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
8	PO20-8D	2020	Essai pleine crépine	1	21.43	Bouwer et Rice (1976)
9	PO20-9D	2020	Essai d'interférence	23	0.5 et 1.0	Bouwer et Rice (1976); Bohling et Butler (2001)
9	PO20-9D	2020	Essai pleine crépine	1	24.37	Bouwer et Rice (1976)

Les essais de perméabilités multi-niveaux servent à obtenir un profil vertical détaillé des propriétés hydrauliques des sédiments et du socle rocheux. Les interprétations des essais de perméabilités multi-niveaux permettent d’obtenir des valeurs fiables de conductivité hydraulique, ainsi que leur variations verticales (Figure 11). Les conductivités hydrauliques finales extraites de ces tests se trouvent à Table A4_3 de l’Annexe 4, et sont utilisées comme base de données pour les simulations stochastiques de la distribution spatiale (horizontale et verticale) de conductivité hydraulique dans les sédiments et dans le roc.

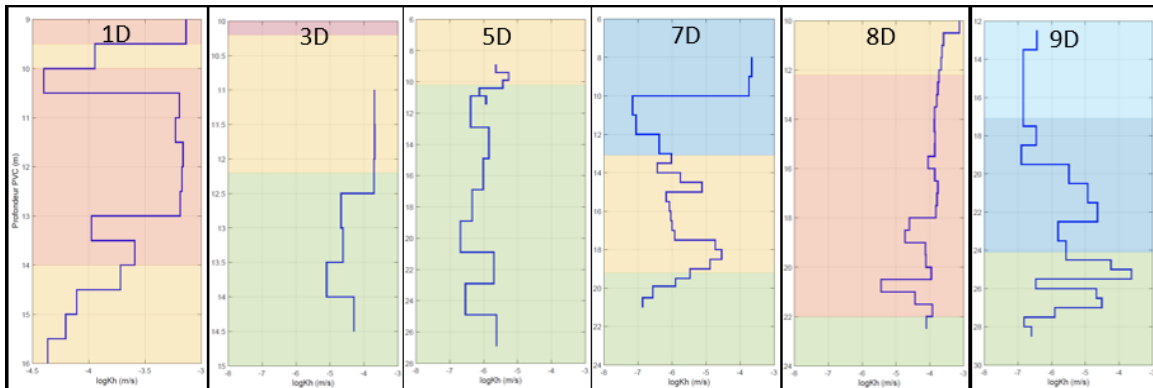


Figure 11. Résultats des essais de perméabilité multi-niveaux de l’automne 2020.

3 Modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques

Cette section présente un résumé de la construction du modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques de la région des anciennes lagunes de Ville Mercier. Toutes les étapes de la construction de ce modèle conceptuel sont décrites en détails dans les rapports d'avancement de Béraud et coll. (2019) et Claprood et coll. (2020, 2021) qui se trouvent respectivement en Annexes 1, 2, et 3 de ce rapport. Ces rapports discutent du contexte géologique, des données utilisées et de la méthodologie employée pour la construction du modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Ces rapports présentent également les modifications apportées au modèle original afin d'inclure les interprétations des nouvelles données géoscientifiques acquises en cours de projet. Après un rappel sur la définition des différentes unités stratigraphiques, cette section présente le modèle conceptuel final sous la forme de cartes d'élévations et d'épaisseurs, de profils verticaux, et de sections provenant du modèle 3D.

3.1 Définition des unités hydrostratigraphiques sur le domaine d'étude

Cinq unités hydrostratigraphiques majeures sont incluses dans ce modèle. Elles sont décrites du bas vers le haut de la colonne stratigraphique.

- **Unité Roc_5**

L'unité « Roc_5 » représente le socle rocheux en place sous les dépôts meubles, constitué de roches sédimentaires d'âge Cambrien à Ordovicien (Globensky, 1986).

- **Unité Till_4**

L'unité « Till_4 » est généralement composée d'un till inférieur ou basal et d'un till supérieur ou remanié. Le modèle hydrostratigraphique conceptuel ne considère qu'une seule couche représentant toute l'épaisseur de till présent au site de Ville Mercier.

- **Unité EskerSG_3**

De façon similaire à l'unité Till_4, toute description de sable, sable et gravier et esker est représentée dans l'unité « EskerSG_3 » afin de pouvoir utiliser le plus grand nombre de données possibles pour compléter la modélisation numérique de l'épaisseur de cette unité. Cette unité contient du gravier sablonneux à du sable graveleux avec des traces de silt et des quantités variables de cailloux et blocs.

Cette unité est ensuite divisée en deux hydrofaciès à l'aide des données de sismique réflexion interprétées; soit le faciès « F1_Esker » représentant les matériaux contenus dans le lobe central des eskers, et le faciès « F2_SG » représentant les sables et graviers d'épandage se trouvant sur les flancs de l'esker. Le faciès F1_Esker est composé de sédiments glaciaires grossiers et propres, dont la conductivité hydraulique est généralement très élevée, bien que fortement hétérogène. Le faciès F2_SG comprend des matériaux dont la conductivité hydraulique est généralement moins forte que dans le faciès F1_Esker.

- **Unité Argile_2**

L'unité « Argile_2 » est composée de l'argile silteuse, et de silt et sable argileux provenant des sédiments marins de la Mer de Champlain. L'unité d'Argile_2 se retrouve au-dessus du Till_4 ou de l'unité EskerSG_3 lorsque celui-ci est présent.

- **Unité Remblai_Organique_1**

Tout matériel présent entre l'unité géologique la plus élevée modélisée et la surface topographique sera assigné à l'unité « Remblai_Organique_1 ». Localement, au site des anciennes lagunes de Ville Mercier, cette unité est constituée de tous les matériaux ayant servi de remblai. Cette unité est constituée de matériaux naturels mais contient aussi des corps étrangers non naturels indiquant que ces matériaux ont été remaniés. Régionalement, cette unité est associée à des horizons de matériaux organiques retrouvés près de la surface à proximité d'étendues d'eau.

3.2 Mise en carte des unités hydrostratigraphiques

Cette section présente les données utilisées, et explique la méthodologie suivie pour faire les mises en carte des unités hydrostratigraphiques et la construction du modèle conceptuel 3D dans le logiciel GOCAD-SKUA de Paradigm (voir l'Annexe 5 pour plus de détail). Toutes les cartes représentant les épaisseurs et élévations des différentes unités stratigraphiques sont construites sur une grille régulière avec des cellules de 10m. Ces différentes cartes 2D sont utilisées pour interpoler les élévations finales du toit de chaque unité au modèle hydrogéologique dans le logiciel Feflow. Les cartes sont toutes présentées selon le même format, soit une vue régionale sur la partie centrale des figures, et une vue locale dans le coin supérieur droit de la figure.

3.2.1 Surface topographique

La surface topographique (Figure 12) est obtenue en utilisant les données LIDAR disponibles sur le domaine de modélisation, et en déformant la carte LIDAR aux valeurs exactes de topographie arpentées aux 287 puits de contrôle dans le modèle, incluant les forages complétés par TechnoRem. Les données LIDAR sont échantillonnées aux 25m et ont été intégrées aux puits de contrôle par krigeage bayésien.

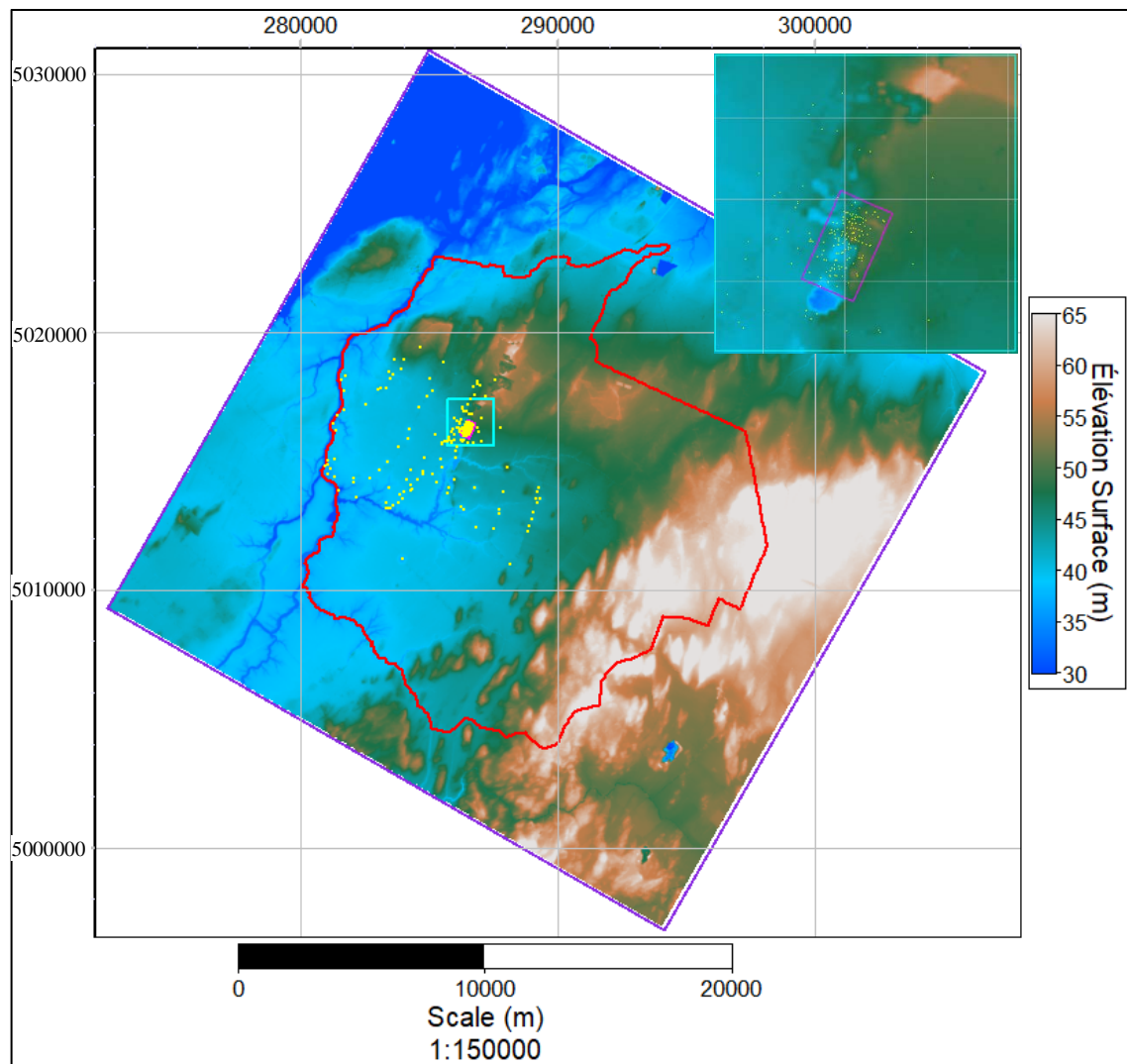


Figure 12. Carte topographique krigée de la surface. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (jaunes) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

Le krigeage bayésien, une variante du krigeage avec dérive externe où la dérive représente la même variable que les données principales, est utilisé pour honorer les élévations de la surface arpentées aux puits en utilisant la surface LIDAR comme tendance régionale. Le variogramme permet d'exprimer la corrélation spatiale entre les élévations de la surface topographique aux points de contrôle. Le variogramme modélisé de l'élévation de la surface est composé de deux structures pour représenter les variations à petites échelles seulement. La variance totale du variogramme est de 16.8 m² avec les paramètres suivants :

- effet pépite de contribution (variance) 0.8 m². Cette contribution faible par rapport à la variance totale démontre un niveau d'ajustement très élevé à courte distance, indicatif d'un bon niveau de confiance dans les données.
- modèle sphérique isotrope de portée 300 m et de contribution de 16 m² afin de représenter les variations spatiales à courte échelle.

3.2.2 Élévation du toit du Roc_5

L'interpolation des élévations du roc a été calculée par deux krigeages successifs, afin de considérer les différents niveaux d'incertitude vis-à-vis chaque source de données. La première interpolation des élévations du roc considérait les puits SIH, les élévations du roc affleurant à la surface, ainsi que la surface interpolée du roc dans le modèle géologique de Pontlevoxy (2004). Le variogramme de cette première surface au roc est construit à partir des puits SIH seulement. Le variogramme modélisé est composée de 3 structures permettant de représenter les variations d'élévation à plusieurs échelles, possédant une variance totale de 301.5 m² avec les paramètres suivants :

- Effet pépité de contribution (variance) 11.5 m². Cette contribution relativement élevée par rapport à la variance totale permet de représenter l'incertitude existant sur les données SIH. Ce fort effet pépité démontre qu'il existe toujours une structure à plus petite échelle dans les données qui n'est pas représentée dans cette première surface krigée.
- Modèle sphérique isotrope de portée 4000 m et de contribution de 65 m² afin de représenter les variations spatiales à moyenne échelle.
- Modèle gaussien anisotrope, de portée 75 000 m dans la direction principale de 30° azimut et de portée 25 000 m dans la direction perpendiculaire, avec une contribution de 225 m².

Ce modèle de variogramme est similaire à celui déterminé à partir des données de sismique réflexion pour le projet PACES de la Montérégie-Est (Blouin et Gloaguen, 2015).

Cette surface préliminaire des élévations du roc est lissée et utilisée comme tendance régionale qui est déformée localement pour honorer les marqueurs géologiques au roc identifiés aux données de puits les plus fiables répertoriées au droit des anciennes lagunes de Mercier, incluant les puits du MELCCFP (239 puits). Le krigeage bayésien, une variante du krigeage avec dérive externe où la dérive doit représenter la même variable que les données principales, est utilisée pour honorer les données d'élévation du roc aux puits en utilisant la surface préliminaire krigée comme tendance régionale. Un second variogramme a été modélisé à partir de tous ces puits, afin de représenter les variations spatiales de courtes distances, de variance totale 77 m² avec les paramètres suivants :

- Effet pépité de contribution (variance) 1 m². Cette contribution faible par rapport à la variance totale démontre un niveau d'ajustement très élevé à courte distance, indicatif d'un bon niveau de confiance dans les données.
- Modèle sphérique isotrope de portée 400 m et de contribution de 11 m² afin de représenter les variations spatiales à courte échelle.
- Modèle gaussien isotrope, de portée 4 000 m et de contribution 65 m², représentant les variations spatiales à moyenne échelle.

La grille finale des élévations du roc (Figure 13) représente la base du modèle conceptuel hydrostratigraphique.

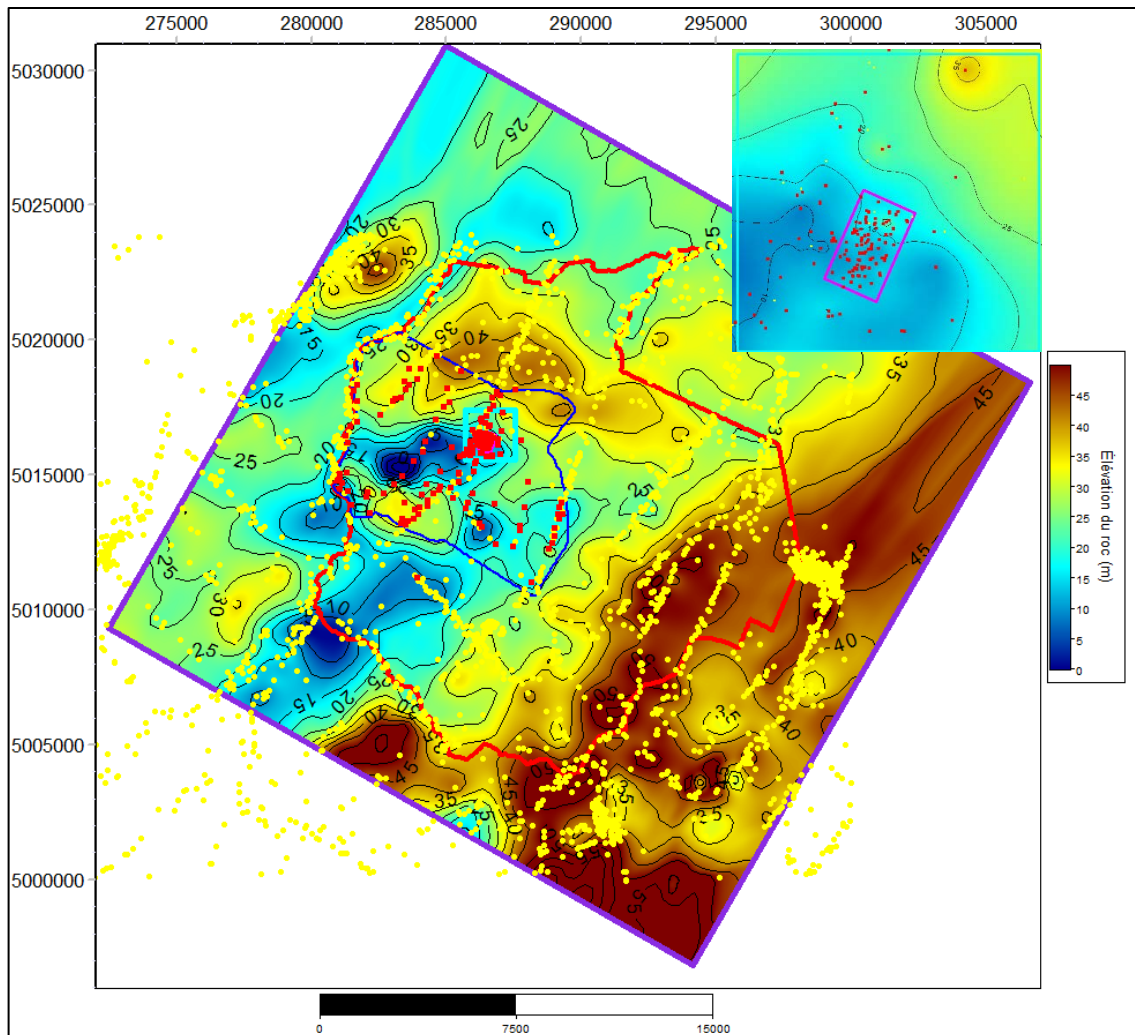


Figure 13. Carte de l'élevation régionale krigée du roc. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (carrés rouges) ; puits SIH (points jaunes) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; limites du modèle intermédiaire de Pontlevoy (2004) (polygone bleu).

3.2.3 Épaisseur de l'unité Till_4

L'unité Till_4 est l'unité possédant le moins de points de contrôle dans le modèle hydrostratigraphique régional. Son épaisseur est estimée à partir de 191 points de contrôle (marqueurs du Till_4 et du Roc_5 présents) aux puits, ainsi qu'un échantillonnage de la carte régionale de géologie de surface, où les épaisseurs sont calculées entre les élévations du till affleurant à la surface et l'élévation du roc estimée préalablement.

L'épaisseur de l'unité Till_4 est initialement évaluée par krigeage simple à partir de toutes les données disponibles. Le variogramme modélisé pour cette première étape est composé de 2 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 37.0 m² et les paramètres suivants :

- effet pépite de contribution (variance) 4.0 m².
- modèle exponentiel isotrope de portée 9100 m et de contribution de 33.0 m² représentant les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface de l'épaisseur de l'unité Till_4 est lissée pour enlever certaines discontinuités et est ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité Till_4 par krigeage bayésien (Figure 14).

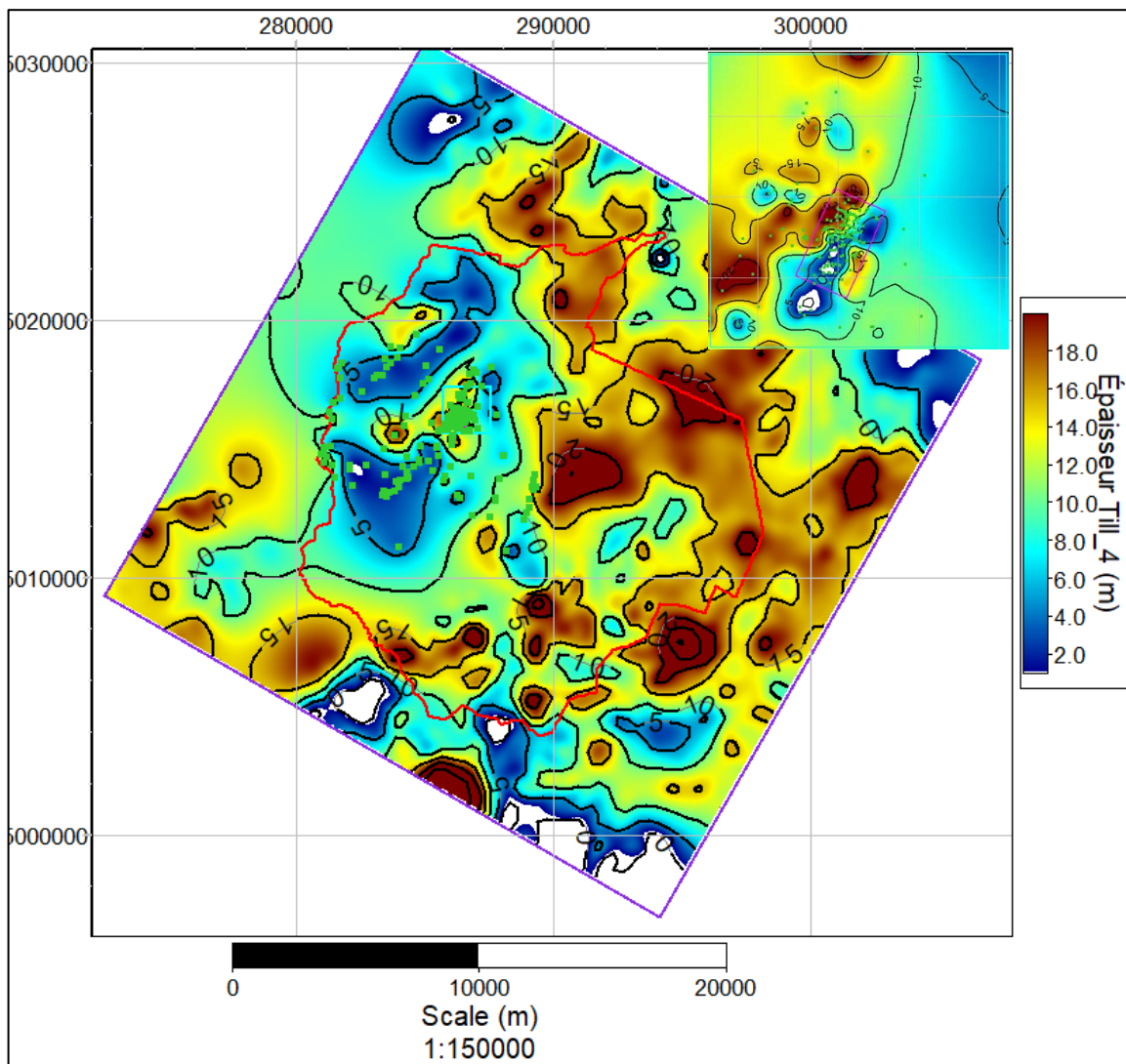


Figure 14. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Till_4. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés verts) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

Les épaisseurs de Till_4 évaluées aux puits sont utilisées pour bâtir le modèle de variogramme local, composé de 2 structures, avec une variance totale de 28.01 m² et les paramètres suivants :

- effet pépite de contribution (variance) 0.01 m².
- modèle sphérique isotrope de portée 200 m et de contribution de 7.0 m² représentant les variations spatiales à l'échelle locale.
- modèle sphérique isotrope de portée 4700 m et de contribution de 21.0 m² représentant les variations spatiales à l'échelle intermédiaire.

La carte des épaisseurs de l'unité Till_4 (Figure 14) montre une épaisseur variant de 0 m à 25 m, régionalement et localement au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les zones blanches mettent en évidence les endroits où le till possède une épaisseur plus petite que 1 m, pouvant ainsi agir comme fenêtre au roc entre l'aquifère de sable et gravier de l'unité EskerSG_3 et l'aquifère du roc fracturée (Roc_5).

3.2.4 Épaisseur de l'unité EskerSG_3

Les points de contrôle pour estimer l'épaisseur de l'unité EskerSG_3 incluent tous les marqueurs aux puits de code « S » (sable), « SG » (sable et gravier) et « esker » (code local 3). En plus des 230 points de contrôle aux puits qui agissent comme données les plus fiables, l'épaisseur de l'unité EskerSG_3 est aussi estimée à partir de la carte régionale de géologie de surface (où l'esker est affleurant à la surface), et à partir des épaisseurs provenant des données sismiques. Des points de contrôle additionnels d'épaisseur nulle de l'EskerSG_3 sont rajoutés aux endroits où l'unité Till_4 est affleurant à la surface afin de forcer l'absence de l'unité EskerSG_3.

De plus, une bonne corrélation a été calculée avec l'élévation du toit de l'unité Till_4, permettant d'utiliser cette surface comme donnée de dérive (Figure 15).

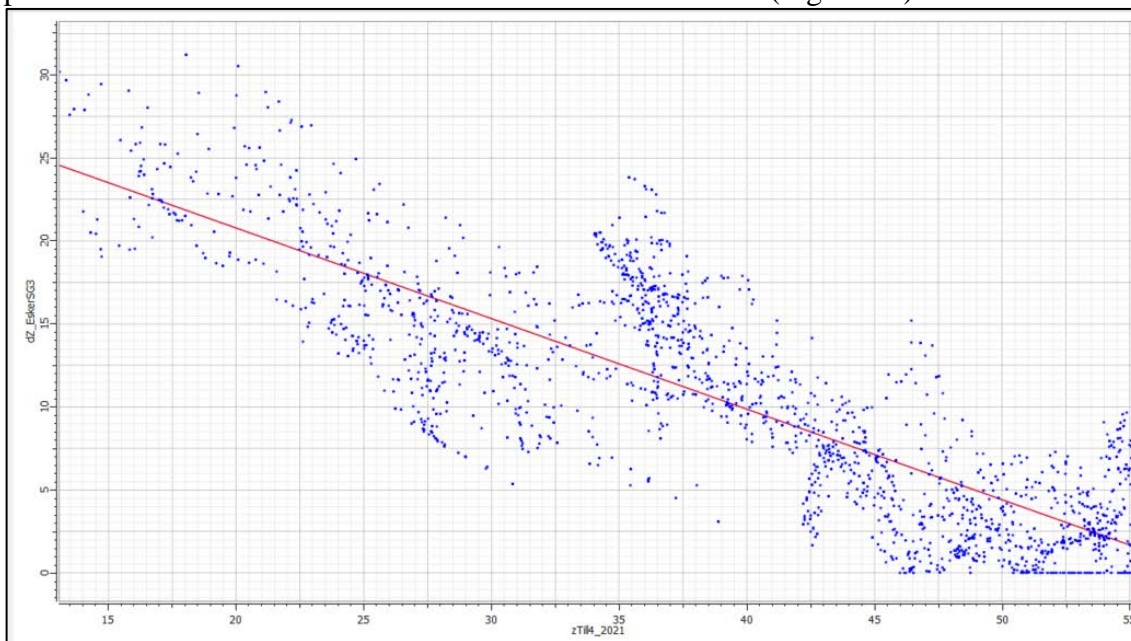


Figure 15. Diagramme croisé entre l'épaisseur de l'EskerSG_3 et l'élévation de Till_4, montrant un coefficient de corrélation $r^2 = -0.84$.

L'épaisseur de l'unité EskerSG_3 est initialement évaluée par krigeage par dérive externe, en utilisant l'élévation du Till_4 comme dérive. L'azimut de l'élévation de la surface de Till_4 est également utilisé pour contrôler la direction principale de krigeage, et ainsi propager les canaux principaux de l'esker pour suivre les creux de l'unité Till_4. Le variogramme modélisé de cette première étape est composé de 3 structures pour représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 57.7 m² et les paramètres suivants :

- Effet pépite de contribution (variance) 0.7 m² ;

- Modèle sphérique isotrope de portée 550 m et de contribution de 30.0 m² pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.
- Modèle gaussien anisotrope de portée 5750 m dans la direction principale des eskers (30° azimuth) et 1250 m perpendiculairement, de contribution de 27 m² pour représenter les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface a une apparence lisse pour enlever certaines discontinuités et afin d'être ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité EskerSG_3 par krigeage bayésien (Figure 16).

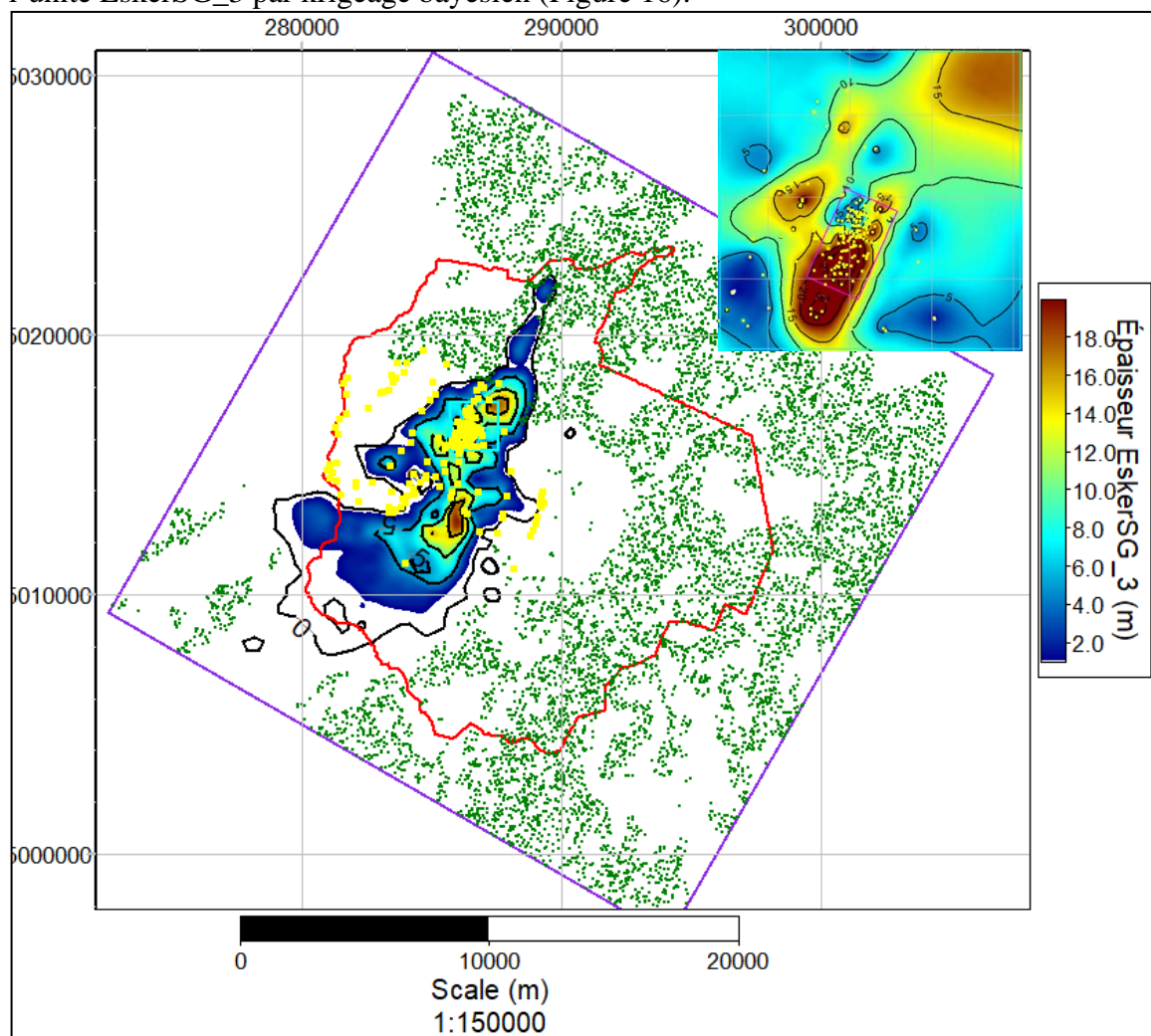


Figure 16. Carte des épaisseurs krigées de l'unité EskerSG_3. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés jaunes) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où le Till_4 affleure à la surface (points verts).

Le modèle de variogramme utilisé pour ce deuxième krigeage est composé de 3 structures, avec une variance totale de 109 m² et les paramètres suivants :

- Effet pépite de contribution (variance) 1.0 m² ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 30 m et de contribution de 28.0 m² pour représenter les variations spatiales à très petite échelle.

- Modèle sphérique isotrope de portée 325 m et de contribution de 80.0 m² pour représenter les variations spatiales à moyenne échelle.

L'épaisseur maximale de l'unité de sable et gravier de l'EskerSG_3 est de 25 m, à la limite sud du site des anciennes lagunes.

3.2.5 Hydrofaciès F1_Esker et F2_SG de l'unité EskerSG_3

L'unité EskerSG_3 est composé de deux hydrofaciès ; le faciès nommé « F1_Esker » et le faciès nommé « F2_SG ». Les deux faciès sont définis par les descriptions des carottes de forage faites par TechnoRem en 2019 et à partir des faciès sismiques identifiés sur les données sismiques de 2019 et 2021.

À partir des descriptions des carottes de forage, on définit le faciès F2_SG par tous les matériaux définis comme sables/graviers silteux ou argileux, possédant une plus grande proportion de particules fines que ceux du faciès F1_Esker définis par sables et/ou graviers. On calcule les proportions respectives des faciès F1_Esker et F2_SG selon leur épaisseur par rapport à l'épaisseur totale de l'unité EskerSG_3.

Différents marqueurs sismiques ont été pointés sur les levés sismiques de MBMS 2019 et 2021. Le marqueur S3 (cyan) correspond au toit de l'unité d'Argile_2. Le marqueur S2 (jaune) correspond au toit du faciès F2_SG, tandis que le marqueur S1 (orange) correspond au toit de l'unité principale d'EskerSG_3, soit le faciès F1_Esker. Le marqueur S0_P (rouge) marque le toit du Till_4 ou du roc, et marque la base du modèle pour calculer les épaisseurs sismiques des différents faciès. On calcule ainsi les proportions des faciès F1_Esker et F2_SG de façon similaire à ce qui est fait avec les descriptions de forage.

Les données de faciès F1_Esker et F2_SG sont concentrées au niveau local autour du site des anciennes lagunes. On utilise la régression multi-linéaire afin de trouver la combinaison de propriétés géologiques pouvant le mieux prédire les proportions de faciès F1_Esker et F2_SG partout dans l'unité de l'EskerSG_3. Cette méthode permet d'entraîner le modèle sur les données connues de faciès (F1_Esker et F2_SG) et a permis de trouver qu'une combinaison des épaisseurs d'Argile_2, d'EskerSG_3, de Till_4, et de l'élévation du toit de l'EskerSG_3 permet de bien estimer les proportions de faciès F1_Esker et F2_SG. Combinant les informations aux 10 puits de TechnoRem et les données de sismique interpolées, la formule finale de régression multi-linéaire utilisée est la suivante :

$$\text{Prop}(F1_Esker) = 0.45343 - 0.00465 * dz(\text{Argile_2}) + 0.00498 * dz(\text{EskerSG_3}) + 0.00392 * dz(\text{Till_4}) + 0.00802 * z(\text{Esker_SG3}).$$

De façon similaire à l'interpolation des épaisseurs et des élévations, deux estimations successives ont été calculées pour mieux honorer les proportions mesurées aux forages par rapport aux proportions sismiques lorsque les données étaient contradictoires. La carte de proportion obtenue par régression multi-linéaire a ensuite été utilisée comme dérive externe par krigeage bayésien avec les proportions mesurées aux forages pour obtenir les cartes finales des épaisseurs (épaisseur du faciès F1_Esker à la Figure 17 et épaisseur du faciès F2_SG à la Figure 18).

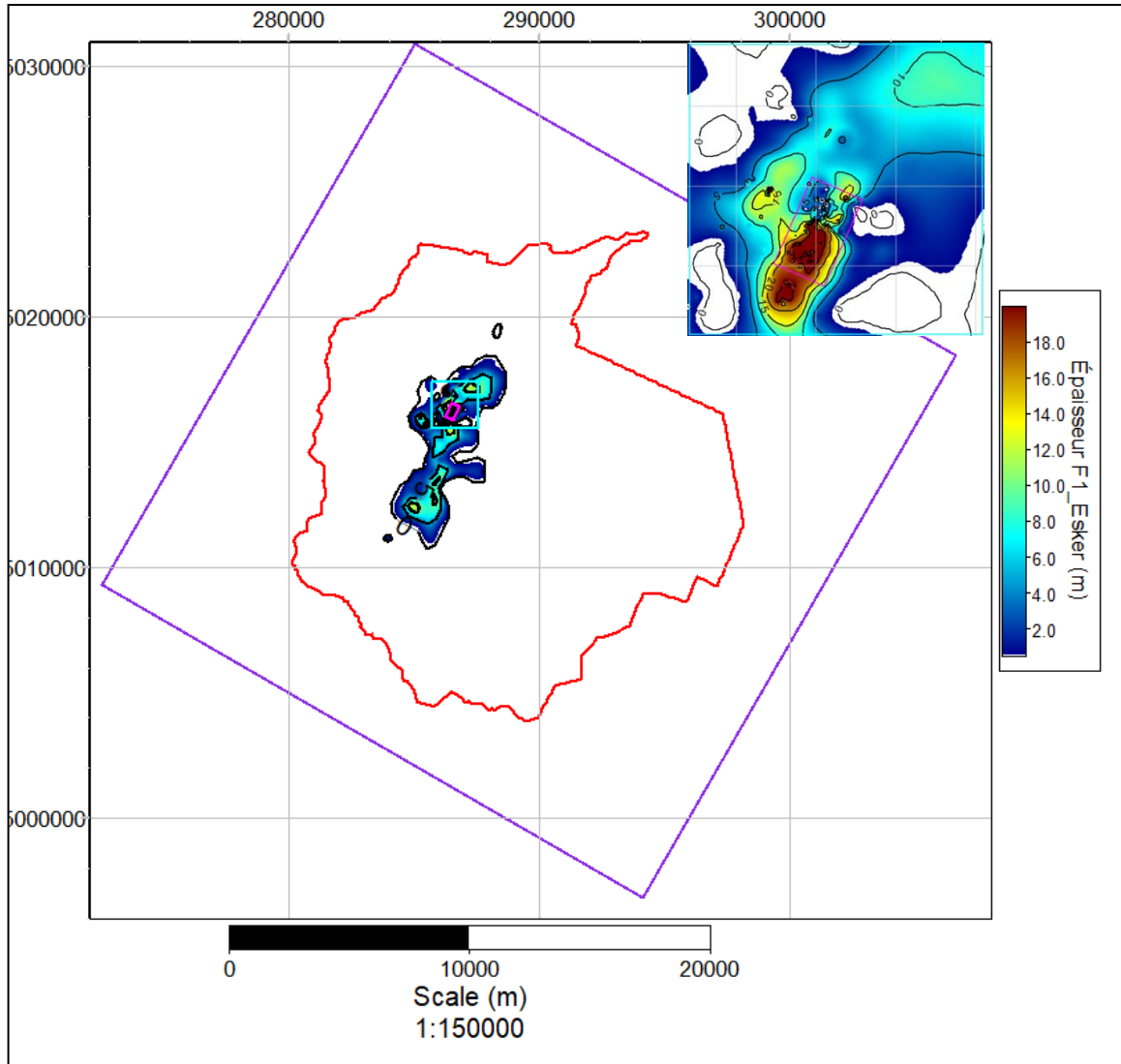


Figure 17. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F1_Esker. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur.

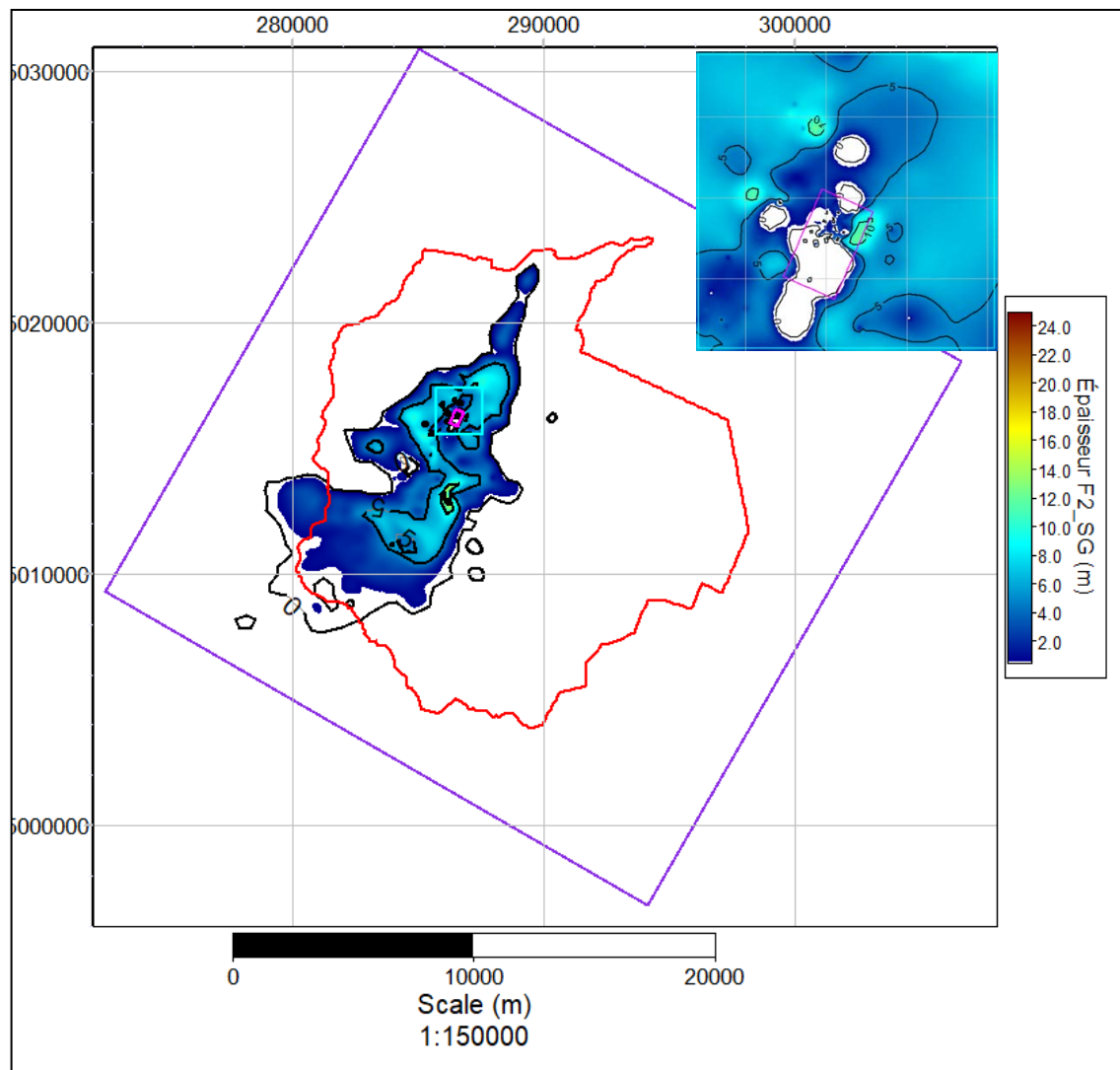


Figure 18. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F2_SG. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur.

3.2.6 Épaisseur de l'unité Argile_2

En plus des 230 points de contrôle aux puits agissant comme données les plus fiables, l'épaisseur de l'unité Argile_2 est estimée à partir de la carte régionale de géologie de surface (où l'argile est affleurant à la surface), et à partir des épaisseurs provenant du modèle sismique local. Des points de contrôle additionnels d'épaisseur Argile_2 de 0m sont rajoutés aux endroits où les unités EskerSG_3 et Till_4 sont affleurant à la surface. L'épaisseur de l'unité Argile_2 est initialement évaluée par krigeage ordinaire, avec un variogramme modélisé à 3 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 37 m² et les paramètres suivants :

- Effet pépite de contribution (variance) 1 m² ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 250 m et de contribution de 10 m² pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.

- Modèle gaussien isotrope de portée 2700 m et de contribution de 26 m² pour représenter les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface est lissée pour enlever certaines discontinuités puis utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité Argile_2 par krigeage bayésien (Figure 19).

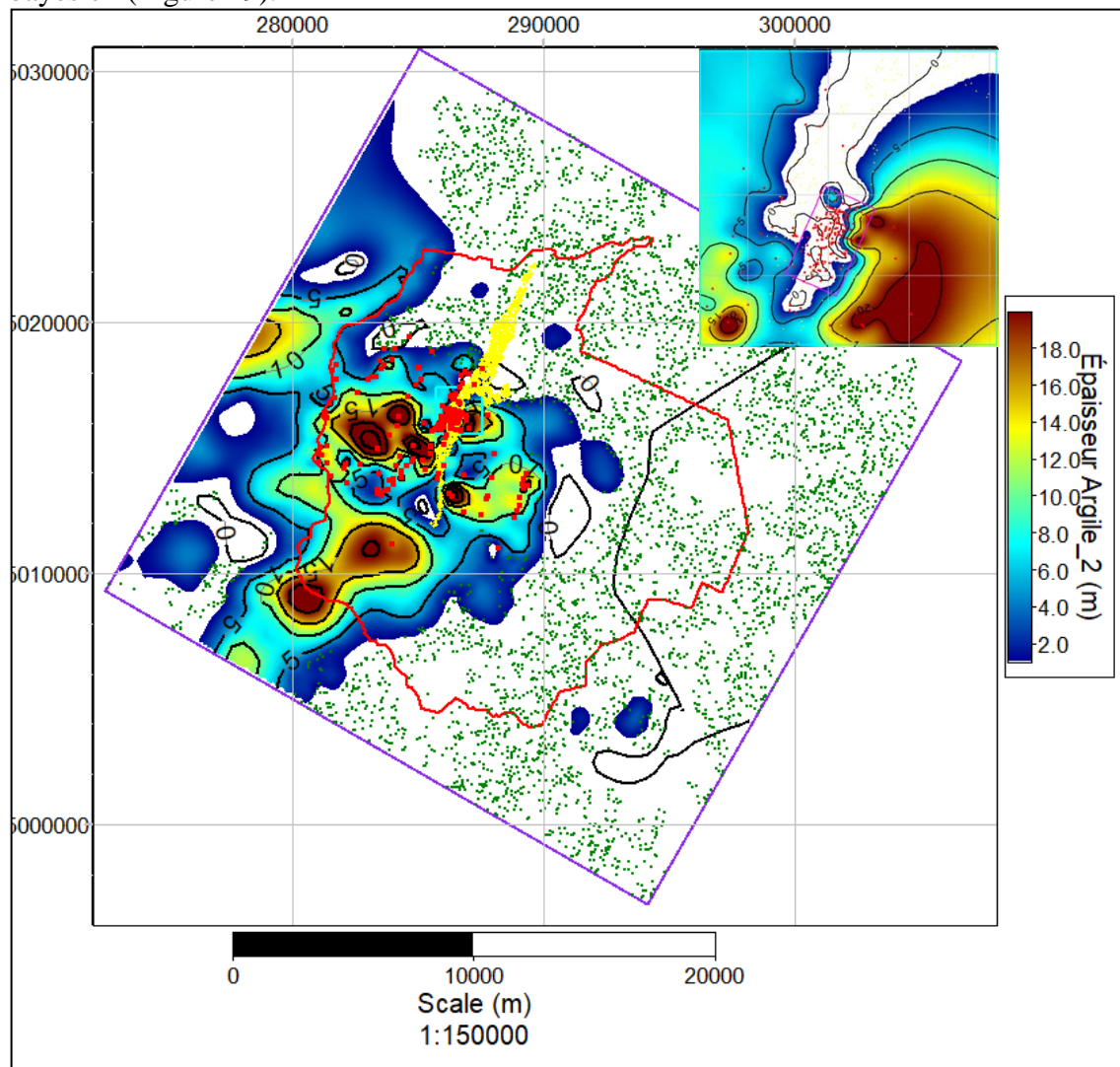


Figure 19. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Argile_2. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés rouges) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où l'unité EskerSG_3 (points jaunes) et l'unité Till_4 (points verts) affleurent à la surface. Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur.

Le modèle de variogramme local est composé de 3 structures, avec une variance totale de 74 m² et des paramètres suivants :

- Effet pépite de contribution (variance) 1.0 m² ;
- Modèle gaussien isotrope de portée 175 m et de contribution de 13 m² pour représenter les variations spatiales à l'échelle locale.

- Modèle gaussien isotrope de portée 1050 m et de contribution de 60 m² pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.

Bien que l'unité Argile_2 soit d'extension régionale, on voit que l'unité n'est pas présente en tous points du modèle. Son épaisseur maximale est de 25 m régionalement, et de 20 m sur le côté est du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. L'argile est absente sur une portion importante du site, localement, où l'esker est visible en surface.

3.2.7 Épaisseur de l'unité Remblai_Organique_1

Les épaisseurs des unités hydrostratigraphiques modélisées sont additionnées à partir du roc pour être recoupées par le LIDAR. La carte des épaisseurs des dépôts de remblai ou organiques meubles (Figure 20) a été obtenue en réalisant la différence entre l'épaisseur totale (élévation du sol moins élévation du roc) et la somme des épaisseurs calculées pour les unités Argile_2, EskerSG_3 et Till_4.

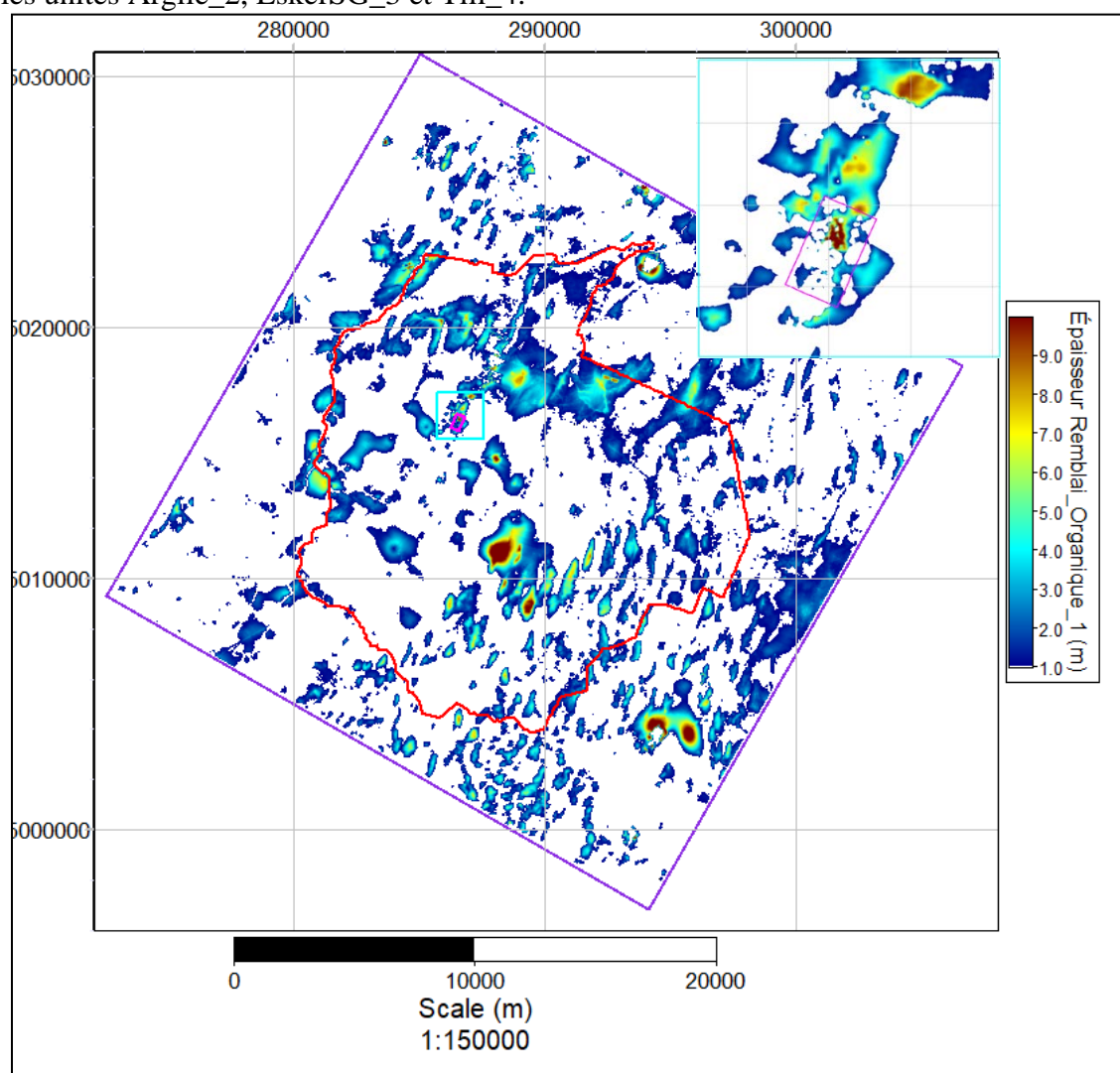


Figure 20. Carte des épaisseurs de l'unité Remblai_Organique_1. Limites du modèle conceptuel (polygone mauve) ; limite du modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). Un seuil de coupure de l'échelle de couleur est fixé à 1m d'épaisseur.

3.3 Représentation 3D des unités hydrostratigraphiques

Les cartes des épaisseurs et des élévations krigées des unités hydrostratigraphiques sont combinées pour construire le modèle conceptuel régional déterministe en trois dimensions (vue régionale à la Figure 21 et vue locale centrée sur les puits de l'UTES à la Figure 22). Le modèle géologique est bâti sur une grille régulière avec des cellules de taille 25m x 25m x 1m, pour un total de 85 millions de cellules. Le modèle géologique 3D est bâti avec une résolution latérale moins grande que les cartes 2D pour réduire le nombre total de cellules du modèle et éviter des problèmes de mémoire. Cette moindre résolution n'est pas critique pour le projet car ce modèle 3D est utilisé principalement pour la présentation des profils verticaux et des vues 3D. Les assignations des unités hydrostratigraphiques et paramètres hydrauliques aux nœuds et éléments de la grille Feflow sont effectuées à partir des grilles 2D possédant une meilleure résolution spatiale (jusqu'à 5 mètres). On voit que le modèle régional s'accorde bien avec le modèle local fourni par le MELCCFP qui est aussi présenté sur la Figure 21.

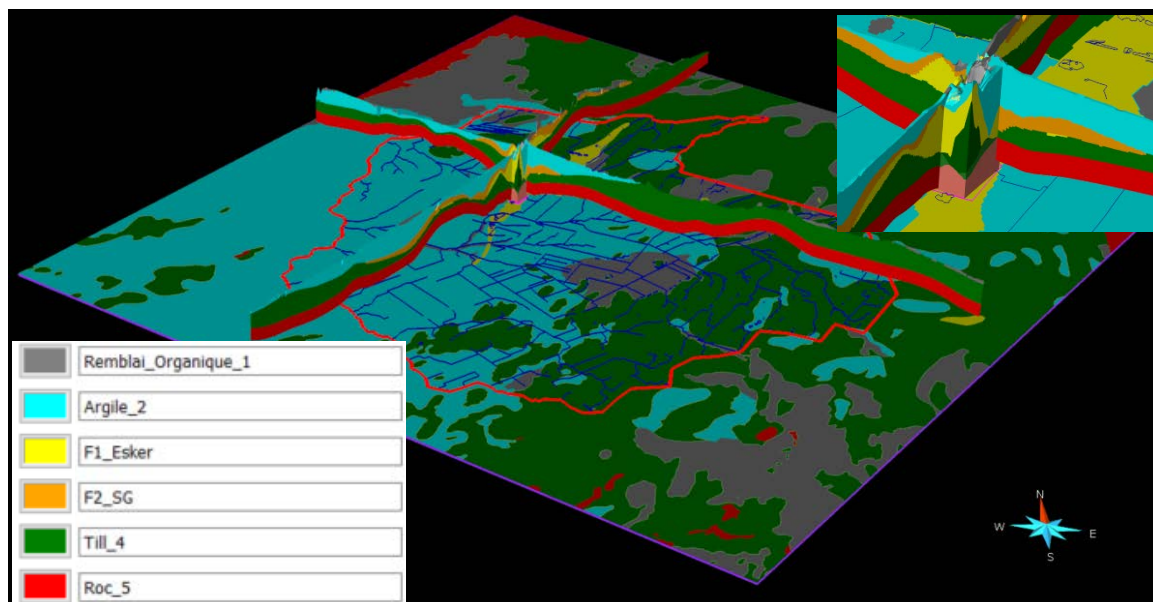


Figure 21. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques dans le modèle conceptuel régional. Exagération verticale de la vue régionale est de 40x, exagération verticale de la vue locale est de 20x. La carte de fond est la géologie de surface, avec le réseau hydrologique. Le modèle géologique local provenant du MELCCFP sur le site des lagunes de Ville Mercier est aussi présenté.

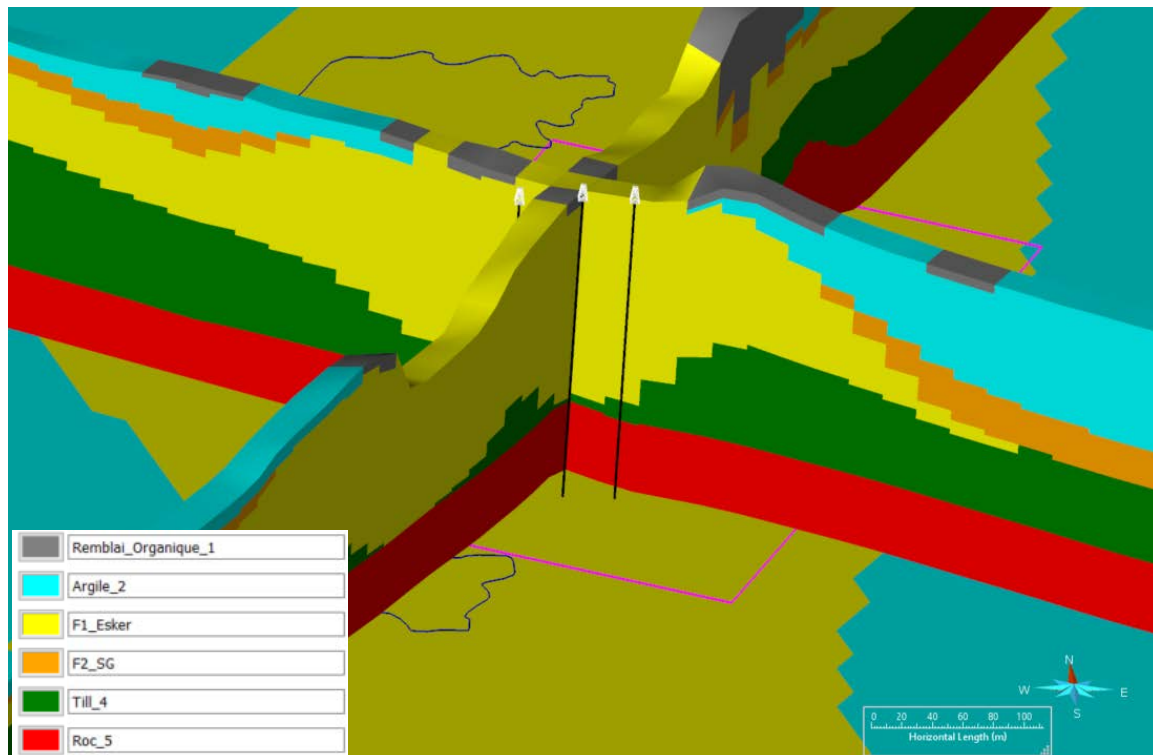


Figure 22. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques au niveau du site de l'UTES, avec une exagération verticale de 5. La carte de fond est la géologie de surface. Les puits de l'UTES PW-113, PW-112, et PW-111 sont présentés en blanc et noir de gauche à droite, respectivement.

3.4 Incertitude sur la construction du modèle conceptuel

Le modèle conceptuel est construit selon une approche déterministe, c'est-à-dire qu'un seul modèle est généré, soit celui minimisant les erreurs d'interpolation entre les données géologiques. Bien que l'incertitude finale ne soit pas quantifiée sur les interpolations des élévations et épaisseurs des différentes unités, celle-ci reste bien présente dans le modèle conceptuel final.

Il existe tout d'abord une incertitude sur les valeurs exactes provenant des données géologiques. Les marqueurs géologiques aux puits ne sont pas tous précis, et aucune mention des incertitudes n'est rapportée sur les mesures rapportés aux puits. L'incertitude sur les mesures est exprimée par les valeurs d'effet pépité sur les variogrammes, permettant au krigeage de ne pas honorer parfaitement certaines valeurs si cela permet de réduire la somme des erreurs d'interpolation.

Il y a une certaine incertitude provenant de l'intégration parfois incohérente de données géologiques provenant de multiples sources. Un contrôle de qualité a été nécessaire afin d'enlever les puits-doublon ou très rapprochés démontrant des données incohérentes. Certaines sources de données utilisaient également un système de notation différent des unités hydrostratigraphiques. Un travail de correspondance des notations a également été effectué afin de pouvoir intégrer toutes les données simultanément et réduire l'incertitude. Il existe différents niveaux de fiabilité selon la provenance des données, générant une incertitude variable qui est adressée en utilisant un système de krigeages successifs avec des portions des données. Les données plus incertaines sont utilisées pour la mise en carte

initiale afin d'interpoler les tendances régionales, qui seront ensuite corrigées et déformées pour honorer les données les plus fiables.

Il existe également une incertitude provenant de l'interpolation de données très denses localement au site des anciennes lagunes de Ville Mercier et éparses régionalement. L'interpolation est apte à représenter ces variations latérales rapides au site, mais génère une représentation spatiale lissée régionalement. L'incertitude augmente ainsi avec la distance aux points de mesure, et est exprimée par le type et les portées des variogrammes utilisés dans les interpolations.

4 Construction du modèle hydrogéologique déterministe

Cette section résume les étapes de construction du modèle hydrogéologique, justifiant la construction du maillage, l'assignation des conditions aux frontières, et la représentation des paramètres hydrauliques dans les différentes unités hydrostratigraphiques dans le logiciel FEFLOW, version 7.4 de DHI. Le lecteur souhaitant reproduire les différentes étapes de construction du modèle hydrogéologique est référé à la lecture de l'Annexe 6 pour plus de détails. Ce modèle hydrogéologique régional est ensuite calibré de façon déterministe en régime permanent (Section 5) et est mis à jour selon une approche stochastique en régime transitoire au niveau local (Section 6). Cette dernière assimilation stochastique va générer un ensemble de modèles hydrogéologiques qui permettront d'évaluer de façon probabiliste différents scénarios de confinement hydraulique au site des anciennes lagunes de Ville Mercier (Section 7).

4.1 Construction du maillage 2D

La construction de la grille d'écoulement dans Feflow se fait en utilisant l'algorithme « *Triangle* » pour générer des éléments triangulaires en deux dimensions (2D) tout en permettant différents niveaux de raffinement souhaités autour d'éléments à considérer dans le modèle hydrogéologique. La grille a été construite afin de représenter parfaitement les éléments linéaires importants du modèle hydrogéologique tel que les cours d'eau et les limites latérales de certaines unités hydrostratigraphiques. Un niveau de raffinement a été appliqué pour obtenir des cellules d'au maximum 100m au niveau régional autour des limites du modèle et des cours d'eau principaux. Une grille irrégulière de 44 points de contrôles, incluant les 3 puits de pompage de l'UTES, a été utilisée au niveau local afin de permettre une discrétisation fine des éléments (taille minimale des éléments souhaitée de 5m) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Considérant le niveau de raffinement des surface géologiques (10m), il fut jugé qu'une résolution de 5m permettrait d'avoir un minimum de deux points de mesures de charge hydraulique entre chaque nœud des surfaces topographiques au niveau local. Un maillage plus fin du maillage 2D ne permettrait pas une meilleure résolution des niveaux d'eau puisque l'incertitude serait principalement expliquée par la résolution moindre existante sur les variations d'épaisseur et d'élévation.

La grille 2D finale (Figure 23) comporte 57 257 nœuds (113 569 éléments) par couche, avec des éléments dont la taille varie de 5m à 150m.

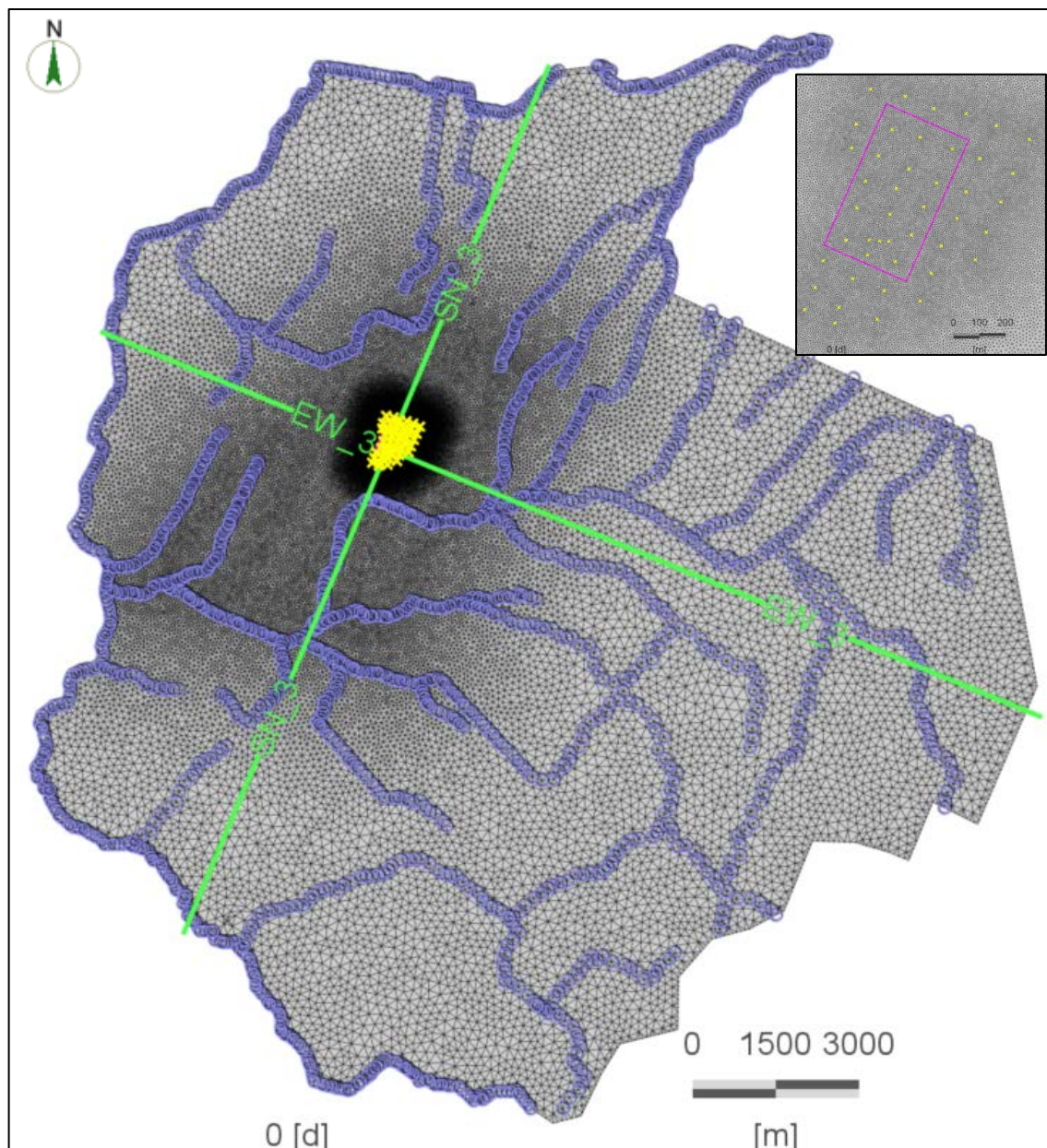


Figure 23. Représentation 2D de la grille de modélisation. Les ronds bleus représentent les nœuds des cours d'eau où sont assignées des conditions aux frontières à charge constante à la surface. Les croix jaunes présentent les points de contrôle utilisés pour bâtir la grille 2D. Les lignes vertes sont les sections verticales EW_3 et SN_3 présentées à la figure suivante.

4.2 Construction de la grille d'écoulement 3D

La grille 2D est extrudée en trois dimensions (3D) afin de représenter les variations verticales des unités hydrostratigraphiques ainsi que les hétérogénéités verticales des propriétés hydrauliques. Une couche de 0.5 m d'épaisseur est imposée à la surface afin d'avoir un contrôle distinct sur la géologie de surface et assurer une recharge plus efficace au modèle. Deux couches minces sont ajoutées à la base de l'unité d'Argile_2 afin de bien représenter les différences de pressions et de charges entre les sédiments fins et peu conducteurs de l'argile et les sédiments très conducteurs de l'esker. Une surface est fixée à l'élévation du toit de l'unité EskerSG_3 en tous points du modèle afin de représenter

adéquatement cette unité. L'unité EskerSG_3 est subdivisée en 20 couches d'épaisseur proportionnelle afin de représenter, dans une étape ultérieure au projet, toutes les hétérogénéités verticales de la conductivité hydraulique dans cette unité. Afin d'éviter la création de couches très minces pouvant générer des instabilités numériques, la discrétisation se fait également sur l'unité de Till_4 au niveau régional. L'unité du Till_4 est divisée en deux sous-unités; le till remanié représenté par les quatre couches supérieures et le till intact sous-jacent. L'élévation du toit du roc est également fixée afin d'être adéquatement représentée dans le modèle. Le roc est représenté par un total de 9 couches, pour permettre une représentation adéquate de l'hétérogénéité verticale de la conductivité hydraulique dans l'étape ultérieure de modélisation. De haut en bas, les 9 couches du roc ont les épaisseurs suivantes :

- 5 couches avec dz = 2m,
- 2 couches avec dz = 5m et,
- 2 couches avec dz = 10m.

Le modèle hydrogéologique régional 3D contient 35 couches (36 surfaces), pour un total de 2 061 252 nœuds (3 974 915 éléments). Le modèle hydrogéologique régional couvre une superficie de 226.02 km² et une épaisseur moyenne de 56.6 m, soit un volume total de 12.79 km³. La Figure 24 et la Figure 25 montrent deux sections verticales traversant le modèle régional 3D.

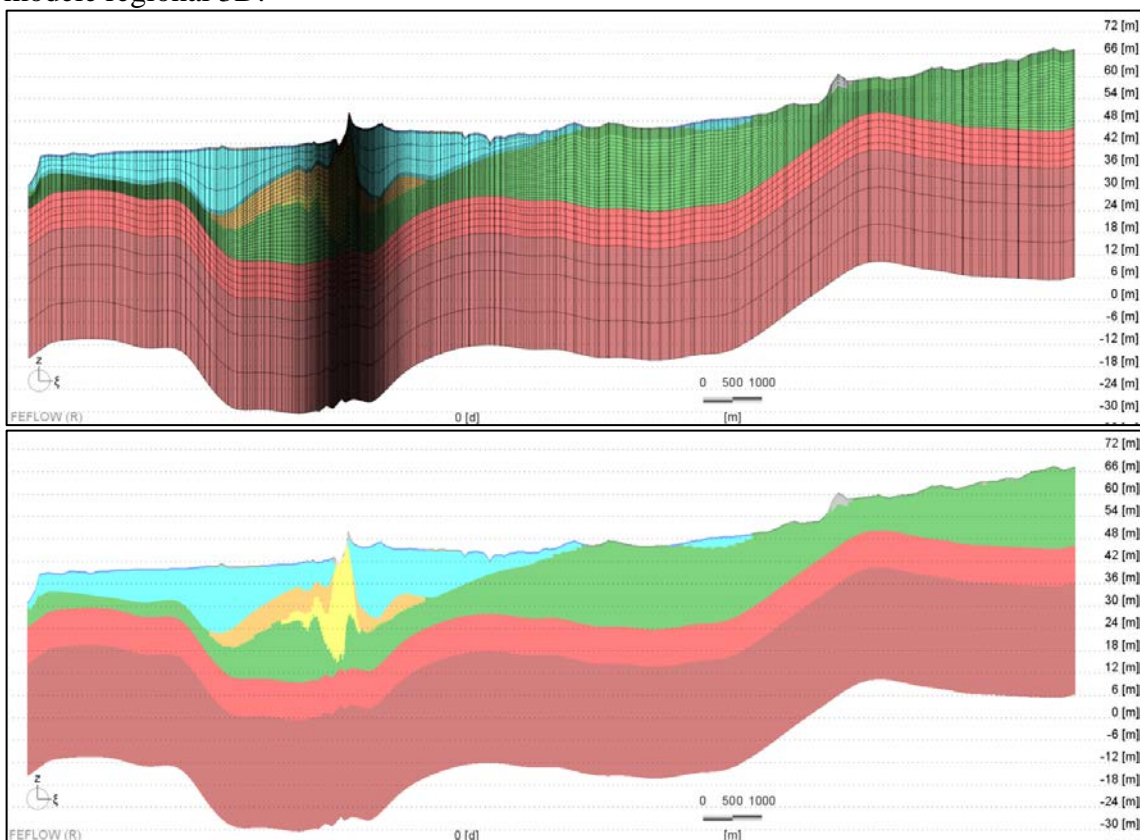


Figure 24. Section verticale (EW_3 sur la Figure 23) d'ouest (gauche) vers l'est (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments. Exagération verticale de 80. De bas en haut : roc sain (marron) ; roc fracturé (rouge) ; Till_4 (vert) ; faciès F1_Esker (jaune) ; faciès F2_SG (orange) ; Argile_2 (cyan) ; et Remblais organique 1 (gris).

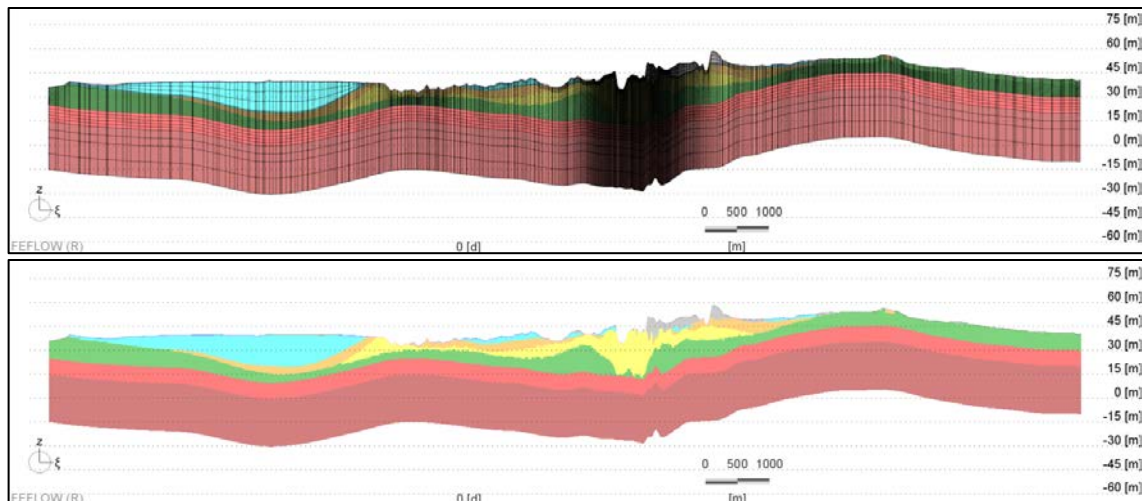


Figure 25. Section verticale (SN_3 sur la Figure 23) du sud (gauche) ou nord (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments. Exagération verticale de 30. De bas en haut : roc sain (marron) ; roc fracturé (rouge) ; Till_4 (vert) ; faciès F1_Esker (jaune) ; faciès F2_SG (orange) ; Argile_2 (cyan) ; et Remblais organique 1 (gris)

4.3 Représentation des propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques ayant le plus d’impact sur les simulations des eaux souterraines au site des anciennes lagunes de Ville Mercier sont les conductivités hydrauliques horizontales (Kxy), les conductivités hydrauliques verticales (Kz) et les coefficients d’emménagement (Ss) des différentes unités hydro-stratigraphiques. Plusieurs valeurs de Kxy ont été mesurées et rapportées dans la littérature (Table A4_3 de l’Annexe 4 pour la liste complète avec références; Tableau 5 pour le résumé des valeurs minimales, médianes et maximales calculées sur toutes les valeurs rapportées). Ces valeurs servent de valeurs baromètre afin d’établir les valeurs initiales de Kxy à implémenter dans le modèle et valider les valeurs de Kxy obtenues après calibration.

Tableau 5. Valeurs minimale, médiane, maximale de conductivité hydraulique rapportées pour les différentes unités hydrostratigraphiques à l’intérieur des limites de modélisation.

Unité	Kxy min (m/s)	Kxy médian (m/s)	Kxy max (m/s)	Nombre de points
Remblai et Organique régional	3.3×10^{-8}	2.2×10^{-6}	1.2×10^{-4}	10
Argile régional	4.0×10^{-10}	N/A	6.4×10^{-10}	0
Esker_SG3 local	6.9×10^{-8}	2.3×10^{-5}	7.4×10^{-4}	107
Esker_SG3 régional	1.4×10^{-6}	6.6×10^{-3}	1.4×10^{-3}	50
Till_4 remanié régional	2.1×10^{-8}	5.6×10^{-8}	4.0×10^{-5}	8
Till_4 intact régional	1.8×10^{-11}	2.0×10^{-8}	8.2×10^{-8}	14
Roc local	1.0×10^{-10}	7.5×10^{-7}	1.6×10^{-4}	73
Roc régional	7.4×10^{-10}	9.0×10^{-7}	3.9×10^{-4}	171

Les valeurs de Kxy sont assignées aux unités de modèle hydrogéologique par deux approches, selon l’hétérogénéité spatiale attendue et mesurée dans les unités hydrostratigraphiques. La première approche consiste à assigner une valeur unique de Kxy par unité (contribution au niveau régional), tandis que la deuxième approche consiste à

interpoler une distribution spatiale de K_{xy} à partir des points de mesure et de points pilotes additionnels à calibrer (contribution au niveau local).

Les valeurs initiales de K_z et S_s incluses dans le modèle hydrogéologique reflètent les valeurs extraites d'études géologiques et hydrogéologiques passées, notamment celle de Pontlevoxy (2004). Notons que dans ce rapport, les valeurs de conductivité hydraulique verticale sont plutôt exprimées en tant que ratio de conductivité hydraulique horizontale sur verticale ($K_r = K_{xy}/K_z$). Se fiant aux hypothèses géologiques, les valeurs initiales de K_r varient entre 2.0 pour les sédiments de remblais et organiques en surface et le roc sain et de 100 pour les unités de Till.

4.3.1 Valeur unique par unité hydrostratigraphique

Une valeur unique de K_{xy} est assignée aux unités suivantes : Remblai_Organique_1, Argile_2, Till_4, et le roc sain. Ces valeurs uniques de K_{xy} sont des valeurs initiales qui seront ajustées pendant la calibration du modèle régional en régime permanent. Un ratio de conductivité unique est également calibré pour chacune de ces unités. Bien que les valeurs de coefficients d'emménagement (S_s) n'aient pas d'impact sur la calibration en régime permanent, les valeurs initiales de S_s extraites de la littérature sont également rapportées. Les valeurs initiales de K_{xy} , K_r , et S_s assignées au modèle déterministe avant calibration (Tableau 6) correspondent à des valeurs représentatives des valeurs mesurées au site, et sont calibrées afin d'honorer les valeurs de charges hydrauliques lues aux piézomètres, régionalement et localement.

Tableau 6. Valeurs initiales de K_{xy} , K_r , et S_s assignées aux unités hydrostratigraphiques du modèle hydrogéologique des anciennes lagunes de Ville Mercier.

Unité	Couleur sur les figures	K_{xy} (m/s)	K_r (-)	S_s (1/m)
Remblai et Organique	Gris	5.0×10^{-5}	2	3.0×10^{-4}
Argile	Cyan	6.0×10^{-8}	10	3.0×10^{-4}
F1_Esker	Jaune	2.0×10^{-4}	10	3.0×10^{-4}
F2_SG	Orange	2.0×10^{-5}	10	3.0×10^{-4}
Till_4 remanié	Vert pâle	2.5×10^{-5}	100	3.0×10^{-4}
Till_4 intact	Vert	1.0×10^{-7}	100	3.0×10^{-4}
Till_4 zones fenêtres	Vert foncé	1.0×10^{-6}	500	6.0×10^{-5}
Roc fracturé	Rouge	5.0×10^{-5}	10	5.5×10^{-6}
Roc sain	Marron	1.0×10^{-7}	2	1.0×10^{-6}

4.3.2 Interpolation par krigeage

L'interpolation par krigeage permet de générer une distribution spatiale réaliste de K_{xy} , en propageant les valeurs de K_{xy} à partir de points de contrôle connus et selon des paramètres de krigeage déterminés à partir des données mesurées. Le krigeage peut se faire en 2D ou en 3D selon les besoins. Il permet une meilleure représentation de l'hétérogénéité que l'utilisation d'une valeur unique de K_{xy} , tout en limitant le nombre de paramètres à calibrer. L'utilisation de points-pilotes permet de calibrer les valeurs de K_{xy} à certains points de contrôle prédéterminés (les points-pilotes) et de régénérer une distribution spatiale par krigeage à partir des nouvelles valeurs de K_{xy} calibrées aux points-pilotes. Cette combinaison de krigeage et de points-pilote est utilisée dans la calibration du modèle

régional déterministe dans l'unité Roc_5, localement dans l'unité de Till_4, et dans les hydrofaciès F1_Esker et F2_SG de l'unité EskerSG_3. Les valeurs de K_r restent définies comme une valeur unique à calibrer pour chacune des unités hydrostratigraphiques.

Krigeage 2D dans l'unité Roc_5

Les valeurs de K_{xy} dans l'unité Roc_5 sont très hétérogènes selon les essais de perméabilité effectués et les valeurs extraites de la littérature dans le domaine de modélisation. Bien que cette hétérogénéité soit aussi verticale, les valeurs de K_{xy} sont généralement mesurées sur tout l'intervalle crépiné du forage utilisé, masquant l'hétérogénéité verticale. Les points de mesures de K_{xy} représentant ces variations régionales (K_{xy} minimum de 7.4×10^{-10} m/s, K_{xy} maximum de 3.9×10^{-4} m/s, pour une valeur médiane de 9.0×10^{-7} m/s calculée à partir de 171 valeurs de K_{xy}) sont utilisés dans ce modèle déterministe comme points de contrôle pour effectuer le krigeage de K_{xy} sur l'ensemble du modèle en 2D (Figure 26).

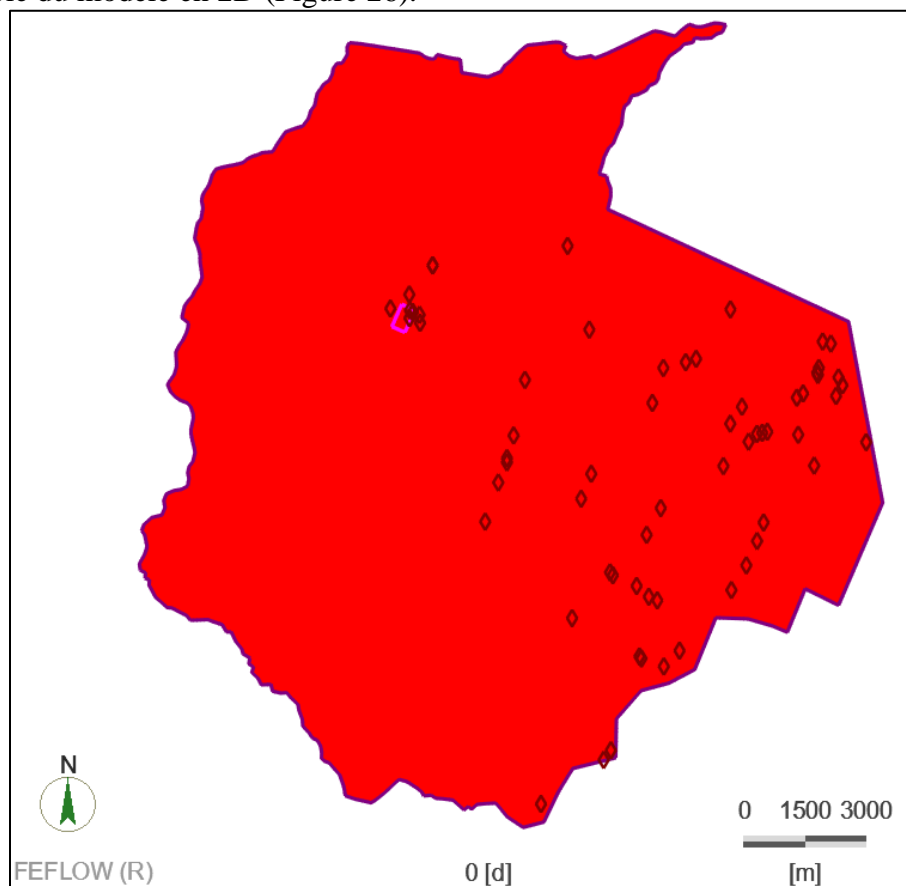


Figure 26. Position (losanges) des points de mesures de K_{xy} dans l'unité de Roc_5 servant de points-pilotes au niveau régional.

Un variogramme modélisé exponentiel, avec un plateau (variance) de 0.41, un effet pépite de 0.04, et une portée omnidirectionnelle de 5000 mètres est utilisé pour le krigeage du logarithme à base 10 (\log_{10}) de K_{xy} . Les valeurs de K_{xy} régionale au roc sont assujetties d'une incertitude importante. En effet, plusieurs de ces valeurs proviennent de puits SIH ou de puits historiques dont la fiabilité des estimés de K_{xy} à partir des débits de pompage est moins fiable. Les valeurs régionales de K_{xy} sont également mesurées sur de grands

intervalles crépinés, générant des valeurs moins représentatives localement. Cette incertitude est incluse dans la calibration en utilisant ces valeurs mesurées de K_{xy} régionale comme points-pilotes pendant la calibration, permettant ainsi à leur valeur de varier d'un ordre de grandeur à partir de leur valeur initiale.

Krigeage 2D de la fenêtre potentielle au roc à travers l'unité Till_4

Une valeur unique de K_{xy} sera calibrée régionalement dans l'unité Till_4. Cependant, la présence potentielle d'une fenêtre au roc entre l'aquifère local de l'EskeSG_3 et l'aquifère régional de Roc_5 ne peut être représentée par la calibration d'une valeur unique. Une distribution spatiale de 81 points-pilotes positionnés de façon aléatoire localement est implémentée afin de fournir à la calibration un degré de flexibilité nécessaire (Figure 27).

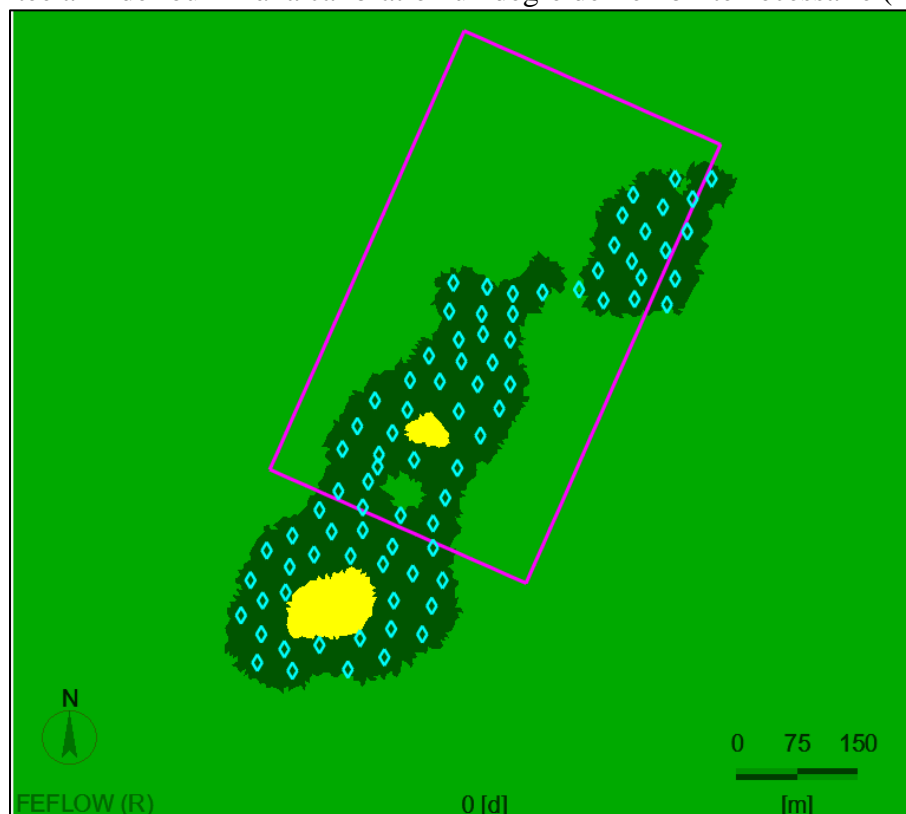


Figure 27. Position (losanges) des points-pilote dans les zones de fenêtres potentielles au Till_4 (zones en vert foncé) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier (rectangle rose). L'unité de Till_4 est représentée par la couleur verte, tandis que la couleur jaune représente les fenêtres au roc modélisées avec l'unité d'EskeSG_3.

Les valeurs de K_{xy} des points-pilotes sont libres de bouger entre deux extrêmes (1×10^{-9} m/s et 5×10^{-4} m/s) localement, tout en produisant un champ de K_{xy} krigé dont la distribution spatiale respecte les paramètres du variogramme suivant : variogramme de type exponentiel, une variance de 2.0 et un effet pépité de 0.1, et une portée omnidirectionnelle de 500 mètres.

Krigeage 3D dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskeSG_3

L'hétérogénéité spatiale de K_{xy} est extrêmement forte dans les deux faciès F1 et F2 de l'unité EskeSG_3. Afin de bien représenter cette hétérogénéité, une distribution spatiale

3D de points-pilotes a été créée afin de tenir compte de la variabilité horizontale et verticale de K_{xy} . Plusieurs points de contrôle étaient disponibles et provenaient de valeurs de K_{xy} mesurées par essai de perméabilité multi-niveaux (Tableau 5 et Table A4_3 de l'Annexe 4). Au total, 79 points de mesure sont disponibles dans le faciès F1, tandis que 37 points de mesure sont disponibles dans le faciès F2. Ces points de mesure sont fixes dans le système de krigeage, afin d'honorer parfaitement ces valeurs fiables. Afin de permettre une certaine latitude pendant la calibration, 183 points-pilotes dans le faciès F1 et 222 points-pilotes dans le faciès F2 sont ajoutés afin de permettre une représentation spatiale 3D adéquate de K_{xy} (Figure 28).

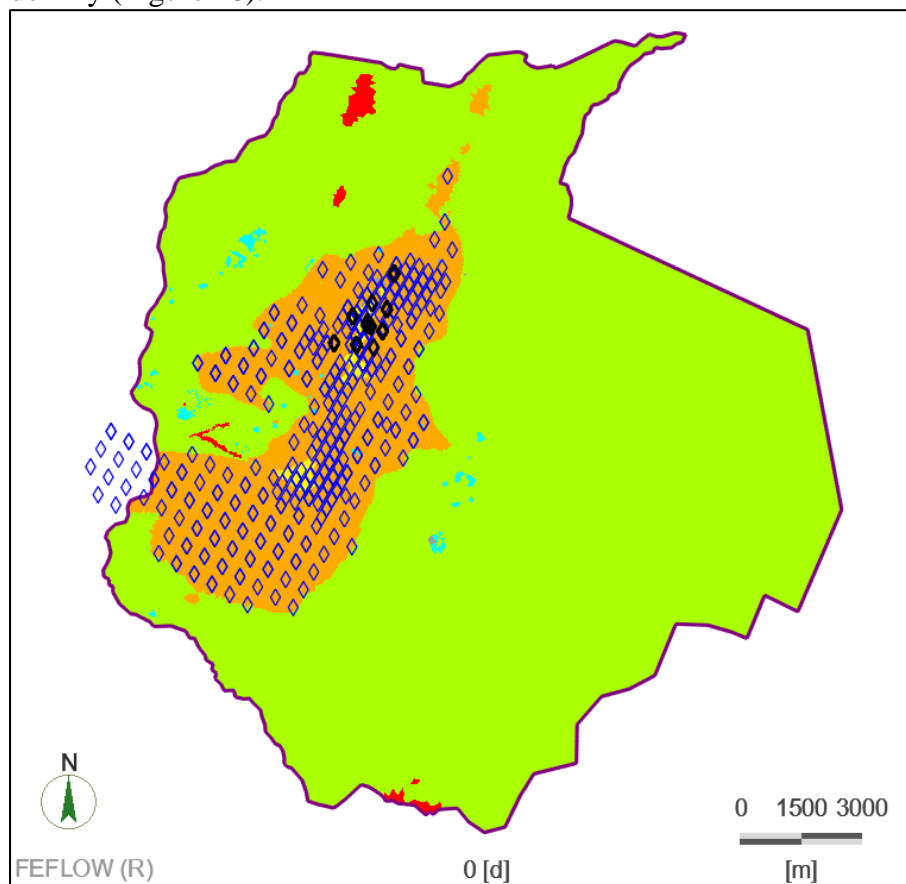


Figure 28. Position des points de mesure (losanges noirs) et des points-pilotes (losanges bleus) dans l'Esker_SG3. La couleur jaune représente le faciès F1 de l'unité EskerSG_3, l'orange représente le faciès F2 de l'unité EskerSG_3, le vert pâle est le Till_4 remanié, le cyan est l'Argile_2, et le rouge est le Roc_5.

Les points-pilotes peuvent fluctuer entre deux valeurs extrêmes (1×10^{-7} m/s et 1×10^{-3} m/s) représentatives des valeurs mesurées sur le terrain (Tableau 5) pendant la calibration afin de produire des champs de K_{xy} krigés dont les distributions spatiales respectent les paramètres des variogrammes suivants : pour le faciès F1, un variogramme exponentiel de variance 1.7, effet pépité de 0.5, une portée horizontale omnidirectionnelle de 650 mètres, et une portée verticale de 5.4 mètres; pour le faciès F2, un variogramme gaussien de variance 2.25, effet pépité de 0.25, une portée horizontale omnidirectionnelle de 900 mètres, et une portée verticale de 7.5 mètres. Les faciès F1 et F2 sont modélisés séparément sans nécessité de respecter une certaine continuité spatiale de K_{xy} à travers l'interface, car les deux faciès sont déposés selon des épisodes géologiques distincts.

4.4 Conditions aux frontières

La Rivière Châteauguay située à la limite ouest du modèle est le principal élément drainant l'eau de surface de la région. La rivière Châteauguay coule en partie sur le roc et constitue une limite hydraulique naturelle en raison de son contact avec l'aquifère. À l'est des lagunes de Mercier, il y a des collines qui forment une ligne de partage des eaux souterraines aux environs de la municipalité de Saint-Rémi. La rivière Châteauguay et la ligne de partage des eaux souterraines forment les limites ouest et est de la région d'étude du modèle d'écoulement. Ces limites avaient également été définies par Pontlevoy (2004) et reprises par Lefebvre (2007). La rivière des Fèves forme la frontière sud du modèle. La limite nord du modèle avait initialement été fixée comme la limite approximative du bassin versant (Pontlevoy, 2004). La limite nord de notre modèle a été étendue vers le nord pour inclure toute la portion de l'esker identifiée sur la carte de géologie de surface (voir Figure 3), permettant ainsi de mieux représenter la géologie dans le modèle conceptuel. Les affleurements rocheux ainsi que les affleurements de till remanié associés à des renflements de socle rocheux ont permis de tracer une première ébauche des limites sud-est du domaine. La limite sud-est suit fidèlement la ligne de partage des eaux souterraines, selon la carte topographique et le réseau hydrographique.

La rivière l'Esturgeon est le principal cours d'eau situé à l'intérieur des limites du modèle, passant au sud du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les autres cours d'eau situés à l'intérieur des limites du modèle sont pour la plupart des canaux d'irrigation non permanents. Seuls les cours d'eau reconnus et les canaux d'irrigation les plus importants sont inclus dans le modèle comme conditions aux frontières. Une condition aux frontières de type Dirichlet, soit de « charge constante » égale à l'élévation de la surface topographique est assignée aux cours d'eau principaux à l'intérieur du domaine de modélisation (Figure 23).

Des conditions aux frontières sont également assignées aux endroits où les principaux aquifères (EskerSG_3 et Roc_5) sont assumés être en connexion hydraulique avec la Rivière Châteauguay (Figure 29). Ainsi, une condition limite de type Dirichlet, soit de charge constante correspondant au niveau d'eau de la Rivière Châteauguay, est assignée à l'unité de Roc_5 à la limite sud-ouest du modèle. Cette condition aux frontières représente l'apport d'eau provenant du roc à la rivière à cet endroit où le roc est affleurant. De façon similaire, une charge constante correspondant au niveau d'eau de la Rivière Châteauguay est assignée à l'unité EskerSG_3 au sud-ouest du modèle. Cette condition aux frontières représente la connexion hydraulique entre l'unité EskerSG_3 et la Rivière Châteauguay.

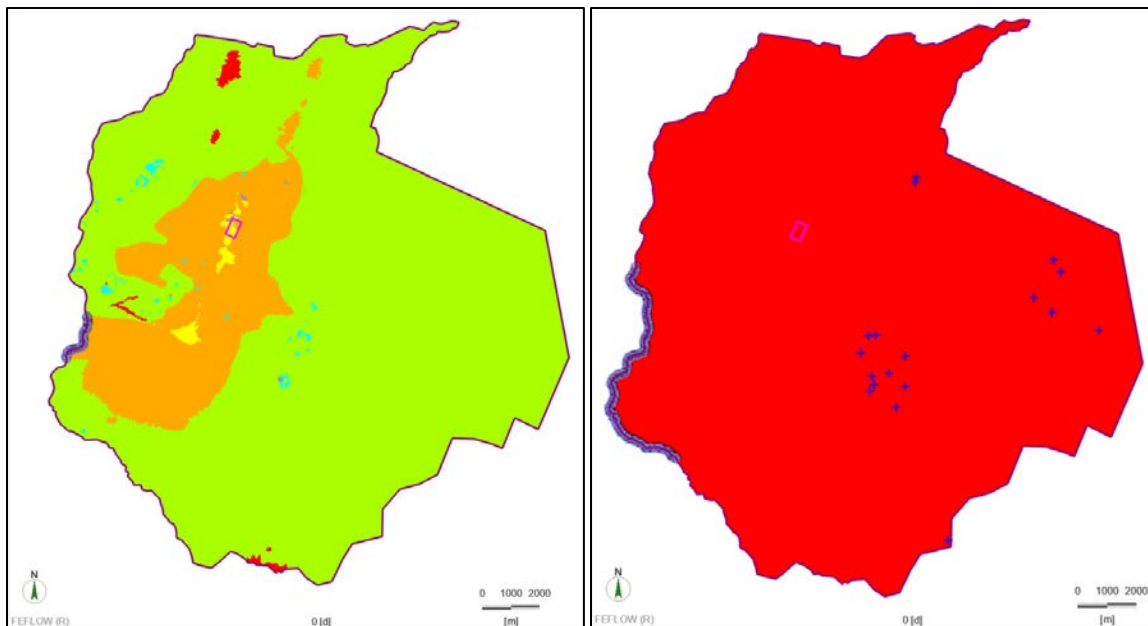


Figure 29. Position des conditions aux frontières de type Dirichlet (cercles bleus) dans l'Esker_SG3 (gauche) et dans le Roc_5 (droite). La couleur cyan représente l'Argile_2, le jaune représente le faciès F1 de l'unité EskerSG_3, l'orange représente le faciès F2 de l'unité EskerSG_3, le vert pâle est le Till_4 remanié, et le rouge est le Roc_5. Les croix bleues représentent la position des grands utilisateurs d'eau du modèle.

4.5 Représentation de la recharge

La distribution spatiale de la recharge provient de la recharge effective du modèle initialement développé par Croteau et coll. (2010), effectué avec HELP, et modifié par le travail de Ballard et coll. (2021) afin de représenter l'utilisation d'eau dans la région par les municipalités et certains grands utilisateurs industriels (Figure 30). Certains grands utilisateurs d'eau (croix bleues sur la carte) ont été agglomérés et inclus dans le modèle comme des puits de pompage avec un débit correspondant à leur utilisation d'eau estimée. La recharge effective varie en fonction de plusieurs facteurs dont la géologie de surface, la topographie et la végétation, et varie de 0 mm/an à 120 mm/an régionalement. La distribution de la recharge a été fixée pendant la calibration du modèle afin de ne calibrer que les valeurs de conductivité hydraulique.

Une fois le modèle hydrogéologique ainsi construit, la prochaine étape est de calibrer les paramètres hydrauliques afin que le modèle puisse reproduire les observations de niveaux d'eau qui sont disponibles régionalement et localement. Deux niveaux de calibrations sont effectués afin de bien reproduire les valeurs et distributions de la conductivité hydraulique régionalement et localement. Ces deux étapes de calibration sont décrites dans les deux chapitres suivants.

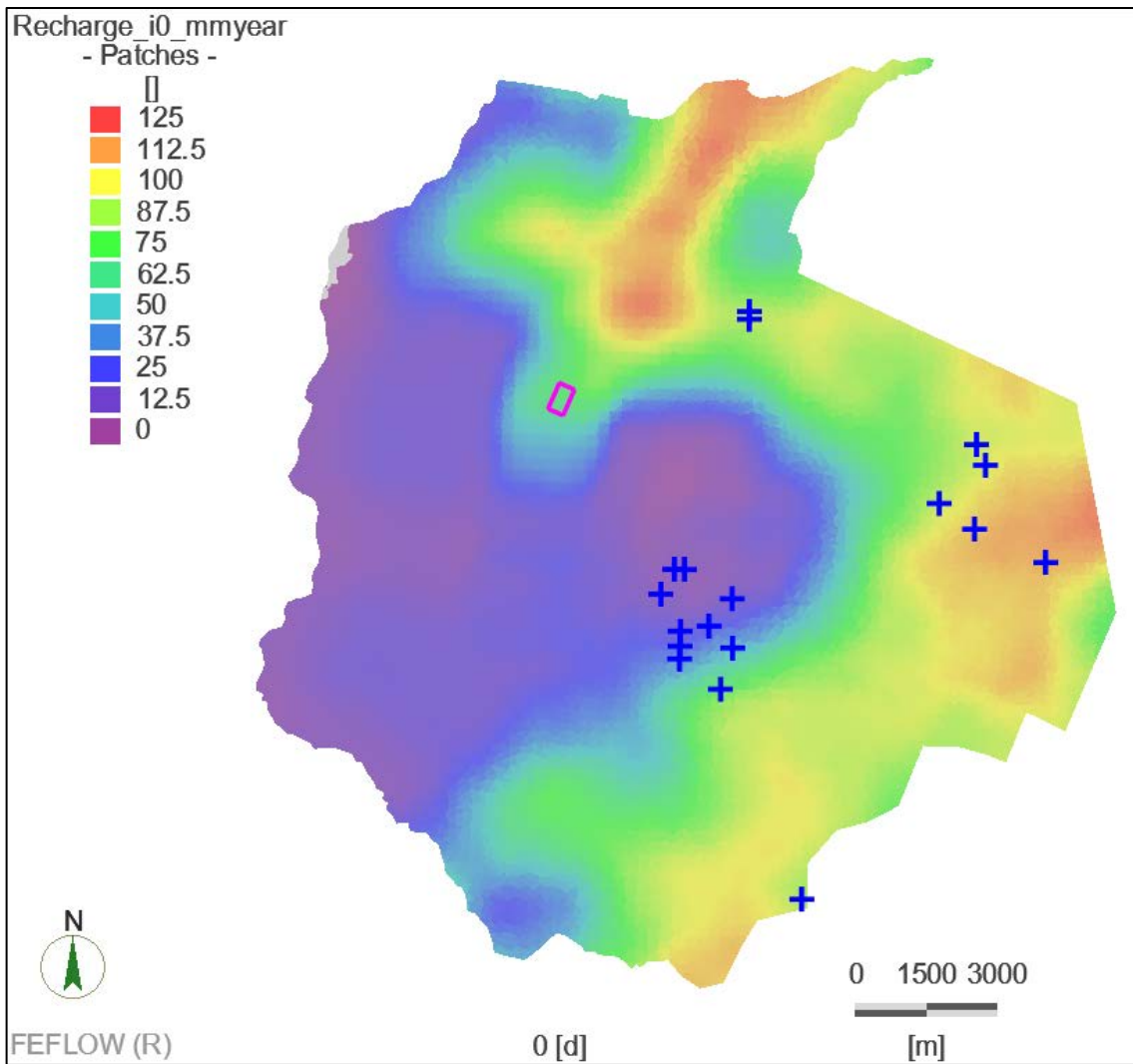


Figure 30. Distribution spatiale de la recharge efficace assignée à la première couche du modèle hydrogéologique déterministe en régime permanent. Les croix bleues représentent la position des grands utilisateurs d'eau du modèle.

5 Calibration du modèle régional déterministe en régime permanent

5.1 Hypothèses de calibration

La calibration du modèle régional déterministe est faite en régime permanent seulement. Le modèle régional est défini en mode confiné avec un niveau de saturation de 100% sur tout le domaine de modélisation. Bien que ces hypothèses ne soient pas représentatives des conditions locales où la présence de l'esker en surface rende le modèle partiellement saturé et non-confiné, ces conditions sont justifiables au niveau régional pour calibrer les valeurs de charges hydrauliques représentant l'écoulement régional en régime permanent.

Au niveau local, les pompes des trois puits de l'UTES sont activées avec un débit moyen de 1200 mètre cube par jour (m^3/j) par puits, pour un total de $3600 m^3/j$. Ce débit correspond au débit moyen des puits de l'UTES pendant les opérations courantes. Il s'agit d'une représentation simplifiée des opérations courantes de l'UTES, qui fonctionne généralement avec deux puits de pompage sur trois, le troisième servant de sécurité pour pallier les imprévus. Il est donc acquis que certains niveaux d'eau à proximité des puits de l'UTES ne pourront pas être calibrés parfaitement.

Une des principales inconnues concerne la présence, la taille et la continuité de fenêtres dans l'unité du Till_4 et qui permettent une connexion hydraulique entre l'unité EskerSG_3 et le roc. L'interpolation de ces fenêtres potentielles a été effectuée par la méthode des points pilotes discutée à la section 4.3.2. La méthode des points pilotes utilise une grille (régulière ou irrégulière) de points de contrôle de conductivité hydraulique (les points pilotes) qui servent de données initiales pour compléter une interpolation de la conductivité en tous points de l'unité. Plutôt que de tenter de calibrer tous les points contenus dans l'unité, seuls les points pilotes sont calibrés et l'interpolation est effectuée de nouveau avec les points pilotes mis à jour. Cette méthode permet une réduction du nombre de paramètres à assimiler et permettra de détecter le niveau de communication hydraulique nécessaire entre l'EskerSG_3 et le roc afin de calibrer le modèle.

5.2 Méthode de calibration

La calibration du modèle déterministe a été faite de façon classique par le logiciel PESTPP en calibrant les valeurs ou distributions de conductivité hydraulique présentées à la section 4.3, soit une valeur unique par unité hydrostratigraphique ou une liste de points pilotes servant à faire une interpolation 2D ou 3D. Cette calibration initiale a permis de déterminer les valeurs de conductivité hydraulique à assigner au niveau régional. Ces valeurs ont servi de points de contrôle pour les simulations géostatistiques de la conductivité hydraulique au niveau local à l'étape suivante du projet. PESTPP permet l'inversion et la calibration de modèles possédant un nombre important de paramètres, comme c'est le cas avec le modèle hydrogéologique régional de Ville Mercier. PESTPP fonctionne avec tous les logiciels de modélisation directe, incluant FEFLOW, à partir d'un fichier d'appel de commandes et d'une suite de fichiers d'entrées.

Un paramètre à la fois, PESTPP fait varier un paramètre à calibrer à l'intérieur de limites prédéterminées par l'utilisateur, et fait rouler le modèle hydrogéologique avec le paramètre édité. À chaque itération de la calibration, le modèle est roulé autant de fois qu'il y a de

paramètres à ajuster dans le modèle. Dans le modèle hydrogéologique déterministe régional de Ville Mercier, il y a 712 paramètres dont 577 paramètres ajustables, soit :

- 9 valeurs uniques de Kxy dans les unités hydrostratigraphiques
- 9 valeurs uniques de Kr dans les unités hydrostratigraphiques
- 9 valeurs uniques de coefficients d'emménagement dans les unités hydrostratigraphiques
- 82 valeurs de Kxy des points-pilotes dans la zone de fenêtres au roc dans le Till_4
- 63 valeurs de Kxy des points-pilotes au niveau régional dans le Roc_5
- 183 valeurs de Kxy des points-pilotes au niveau local dans le faciès F1 de l'EsgerSG_3
- 222 valeurs de Kxy des points-pilotes au niveau local dans le faciès F2 de l'EsgerSG_3

PESTPP calcule ainsi la variation qu'un changement de chaque paramètre engendre sur les niveaux d'eau simulés. En comparant les niveaux d'eau simulés aux niveaux d'eau observés, PESTPP évalue l'impact que ce paramètre possède sur l'ensemble du système et propose une nouvelle valeur afin de diminuer les erreurs entre les valeurs simulées et observées pour la mise à jour du modèle. À la fin de chaque itération, PESTPP calcule une fonction objective représentant la somme des erreurs au carré sur toutes les observations afin d'évaluer l'état de la calibration. La calibration est arrêtée lorsque la fonction objective descend sous un seuil critique et cesse de diminuer rapidement entre les itérations.

5.3 Observations utilisées pour la calibration

Plusieurs sources de niveaux d'eau sont disponibles pour permettre la calibration en régime permanent, pour un total de 969 valeurs de niveaux d'eau. La calibration en régime permanent revient à calibrer le modèle lorsque les niveaux d'eau sont représentatifs de l'état le plus stable possible du modèle. Pour chaque puits disponible, l'algorithme suivant a été développé afin de sélectionner le niveau d'eau représentatif du régime permanent :

1. si le puits possède une série temporelle de plus de 10 valeurs, la valeur de niveau d'eau correspondant au 95^e percentile est choisie comme valeur à calibrer,
2. si le puits possède une série temporelle de moins de 10 valeurs, la valeur médiane de niveau d'eau observée est choisie comme valeur à calibrer,
3. si le puits ne possède qu'une seule valeur, celle-ci est retenue comme valeur à calibrer.

La source d'information la plus fiable est la liste de piézomètres dont les mesures de niveaux d'eau sont relevées bi-annuellement par le MELCCFP, comprenant 2 données de niveaux d'eau par année entre 1999 et 2020. Un total de 99 niveaux d'eau provient de cette base de données, pour la plupart situés à l'intérieur d'un rayon de 1 km autour des puits de l'UTES. Le nom « melcc » est attribué à ce groupe d'observations.

Une deuxième source de données de niveaux d'eau provient de lectures de piézométrie et de gradients effectuées à 3 reprises en 1996 par le MELCCFP. En gardant les valeurs maximales de niveaux d'eau à chaque piézomètre, 76 niveaux d'eau sont disponibles localement autour du site de l'UTES. Le nom « 2000nl » est attribué à ce groupe d'observations.

Les chroniques temporelles de onze puits provenant du réseau québécois de suivi sont également disponibles au niveau régional (groupe d'observation « suiviQc »). Encore une fois, les valeurs de niveaux d'eau correspondant au 95^e percentile sont gardées pour la calibration du modèle hydrogéologique en régime permanent.

Les puits du système d'information hydrogéologique (SIH) du MELCC sont également une source importante de niveaux d'eau au niveau régional. Bien que ces données des puisatiers soient entachées d'une plus grande incertitude, cela reste une importante source d'observations servant à la calibration. Un total de 674 niveaux d'eau sont disponibles à partir des puits SIH à l'échelle régionale (groupe d'observations « SIH2 »), dont 45 valeurs provenant d'une étude régionale de Technorem (2008) qui ont été validées et sont donc jugées plus fiables pour la calibration (groupe d'observations « SIH1 »).

111 points de contrôle représentant l'élévation du niveau du sol sont aussi rajoutés à la calibration afin de mieux contrôler les variations des niveaux d'eau aux endroits du modèle où on retrouve peu d'observations du niveau d'eau régionalement. Ces points de contrôle sont assignés au groupe d'observations « Surface » sur une grille régulière au niveau régional afin que les niveaux d'eau du modèle ne dépassent pas le niveau topographique.

Un système de pondération est utilisé pour ajuster le niveau de calibration attendu à chaque donnée de niveau d'eau observé et utilisé pendant la calibration. Un poids important a été assigné aux données considérées les plus fiables et un poids moindre a été assigné aux observations jugées moins fiable pendant la calibration. Les niveaux d'eau des groupes « melcc », « 2000nl », et « suiviQc » sont considérés comme les plus fiables, tandis que des poids moins importants ont été assignés aux observations des groupes « SIH1 » et « SIH2 » pour tenir compte de la plus grande incertitude reliée à leur valeur. Une recherche de doublons a également été effectuée, ce qui a permis de garder un seul puits et d'assigner un poids de zéro (0) au second puits pour éviter une double calibration à des valeurs différentes. La pondération finale a été adaptée pendant le processus de calibration pour que chaque groupe d'observations ait un poids global conséquent pendant la calibration du modèle. La distribution des niveaux d'eau par rapport au niveau moyen des mers à calibrer est présentée aux Figures 31 et 32.

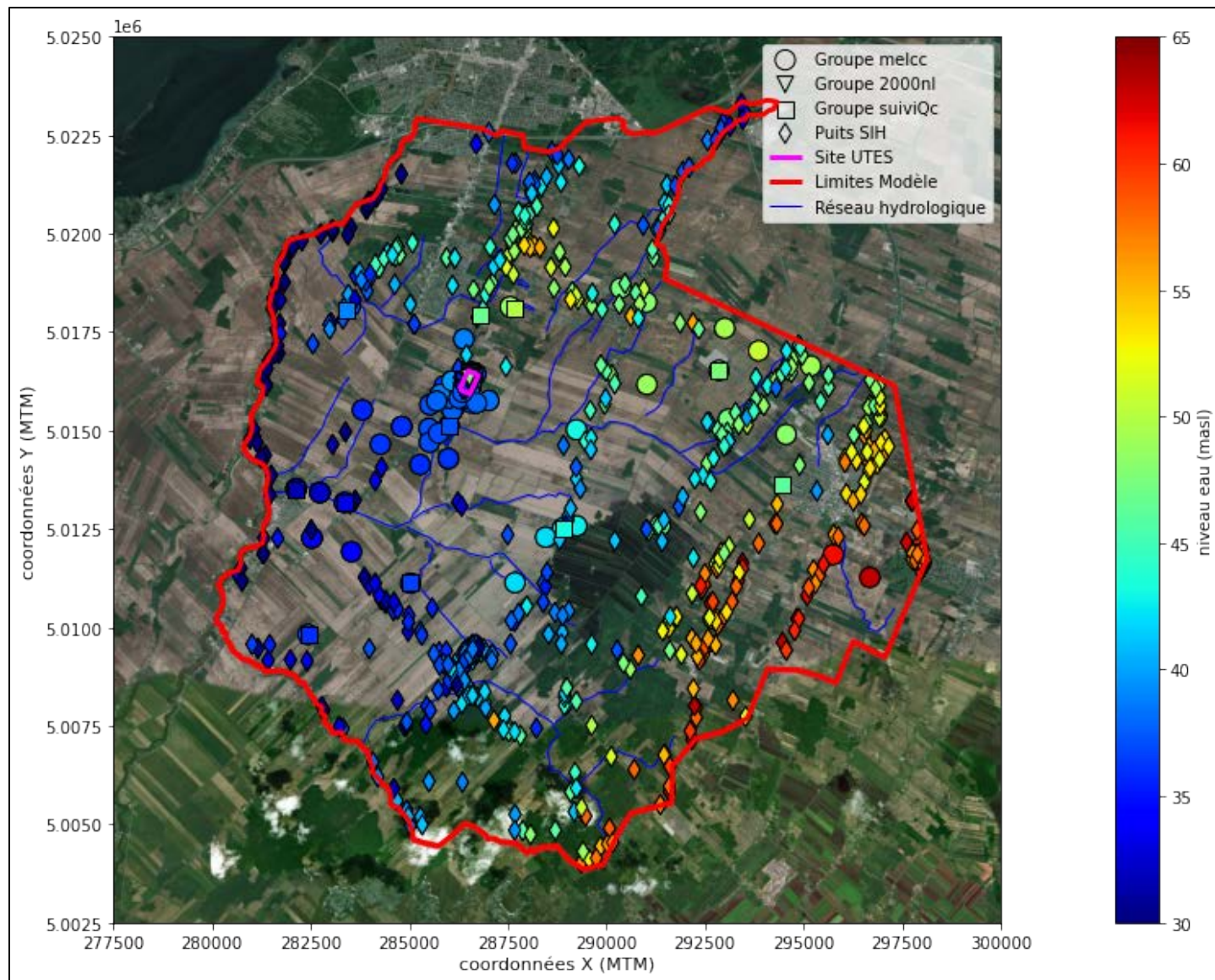


Figure 31. Distribution régionale des niveaux d'eau à calibrer en régime permanent sur le modèle hydrogéologique de Ville Mercier.

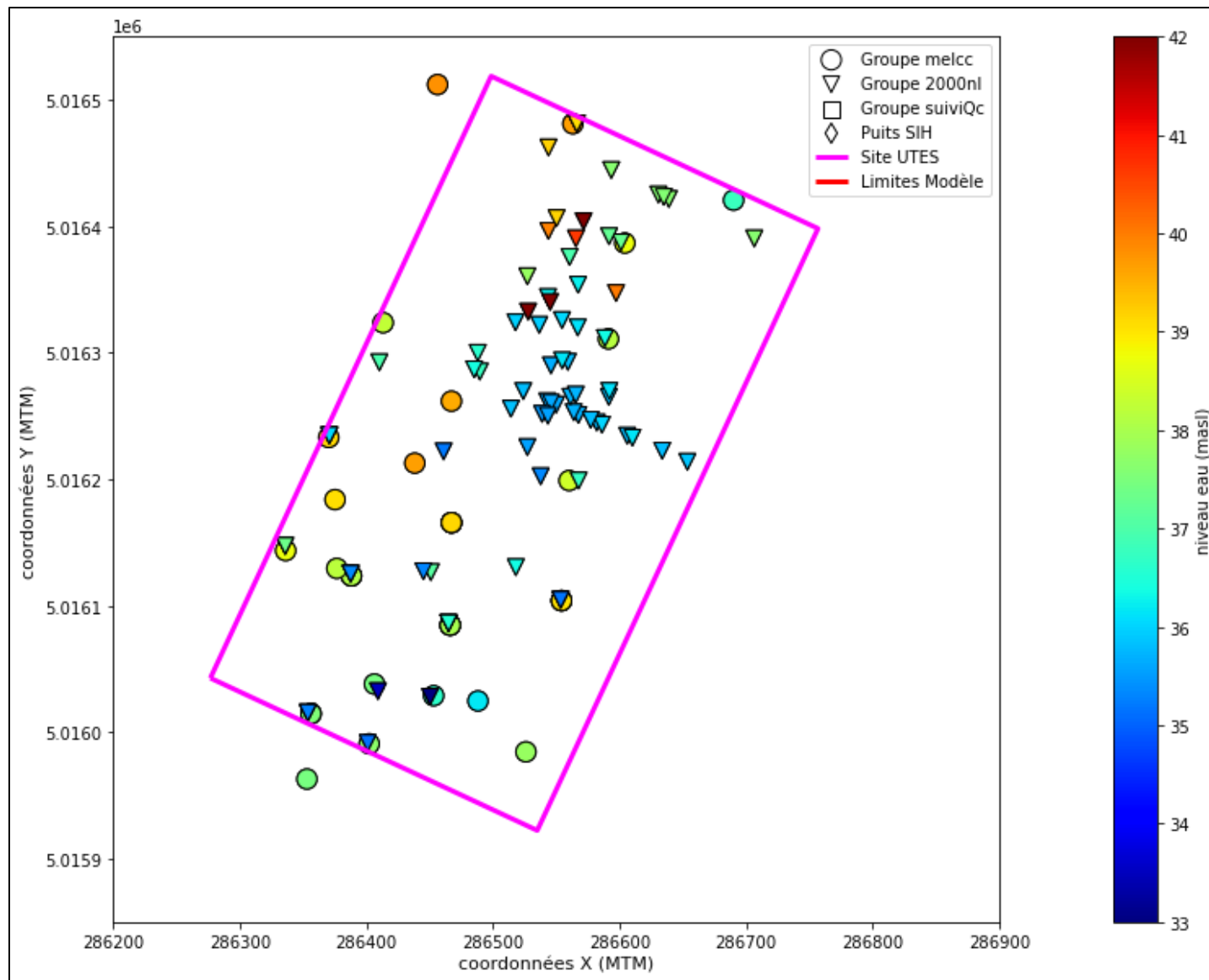


Figure 32. Distribution locale des niveaux d'eau à calibrer en régime permanent sur le modèle hydrogéologique de Ville Mercier.

5.4 Résultats de la calibration

La calibration a permis de diminuer grandement les erreurs moyennes au carré entre les niveaux d'eau observés et ceux simulés (Tableau 7) et d'obtenir des paramètres hydrauliques représentatifs de la situation hydrogéologique régionale autour du domaine modélisé.

Tableau 7. Somme pondérée des erreurs moyennes au carré (SCE) entre les niveaux d'eau observés et niveaux d'eau simulés, selon le groupe d'observation.

Groupe d'observations	Conditions Initiales	Après 1 itération		Après 2 itérations	
	SCE (m2)	SCE (m2)	Variation (%)	SCE (m2)	Variation (%)
melcc	33800	5987	82%	2771	54%
2000nl	13162	2889	78%	2112	27%
suiviQc	405	23	94%	4	82%
SIH1	1530	191	88%	94	51%
SIH2	1277	485	62%	421	13%
surface	98	91	7%	110	-21%
Total	50271	9666	81%	5512	43%

Pour le modèle hydrogéologique déterministe de Ville Mercier, les résultats obtenus après la deuxième itération ont été retenus, car un ralentissement de l'amélioration était évident (variation de 43% de J_2 par rapport à J_1 comparativement de 81% de J_1 par rapport à J_0) et la fonction objective J_2 correspond à 11% de la valeur initiale de la fonction objective, seuil qui fut jugé satisfaisant. L'objectif de la calibration de ce modèle déterministe était surtout de calibrer le modèle à un niveau général adéquat et non pas d'obtenir le meilleur modèle calibré possible, car il était déjà entendu qu'un ensemble de modèles stochastiques sera assimilé en régimes permanent et transitoire.

5.4.1 Comparaison niveaux d'eau observés et niveaux d'eau simulés

Les niveaux d'eau simulés sont comparés aux niveaux d'eau observés avant et après la calibration pour apprécier visuellement les résultats obtenus. Les Figures 33 et 34 montrent les distributions des niveaux d'eau simulés et calibrés régionalement et localement, respectivement.

Au niveau régional, la calibration a été efficace pour améliorer la distribution de niveaux d'eau dans le coin nord-est du domaine de modélisation, où les charges simulées initialement présentaient un biais systématique vers des niveaux d'eau moins élevés. Au niveau local centré sur le site de l'UTES, on voit clairement sur la Figure 34 que la calibration a réussi à enlever le biais systématique qui était présent initialement. La distribution des niveaux d'eau simulés et calibrés représente bien les niveaux d'eau observés.

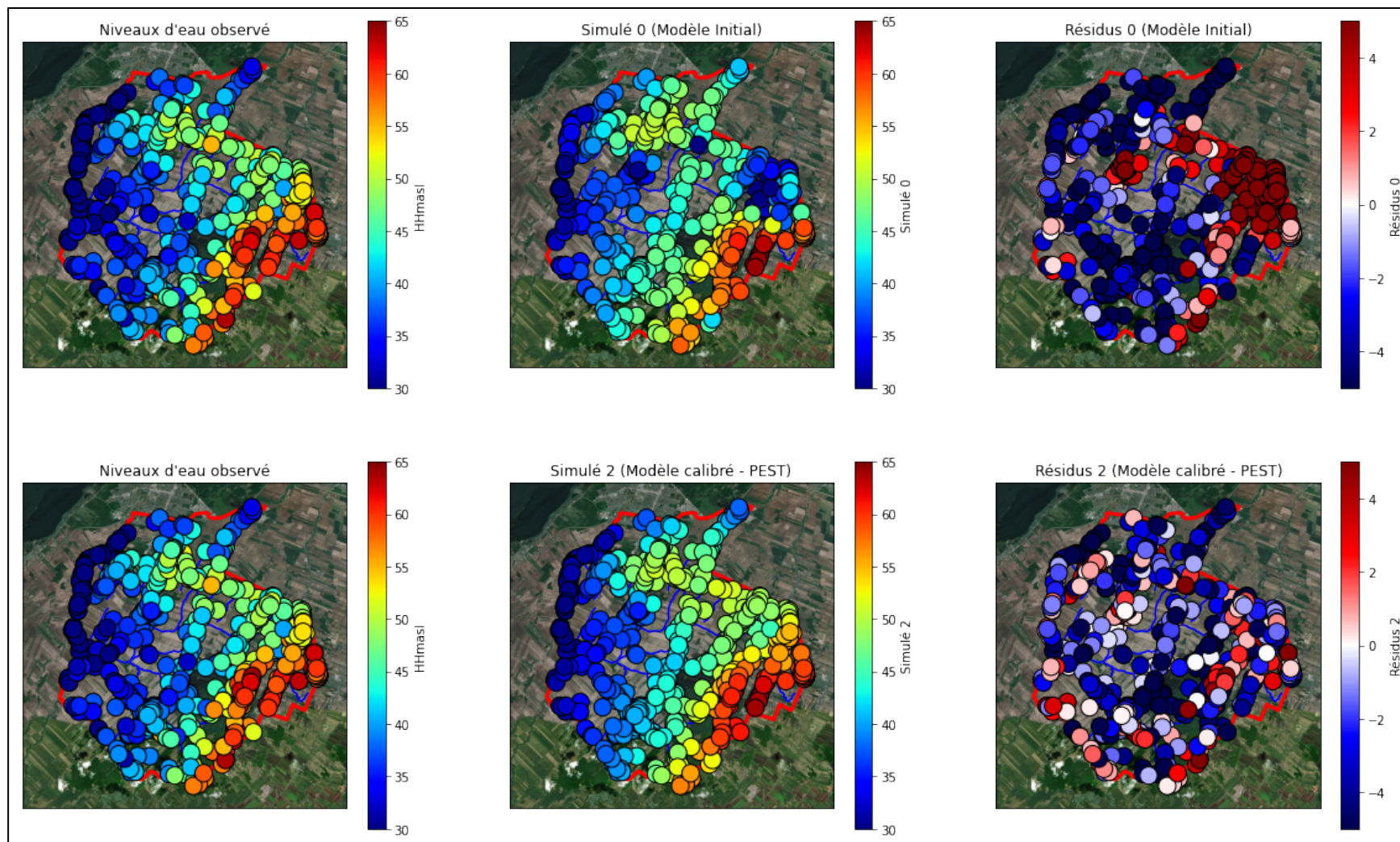


Figure 33. Distribution régionale des niveaux d'eau (en mètres) observés (gauche), simulés avant (centre, haut), et simulés après (centre, bas) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique. Les résidus (niveaux d'eau simulés moins niveaux d'eau observés) sont affichés dans la colonne de droite, avant (droite, haut) et après (droite, bas) la calibration.

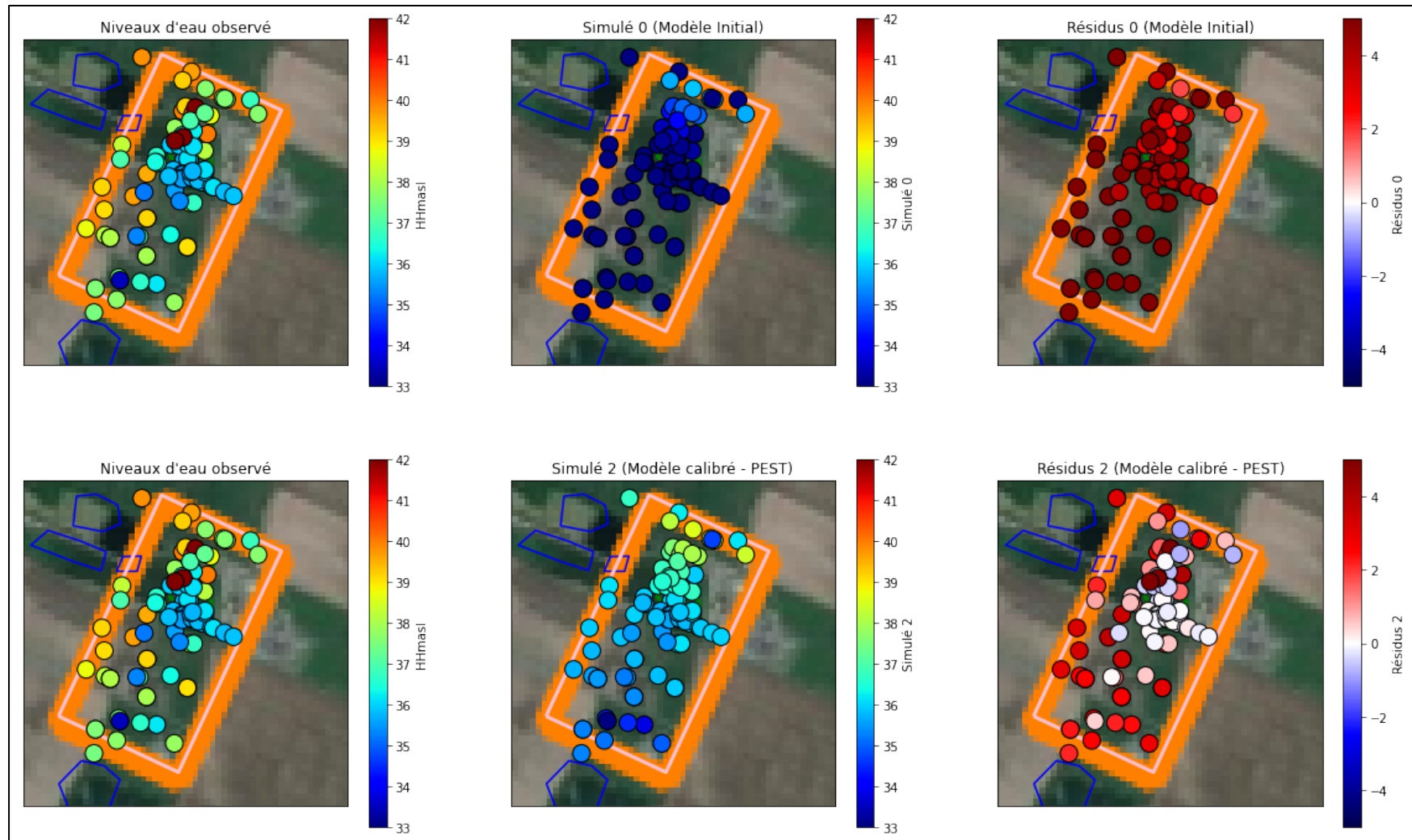


Figure 34. Distribution locale des niveaux d'eau (en mètres) observés (gauche), simulés avant (centre, haut), et simulés après (centre, bas) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique. Les résidus (niveaux d'eau simulés moins niveaux d'eau observés) sont affichés dans la colonne de droite, avant (droite, haut) et après (droite, bas) la calibration.

Les diagrammes croisés des niveaux d'eau simulés versus les niveaux d'eau mesurés (Figure 35) montrent bien le resserrement des valeurs simulées autour de la ligne pointillée représentant la calibration parfaite. Cet ajustement est observé autant pour les valeurs régionales (Figure 35 a,b) que les valeurs locales autour du site de l'UTES (Figure 35 c,d).

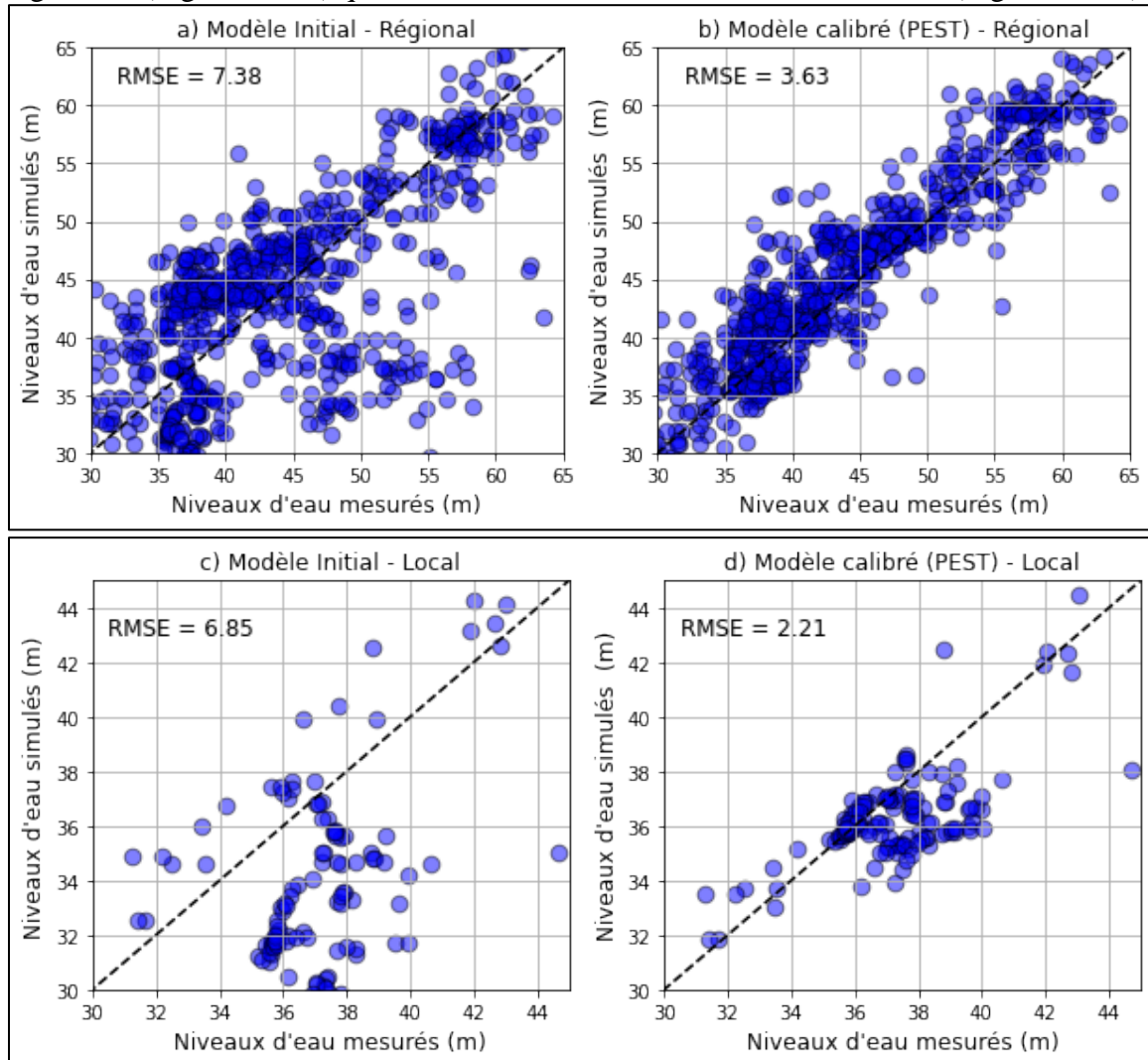


Figure 35. Niveaux d'eau simulés en fonction des niveaux d'eau observés avant (a, c) et après (b, d) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique, pour toutes les observations régionalement (a, b) et localement (c, d).

Les Figures 36 et 37 présentent les boîtes à moustache des résidus (m) et des erreurs (%) avant et après la calibration, permettant de valider les résultats de la calibration obtenue. On voit que l'écart moyen calculé sur le modèle calibré est près de 0m, démontrant que la calibration a permis d'obtenir des résultats sans biais, surtout au niveau local (panneaux de droite). La distribution des erreurs de calibration est également ressermée autour de 0% après la calibration, démontrant que la grande majorité des niveaux d'eau simulés est bien ajustée par la calibration du modèle hydrogéologique déterministe.

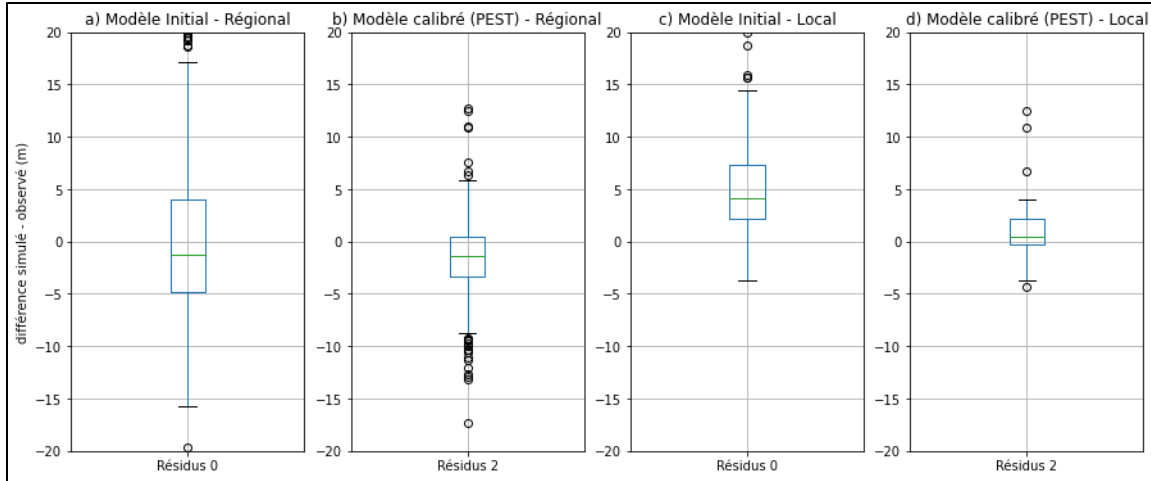


Figure 36. Boîtes à moustache montrant les résidus entre les niveaux d'eau simulés et observés avant (a, c) et après (b, d) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique, pour toutes les observations régionalement (a, b) et localement (c, d). Les ronds représentent les erreurs extrêmes, à plus de 3 écart-types de la moyenne.

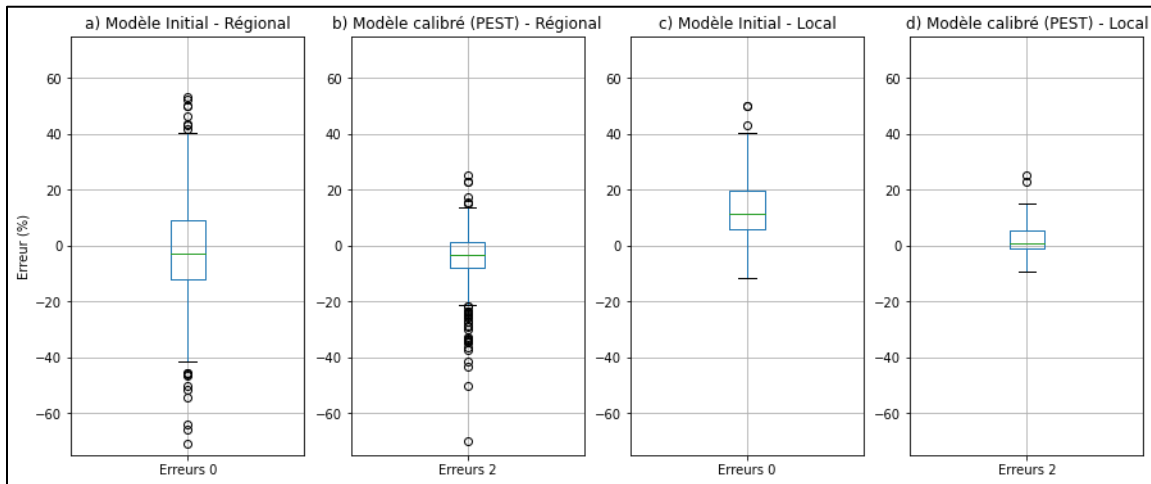


Figure 37. Boîtes à moustache montrant les erreurs de calibration (en pourcentage) sur les niveaux d'eau simulés avant (a, c) et après (b, d) la calibration en régime permanent sur le modèle hydrogéologique, pour toutes les observations régionalement (a, b) et localement (c, d). Les ronds représentent les erreurs extrêmes, à plus de 3 écart-types de la moyenne.

Cependant, autant au niveau régional que local, il reste quelques erreurs élevées à plus de 10% d'écart, qui ne peuvent être réduites davantage à cause de la paramétrisation inadéquate du modèle. Les valeurs uniques et les interpolations spatiales par krigeage de la conductivité hydraulique ne permettent pas suffisamment de flexibilité au modèle afin de représenter toute l'hétérogénéité présente dans le roc et l'unité EskerSG_3.

5.4.2 Distribution spatiale de niveaux d'eau simulés

La distribution spatiale simulée et calibrée des niveaux d'eau dans l'unité Roc_5 au niveau régional est présentée à la Figure 38. Elle est comparable avec la carte piézométrique des niveaux d'eau du roc tracée selon les observations acquises au printemps 2004 provenant du ministère de l'environnement du Québec, maintenant MELCCFP (Figure 39).

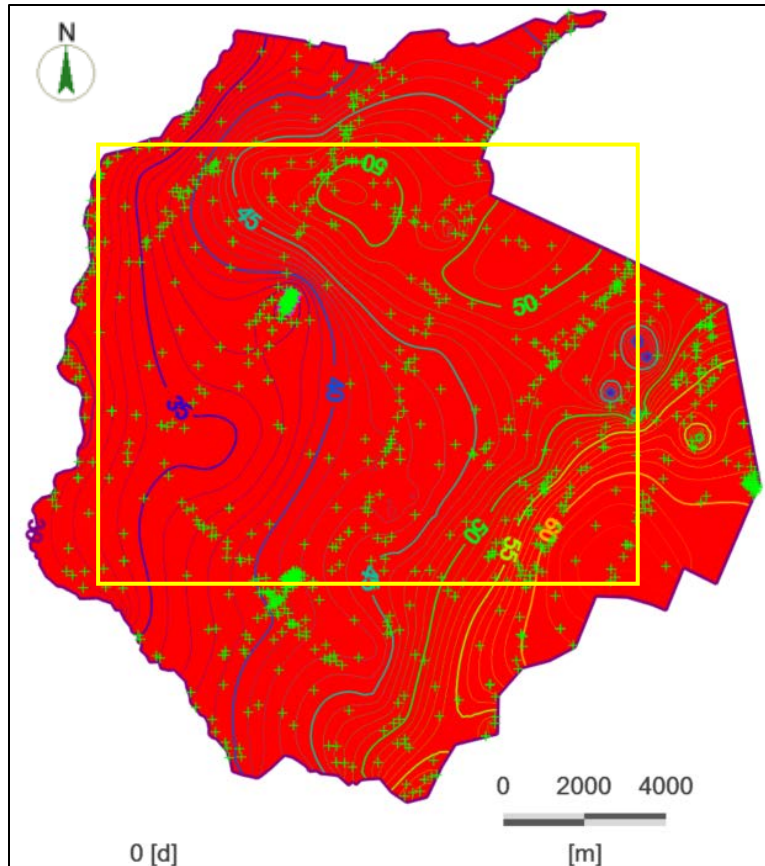


Figure 38. Niveaux d'eau simulés et calibrés dans l'unité Roc_5 au niveau régional, couche 27 du modèle hydrogéologique. Les croix vertes sont la position des observations de niveaux d'eau qui ont servi à la calibration. Les ronds bleus sont les conditions aux frontières associées au roc. Le rectangle jaune délimite la zone représentée sur la Figure 39.

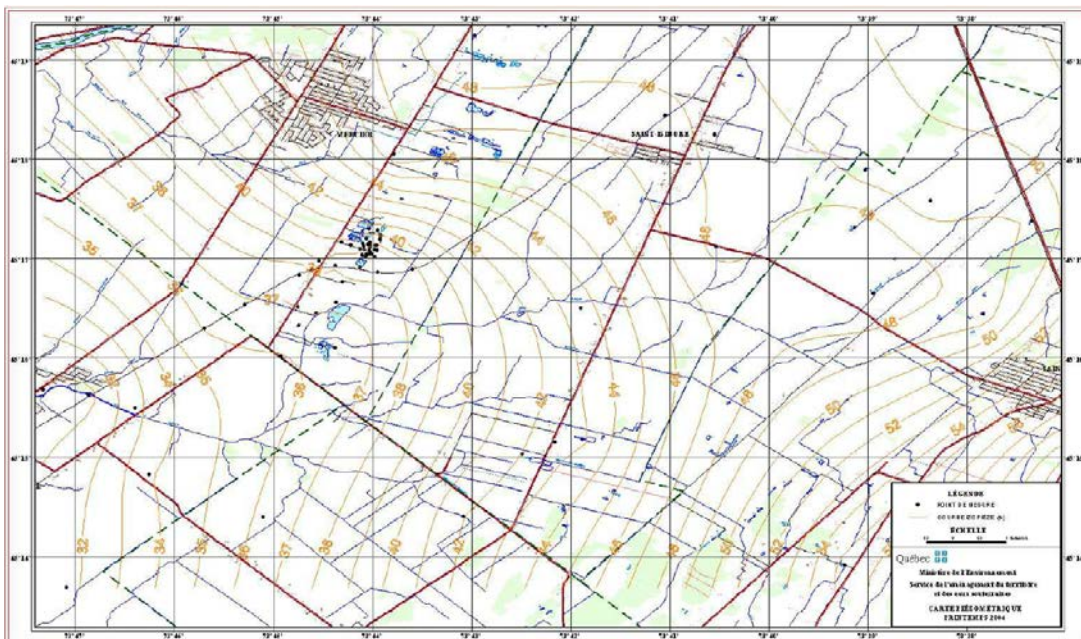


Figure 39. Carte piézométrique dans le roc au printemps 2004, provenant du Service de l'aménagement du territoire et des eaux souterraines du ministère de l'environnement du Québec.

L'écoulement des eaux souterraines dans le roc se fait principalement selon une composante de l'est vers l'ouest et avec une composante du nord vers le sud au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Le point de décharge principal reste la Rivière Châteauguay qui représente la limite ouest du domaine de modélisation. Localement, on voit bien l'influence des puits de pompage de l'UTES, autant pour la distribution des niveaux d'eau dans le roc (Figure 40, gauche) et dans l'unité EskerSG_3 (Figure 40, droite). Le sens d'écoulement des eaux souterraines dans l'esker est du nord vers le sud au site des anciennes lagunes de Ville Mercier.

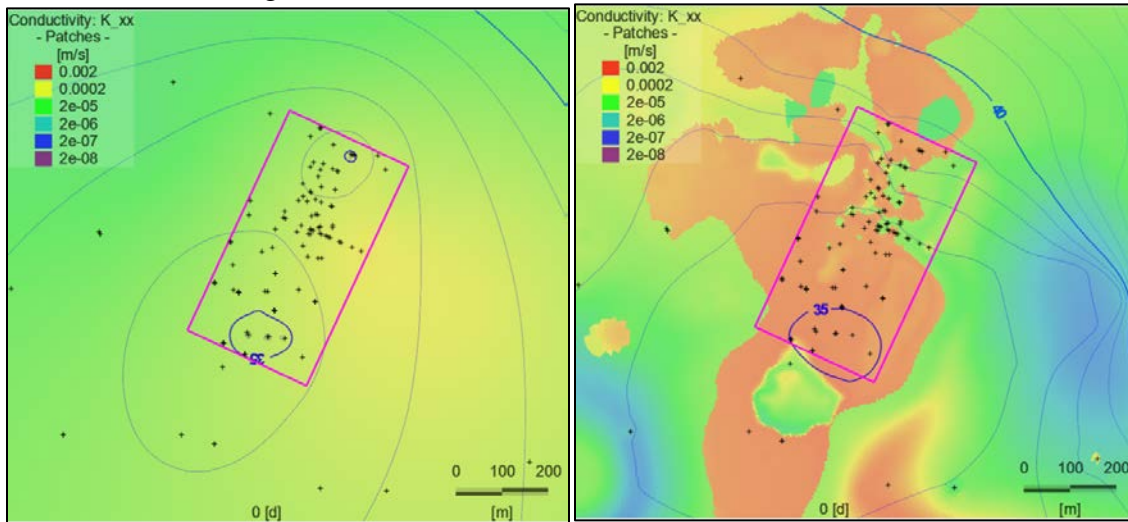


Figure 40. Niveaux d'eau simulés et calibrés dans l'unité Roc_5 (gauche, couche 27) et EskerSG_3 (droite, couche 8) au niveau local. Les points noirs sont la position des observations de niveaux d'eau qui ont servi à la calibration.

5.4.3 Paramètres hydrauliques calibrés

Pour bien juger de la calibration du modèle hydrogéologique régional de Ville Mercier, l'évaluation des erreurs entre les niveaux d'eau mesurés et simulés n'est pas le seul critère à respecter. Les paramètres hydrauliques calibrés doivent être réalistes et situés à l'intérieur de l'intervalle de confiance des valeurs mesurées sur le terrain ou selon les valeurs tirées de la littérature. Le Tableau 8 présente les valeurs de K_{xy} et K_r ($K_r = K_{xy}/K_z$) initialement assignées aux différentes unités hydrostratigraphiques du modèle hydrogéologique et les valeurs de K_{xy} et K_r calibrées après deux itérations.

Tableau 8. Valeurs de K_{xy} et K_r initialement assignées et calibrées aux différentes unités hydrostratigraphiques du modèle hydrogéologique régional.

Unité	Modèle Initial		Modèle calibré	
	K_{xy} (m/s)	K_r (-)	K_{xy} (m/s)	K_r (-)
Remblai & Organique	5.0×10^{-5}	2	1.4×10^{-5}	1.0
Argile	6.0×10^{-8}	10	2.0×10^{-7}	45.6
F1_Esker	2.0×10^{-4}	10	5.0×10^{-3}	1.2
F2_SG	2.0×10^{-5}	10	3.8×10^{-4}	1.0
Till remanié	2.5×10^{-5}	100	1.4×10^{-4}	147.5
Till intact	1.0×10^{-7}	100	6.1×10^{-7}	61.4
Roc fracturé	5.0×10^{-5}	10	5.6×10^{-5}	62.6
Roc sain	1.0×10^{-7}	2	2.5×10^{-6}	2.0

La calibration des valeurs de K_r fluctue pour chaque unité hydrostratigraphique. Le K_r pour l'Argile_2 tend à monter, suggérant une valeur de K_z plus faible qu'anticipée. À l'opposé, les ratios K_r des faciès de l'unité EskerSG_3 tendent à baisser vers la valeur unitaire, suggérant une très faible anisotropie verticale générale dans cette unité. Les valeurs de K_r dans les tills et le roc fracturé restent à des valeurs entre 60 et 150, démontrant une anisotropie verticale importante pour ces unités.

On remarque que le modèle initial avait une tendance à sous-estimer les valeurs de K_{xy} , qui furent pour la plupart assignées à des valeurs plus élevées par le modèle calibré. Il faut noter que les valeurs de K_{xy} dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3 et de l'unité de roc fracturé Roc_5 sont des valeurs ayant une très faible influence sur le modèle car les valeurs de K_{xy} sont plutôt assignées à une distribution spatiale par krigeage à partir des points mesurés et autres points pilotes. Les distributions spatiales de K_{xy} initialement assignées et calibrées dans les différentes zones du modèle hydrogéologique sont présentées dans les histogrammes de la Figure 41. D'une valeur initiale arbitrairement choisie de 1×10^{-6} m/s, les valeurs de K_{xy} sur les points-pilotes placés dans la zone de fenêtre potentielle au roc du till ont légèrement diminué pendant la calibration, pour atteindre une valeur moyenne de 9.1×10^{-7} m/s, avec une valeur minimale de 1.6×10^{-7} m/s et une valeur maximale de 5.3×10^{-6} m/s. Considérant la valeur de K_r calibrée pour le till intact de 61.4 (Tableau 8), cela équivaut à des K_z variant entre 2.6×10^{-9} m/s à 8.6×10^{-8} m/s, avec une valeur moyenne de 1.5×10^{-8} m/s dans la zone de fenêtre potentielle au roc du till, des valeurs légèrement supérieure aux valeurs calibrées régionalement dans le till intact ($K_{xy} = 6.1 \times 10^{-7}$ m/s, $K_r = 61.4$, $K_z = 9.9 \times 10^{-9}$ m/s selon le Tableau 8). Ces résultats suggèrent qu'une connexion hydraulique est possible entre l'EskerSG_3 et le roc dans certaines zones à travers le till, mais que cette connexion hydraulique reste relativement restreinte (K_z maximal de 8.6×10^{-8} m/s).

La distribution des valeurs de K_{xy} dans le roc avant et après calibration (Figure 41, en haut à droite) montre que les valeurs krigées initiales (histogramme bleu) étaient généralement représentative de la distribution spatiale de K_{xy} au niveau régional, car la distribution de K_{xy} après calibration a peu bougé. Les valeurs sont très dispersées et s'étendent sur trois ordres de grandeur. La valeur moyenne de K_{xy} calibrée dans le roc au niveau régional est de 2.0×10^{-5} m/s, avec une valeur minimale de 3.8×10^{-7} m/s et une valeur maximale de 5.0×10^{-4} m/s.

Les distributions de K_{xy} dans les deux faciès de l'unité EskerSG_3 (Figure 41, en bas) montrent des valeurs de K_{xy} très élevées dans le faciès F1, avec une valeur moyenne de 5.5×10^{-4} m/s, une valeur minimale de 7.4×10^{-5} m/s et une valeur maximale de 1.0×10^{-3} m/s. Bien que légèrement moins fortes, les valeurs de K_{xy} dans le faciès F2 sont aussi élevées, avec une valeur moyenne de 4.6×10^{-5} m/s, une valeur minimale de 6.0×10^{-6} m/s et une valeur maximale de 7.2×10^{-4} m/s.

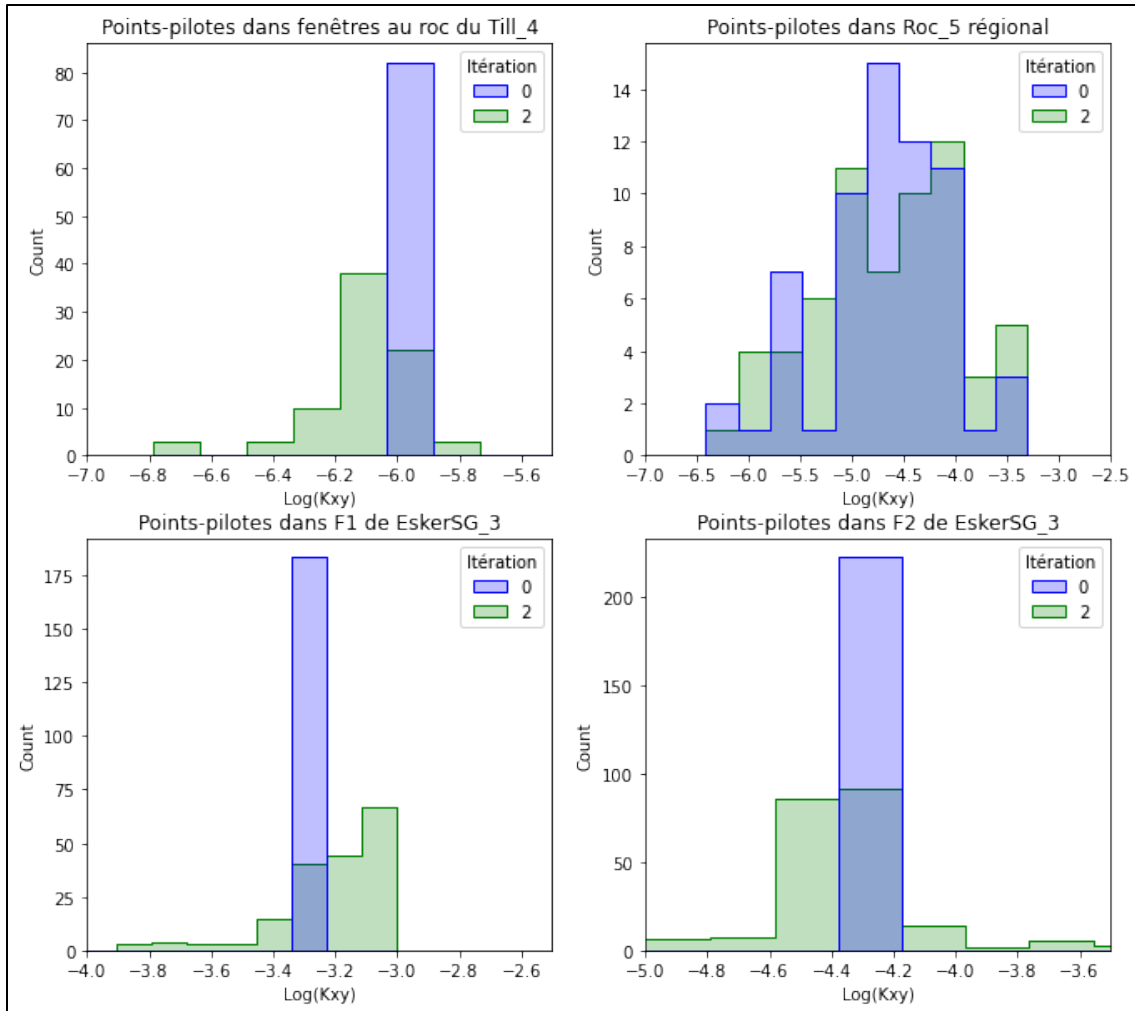


Figure 41. Distributions des conductivités hydrauliques calibrées sur les points-pilotes, avant (0 : bleu) et après (2 : vert) la calibration du modèle par PEST.

La distribution spatiale de Kxy dans la zone de fenêtre au roc (Figure 42) démontre des zones montrant des valeurs de Kxy légèrement plus élevées et continues dans la zone analysée (Figure 42). Cela est une indication que la fenêtre au roc n'est pas continue dans la zone analysée et qu'il pourrait y avoir des échanges limités des eaux souterraines entre le roc et l'esker à ces endroits précis, car les valeurs calibrées de Kxy dans ces zones ne dépassent pas 5.3×10^{-6} m/s.

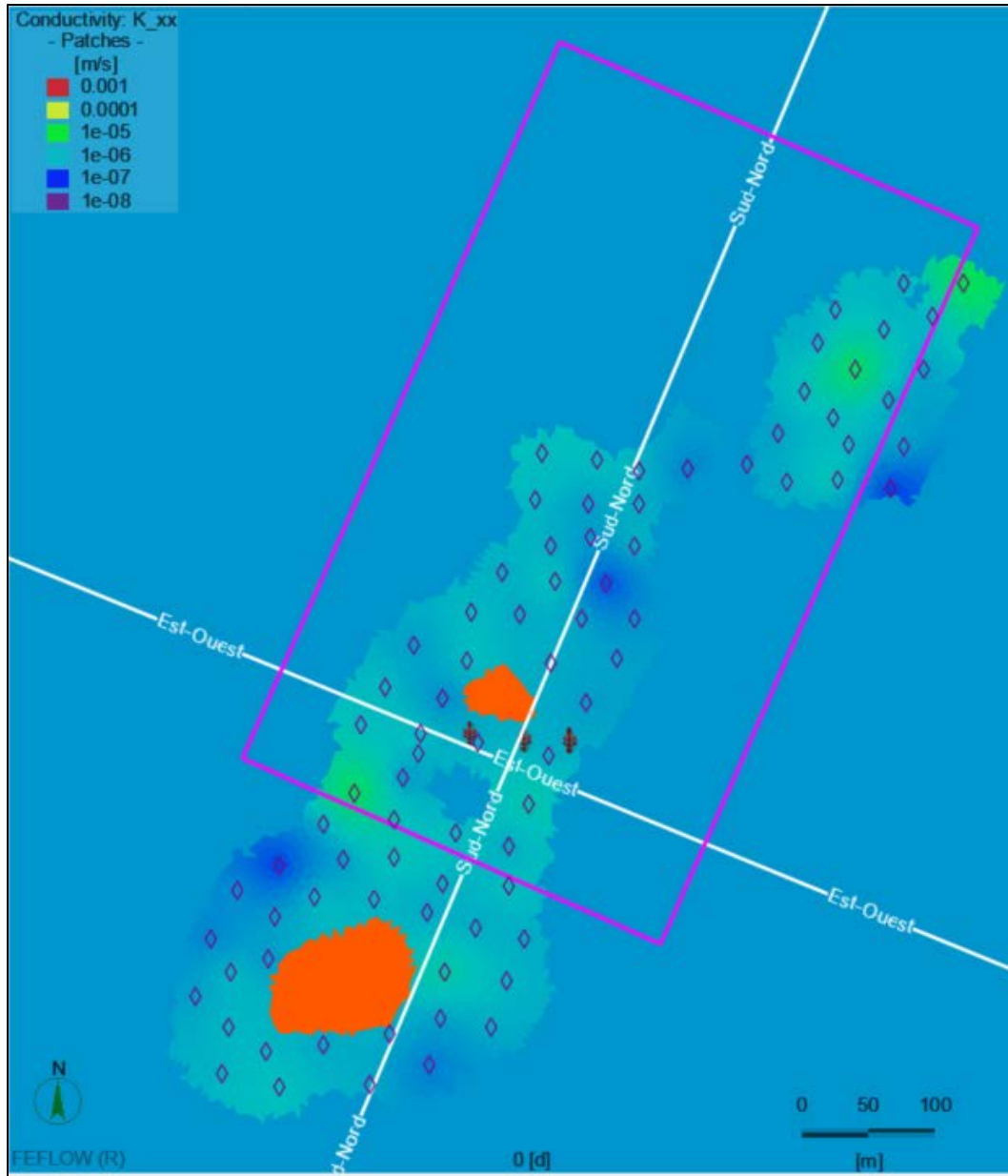


Figure 42. Distribution spatiale de K_{xy} calibrée localement dans la fenêtre potentielle au roc dans l'unité Till_4, avec la position des points-pilotes (losanges vert). Les zones oranges sont les fenêtres au roc provenant du modèle conceptuel. Les symboles marrons représentent les 3 puits de l'UTES. Le rectangle rose est le site de l'UTES. Les lignes blanches sont la position des profils verticaux de la Figure 45.

La distribution de K_{xy} calibrée régionalement dans l'unité Roc_5 (en haut à droite de la Figure 41) montre que les valeurs régionales de K_{xy} restent assez élevées dans l'unité, tout en conservant une certaine variation spatiale (Figure 43). Les valeurs de K_{xy} ainsi calibrées dans ce modèle déterministe représentent seulement l'hétérogénéité horizontale de K_{xy} , mais ne permettent pas de représenter l'hétérogénéité verticale de K_{xy} connue pour être assez élevée dans l'unité du Roc_5.

La distribution spatiale de K_{xy} calibrée dans l'unité Roc_5 est représentative des variations générales de la conductivité hydraulique dans l'aquifère régional de roc fracturé, mais ne permet pas de représenter toutes les variations locales et verticales de K_{xy} au niveau du site de l'UTES. Un ensemble de réalisations stochastiques 3D de K_{xy} au niveau local a été utilisé dans une seconde phase de calibration de K_{xy} dans le roc par les méthodes d'ensemble.

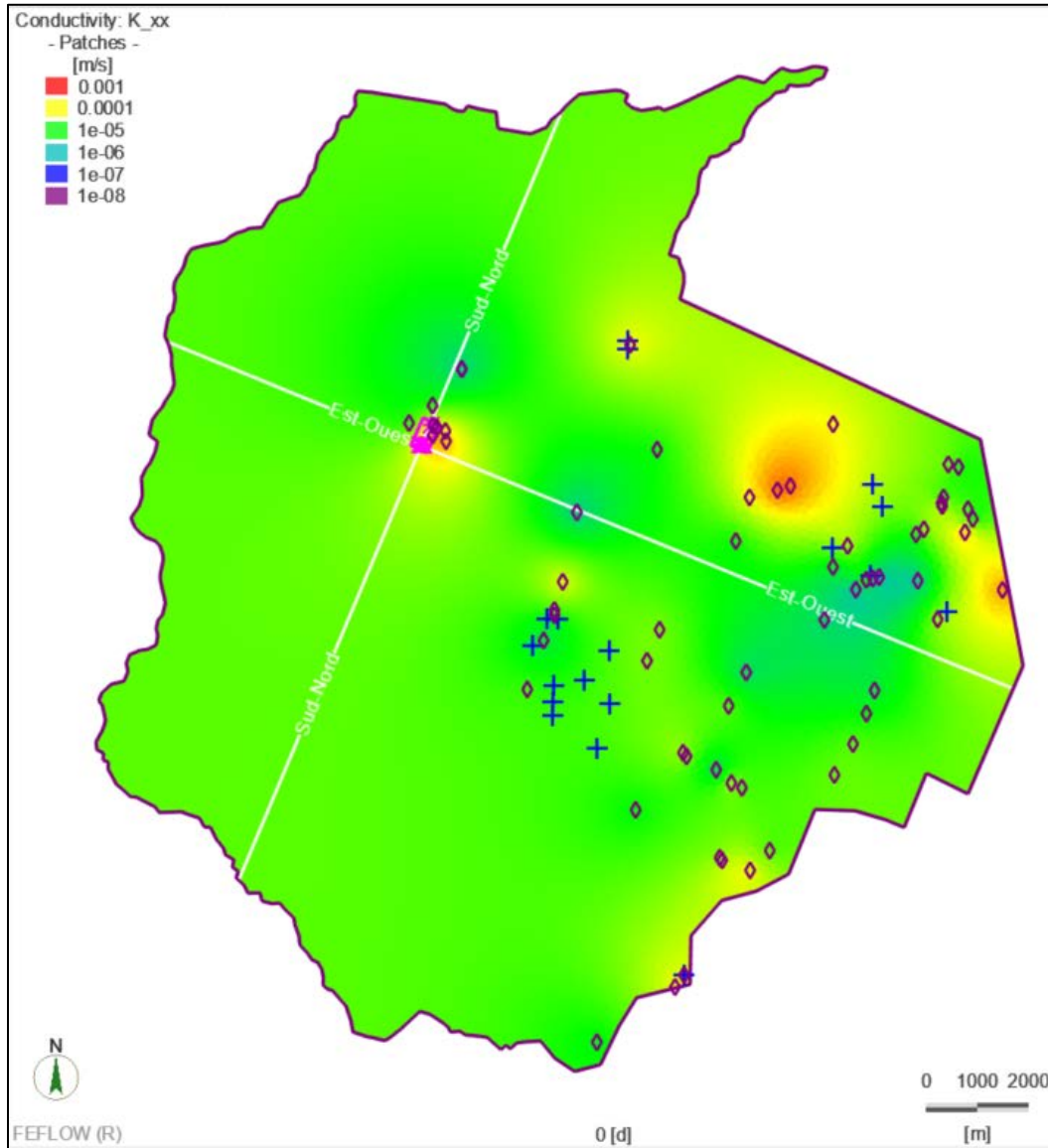


Figure 43. Distribution spatiale de K_{xy} calibrée régionalement dans le roc, avec la position des points-pilotes (losanges marrons). Les croix bleues représentent les grands utilisateurs d'eau. Le rectangle rose est le site de l'UTES. Les lignes blanches sont la position des profils verticaux de la Figure 45.

La calibration de K_{xy} dans les faciès F1 (Figure 41, en bas, à gauche) et F2 (Figure 41, en bas, à droite) de l'unité EskerSG_3 montre l'importance de la représentation de K_{xy} par une distribution spatiale de valeurs. Alors qu'une valeur unique était utilisée comme valeur initiale de K_{xy} à tous les points-pilotes dans les deux faciès, la calibration a engendré des valeurs très hétérogènes de K_{xy} dans les deux faciès. Les valeurs de K_{xy} ont tendance à

augmenter dans le faciès F1 tandis qu'elles ont tendance à diminuer dans le faciès F2 de l'EskerSG_3. La Figure 44 présente la distribution spatiale de Kxy calibrée dans les deux faciès dans la couche 12 du modèle hydrogéologique, avec la position de deux sections verticales de Kxy qui sont présentées à la Figure 45.

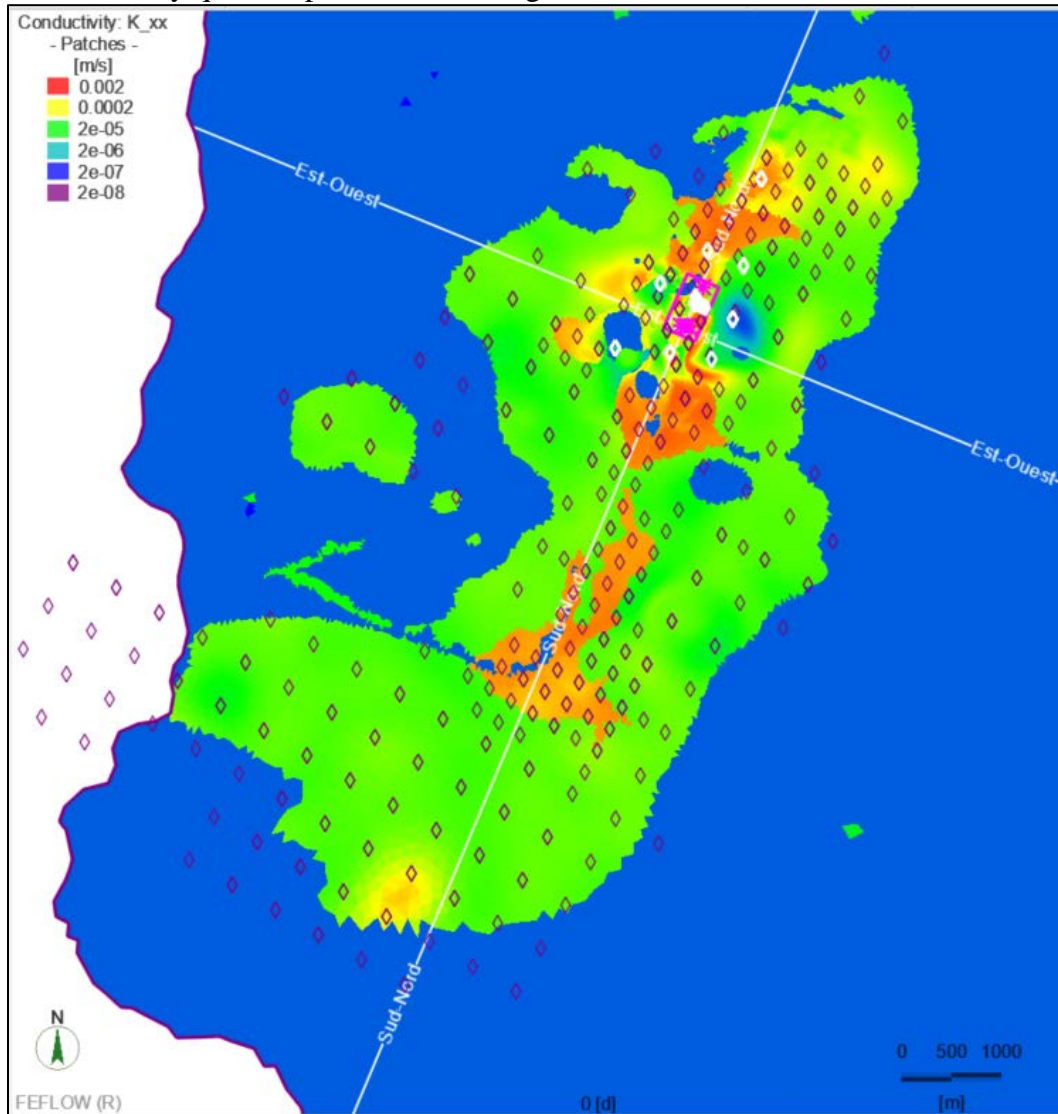


Figure 44. Distribution spatiale de Kxy calibrée localement dans les faciès F1 et F2 dans une couche de l'unité EskerSG_3, avec la position des points de mesure (losanges blancs) et des points-pilotes (losanges marrons). Le rectangle rose est le site de l'UTES.

Les profils verticaux de Kxy dans l'unité EskerSG_3 démontrent bien le niveau important d'hétérogénéité verticale (Figure 45). L'interprétation des résultats de la calibration du modèle hydrogéologique déterministe en régime permanent semble indiquer que le niveau d'hétérogénéité spatiale et verticale de Kxy est plus élevé que ce qui est possible de représenter avec des valeurs uniques et une interpolation spatiale par krigeage. Afin d'améliorer la représentation hétérogène de Kxy, une seconde phase de calibration a été effectuée en régime transitoire, sur un ensemble de modèles hydrogéologiques hétérogènes de Kxy par les méthodes d'ensemble, les détails se trouvent au chapitre 6.

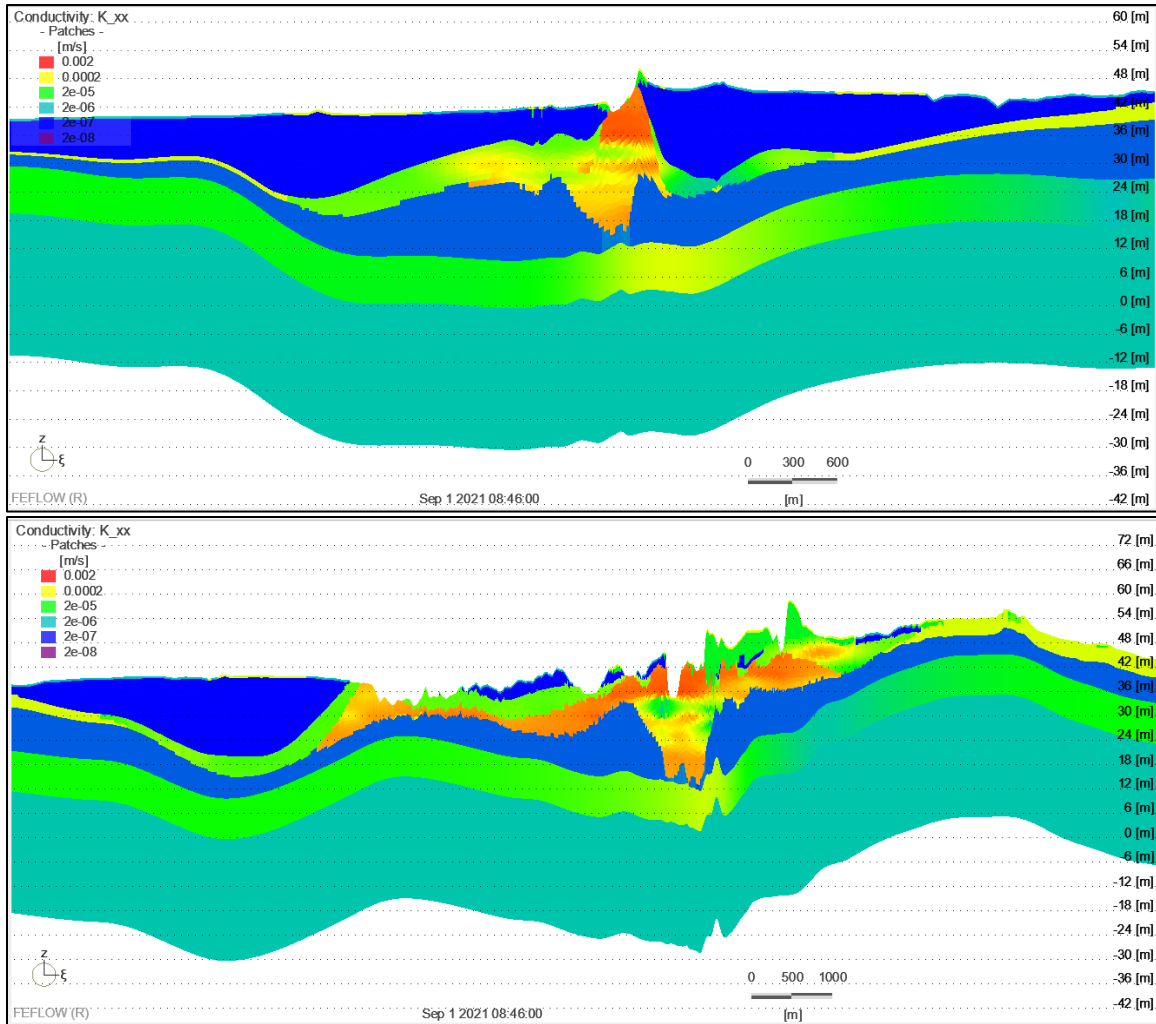


Figure 45. Sections verticales Est-Ouest (en haut) et Sud-Nord (bas) de la Figure 44 montrant la distribution spatiale de K_{xy} calibrée localement dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3 et du Roc_5.

5.5 Étude de sensibilité

L'étude de la sensibilité des paramètres permet de juger de l'importance de chacun des paramètres calibrés sur la fonction objective (Tableau 9).

Tableau 9. Sensibilité des paramètres hydrauliques calibrés sur la fonction objective

Unité	Sensibilité (-)	
	K_{xy} (-)	K_r (-)
Remblai & Organique	0.0307	0.0033
Argile	0.0087	0.0071
F1_Esker	0.0100	0.0070
F2_SG	0.0082	0.0028
Till remanié	0.0203	0.0014
Till intact	0.0547	0.0554
Roc fracturé	0.0007	0.0026
Roc sain	0.0088	0.0010

Une forte valeur de sensibilité indique une forte influence sur le calcul des erreurs et pour la construction de la fonction objective.

L'analyse de sensibilité indique que les valeurs de K_{xy} dans le till, dans la couche superficielle, et dans le faciès F1 de l'EskeSG_3 sont les valeurs de conductivité hydraulique ayant la plus forte influence sur les valeurs de la calibration. La sensibilité du roc reste basse malgré son importance dans le modèle régional car sa valeur a plutôt été calibrée par une distribution spatiale régionale sur des points-pilotes.

Concernant les ratios de conductivité K_r , tous semblent avoir une faible importance, à l'exception de ratio de K_r dans le till, qui a une importante sensibilité. Ce paramètre semble en effet jouer un rôle substitut pour évaluer la connexion hydraulique entre l'aquifère local de l'EskeSG_3 et l'aquifère régional du Roc_5. Le ratio K_r du till restant élevé, lié avec sa sensibilité importante semble indiquer que la connexion hydraulique reste possible, mais limitée entre les deux aquifères aux endroits où le till est présent.

6 Assimilation des modèles stochastiques en régime transitoire

La variabilité horizontale et verticale de K_{xy} dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3 et dans le roc doit être représentée de façon plus réaliste localement afin de dépeindre adéquatement l'hétérogénéité existante. Cette variabilité spatiale de K_{xy} est exprimée par un ensemble de réalisations géostatistiques dont les paramètres hydrauliques ont été mis à jour par l'assimilation d'observations de niveaux d'eau en régime transitoire par la méthode de lissage d'ensemble itératif (iES pour iterative ensemble smoother) telle qu'implémentée dans le logiciel PestPP-iES. Deux essais de pompage complétés au droit du site des anciennes lagunes de Ville Mercier sont utilisés pour la calibration transitoire. Pour chaque essai de pompage, les chroniques temporelles des niveaux d'eau observés pendant l'essai sont assimilées afin de mettre à jour les paramètres hydrauliques.

6.1 Assimilation par méthode de lissage d'ensemble

L'assimilation par méthode iES permet de mettre à jour les paramètres hydrauliques à partir d'un ensemble de réalisations du modèle hydrogéologique en assimilant en une étape les multiples pas de temps des séries temporelles de niveaux d'eau observés en réponse à un ou des essais de pompage. Le schéma d'un cycle complet d'assimilation de données par méthode d'ensemble est présenté à la Figure 46. Le cycle commence par la simulation numérique d'un ensemble initial (E^a) de modèles hydrogéologiques sur lesquels des scénarios de pompage ont été simulés, représentant l'étape de prédiction (H) du cycle. On obtient les niveaux d'eau simulés (E^f) qui sont comparés avec les niveaux d'eau observés (y) à tous les pas de temps. En comparant les niveaux d'eau simulés (E^f) et observés (y), on calcule le filtre de Kalman (K) qui permet la mise à jour des paramètres hydrauliques des modèles hydrogéologiques (E^a), qui sont utilisés comme points de départ pour la prochaine itération du cycle.

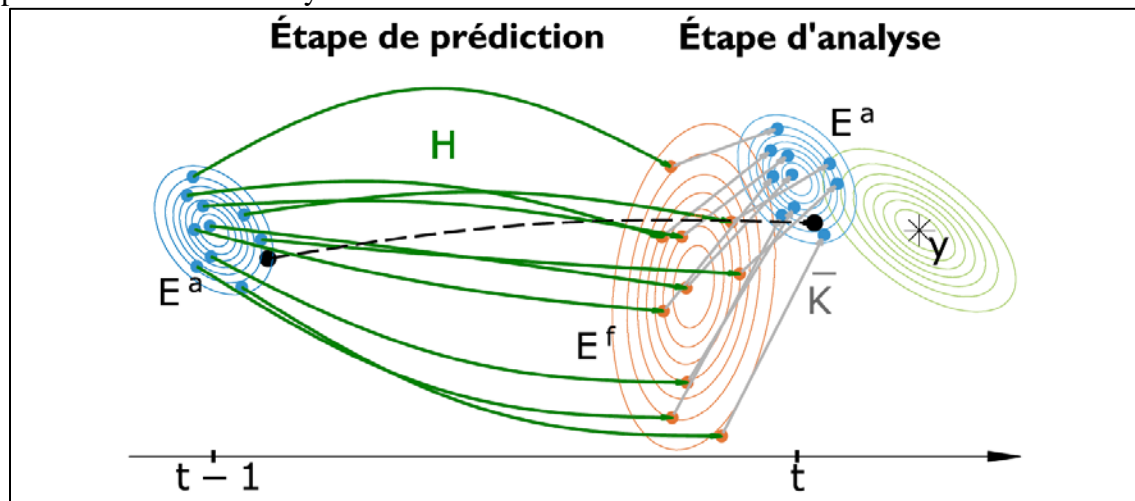


Figure 46. Schéma complet d'assimilation des données par méthodes d'ensemble. Figure extraite de Béraud (2022), modifiée de Raanes (2005).

Le schéma de la mise à jour des paramètres par la méthode iES est montré à la Figure 47, extraite de la thèse de doctorat de Béraud (2022), et adapté de Evensen (2009).

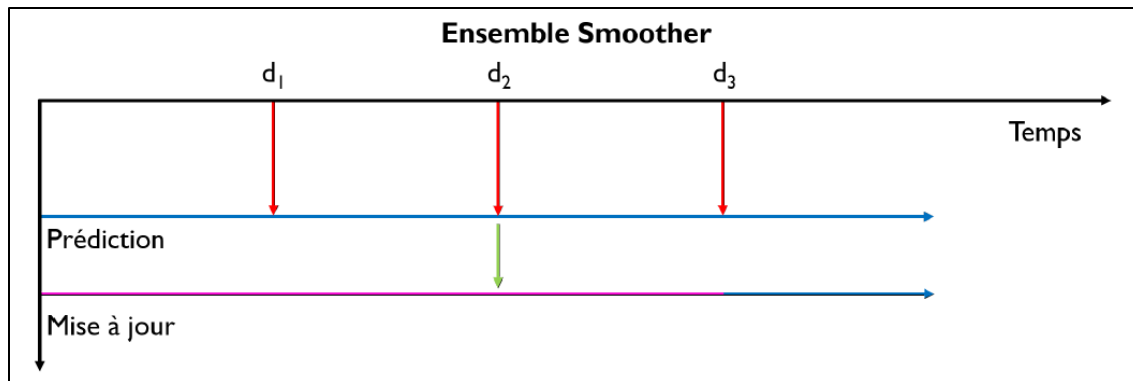


Figure 47. Schéma de la mise à jour dans la méthode de lissage d'ensemble itératif. L'axe horizontal montre le pas d'échantillonnage des mesures temporelles. L'axe vertical est l'axe des mises à jour. La flèche bleue représente la simulation hydrogéologique de l'ensemble avec l'assimilation des observations temporelles (flèches rouges). La flèche rose est l'ensemble mis à jour par la flèche verte. Figure extraite de Béraud (2022), modifiée de Evensen (2009).

Afin d'utiliser les méthodes d'assimilation par lissage d'ensemble itératif, il faut :

- Un ou des paramètres hydrauliques possédant une distribution stochastique de ses valeurs ;
- Un ou des essais de pompage avec un ou plusieurs puits d'observations des niveaux d'eau permettant de relier le stress induit dans le système aux fluctuations observées des niveaux d'eau ;
- Un ensemble de poids indiquant l'erreur sur les observations nécessaires à la mise à jour des paramètres.

6.2 Hypothèses d'assimilation

Deux modèles, en régime permanent et en régime transitoire, ont été roulés afin de calculer le niveau d'eau de base (permanent) avant de débiter les essais de pompage. L'état de régime permanent avant le premier essai de pompage utilisé était différent de l'état de régime permanent utilisé dans la calibration du modèle déterministe. Les observations provenant des puits SIH et des points de surface ont été retirées de la liste d'observations à calibrer. Ces observations sont surtout situées régionalement, et le but de cette assimilation par iES est de mettre à jour les paramètres localement.

Contrairement au modèle déterministe qui était calculé en conditions saturées et confinées car l'objectif était de calibrer au niveau régional, les modèles sont calculés en conditions non-saturées et non-confinées avec l'équation de Richard (1931) afin de représenter réalistement les fluctuations de niveaux d'eau de faible amplitude en relation aux essais de pompage utilisés pour la calibration en régime transitoire au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Afin d'assurer une bonne intégration des niveaux d'eau simulés en régime permanent et leur variation en régime transitoire, le modèle hydrogéologique en régime permanent est aussi roulé en conditions non-saturées et non-confinées. Un modèle empirique linéaire a été utilisé afin d'approximer les degrés de saturation, permettant aussi de limiter les problèmes de convergence rencontrés lors des tests effectués avec les paramètres de Van Genuchten. Les paramètres du modèle linéaire sont les suivants :

- seuil de pression minimal (« Threshold Pressure Head », paramètre Feflow Ψ_l) de -25m,
- pression d'entrée d'air (« Air-Entry Pressure Head », paramètre Feflow Ψ_a) de 0m,

- saturation maximale (paramètre $F_{flow\ s_s}$) de 100%, et
- saturation résiduelle (paramètre $F_{flow\ s_r}$) de 0.25%.

Le seuil de pression d'entrée d'air est faible et a pour impact de désaturer le modèle plus tôt qu'en réalité. La valeur faible de saturation résiduelle peut libérer plus d'eau par unité de diminution de charge hydraulique pour la zone non-saturée. Cependant, leurs impacts sont considérés négligeables pendant l'assimilation car les variations de charges hydrauliques dans le modèle à calibrer sont généralement faibles.

Aucune recharge n'est appliquée pendant le régime transitoire. Les essais de pompage utilisés pour la calibration sont trop courts pour que la recharge ait un impact significatif sur les fluctuations des niveaux d'eau simulés. Ces hypothèses ne sont probablement pas 100% valides, car des précipitations importantes ont eu lieu pendant les deux essais de pompage utilisés. La modélisation exacte des précipitations et leur impact temporel sur la recharge en eau souterraine associée sont toutefois trop difficiles à représenter de façon réaliste. L'utilisation d'une recharge nulle est l'hypothèse conservatrice qui a été privilégiée.

Une erreur de convergence assez permissive de 1×10^{-3} est utilisée pour la convergence des modèles numériques, permettant de rouler un ensemble de modèles en évitant les problèmes de convergence. L'utilisation d'une erreur de convergence permissive est une pratique courante avec les méthodes d'ensemble, car le but est de rouler un ensemble de réalisations plausibles et non d'obtenir le modèle le plus précis possible.

Les modèles qui prennent plus de 90 minutes à rouler (soit deux fois plus que le temps moyen de simulation des modèles en régime permanent et régime transitoire) sont rejetés du système de calibration. Un modèle qui roule pendant aussi longtemps est indicatif d'un problème de convergence, signifiant que la distribution spatiale de K_{xy} de cette réalisation ne permet pas de représenter les essais de pompage utilisés pendant la calibration.

Puisque le processus d'assimilation repose sur deux essais de pompage localisés au droit des anciennes lagunes de Ville Mercier, un choix a été fait de mettre à jour uniquement les paramètres de K_{xy} et de coefficients d'emmagasinement (S) localement autour du site. Pour exprimer l'hétérogénéité qui existe localement, et permettre la calibration locale du modèle en régime transitoire, des simulations géostatistiques 3D de K_{xy} ont été calculées dans une portion locale de l'unité du Roc_5, et dans les faciès F1 et F3 de l'unité EskerSG_3. Les valeurs de K_{xy} des autres unités hydrostratigraphiques sont gardées fixes aux valeurs calibrées du modèle déterministe, et n'ont pas été mises à jour par la méthode iES.

La région locale où les simulations géostatistiques sont calculées est une région circulaire de rayon de 2km centrée sur le site de l'UTES (Figure 48).

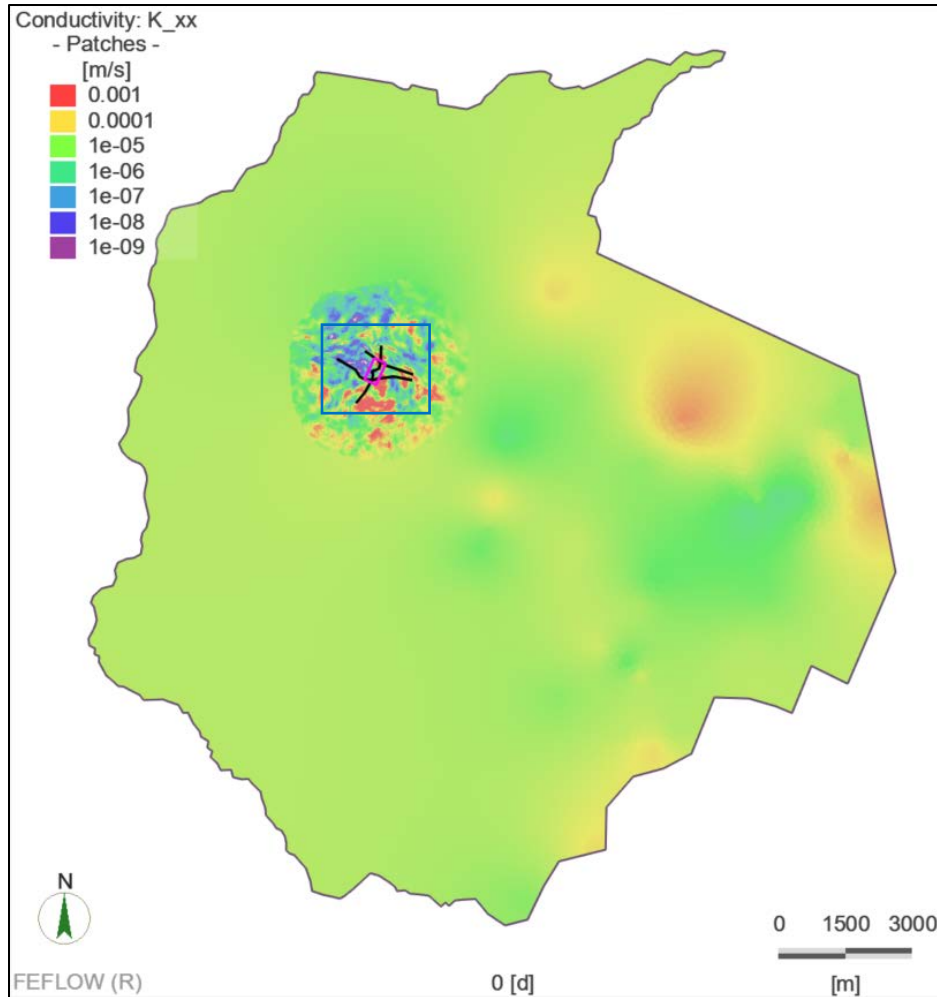


Figure 48. Distribution spatiale de K_{xy} dans une couche du modèle hydrogéologique (couche 27) montrant la limite entre le modèle local stochastique et le modèle régional déterministe. Les traits noirs sont la position de profils verticaux où sont présentés les résultats des simulations. Le carré bleu présente la zone où sont présentés les résultats des simulations en plan.

Cette zone contient 355 046 éléments dans l'unité Roc_5, 417 655 éléments dans le faciès F1 de l'unité EskerSG_3, et 322 070 éléments dans le faciès F2 de l'unité EskerSG_3. Les valeurs de K_{xy} calibrées sur le modèle déterministe au niveau du contour de la région locale sont ajoutées aux points de contrôle afin de faire tendre les valeurs de K_{xy} simulées localement vers les valeurs de K_{xy} calibrées régionalement, et ainsi éviter des sauts artificiels de la conductivité aux abords de la région. En ajoutant les paramètres hydrauliques déterministes à calibrer (K_r et S_s), on obtient un total de 1 094 774 paramètres ajustables par la méthode iES. Ce nombre de paramètres aurait été trop élevé pour être ajustable de façon conventionnelle où le modèle hydrogéologique aurait dû être roulé autant de fois que de paramètres ajustables. De plus, la méthode iES permet de tenir compte de l'incertitude existante sur les paramètres qui aura un impact sur les paramètres influençant le choix du scénario de confinement hydraulique.

6.3 Maquette numérique de la conductivité hydraulique

La méthode géostatistique employée est celle des bandes tournantes disponible dans le logiciel Isatis.neo (Geovariances). Isatis.neo est un logiciel spécialisé en modélisation géostatistique, et offre à l'utilisateur un vaste choix d'algorithmes d'interpolation et de simulations géostatistiques en deux et trois dimensions. Le choix des bandes tournantes est motivé par le fait que cet algorithme permet de générer des champs de grande taille sur des grilles irrégulières en peu de temps et avec une utilisation minimale de la mémoire RAM comparativement aux autres méthodes géostatistiques. L'utilisation d'un nombre élevé de bandes tournantes (2400) permet d'approximer les relations spatiales dans les autres dimensions spatiales, et ainsi générer plusieurs réalisations équiprobables de K_{xy} stable en peu de temps. Trois niveaux d'incertitude et de variabilité sur K_{xy} sont intégrés dans la maquette numérique afin de représenter l'hétérogénéité spatiale telle qu'observée sur les données :

- hétérogénéité de K_{xy} dans le roc,
- hétérogénéité de K_{xy} dans le faciès F1 de l'unité EskerSG_3, et
- hétérogénéité de K_{xy} dans le faciès F2 de l'unité EskerSG_3.

Un ensemble de 200 réalisations initiales de K_{xy} a été obtenu, définissant ainsi l'ensemble initial. Depuis cet ensemble initial, des simulations d'écoulement ont été effectuées afin de reproduire numériquement les deux essais de pompage. À la suite de ces simulations, 75 modèles qui convergeaient numériquement ont été retenus.

Les données de conductivité hydraulique provenant de multiples campagnes d'acquisition (sections 2.1 et 2.2.4) ont été utilisées pour former la base de données de K_{xy} pour faire les simulations géostatistiques. Une étape de filtrage et de contrôle de qualité des données a été déployée pour ne garder que les données fiables et en phase avec les données régionales employées dans la calibration du modèle hydrogéologique déterministe régional.

6.3.1 Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans le roc

Un total de 111 mesures de conductivité hydraulique réparties sur 15 puits sont disponibles dans l'unité du roc (Figure 49).

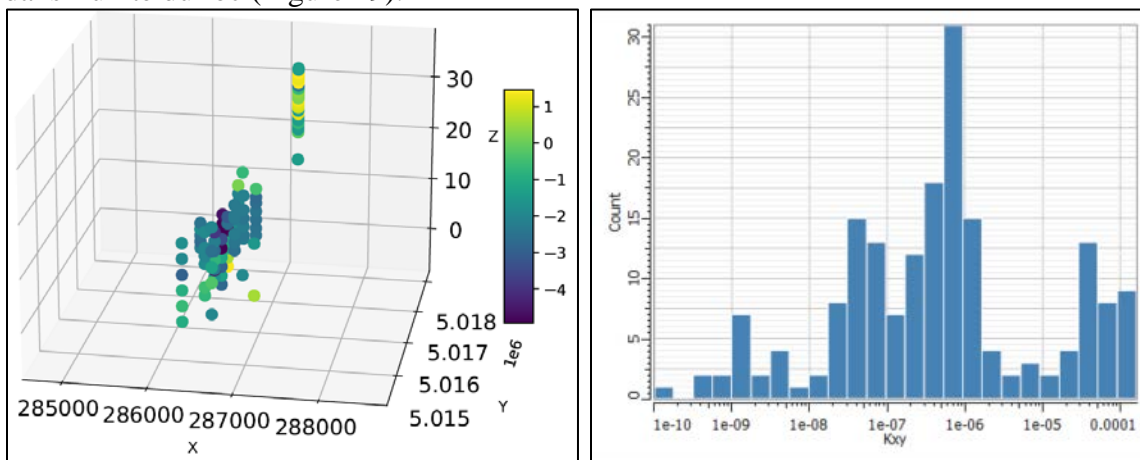


Figure 49. Distribution spatiale (gauche) et histogramme (droite) des mesures de K_{xy} dans l'unité de roc.

L'analyse des mesures de Kxy locales et l'analyse exploratoire lors de la construction du modèle déterministe régional ont conduit à choisir le variogramme suivant pour la simulation des résidus du logarithme de Kxy :

- Variance normalisée totale de 1 (sans unité) ;
- Effet pépite de 0.01 (sans unité) ;
- Modèle Cauchy généralisé de portée horizontale de 500m, portée verticale de 10m et de contribution de 0.89 ;
- Modèle Cauchy généralisé de portée horizontale de 5000m, portée verticale de 50m et de contribution de 0.1.

Le modèle de variogramme Cauchy généralisé assure une transition spatiale douce entre les éléments de conductivité hydraulique et ainsi évite des problèmes numériques lors des simulations d'écoulement. Les courtes portées des variogrammes dans le roc traduisent les zones de fracturations permettant la communication hydraulique dans l'unité Roc_5.

6.3.2 Hétérogénéité de Kxy dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3

Les mêmes données de Kxy que celles utilisées pour le krigeage 3D dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3 sont employées comme données initiales pour les simulations géostatistiques, soit toutes les valeurs de Kxy mesurées par essai de perméabilité multi-niveaux jugées fiables sur les puits récents et historiques. 86 mesures de conductivité hydraulique réparties sur 18 puits sont disponibles pour le faciès F1 tandis que 37 mesures de conductivité hydraulique sur 9 puits sont disponibles pour le faciès F2 (Figure 50).

L'analyse des mesures de Kxy locales et l'analyse exploratoire lors de la construction du modèle déterministe régional ont conduit à choisir le variogramme suivant pour la simulation des résidus du logarithme de Kxy dans le faciès F1 :

- Variance normalisée totale de 1 (sans unité) ;
- Effet pépite de 0.01 (sans unité) ;
- Modèle Cauchy généralisé de portée horizontale de 500m, portée verticale de 3m et de contribution de 0.99.

Le manque de données disponibles dans le faciès F2 a conduit à utiliser le même modèle de variogramme que dans le cas du faciès F1. Les variabilités à courte échelle dans les deux faciès de l'unité EskerSG_3 traduisent bien les processus de déposition plus ou moins énergiques des matériaux de l'esker. Les simulations sont roulées distinctivement pour les deux hydrofaciès de l'unité, soit le faciès F1_Esker et le faciès F2_SG afin de permettre l'utilisation de paramètres de simulations distincts pour représenter les modes de déposition unique de chaque faciès.

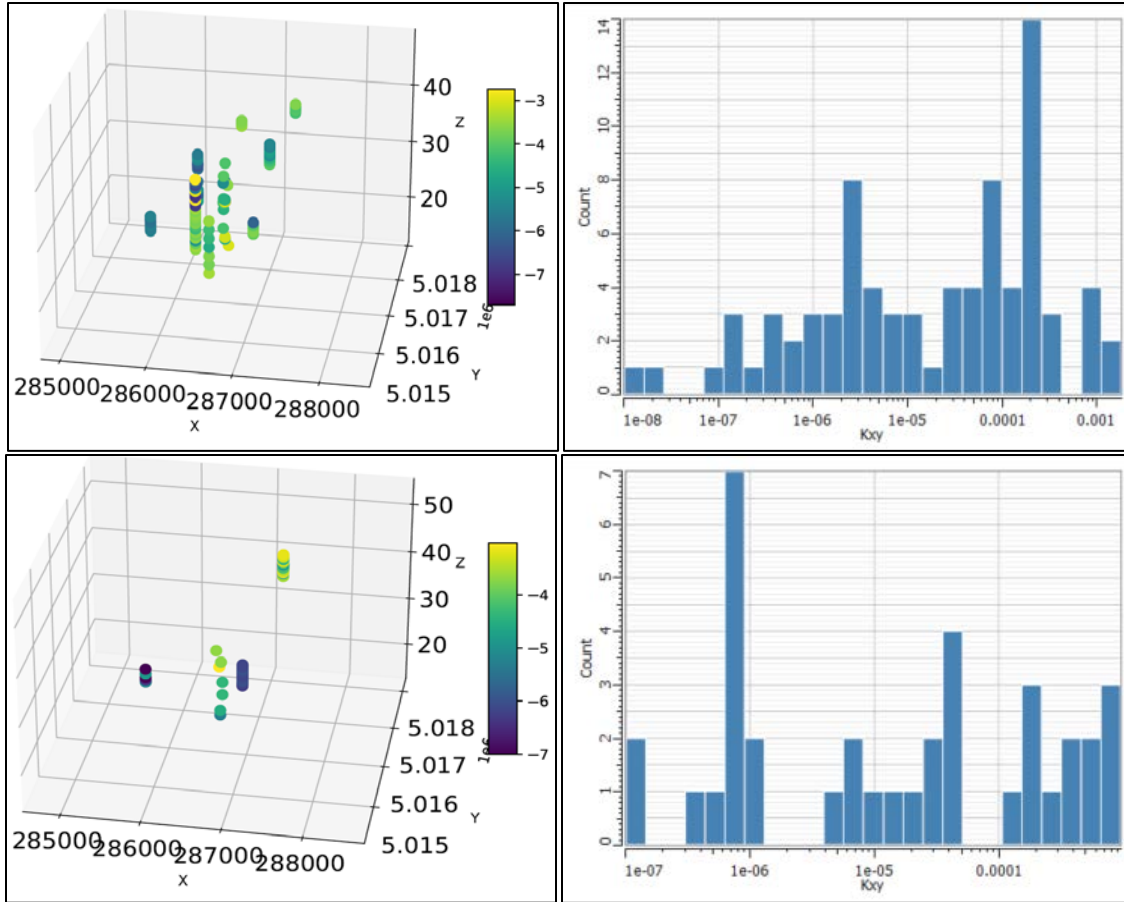


Figure 50. Distribution spatiale (gauche) et histogramme (droite) des mesures de K_{xy} dans le faciès F1 (haut) et F2 (bas) de l'unité EskerSG_3.

6.3.3 Simulations géostatistiques de K_{xy} par bandes tournantes

Les Figures 51 et 52 présentent les vues en plan et les profils verticaux de deux réalisations distinctes de la conductivité hydraulique dans le roc et dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3. Les champs de K_{xy} simulés (Figures 51 et 52) démontrent bien l'hétérogénéité existante et l'incertitude présente entre les points de mesure dans les différentes unités. Chaque réalisation présente des distributions spatiales de K_{xy} similaires car elles sont toutes basées sur les mêmes variogrammes et histogrammes, avec des valeurs identiques aux points de mesure mais qui peuvent fluctuer loin des points de mesures afin de représenter l'incertitude sur les valeurs de K_{xy} . Chaque réalisation est dite équiprobable, et aucune ne peut être perçue comme étant « meilleure » qu'une autre, car elles sont toutes basées sur les mêmes données et paramètres de simulation.

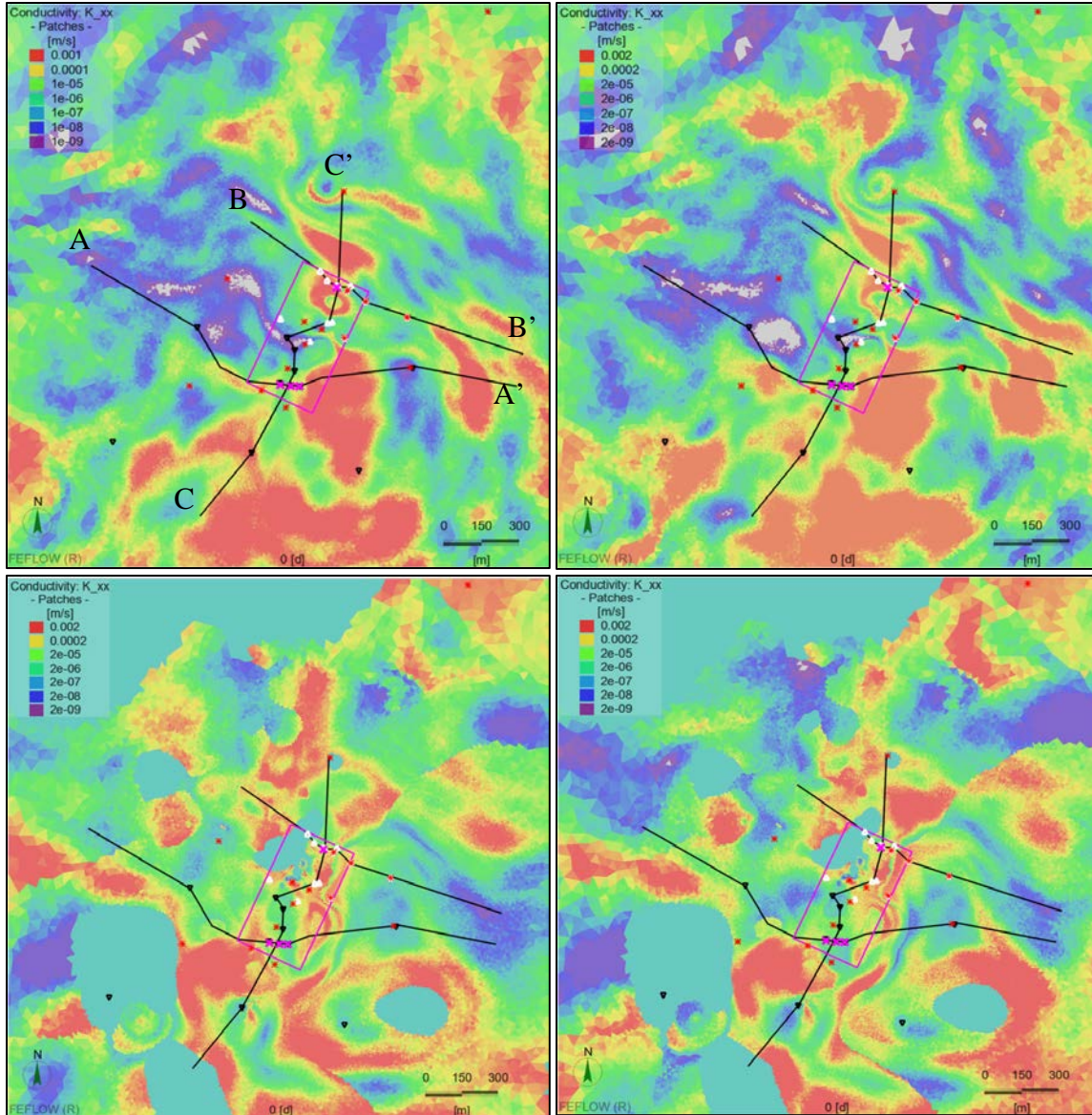


Figure 51. Vue en plan de 2 réalisations de K_{xy} dans le roc (haut) et dans les faciès F1 et F2 de l'EskerSG_3 (bas). Les lignes noires sont la position des profils verticaux. Le carré rose est le site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les points rouges sont la position des points de mesure de K_{xy} dans le roc. Les triangles noirs sont la position des puits d'observation pour l'essai de remontée de l'UTES (essai de pompage 1). Les triangles blancs sont la position des puits d'observation pour l'essai de pompage du puits 87-01 (essai de pompage 2). Les croix roses sont les puits de pompage.

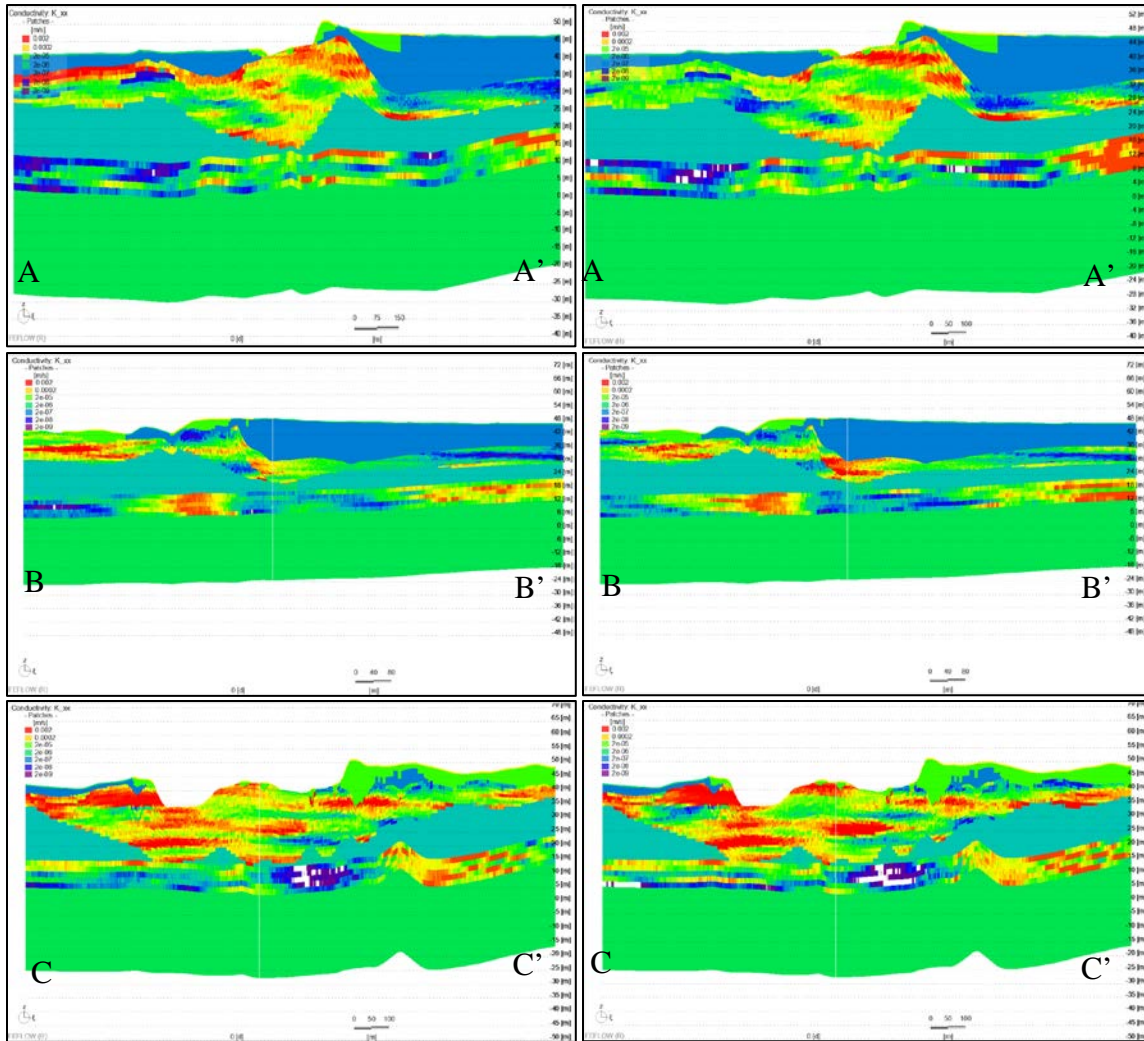


Figure 52. Vue de 3 profils de 2 réalisations de Kxy du modèle hydrogéologique local.

6.4 Essais de pompage et de remontée

Le processus d’assimilation en régime transitoire repose sur deux essais de pompage disponibles au droit des anciennes lagunes de Ville Mercier, afin de mettre à jour les distributions de Kxy simulées localement, ainsi que les Kr et Ss des principales unités hydrostratigraphiques. Les variations des niveaux d’eau observés en réponse aux deux essais de pompage sont limitées aux environs immédiats des puits de pompage. Il est donc inutile de tenter de mettre à jour tous les paramètres hydrauliques régionaux car ceux-ci sont insensibles aux essais de pompage.

Un essai de remontée effectué aux puits de l’UTES en septembre 2021 (« Essai de pompage 1 ») et un essai de pompage datant de 2005 au puits 87-01 (MDDEP, 2005; « Essai de pompage 2 ») sont utilisés pour la calibration transitoire. Pour chaque essai de pompage, les chroniques temporelles des niveaux d’eau observés pendant l’essai sont assimilées afin de mettre à jour les paramètres hydrauliques.

6.4.1 Essai de pompage 1

L'essai de pompage 1 est un essai de remontée effectué dans les puits PW112 et PW113 de l'UTES et qui est suivi par 12 sondes positionnées dans 9 puits d'observation (Figure 53). Les puits F-102, F-106, et F-124 ont deux crépines A et C. La partie crépinée A suit les niveaux d'eau dans l'unité EskerSG_3 et les partie crépinée C suit les niveaux d'eau dans le roc.

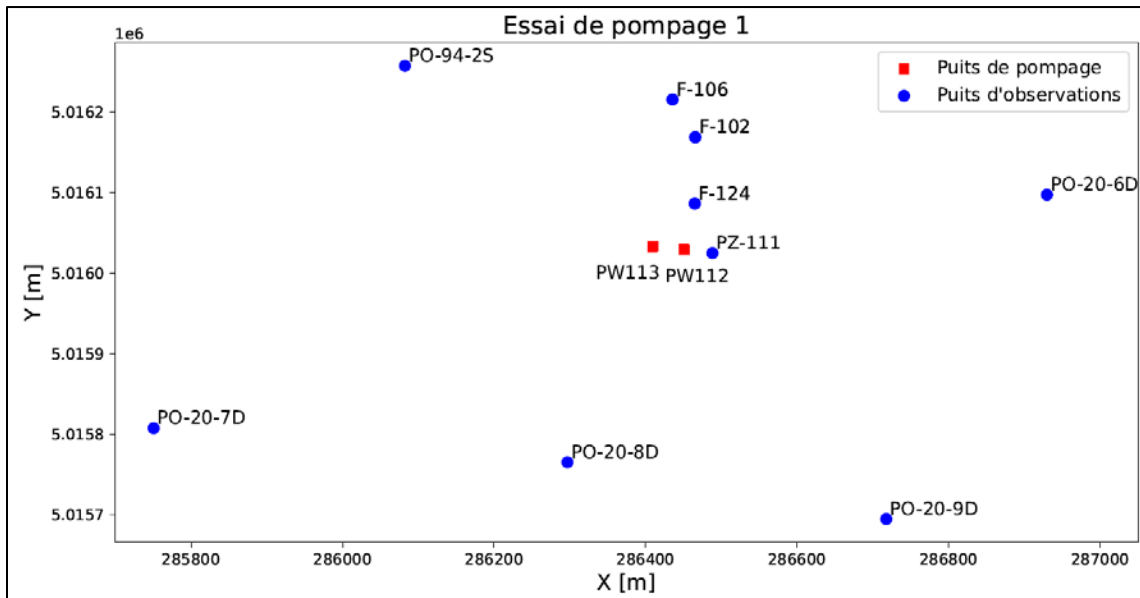


Figure 53. Position des puits d'observation et de pompage pour l'essai de pompage 1, soit l'essai de remontée aux puits de l'UTES.

Deux puits de l'UTES (PW112 et PW113) ont vu leur débit varier tout au long de l'essai de remontée (Figure 54), alors que le troisième puits de l'UTES (PW111) est resté fermé avec un débit nul. En raison de contraintes techniques, il n'a pas été possible d'interrompre l'intégralité du pompage aux puits de l'UTES pendant l'essai de remontée. Le puits PW113 compensait l'arrêt du pompage au puits PW112 en augmentant son débit de pompage.

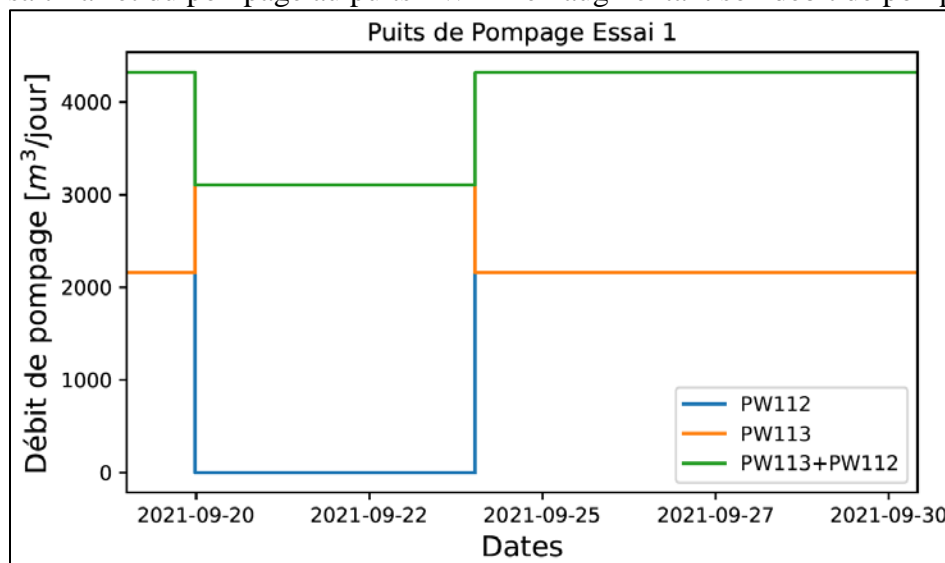


Figure 54. Débits prélevés par les puits de pompage PW112 et PW113 lors de l'essai de pompage 1.

Les séries temporelles des niveaux d'eau mesurés à 4 puits d'observation (Figure 55) montrent des différences importantes en fonction de l'éloignement des puits d'observation aux puits de pompage. Les amplitudes varient fortement d'un puits d'observation à un autre. De faibles amplitudes sont observées pendant l'essai de remontée, souvent dans le même ordre de grandeur que l'erreur de convergence du modèle numérique. Ces niveaux d'eau traduisent un sous-sol complexe avec des unités hydrostratigraphiques potentiellement déconnectées et pouvant présenter des variations importantes de leurs propriétés hydrauliques.

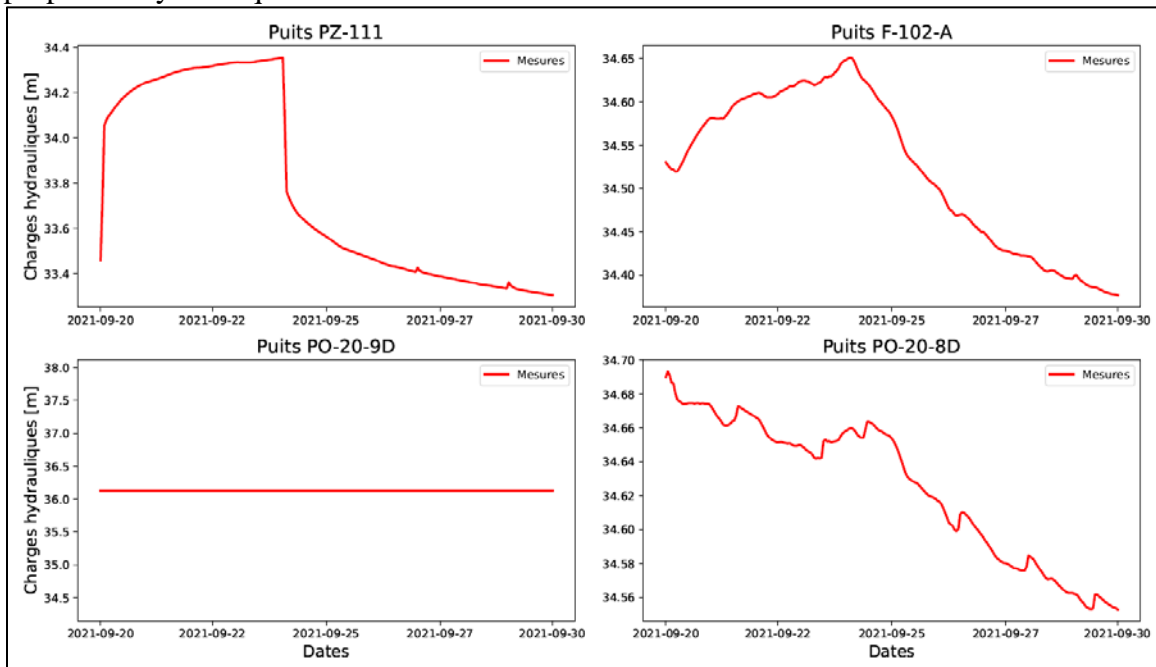


Figure 55. Séries temporelles mesurées dans 4 puits d'observation lors de l'essai de pompage 1.

6.4.2 Essai de pompage 2

L'essai de pompage 2 est un essai conventionnel qui a eu lieu en septembre 2005 au puits PW8701 (Leppert, 2005). L'essai de pompage 2 est suivi dans 13 puits d'observation (Figure 56). Le puits d'observation Z11 est séparé en deux unités, A et C. La partie crépinée A suit les niveaux d'eau dans l'unité EskerSG_3 et la partie crépinée C suit les niveaux d'eau dans le roc.

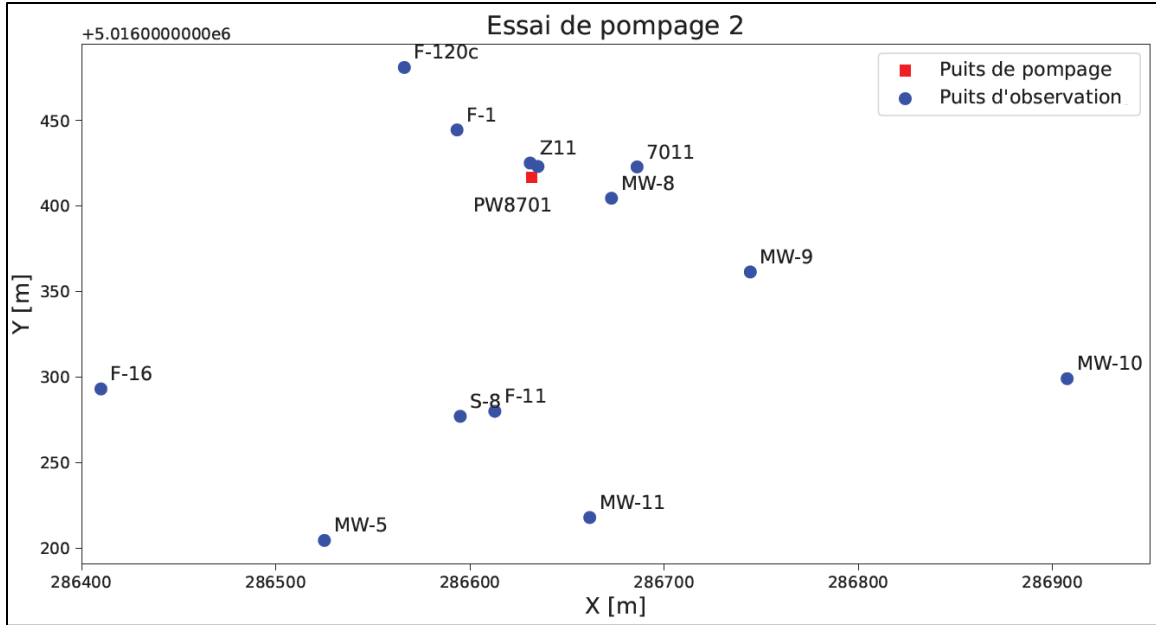


Figure 56. Position des puits d'observation et de pompage pour l'essai de pompage 2.

Les débits prélevés au puits de pompage PW8701 sont présentés à la Figure 57. Lors de l'essai de pompage 2, de très fortes précipitations, reliées à l'ouragan Katrina, ont eu lieu, pouvant affecter localement et brièvement les niveaux d'eau observés. L'hypothèse de recharge nulle ainsi émise n'est pas valide pour toute la durée de l'essai, pouvant affecter la performance de la calibration. Bien que cet essai de pompage ait été effectué en septembre 2005, il est reporté aux mêmes dates de l'année 2021 afin de le combiner avec l'essai de pompage 1 effectuée en septembre 2021 et ainsi rouler un seul modèle transitoire. Il y a suffisamment d'écart de temps (8 jours) entre les deux essais de pompage pour considérer que le régime permanent est rétabli avant le début de l'essai de pompage 2.

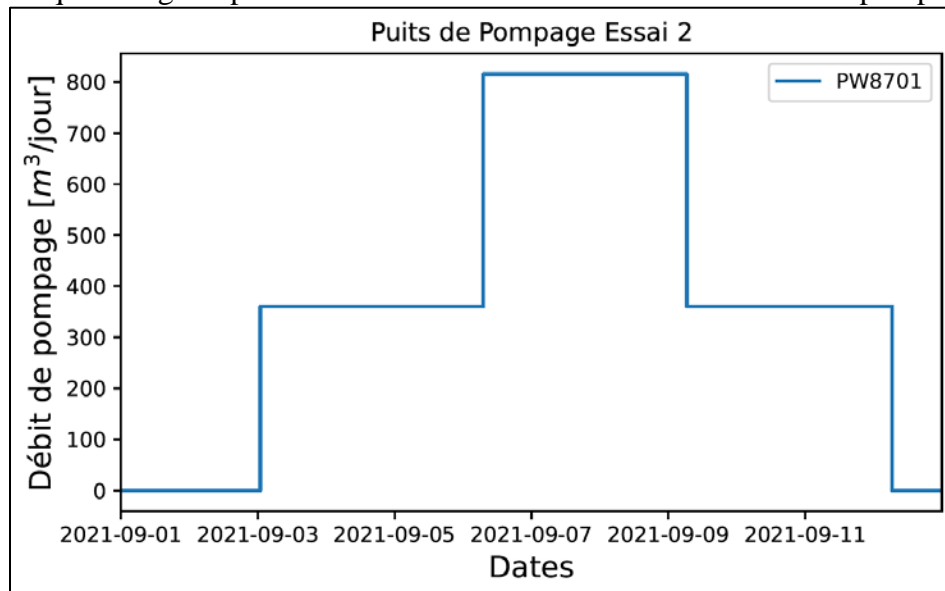


Figure 57. Débits prélevés par le puits de pompage PW87-01 lors de l'essai de pompage 2.

Une représentation des niveaux d'eau mesurés pendant l'essai de pompage 2 est illustrée à la Figure 58, montrant encore une fois des réponses complexes et de faible amplitude.

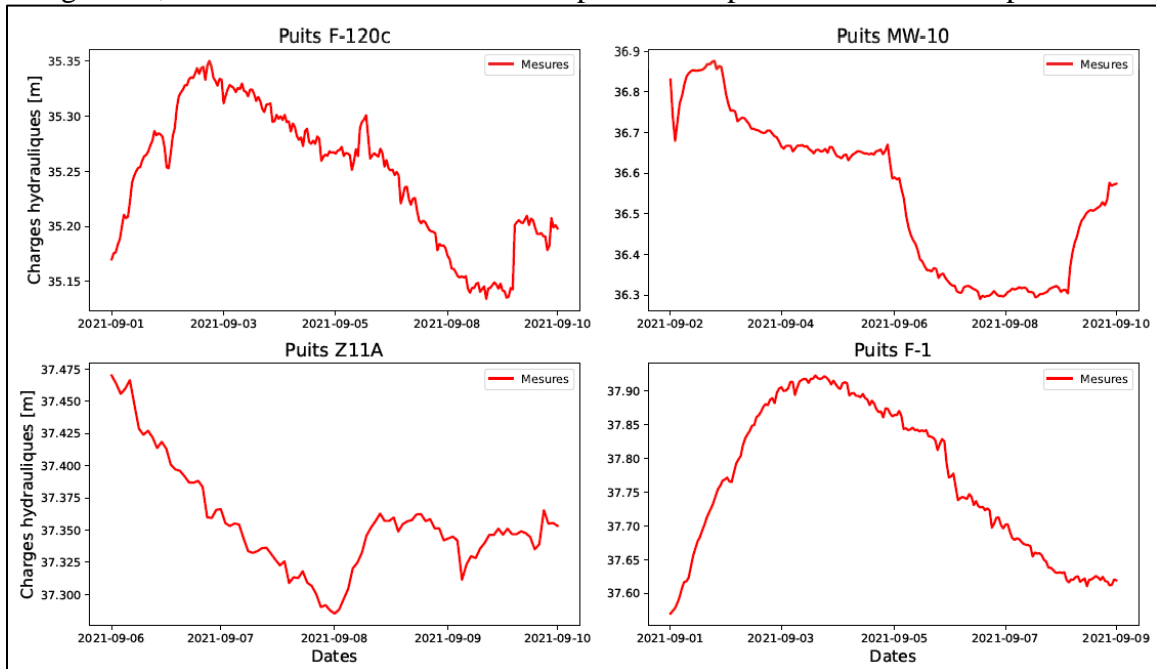


Figure 58. Séries temporelles mesurées dans 4 puits d'observation lors de l'essai de pompage 2.

Ces deux essais de pompage procurent l'intégralité des données dynamiques nécessaires à l'assimilation de l'ensemble des modèles. Ces deux essais présentent des limites avec des sources externes ayant pu affecter les essais, induisant des erreurs potentielles sur les données à calibrer.

6.5 Résultats de l'assimilation

Les résultats de l'assimilation obtenus par la méthode implémentée dans PESTpp-iES sont analysés en fonction des niveaux d'eau simulés et des paramètres hydrauliques mis à jour.

La Figure 59 montre les variations de la fonction objective globale, soit la somme des erreurs de calibration au carré, en fonction de l'itération pendant l'assimilation par méthode iES. À chaque itération, la fonction objective calculée sur chacune des réalisations est présentée, ainsi que les valeurs minimales, maximales et moyennes.

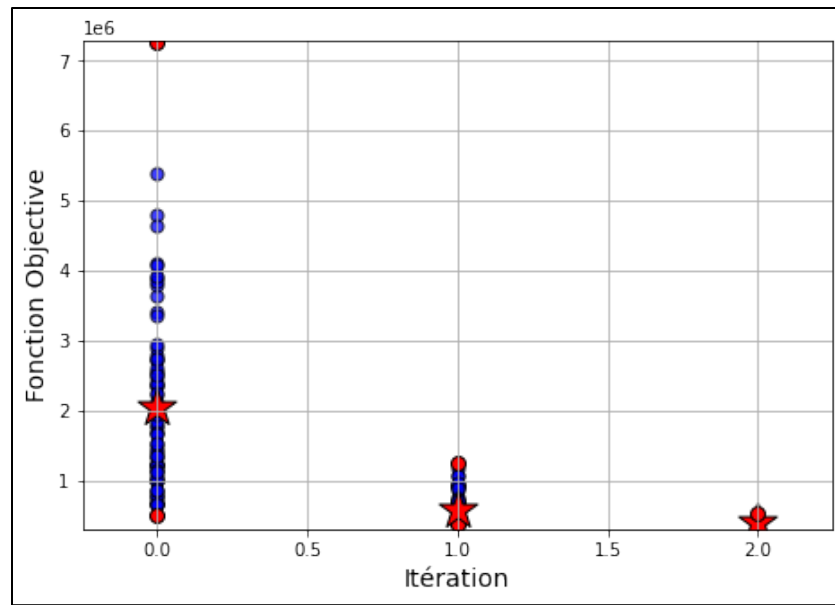


Figure 59. Fonction objective globale en fonction de l'itération pendant l'assimilation par méthode iES. Les points bleus sont les fonctions objectives calculées sur chaque réalisation ; les points rouges sont les fonctions objectives minimale et maximale, et l'étoile rouge est la valeur moyenne.

On observe une grande variabilité de la fonction objective sur les modèles initiaux (avant la première itération d'assimilation). Cette variabilité est importante pour les méthodes d'ensemble qui utilisent l'incertitude existante sur les données et les paramètres hydrauliques pour générer un ensemble de réalisations probables à la place d'une seule réalisation déterministe. L'assimilation par ensemble se base sur les écarts entre les différentes réalisations par rapport à la moyenne afin d'évaluer la mise à jour à effectuer sur les paramètres hydrauliques. Lorsque la variabilité devient trop faible, l'assimilation n'est plus possible et toutes les réalisations mises à jour sont similaires. Les résultats observés sont alors similaires à ceux obtenus par une calibration déterministe, rendant l'utilisation des méthodes d'ensemble caduc. La présence de variabilité rend également possible l'analyse probabiliste qu'offrent les méthodes d'ensemble avec les réalisations stochastiques mises à jour.

On observe ainsi, sur la Figure 59, que la variabilité diminue fortement pendant l'assimilation en fonction des itérations. Un écrasement de la variabilité est observé entre l'itération 1 et l'itération 2, où toutes les réalisations présentent la même valeur de fonction objective. Considérant l'incertitude sur les observations disponibles à Ville Mercier et l'hétérogénéité des paramètres hydrauliques, les résultats obtenus à la suite de la première itération d'assimilation sont considérés comme étant les plus fiables pour permettre l'analyse probabiliste du modèle hydrogéologique des anciennes lagunes de Ville Mercier. Sur les 75 modèles hydrogéologiques de l'ensemble initial, 6 n'ont pas convergé et sont donc rejetés du système. Il reste donc 69 modèles ayant convergé après la première itération d'assimilation par la méthode iES, ce qui forme l'ensemble final des modèles hydrogéologiques mis à jour.

La Figure 60 présente la diminution de la fonction objective pour chaque groupe d'observations assimilé par la méthode iES.

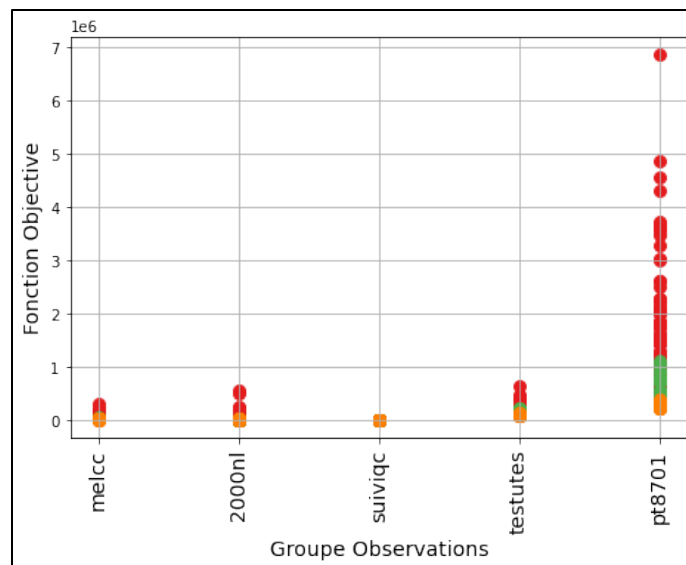


Figure 60. Fonction objective selon les groupes d’observation pendant l’assimilation par méthode iES, avant la première itération (rouge), après la première itération (vert) et après la deuxième itération (orange).

Les observations provenant des niveaux d’eau en régime permanent (groupes « melcc », « 2000nl », et « suiviqc ») comptent pour une faible proportion de la fonction objective. Ils ont été assimilés avec succès pendant l’assimilation par iES puisqu’une diminution de leur fonction objective respective est observée. L’assimilation par la méthode iES a également permis de réduire la fonction objective associée aux observations de l’essai de pompage 1 (groupe d’observations « testutes ») et des observations temporelles de l’essai de pompage 2 (groupe d’observations « pt8701 »). Il existe une moins grande variabilité des valeurs de fonction objective pour les différentes réalisations avant l’assimilation (points rouges sur la Figure 60), car les observations sont des variations très faibles de niveaux d’eau, souvent dans la limite de résolution du modèle numérique. La performance de l’assimilation pour ces données est considérée comme étant limitée due aux faibles valeurs observées. Les résultats sont toutefois valables car l’assimilation améliore bien la fonction objective et ne dégrade pas les comparaisons entre les données observées et les données simulées. Les résultats de l’assimilation sur le groupe d’observation provenant de l’essai de pompage 2 (groupe « pt8701 ») sont encourageantes, avec une fonction objective qui décroît substantiellement après une itération.

Les faibles valeurs de variations de niveaux d’eau à calibrer en régime transitoire, et l’incertitude très élevée sur les observations rendent l’assimilation complexe, et provoquent un écrasement de la variabilité après deux itérations. Afin de conserver une variabilité sur les différentes réalisations, et ainsi pouvoir considérer l’incertitude dans l’analyse des résultats obtenus par l’assimilation par méthode d’ensemble, les résultats de la première itération sont gardés pour la suite de l’analyse.

6.5.1 Comparaison des niveaux d’eau observés et simulés

La Figure 61 montre, au niveau local, la distribution spatiale des niveaux d’eau observés (gauche) et simulés (centre) avant (haut) et après 1 (milieu) itération d’assimilation par la méthode iES en régime permanent.

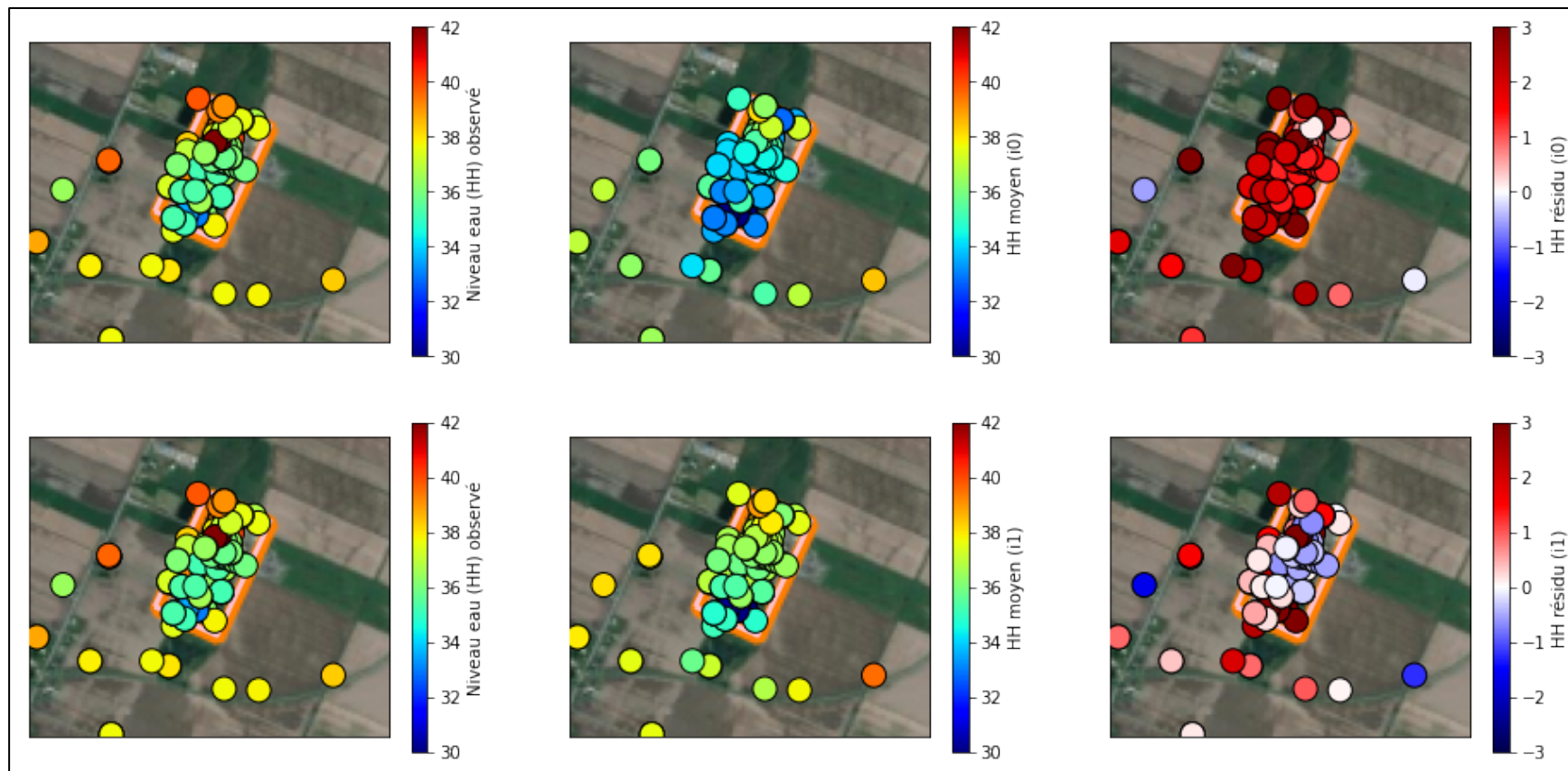


Figure 61. Distribution locale des niveaux d'eau permanent observés et simulés avant (haut), après 1 itération (bas) d'assimilation par méthode iES.

Les charges simulées comportent un biais important au stade initial, biais qui fut introduit par l'utilisation d'un modèle en mode non-saturé, et un état initial de pompage différent que celui utilisé pendant la calibration du modèle déterministe. Ce biais est rapidement corrigé par la première itération de l'assimilation qui présente une distribution d'erreur centrée sur la valeur 0 (Figures 62 et 63).

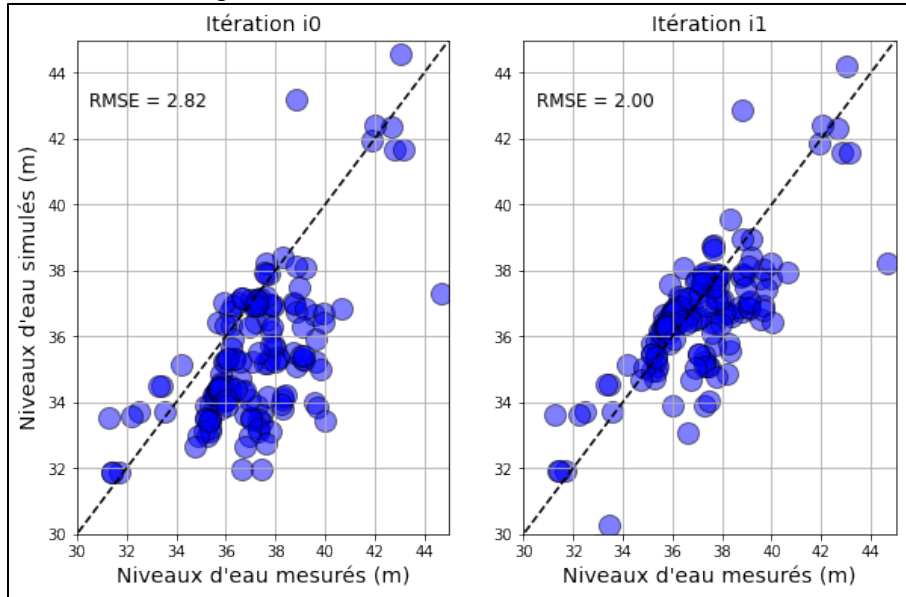


Figure 62. Niveaux d'eau simulés en fonction des niveaux d'eau observés avant (gauche) et après 1 (droite) itération d'assimilation en régime permanent par la méthode iES.

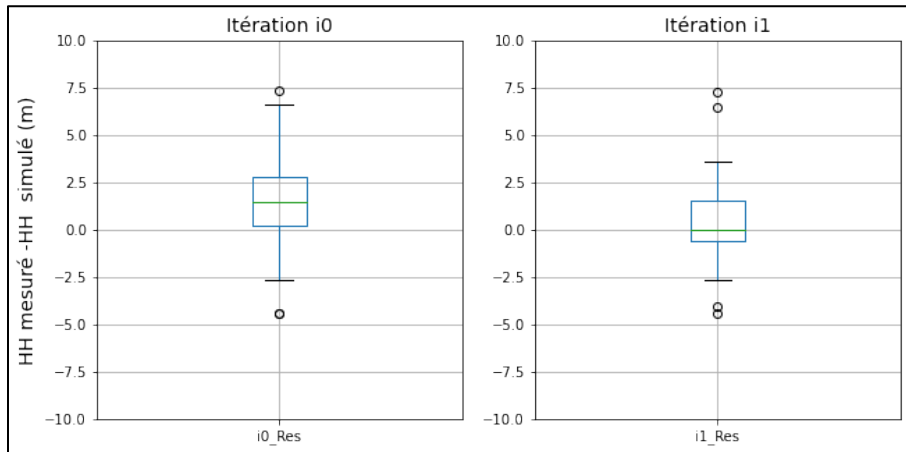


Figure 63. Boîtes à moustache montrant les niveaux d'eau simulés et observés avant (gauche), et après 1 (droite) itération d'assimilation en régime permanent par la méthode iES.

Les séries temporelles des niveaux d'eau mesurés sont interpolées pour obtenir une valeur horaire pour chaque puits. Après un contrôle de qualité pour ne garder que les mesures les plus fiables pour la calibration, on obtient un total de 5645 points de mesure transitoires à assimiler ; soit 3346 points de mesure pour l'essai de pompage 1 et 2299 points de mesure pour l'essai de pompage 2. Pour chaque puits d'observation, les séries temporelles des variations des niveaux d'eau observés sont comparées avec les séries temporelles des variations des niveaux d'eau simulés pour l'ensemble initial des réalisations avant

assimilation, et pour l'ensemble final des réalisations après une itération de mise à jour des paramètres hydrauliques (Figures 64 et 65).

Pour plusieurs puits, il faut noter les faibles variations temporelles des niveaux d'eau qui rendent la calibration difficile, voire impossible. Un critère de convergence de 0.001 (1×10^{-3}) a été utilisée pour rouler les simulations. Cela indique qu'à chaque pas de temps, sur des niveaux d'eau à simuler variant entre 30 à 50 mètres au-dessus du niveau moyen des mers, on accepte une erreur de 3 cm à 5 cm pour passer au pas de temps suivant. Cette erreur de convergence est très près des variations de niveaux d'eau observés à plusieurs puits à calibrer (puits MW-05, Z-11A, PO-20-8d, PO-20-9d, PO-94-2S, F-102-A-C, F-106-A-C, F-124C).

Pour plusieurs puits, les séries temporelles après la première itération se rapprochent des séries temporelles des variations des niveaux d'eau observés, indication que la méthode d'assimilation par iES effectue adéquatement la mise à jour des paramètres hydrauliques. Les résultats obtenus aux puits F-16, Z-11C, F102-A, F102-C, F106-C, F124-A, et PZ-111 sont jugés très satisfaisants.

L'essai de pompage 1 est un essai de remontée impliquant l'arrêt du pompage au puits PW-112, passant d'un débit de 2000 m³/jour à 0 m³/jour. L'arrêt du pompage à ce puits a induit une augmentation non-souhaitée du pompage au puits PW-113, qui a passé d'un débit de 2200 m³/jour à 3000 m³/jour. Le puits PW-111 est resté à l'arrêt avant et pendant l'essai de remontée. Les puits d'observation PZ-112 et PZ-113 sont situés à moins de 10 mètres et dans le même élément du modèle numérique que les puits de pompage PW-112 et PW-113, respectivement. Les variations de niveaux d'eau observées aux puits PZ-112 et PZ-113 ne pourront pas être simulées adéquatement, ce qui explique le manque d'amplitude observé sur les niveaux d'eau simulés à ces puits.

L'assimilation a permis d'améliorer légèrement ou n'a pas offert d'amélioration sur les comparaisons des niveaux d'eau aux puits d'observation F-120-C, F-11, 7011, F-124-C, MW-08, et F-1, tandis que la calibration a dégradé les comparaisons entre les niveaux d'eau simulés et observés aux puits MW-09, MW-10, et MW-11. Comme la plupart des méthodes de calibration déterministe, le mode d'assimilation utilisé par la méthode iES est un mode global, indiquant que tous les éléments de la grille de modélisation sont mis à jour simultanément. Ainsi, si des puits d'observations rapprochés varient dans des directions opposées, suggérant des mises à jour différentes des paramètres hydrauliques, la méthode d'assimilation par iES fait une mise à jour unique des paramètres vers la direction permettant de réduire au maximum les erreurs de calibration. Cette mise à jour globale est acceptable pour certains puits d'observation, mais peut cependant dégrader la comparaison à d'autres puits d'observation. Des méthodes d'analyse locale existent pour aider à mieux considérer chacune des observations, mais n'ont pas été implémentées dans ce projet.

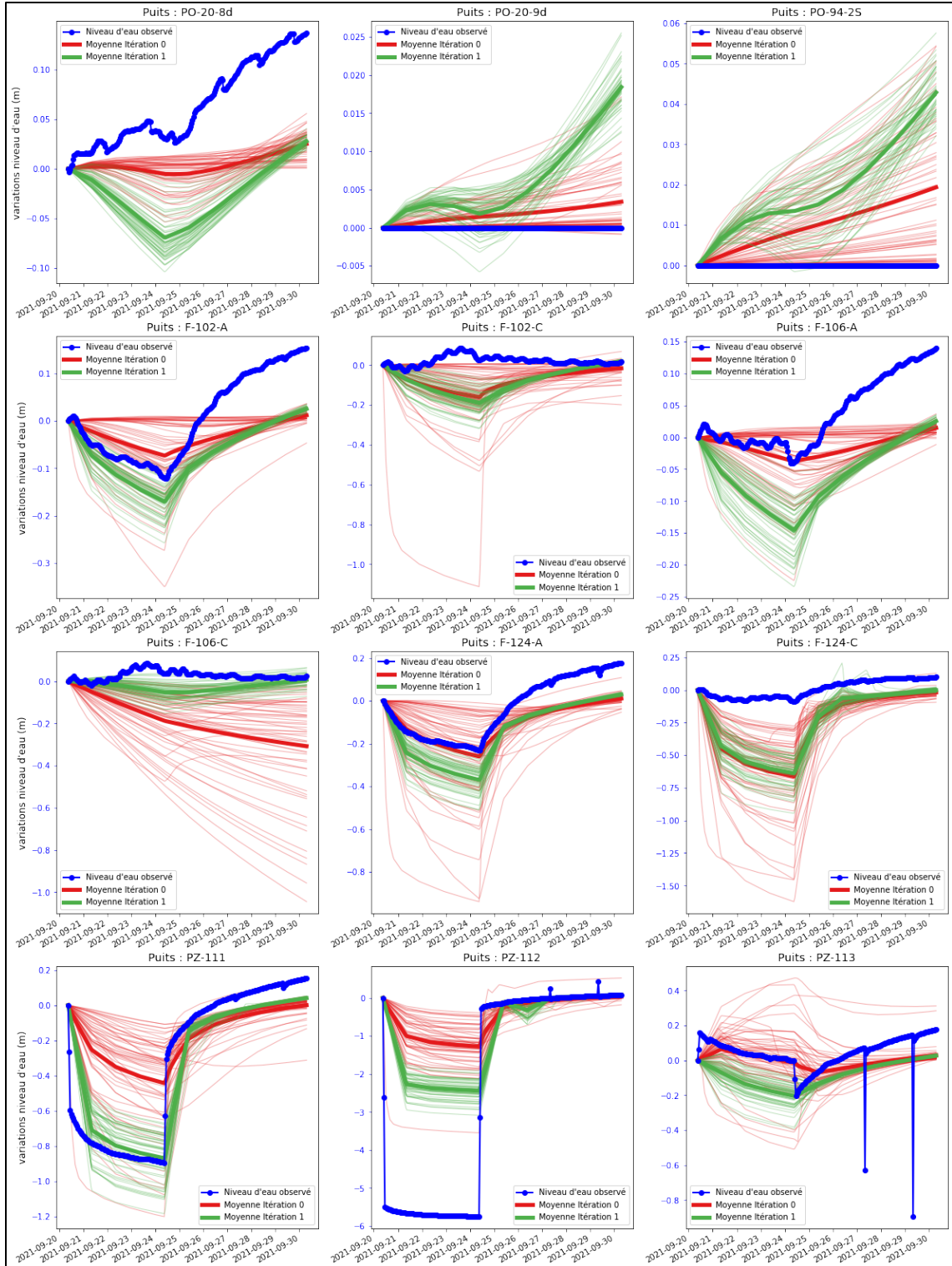


Figure 64. Séries temporelles des niveaux d'eau observés (bleu) et simulés avant (rouge) et après une itération (vert) d'assimilation par méthode iES pour l'essai de pompage 1.

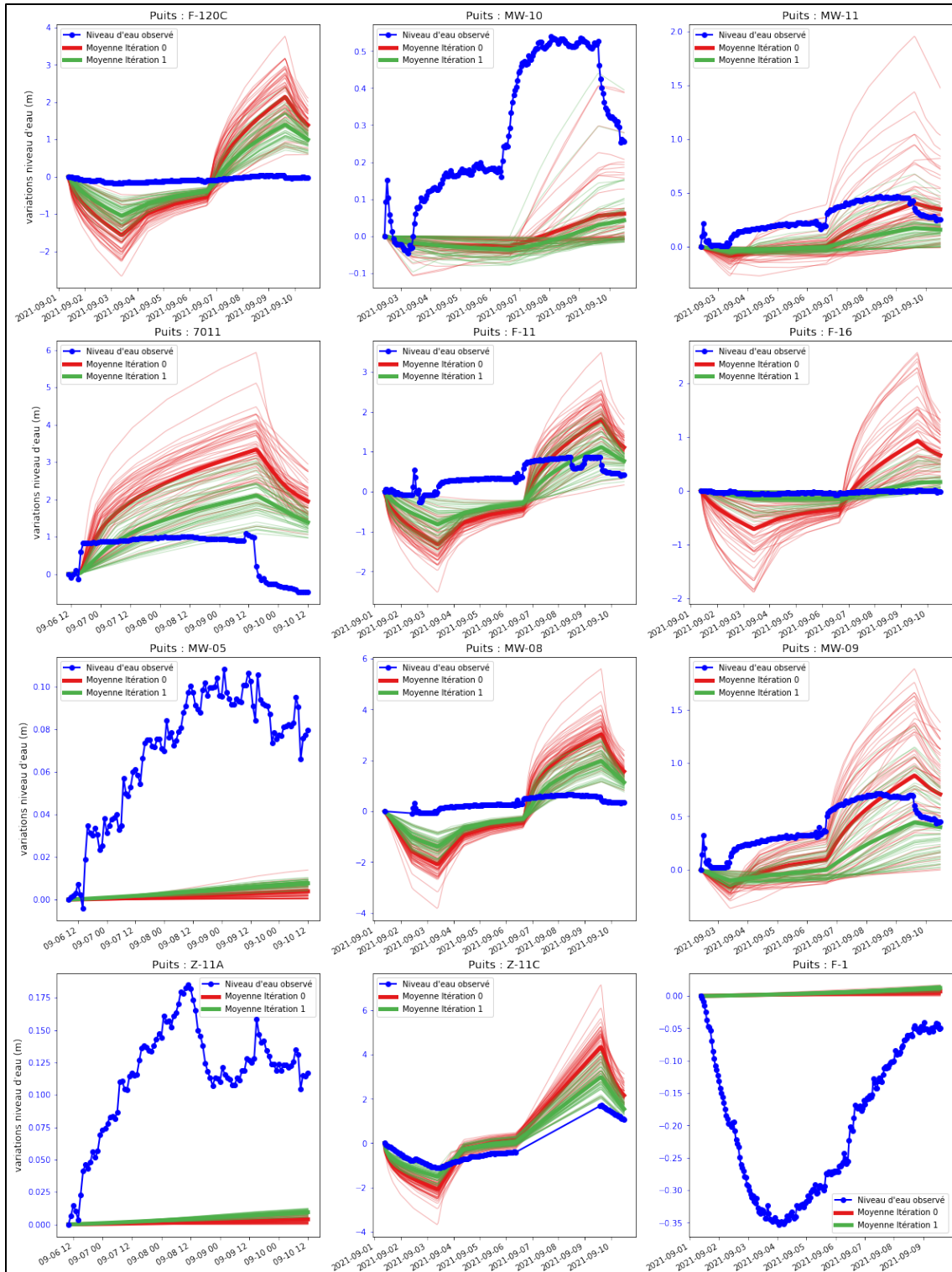


Figure 65. Séries temporelles des niveaux d'eau observés (bleu) et simulés avant (rouge) et après une itération (vert) d'assimilation par méthode iES pour l'essai de pompage 2.

D'autres facteurs peuvent expliquer les écarts observés à la calibration des niveaux d'eau à certains puits. Il peut s'agir d'un manque de sensibilité de certains puits d'observation par rapport au stress induit par l'essai de pompage. Certains puits pourraient être davantage

affectés par les précipitations et les variations de pression atmosphérique ayant eu lieu pendant les essais de pompage. Bien que les différentes réalisations stochastiques représentent bien l'hétérogénéité spatiale de la conductivité hydraulique dans l'esker et le roc fracturé, il reste une certaine hétérogénéité qui n'est pas représentée par le modèle hydrogéologique. Les débits provenant de l'essai de pompage 1 sont moyennés sur une base journalière et peuvent ne pas refléter les variations plus rapides pouvant survenir. Les débits provenant de l'essai de pompage 2 ont été interprétés à partir d'un rapport technique (Leppert, 2005) offrant peu de détails sur les débits exacts et les conditions existantes pendant l'essai de pompage.

Bien que toutes les observations ne puissent pas être calibrées parfaitement en tous points, l'assimilation par méthode iES permet d'obtenir des variations de niveaux d'eau simulées mises à jour réalistes, montrant une variabilité adéquate entre les réalisations après une itération. L'amélioration globale des niveaux d'eau en régime permanent suggère que les réalisations stochastiques représentent des écoulements locaux et régionaux réalistes des eaux souterraines au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. La variabilité observée entre les réalisations stochastiques représente bien l'incertitude existante sur les niveaux d'eau observés et sur les paramètres hydrauliques estimés. Cette incertitude est primordiale dans la représentation et l'évaluation des différents scénarios de confinement hydraulique proposés dans le cadre de l'UTES-II (section 7).

6.5.2 Paramètres hydrauliques mis à jour

De façon similaire aux résultats de la calibration déterministe (section 5.4), les paramètres hydrauliques mis à jour sont également évalués afin de quantifier l'état de l'assimilation par iES. Les histogrammes de la Figure 66 montrent les paramètres de coefficients d'emmagasinement (Ss) avant et après 1 itération d'assimilation pour l'unité de Roc_5, et les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3. On voit que les Ss dans l'unité EskerSG_3 tendent à baisser pendant la calibration afin de générer des réponses transitoires rapides telles que mesurées aux puits d'observation.

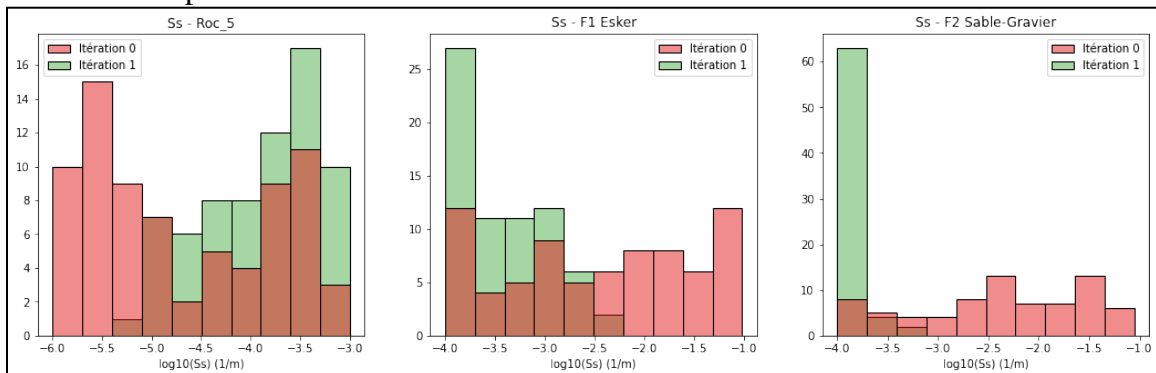


Figure 66. Distributions des coefficients d'emmagasinement (Ss) avant (rouge) et après 1 (vert) itération d'assimilation par la méthode iES pour l'unité Roc_5 (gauche), et les faciès F1 (milieu) et F2 (droite) de l'unité EskerSG_3.

Les valeurs de Kxy dans le roc (Figure 67, gauche) tendent à montrer une variabilité plus importante à la suite d'une itération d'assimilation. La distribution de Kxy montre une plus importante proportion de valeurs extrêmes que la distribution initiale, démontrant l'importance de l'hétérogénéité de Kxy dans le roc. Le même phénomène est observable

dans le faciès F2 de l'EskerSG_3 (Figure 67, droite). Les valeurs de Kxy dans le faciès F1 tendent à montrer des valeurs plus élevées dans le cœur de l'esker (faciès F1), les valeurs tendant vers une limite maximale imposée de 2×10^{-3} m/s pendant l'assimilation. Cette limite a été fixée à un ordre de grandeur plus élevée que la valeur de Kxy initialement imposée dans le faciès F1 de l'EskerSG_3 (Tableau 6) et représente bien la valeur maximale de Kxy observée dans ce faciès de 1.4×10^{-3} m/s (Tableau 5).

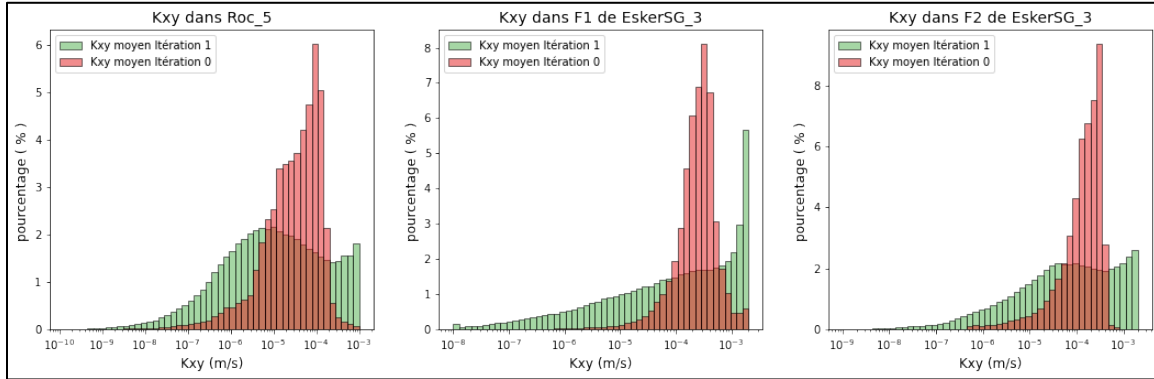


Figure 67. Distributions des Kxy avant (rouge) et après 1 (vert) itération d'assimilation par la méthode iES pour l'unité Roc_5 (gauche), et les faciès F1 (milieu) et F2 (droite) de l'unité EskserSG_3.

Les réalisations assimilées après une itération commencent à présenter certains patrons similaires concernant les variations de Kxy. Ainsi, la moyenne et la variance des réalisations initiales avant assimilation (panneaux de gauche des Figure 68 et 69) montrent une distribution spatiale se rapprochant d'une interpolation par krigeage avec une variance similaire à la variance de krigeage. Après une itération d'assimilation, la moyenne des réalisations tend vers une distribution plus hétérogène de Kxy, où les zones peu conductrices et très conductrices sont également visibles sur les valeurs moyennes (panneaux de droite des Figure 68 et 69).

Les variances des réalisations ont également diminué, démontrant que les réalisations individuelles sont plus similaires après une itération qu'avant l'assimilation. Il s'agit d'une preuve supplémentaire de la nécessité d'arrêter l'assimilation après la première itération, afin de garder cette variabilité nécessaire pour l'analyse stochastique des différents scénarios, tout en considérant l'incertitude sur les mesures et les paramètres hydrauliques.

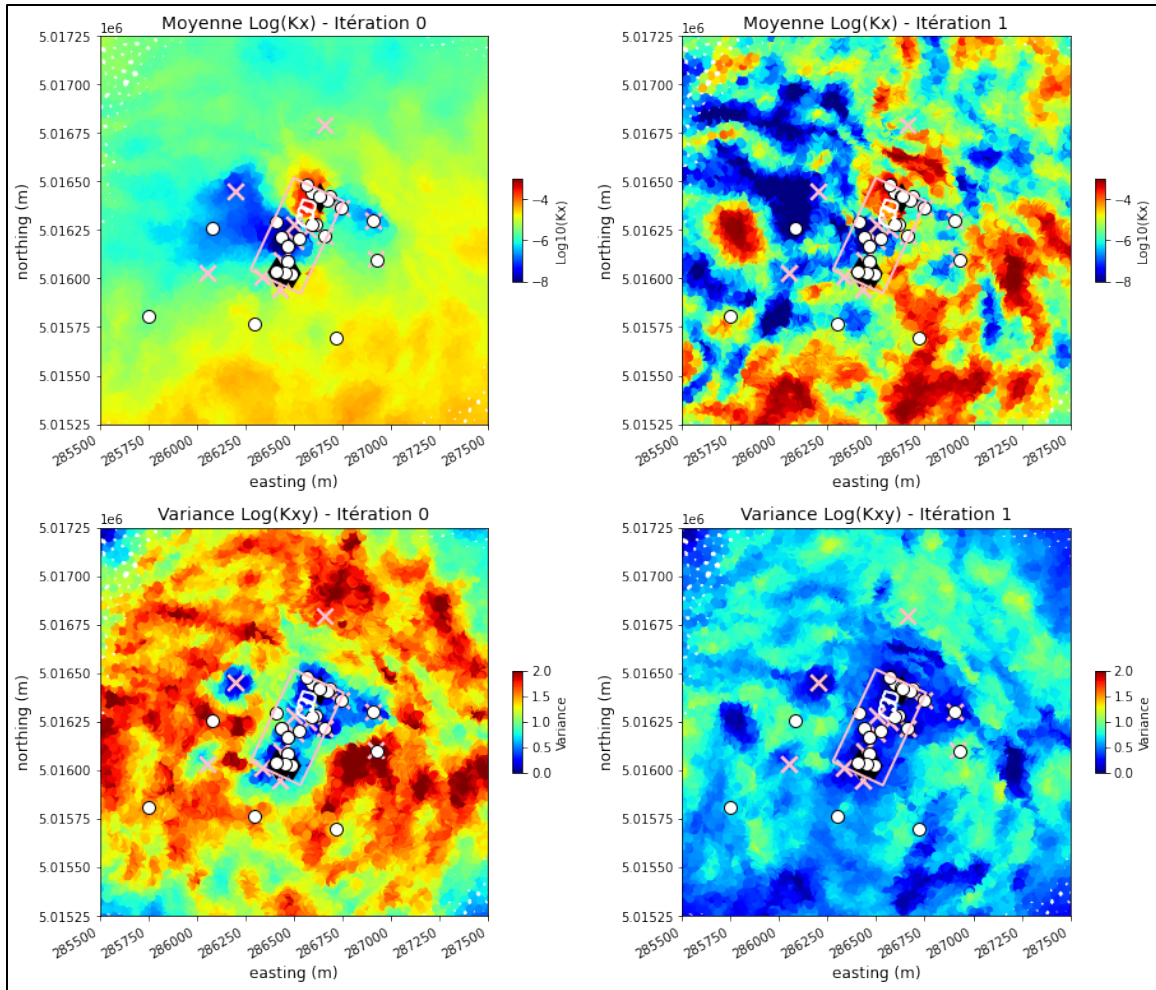


Figure 68. Distribution spatiale de la moyenne et de la variance de K_{xy} sur toutes les réalisations dans le roc (couche 28 du modèle) avant l'assimilation (gauche) et après 1 itération d'assimilation (droite). Les croix roses sont les points de mesures de K_{xy} , les points blancs sont les points d'observations des variations de niveaux d'eau, les losanges noirs sont les puits de pompage.

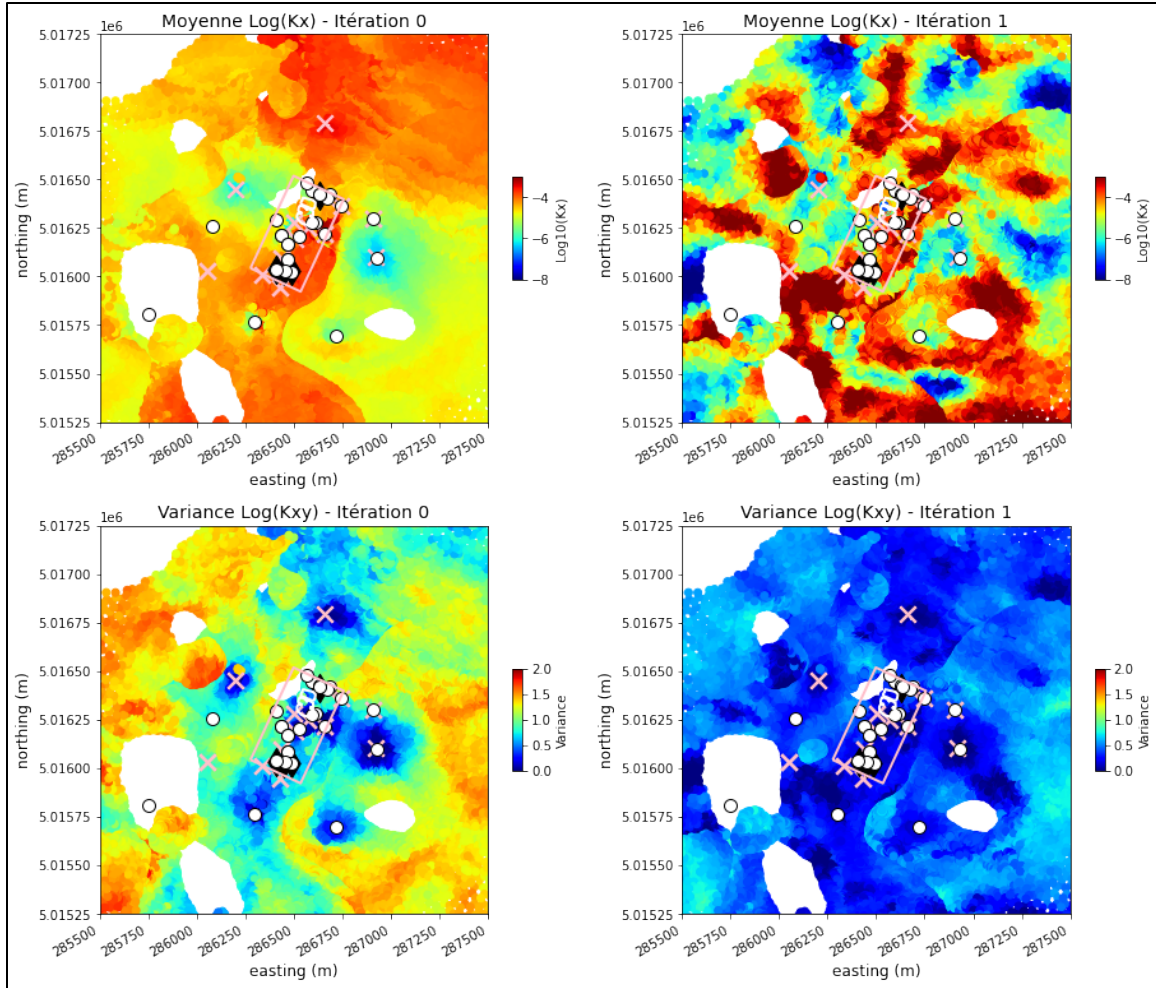


Figure 69. Distribution spatiale de la moyenne et de la variance de K_{xy} sur toutes les réalisations dans les faciès $F1_{Esker}$ et $F2_{SG}$ de l'unité $EskerSG_3$ (couche 12 du modèle) avant l'assimilation (gauche) et après 1 itération d'assimilation (droite). Les croix roses sont les points de mesures de K_{xy} , les points blancs sont les points d'observations des variations de niveaux d'eau, les losanges noirs sont les puits de pompage.

Les Figure 70 et 71 montrent les champs de K_{xy} autour du site des anciennes lagunes de Ville Mercier pour 3 réalisations tirées aléatoirement sur les 75 réalisations initiales et après une itération d'assimilation, pour l'unité Roc_5 (Figure 70) et les faciès $F1$ et $F2$ de l' $EskerSG_3$ (Figure 71). Chaque réalisation présente les mêmes valeurs de K_{xy} autour des points de mesures (croix roses sur les figures), alors que les distributions spatiales de K_{xy} loin des points de mesures peuvent prendre différentes valeurs, tout en gardant des variations spatiales respectant les mêmes patrons.

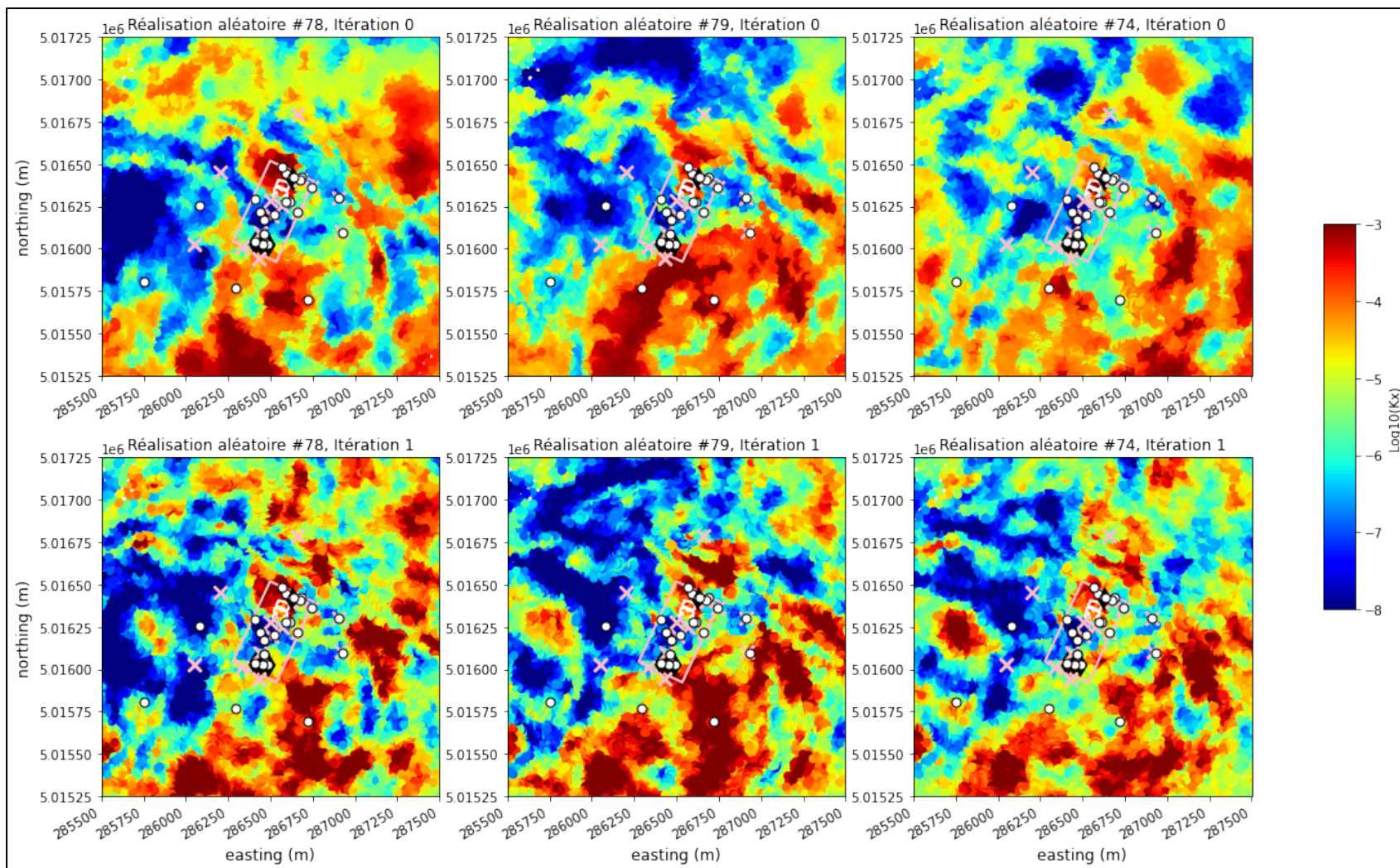


Figure 70. Distribution spatiale de K_{xy} dans le roc (couche 28 du modèle) pour 3 réalisations tirées aléatoirement, avant (haut) et après 1 itération d'assimilation (bas). Les croix roses sont les points de mesures de K_{xy} , les points blancs sont les points d'observation des variations de niveaux d'eau, les losanges noirs sont les puits de pompage.

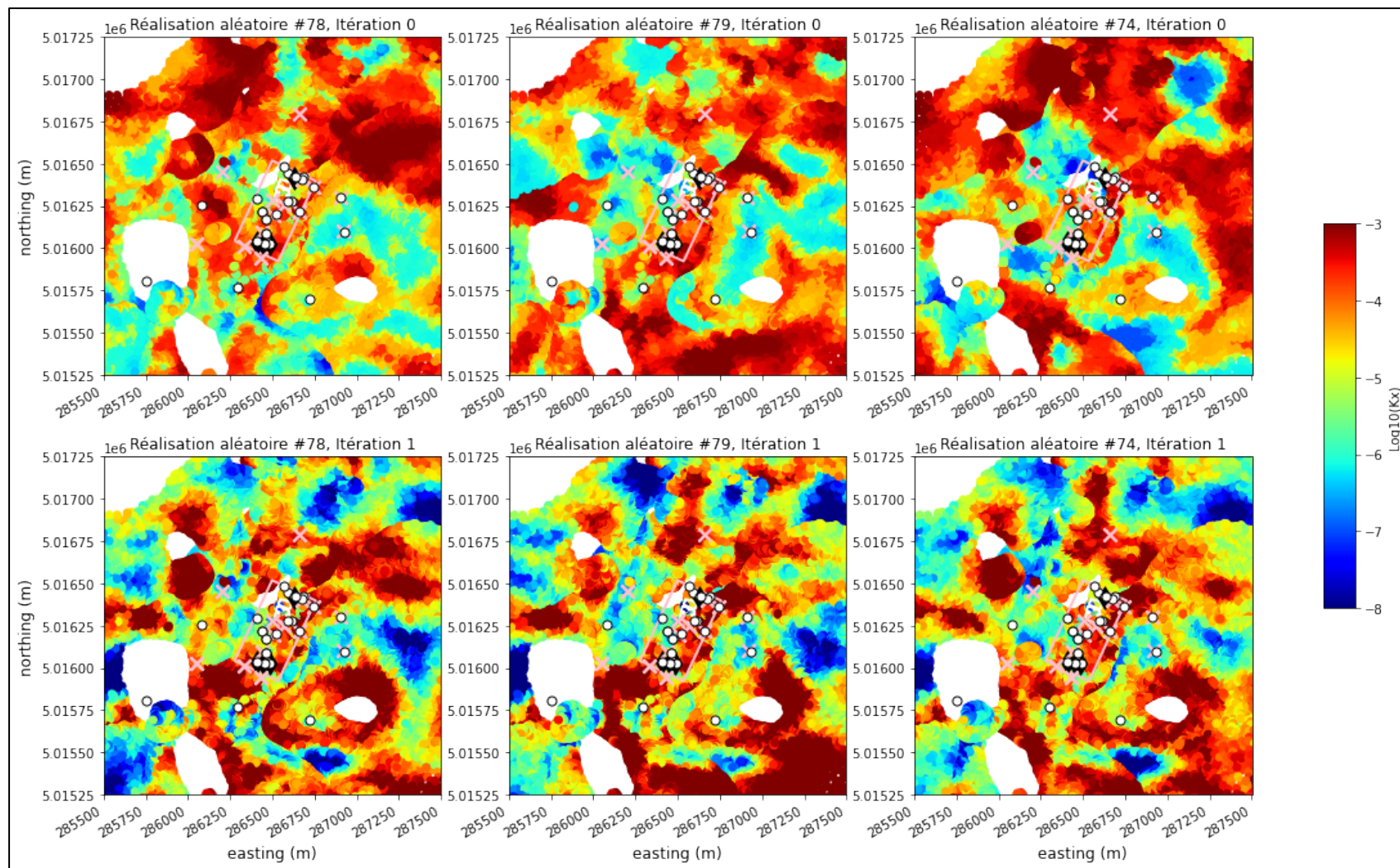


Figure 71. Distribution spatiale de K_{xy} dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3 (couche 12 du modèle) pour 3 réalisations tirées aléatoirement, avant (haut) et après 1 itération d'assimilation (bas). Les croix roses sont les points de mesures de K_{xy} , les points blancs sont les points d'observation des variations de niveaux d'eau, les losanges noirs sont les puits de pompage.

Il semble visuellement évident que l'hétérogénéité spatiale de K_{xy} dans le roc est augmentée après l'assimilation. Il s'agit d'un des avantages les plus importants découlant de l'utilisation de la méthode d'ensemble que de pouvoir représenter les niveaux d'hétérogénéité avec autant de réalisme. Cette hétérogénéité est en effet très importante pour la simulation des différents scénarios de pompage dans des environnements aussi complexes hydrauliquement. Bien que le champ exact de K_{xy} ne puisse pas être connu parfaitement, la mise en place d'un ensemble de réalisations calibrées par les données mesurées de niveaux d'eau permet de considérer l'incertitude, permettant ainsi de mieux interpréter les résultats.

Les valeurs de K_{xy} dans le faciès F1 de l'EskerSG_3 présentent également une hétérogénéité importante, avec des valeurs très élevées de K_{xy} pour les réalisations calibrées. Bien que très hétérogènes, les valeurs élevées de K_{xy} permettent généralement des débits de pompage assez élevés peu importe la position des puits de pompage des scénarios potentiels de l'UTES-II dans l'unité d'EskerSG_3.

L'hétérogénéité de K_{xy} combinée avec l'incertitude sur la position des zones moins perméables dans le roc rend le positionnement des puits de pompage des différents scénarios pour l'UTES-II plus risqué, tout en limitant les débits de pompage pouvant être imposés dans l'unité de Roc_5.

Le positionnement des puits au roc se fait à l'aide d'une carte de probabilité de dépassement d'un seuil de transmissivité calculée comme la somme des K_{xy} multipliée par l'épaisseur de roc. Une carte de transmissivité du roc est premièrement calculée sur chacune des 69 réalisations mises à jour après une itération de la méthode iES. Pour chaque point de cette carte de transmissivité, on calcule la probabilité de dépasser une valeur seuil de transmissivité (T_{seuil}) considérée comme étant suffisamment élevée pour permettre l'implantation d'un puits de pompage au roc. Une valeur de $T_{\text{seuil}} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, représentant un K_{xy} moyen de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ sur l'épaisseur de roc de 10 mètres est utilisée.

Cette carte (Figure 72) permet donc de localiser les zones où il est plus probable de trouver un roc possédant un K_{xy} plus élevé, et sera utilisée pour positionner les puits au roc dans les différents scénarios de confinement hydraulique testés et présentés dans ce rapport (section 7).

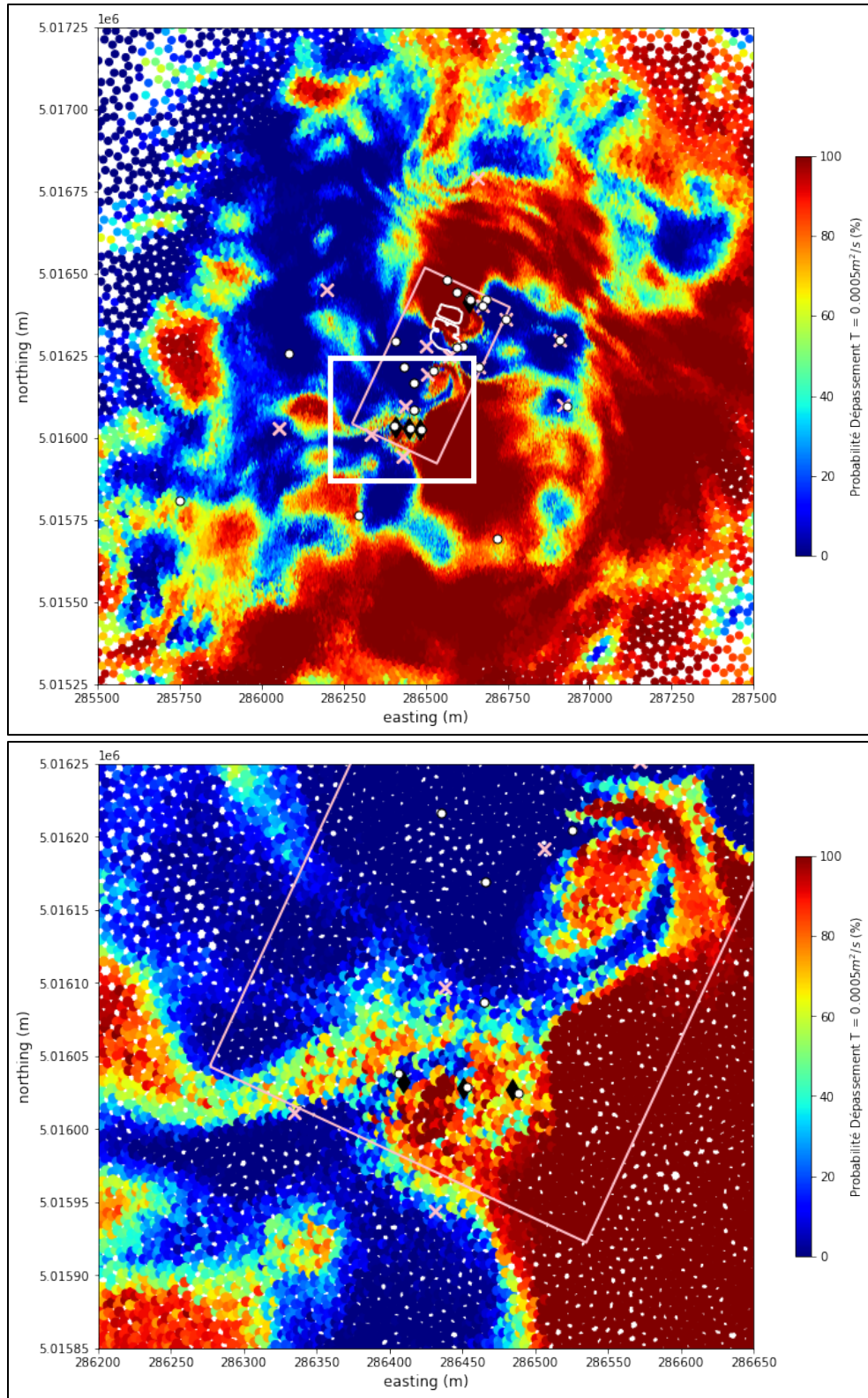


Figure 72. Distribution spatiale (haut : régional ; bas : local) de la probabilité de dépassement d'une transmissivité au roc de $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ sur l'ensemble des modèles assimilés après une itération de la méthode iES. Les croix roses sont les points de mesures de Kxy, les points blancs sont les points d'observations des variations de niveaux d'eau, les losanges noirs sont les puits de pompage.

7 Évaluation des scénarios de pompage de l'UTES-II

Les modèles numériques d'écoulement des eaux souterraines optimisés pourront servir à :

- la conception d'un nouveau système de confinement hydraulique nommé l'UTES-II qui sera appelé à remplacer le système actuellement en opération depuis 1984 (UTES) ;
- la définition du scénario de transition entre l'UTES et l'UTES-II ;
- la détermination des règles d'opération à long terme de l'UTES-II, et ce, dans une perspective de changement climatique ;
- l'établissement de règles d'exploitation des eaux souterraines à l'échelle régionale, de manière à ce que l'octroi de futures autorisations de prélèvement d'eau souterraine dans la région ne compromette pas l'intégrité de l'UTES-II.

Plusieurs scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Ville Mercier sont évalués par l'entremise de l'ensemble des modèles stochastiques d'écoulement des eaux souterraines :

- Scénario SA : Scénario représentant la situation actuelle, soit les trois puits de l'UTES (PW-111, PW-112, et PW-113) pompant à un débit moyen total de 3600 m³/jour, soit de 1200 m³/jour par puits.
- Scénario A : Les portions des milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de liquides immiscibles denses (LID) ou légers (LIL) sont confinées hydrauliquement en aménageant une composante de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker) à l'aval hydraulique de ces portions des milieux poreux et fracturés.
- Scénario B : Les portions des milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de LID et LIL sont confinées hydrauliquement en aménageant deux composantes de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker), soit une à l'amont hydraulique de ces portions et une autre à l'aval hydraulique. Dans ce scénario B, les puits en amont hydraulique dans le roc sont situés au nord du site de l'UTES.
- Scénario B_1 : Ce scénario est une version légèrement modifiée du scénario B, dans lequel les puits en amont hydraulique dans le roc sont situés à l'est du site de l'UTES.
- Scénario C : Les portions des milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de LID et LIL sont confinées hydrauliquement en aménageant une composante de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker) à l'amont hydraulique de ces portions, une composante d'injection (d'une partie des eaux pompées en amont) à l'aval hydraulique de ces mêmes portions, puis une composante de pompage intermédiaire (entre les deux précédentes) destinée à recueillir les eaux d'infiltration et permettant ainsi de maintenir une zone de stagnation des eaux souterraines contaminées créée par les deux autres composantes. Dans ce scénario C, les débits de pompage sont ajustés afin de respecter le plus fidèlement possible les débits de pompage ciblés par le MELCCFP.
- Scénario C_1 : Ce scénario est une version modifiée du scénario C, dans lequel les débits de pompage sont diminués afin d'éviter les problèmes de convergence numérique encourus sur les réalisations du scénario C.

Chacun des scénarios est évalué selon une liste de critères établis conjointement avec le MELCCFP (section 7.1) Les hypothèses et les limitations de l'évaluation sont décrites à la section 7.2. Le processus d'évaluation des scénarios est défini à la section 7.3, tandis que les évaluations des scénarios se trouvent à la section 7.4.

7.1 Critères d'évaluation des scénarios

Une grille de décision (Tableau 10) est établie selon une liste de 31 critères pour évaluer et comparer les scénarios envisagés pour la conception d'un nouveau système de confinement hydraulique. Cette grille servira d'outil d'aide à la décision pour le MELCCFP afin de guider le choix du scénario pour l'implantation du nouveau système de confinement hydraulique de l'UTES-II. Les critères sont classés en trois grandes catégories :

- les critères relatifs à la conception du système ;
- les critères relatifs à l'exploitation du système et
- les critères relatifs à la performance du système.

Les critères relatifs à la conception du système sont liés à la complexité de la logistique de maintenance du système. Ces critères incluent le nombre de puits du scénario (critères 1 à 5) et les débits de pompage et de réinjection recommandés (critères 6 à 11).

Les critères relatifs à l'exploitation font le suivi du comportement du système quant au maintien d'un gradient hydraulique horizontal vers les puits de pompage de l'usine de traitement (critères 12-13), et de maintenir des gradients hydrauliques verticaux du roc vers l'esker (critères 14 à 18). La direction du gradient horizontal est validée globalement sur l'ensemble du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, tandis que la direction des gradients verticaux est mesurée en quelques points de mesure précis au droit du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. L'incertitude existante sur le contrôle des débits minimum et maximum possibles aux puits de pompage de l'usine de traitement est également analysée afin d'évaluer la flexibilité du système sur les débits pouvant être utilisés (critères 19 à 22).

Les critères relatifs à la performance du système définissent tout d'abord (critères 23 à 25) les risques de migration d'une masse d'eau stagnante contaminée située en aval hydraulique du site hors de la zone de restriction d'utilisation des eaux souterraines. Cette zone est définie dans l'Annexe V du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection ([RPEP](#)). La limite sud de cette zone de restriction est utilisée pour définir une zone de surveillance et évaluer l'aire relarguée potentielle et le temps de parcours minimal requis à la masse d'eau stagnante contaminée pour atteindre la zone de restriction (Figure 73). Les critères de performance évaluent aussi la probabilité de confinement des zones contaminées de l'esker et au roc vers les puits de pompage de l'usine de traitement. L'étendue de la zone d'appel est évaluée selon deux types de critères. Le premier type (critères 26-27) indique le pourcentage des réalisations captant la totalité (100%) des zones contaminées de l'esker et au roc. Le second type (critères 28-29) calcule la proportion médiane des zones contaminées captée selon l'ensemble des réalisations. La résilience du système à un possible arrêt du système est également évaluée en estimant le nombre de jours maximal pendant lequel le système peut être arrêté avant que le régime d'écoulement des eaux souterraines ne revienne à son régime permanent, soit l'état naturel sans pompage (critère 30). Cette résilience du système permet également d'estimer le temps de transition minimum possible entre l'arrêt des puits de l'UTES et la mise en fonction des puits de l'UTES-II. Un critère de performance évalue également la flexibilité du système à la possibilité que de l'eau non contaminée puisse être pompée en dehors de la zone de restriction en amont hydraulique du site (critère 31).

Tableau 10. Grille des critères d'évaluation des différents scénarios de l'UTES-II.

Critères d'analyse					
Critères	Objectifs	Composantes du critère	Id	unité	Schéma
Critères relatifs à la conception					
Complexité du système	Déterminer les infrastructures nécessaire au piège hydraulique	Nombre de puits de pompage dans l'esker	1	-	Kxy moyen
		Nombre de puits d'injection dans l'esker	2	-	Kxy moyen
		Nombre de puits de pompage dans le roc	3	-	Kxy moyen
		Nombre de puits d'injection dans le roc	4	-	Kxy moyen
		Nombre de puits total	5	-	Kxy moyen
Volume d'eau à traiter	Minimiser le volume d'eau qui doit être traité à l'usine	Débit - pompage esker en aval hydraulique	6	m3/j	Kxy moyen
		Débit - pompage roc en aval hydraulique	7	m3/j	Kxy moyen
Volume d'eau en amont	Minimiser le volume d'eau qui doit être pompé en amont hydraulique pour diminuer les gradients hydrauliques	Débit - pompage esker en amont hydraulique	8	m3/j	Kxy moyen
		Débit - pompage roc en amont hydraulique	9	m3/j	Kxy moyen
Volume d'eau réinjecté	Minimiser le volume d'eau qui sera réinjecté dans les aquifères de l'esker et du roc	Débit - ré-injection dans l'esker	10	m3/j	Kxy moyen
		Débit - ré-injection dans le roc	11	m3/j	Kxy moyen
Critères relatifs à l'exploitation					
Suivi de performance du système	Maintenir un gradient hydraulique au droit de la zone contaminée de l'esker vers les puits de pompage de l'usine de traitement en tout temps	Proportion de réalisations captant la zone contaminée dans l'esker à partir de puits en amont	12	%	Probabiliste
		Proportion de réalisations captant la zone contaminée au roc à partir de puits en amont	13	%	Probabiliste
	Maintenir un gradient hydraulique vertical positif, soit du bas vers le haut de l'unité du roc vers l'esker en tout temps.	Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 1 positif	14	%	Probabiliste
		Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 2 positif	15	%	Probabiliste
		Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 3 positif	16	%	Probabiliste
		Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 4 positif	17	%	Probabiliste
		Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 5 positif	18	%	Probabiliste
	Contrôler les débits	Débit minimum possible dans l'esker en aval	19	m3/j	Kxy moyen
		Débit maximum possible dans l'esker en aval	20	m3/j	Kxy moyen
		Débit minimum possible dans le roc en aval	21	m3/j	Kxy moyen
Débit maximum possible dans le roc en aval		22	m3/j	Kxy moyen	
Critères relatifs à la performance					
Devenir de la masse d'eau stagnante aval	Définir le risque de migration vers les récepteurs de la masse d'eau stagnante contaminée	Aire moyenne de l'aire de restriction touchée par le relargage de particules après 100 ans	23	m2	Probabiliste
		Proportion de réalisations dépassant une aire critique touchée par le relargage de particules dans la zone de restriction	24	%	Probabiliste
		Temps minimum requis par les particules relarguées pour atteindre la zone de restriction	25	année	Probabiliste
Étendue de la zone d'appel	Vérifier le confinement des zones contaminées de l'esker et au roc	Proportion de réalisations captant 100% de la zone contaminée dans l'esker à partir des puits en aval	26	%	Probabiliste
		Proportion de réalisations captant 100% de la zone contaminée au roc à partir des puits en aval	27	%	Probabiliste
		Médiane de la proportion captée de la zone contaminée dans l'esker incluse dans le piège hydraulique	28	%	Probabiliste
		Médiane de la proportion captée de la zone contaminée au roc incluse dans le piège hydraulique	29	%	Probabiliste
Résilience du système	Évaluer le risque lors des opérations de réparations/maintenance	Durée maximale pendant laquelle le système peut être mis à l'arrêt avant retour au régime d'écoulement permanent	30	jour	Arrêt
Flexibilité du système	Valider la possibilité que de l'eau non-contaminée puisse être pompée en amont hydraulique du site	Débit possible d'un éventuel pompage en amont pour l'approvisionnement en eau	31	m3/j	Nord
Changement climatique	Simuler un scénario de climat futur en utilisant les recharges et utilisations d'eau souterraine projetées (pire scénario)	Résilience du système face à un scénario de changement climatique			Climat

7.2 Hypothèses et limitations de l'évaluation des scénarios

- Les puits sont positionnés selon la carte de probabilité de dépassement d'un seuil de transmissivité au roc de 5×10^{-4} m²/s (Figure 72) à partir des 69 réalisations du modèle hydrogéologique. L'hétérogénéité spatiale de Kxy dans le roc est très grande, il reste donc une grande incertitude sur cette carte de probabilité, signifiant que les débits de pompage prescrits pourraient ne pas être atteignables dans les futurs puits, selon la vraie conductivité hydraulique du roc à ces endroits précis. Il sera impératif de vérifier les conductivités hydrauliques *in situ* et valider les débits possibles avant de commencer le pompage.
- Les puits sont classés selon leur fonction dans le scénario. Sans être nécessairement présentes dans chaque scénario, six catégories de puits peuvent exister :
 - Puits de pompage en amont hydraulique dans le roc,
 - Puits de pompage en amont hydraulique dans l'esker,
 - Puits de pompage en aval hydraulique dans le roc,
 - Puits de pompage en aval hydraulique dans l'esker,
 - Puits de réinjection en aval hydraulique dans le roc,
 - Puits de réinjection en aval hydraulique dans l'esker.
- Le nombre de puits exact n'est pas optimisé de manière numérique, mais plutôt ajusté par essais et erreurs afin de permettre les débits prescrits. Cette approche est valide car la position exacte des futurs puits n'est pas connue et que le but de l'exercice est de tester des types de scénarios de pompage, et non d'optimiser un système en tant que tel.
 - S'ils sont situés en aval hydraulique, les puits de pompage dans l'esker sont placés aux coordonnées des puits actuels de l'UTES.
 - S'ils sont situés en amont hydraulique, les puits de pompage dans l'esker sont placés sur un isopièze.
 - Pour les scénarios C et C_1, les puits de pompage et de réinjection sont placés le plus fidèlement possible selon les propositions du MELCCFP.
- Certains scénarios de pompage incluent des puits de pompage au roc qui sont situés à l'intérieur des zones contaminées au roc. Il existe un risque de présence de phases contaminées (LI et eau) pendant le pompage.

7.3 Processus d'évaluation des scénarios

Chacun des scénarios est évalué selon le même processus afin de définir une base commune de comparaison entre les scénarios. Pour l'évaluation de tous les critères définis au Tableau 10, cinq schémas différents du modèle hydrogéologique doivent être calculés.

Le schéma « Kxy moyen » (Tableau 10) permet d'optimiser les débits de pompage ou de réinjection pour chaque groupe de puits en roulant plusieurs combinaisons possibles. Les valeurs de Kxy de ce modèle sont obtenues en calculant la moyenne des Kxy à partir des 69 réalisations de l'ensemble final (section 6.5.2). Sur chaque combinaison de débits testés, on calcule les paramètres suivants :

- Les variations des gradients verticaux en fonction des combinaisons de débits ;
- Les variations de la proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années en fonction des débits ;
- Les variations de la proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 années en fonction des débits ;

- Les variations du temps de parcours minimum requis par des particules relarguées à partir de la masse d'eau stagnante en aval hydraulique pour atteindre la limite de la zone de restriction de prélèvement en fonction des débits.

La combinaison optimale de débits sélectionnée pour le reste du processus permet de :

- minimiser les débits de pompage ;
- maintenir les gradients verticaux positifs (du roc vers l'esker) ou stabiliser leurs valeurs ;
- optimiser la proportion captée des zones contaminées au roc et dans l'esker ;
- minimiser le relargage des particules à partir de la masse d'eau stagnante contaminée en aval hydraulique.

Le schéma « Probabiliste » (Tableau 10) est un modèle hydrogéologique en régime permanent avec les débits optimaux calculé sur les 69 réalisations de l'ensemble final. Ce schéma permet d'évaluer certains critères de façon probabiliste, en calculant la proportion des réalisations respectant ou dépassant les critères énoncés. Cette approche probabiliste permet donc de détecter la distribution spatiale des incertitudes liées à l'évaluation des scénarios.

Le schéma « Arrêt » (Tableau 10) est un modèle hydrogéologique roulé en régime transitoire pour évaluer la durée maximale pendant laquelle le système peut être mis à l'arrêt avant que le régime d'écoulement des eaux souterraines ne revienne à son régime permanent. Tous les puits de pompage et d'injection du scénario sont brusquement mis à l'arrêt au début de la simulation transitoire. Les variations des gradients verticaux et des niveaux d'eau dans les puits de suivi sont analysées en fonction du temps depuis l'arrêt du système. Ce schéma roulé sur le scénario SA permet d'évaluer la transition entre le système actuel de l'UTES et le système de l'UTES-II. Les aires de captage au roc et dans l'esker, ainsi que le relargage de particules en aval sont également analysées à plusieurs temps après l'arrêt du pompage pour voir à partir de quand le confinement n'est plus assuré.

Le schéma « Nord » (Tableau 10) est un modèle hydrogéologique calculé en régime permanent pour évaluer la sensibilité du système face à un éventuel pompage en amont. Sur le modèle hydrogéologique moyen, trois puits de pompage hypothétiques (Tableau 11) sont ajoutés à environ 1 km au nord de la zone de restriction (Figure 73) en faisant varier les débits de pompage.

Tableau 11. Coordonnées des 3 puits hypothétiques utilisés dans le schéma Nord.

Puits	X (MTM Zone 8)	Y (MTM Zone 8)	Unité
Pompage Nord 1	287492	5017759	EskerSG_3
Pompage Nord 2	287807	5017685	EskerSG_3
Pompage Nord 3	288109	5017570	EskerSG_3

Les débits totaux suivants ont été testés sur chacun des scénarios : 500, 1000, 2000, 4000, 5000, et 8000 m³/jour. Ce système permet d'évaluer la possibilité d'implanter des puits d'approvisionnement en eau souterraine en amont de la zone contaminée des anciennes lagunes de Ville Mercier, sans affecter les différents scénarios de confinement hydraulique proposé.

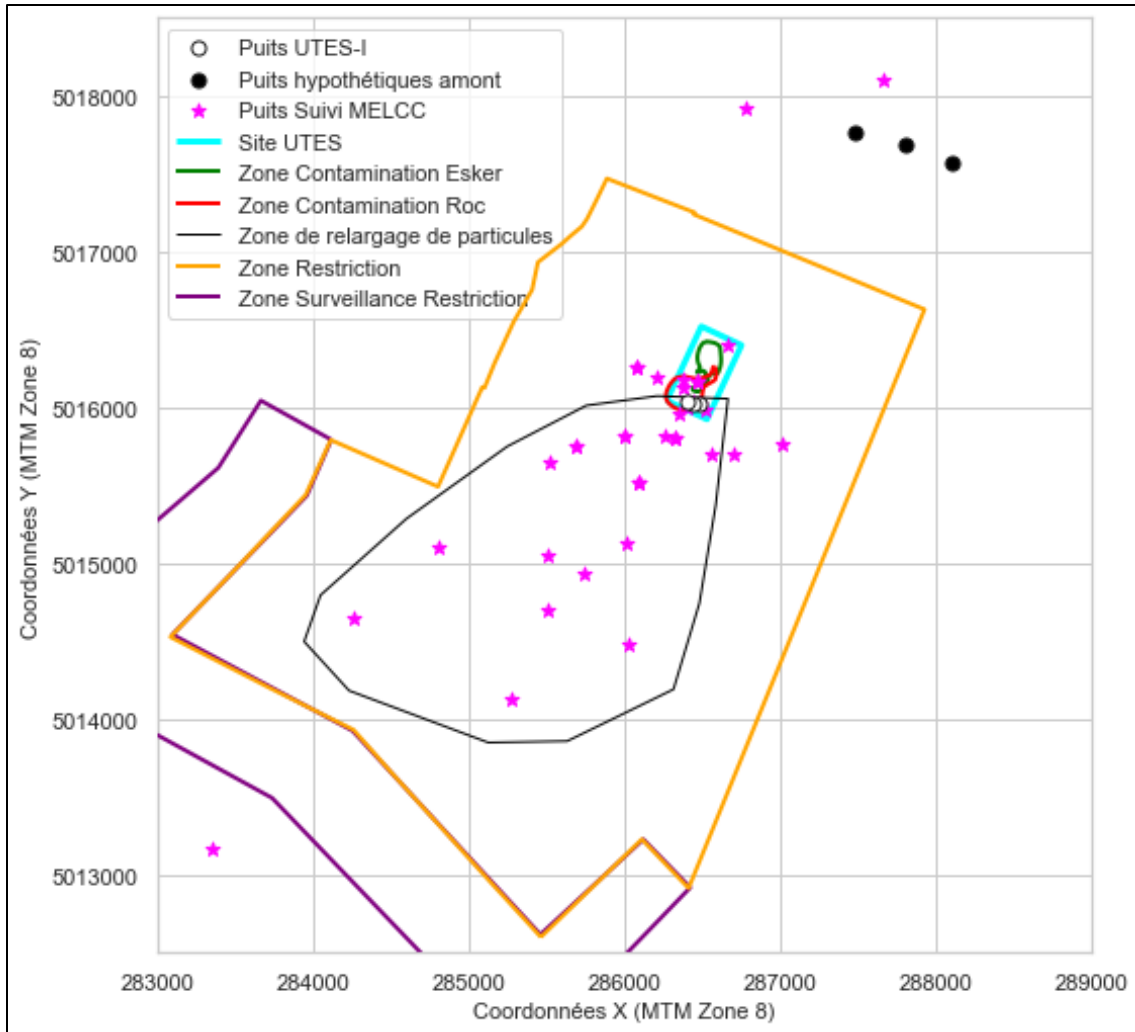


Figure 73. Composantes des différents schémas utilisés dans l'évaluation des scénarios.

Finalement, le schéma « Climat » (Tableau 10) est calculé en régime permanent sur les 69 réalisations de l'ensemble final, pour un cas représentant un changement d'exploitation de l'eau souterraine et des changements climatiques. Ce cas représente le scénario S3R3 du rapport de Ballard et coll (2022) soumis au MELCCFP en juillet 2022 :

- S3R3 : recharge effective partielle du cas d'exploitation maximale de l'eau souterraine, avec la recharge future proche calculée par HELP. Il s'agit du cas optimiste avec une recharge 50% plus élevée que celle des cas originaux, et une exploitation 38% plus élevée que celle des cas originaux.

Les critères du schéma Probabiliste sont recalculés pour le schéma Climat pour évaluer la résilience de chaque scénario face aux changements climatiques.

7.4 Résultats des évaluations des différents scénarios

Le Tableau 12 synthétise l'évaluation de tous les critères pour chacun des scénarios de confinement hydraulique de l'UTES-II testés dans le cadre de ce projet.

Tableau 12. Évaluation des différents scénarios de l'UTES-II.

Critère	Schéma	Composante du critère	Scénario	SA	A	B	B1	C	C1	SA_S3R3	A_S3R3	B_S3R3	B1_S3R3	C1_S3R3
										unité	Climat	Climat	Climat	Climat
Critères relatifs à la conception														
1	Kxy moyen	Nombre de puits de pompage dans l'esker	-	3	3	6	6	6	6	3	3	6	6	6
2	Kxy moyen	Nombre de puits d'injection dans l'esker	-	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	4
3	Kxy moyen	Nombre de puits de pompage dans le roc	-	0	3	6	6	12	12	0	3	6	6	12
4	Kxy moyen	Nombre de puits d'injection dans le roc	-	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0	6
5	Kxy moyen	Nombre de puits total	-	3	6	12	12	28	28	3	6	12	12	28
6	Kxy moyen	Débit - pompage esker en aval hydraulique	m3/j	3600	1500	1500	1500	NC	1090	3600	1500	1500	1500	1090
7	Kxy moyen	Débit - pompage roc en aval hydraulique	m3/j		300	300	300	NC	0		300	300	600	0
8	Kxy moyen	Débit - pompage esker en amont hydraulique	m3/j	0	0	300	300	NC	400	0	0	300	300	400
9	Kxy moyen	Débit - pompage roc en amont hydraulique	m3/j	0	0	300	300	NC	1200	0	0	300	0	1200
10	Kxy moyen	Débit - ré-injection dans l'esker	m3/j	0	0	0	0	NC	545	0	0	0	0	545
11	Kxy moyen	Débit - ré-injection dans le roc	m3/j	0	0	0	0	NC	300	0	0	0	0	300
Critères relatifs à l'exploitation														
12	Probabiliste	Proportion de réalisations captant la zone contaminée dans l'esker à partir de puits en amont	%	0	0	0	0	NC	19	0	0	0	0	14
13	Probabiliste	Proportion de réalisations captant la zone contaminée au roc à partir de puits en amont	%	0	0	7	72	NC	99	0	0	6	71	97
14	Probabiliste	Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 1 positif	%	70	0	0	0	NC	100	72	0	0	0	99
15	Probabiliste	Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 2 positif	%	0	0	0	0	NC	96	1	0	0	0	93
16	Probabiliste	Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 3 positif	%	81	49	30	0	NC	54	86	54	39	0	61
17	Probabiliste	Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 4 positif	%	100	99	65	10	NC	3	100	97	70	10	4
18	Probabiliste	Proportion de réalisations conservant le gradient vertical 5 positif	%	100	100	48	97	NC	0	100	99	51	99	0
19	Kxy moyen	Débit minimum possible dans l'esker en aval	m3/j	1500	1500	750	1500	NC	1090	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
20	Kxy moyen	Débit maximum possible dans l'esker en aval	m3/j	4500	6000	3000	3000	NC	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
21	Kxy moyen	Débit minimum possible dans le roc en aval	m3/j	#N/A	300	300	300	NC	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
22	Kxy moyen	Débit maximum possible dans le roc en aval	m3/j	#N/A	1500	300	750	NC	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Critères relatifs à la performance														
23	Probabiliste	Aire moyenne de l'aire de restriction touchée par le relargage de particules après 100 ans	m2	3750	16250	11250	9375	NC	13750	2500	10625	8125	8750	12500
24	Probabiliste	Proportion de réalisations dépassant une aire critique touchée par le relargage de particules dans la zone de restriction	%	0	28	10	6	NC	29	0	9	7	4	14
25	Probabiliste	Temps minimum requis par les particules relarguées pour atteindre la zone de restriction	année	74	62	64	66	NC	61	84	66	66	70	65
26	Probabiliste	Proportion de réalisations captant 100% de la zone contaminée dans l'esker à partir des puits en aval	%	59	29	14	22	NC	16	59	35	28	23	22
27	Probabiliste	Proportion de réalisations captant 100% de la zone contaminée au roc à partir des puits en aval	%	0	6	0	1	NC	0	1	1	0	0	0
28	Probabiliste	Médiane de la proportion captée de la zone contaminée dans l'esker incluse dans le piège hydraulique	%	100	98	96	96	NC	94	100	98	96	96	96
29	Probabiliste	Médiane de la proportion captée de la zone contaminée au roc incluse dans le piège hydraulique	%	82	92	85	92	NC	44	82	89	84	90	45
30	Arrêt	Durée maximale pendant laquelle le système peut être mis à l'arrêt avant retour au régime d'écoulement permanent	jour	30	7	7	3	NC	7	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
31	Nord	Débit possible d'un éventuel pompage en amont pour l'approvisionnement en eau	m3/j	5000	5000	5000	#N/A	NC	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

NC critère n'est pas applicable pour ce scénario en raison de problème de convergence
 #N/A critère non applicable à ce scénario

Les sections suivantes présentent le positionnement des différentes composantes du système pour chacun des 6 scénarios testés, la justification des paramètres utilisés, et les résultats principaux obtenus pour chaque scénario selon les critères d'évaluation établis et décrits précédemment (section 7.1).

Toutes les figures ayant servi aux évaluations des scénarios et aux calculs des différents critères se trouvent en Annexe 7.

7.4.1 Scénario SA

Le scénario SA représente la situation actuelle, soit les 3 puits actuels de l'UTES, pompant à un débit total de 3600 m³/jour, soit un débit moyen par puits de 1200 m³/jour. Les trois puits sont situés en aval hydraulique des anciennes lagunes et sont crépinés de l'esker au roc (Figure 74). Les figures permettant l'évaluation du scénario SA se trouvent aux Figures SA-1 à SA-33 à partir de la page 1 de l'Annexe 7.

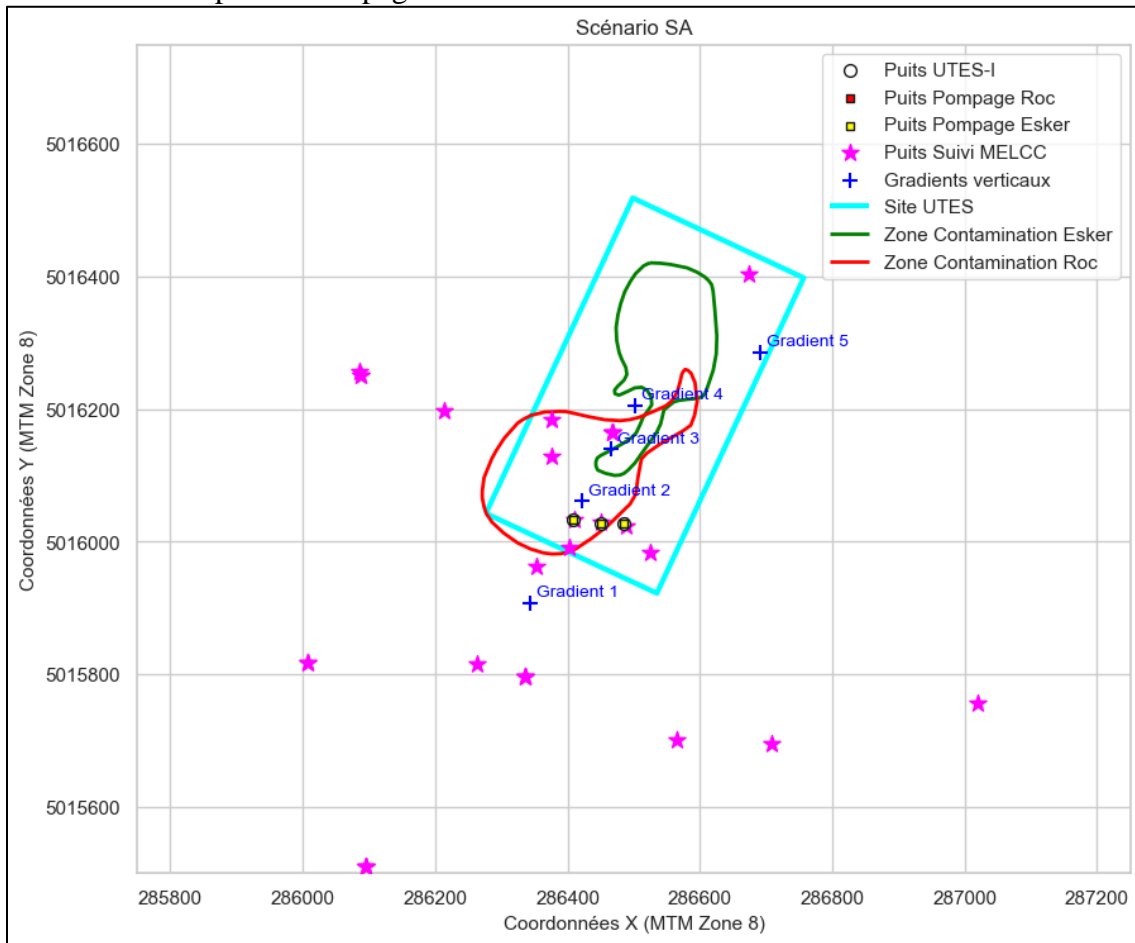


Figure 74. Position des différentes composantes du Scénario SA.

7.4.1.1 Analyse du schéma « Kxy moyen »

Des tests ont été effectués sur le schéma « Kxy moyen » pour analyser les effets des débits de pompage sur les critères de décision du scénario SA (Figures SA-2 et SA-3 de l'Annexe 7). Les débits totaux suivants ont été testés, répartis également sur les trois puits

de pompage : 750, 1500, 3600, 4500, 6000, 7500 m³/jour. Les tests du schéma « Kxy moyen » démontrent que le débit total aux trois puits de pompage situés en aval hydraulique pourrait être diminués sans compromettre l'intégrité du piège hydraulique. En effet, les gradients verticaux restent stables par rapport à la situation actuelle (3600 m³/jour), et les proportions des zones contaminées captées dans l'esker et dans le roc restent à leur valeur maximale. L'utilisation de débits de pompage trop élevés (6000 et 7500 m³/jour) pourrait impliquer un plus grand ratio d'eau pompée à partir du roc par rapport à l'eau pompée de l'esker (les puits de l'UTES sont crépinés de l'esker au roc). Puisque les rabattements dans le roc sont plus importants, une inversion des gradients verticaux serait possible en utilisant des débits trop forts. À la suite de l'arrêt des pompes, le temps de parcours minimum pour que les particules relâchées atteignent la zone de restriction est toutefois plus court, indication que des débits plus bas pourraient admettre un relargage d'une partie de la masse d'eau stagnante située en aval hydraulique du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Il serait intéressant de rouler tous les schémas d'évaluation du scénario SA avec des débits réduits pour tester de façon exhaustive la possibilité de réduire les débits de pompage opérationnels. Afin de permettre une comparaison des différents scénarios alternatifs avec le scénario actuel, le débit opérationnel total de 3600 m³/jour est utilisé pour l'analyse complète du scénario SA.

7.4.1.2 Analyse du schéma « Probabiliste »

Les résultats de l'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario SA sont présentés aux Figures SA-4 à SA-14 de l'Annexe 7. Les résultats montrent qu'à l'exception du gradient 2 qui est situé directement au-dessus d'une fenêtre au roc à proximité d'un puits de pompage, la majorité des réalisations conservent un gradient vertical positif entre le roc et l'esker aux points d'évaluation des gradients (Figure SA-4 de l'Annexe 7).

Les cartes de probabilités de captage du scénario SA (Figures SA-5 à SA-12 de l'Annexe 7) sont utilisées pour évaluer la direction des gradients horizontaux et le captage des zones contaminées dans l'esker et au roc, avec un point de vue régional et local. Les gradients horizontaux sont conservés vers les puits en aval puisqu'il n'y a pas de pompage en amont dans ce scénario. Il y a 59% des réalisations de ce scénario qui permettent de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker en moins de 5 ans. La proportion médiane de la zone contaminée de l'esker ainsi captée et calculée à partir de l'ensemble des réalisations de ce scénario est de 100%. Bien qu'aucune réalisation de ce scénario ne permette de capter la totalité de la zone contaminée définie au roc en moins de 25 ans, la proportion médiane de la zone contaminée au roc captée et calculée à partir de l'ensemble des réalisations est de 82%.

L'aire médiane atteinte dans la zone de restriction par des particules libérées à partir de la zone de relargage (Figure 73) après 100 ans de migration est de 3750 m² (Figure SA-13 de l'Annexe 7). Le temps minimum médian requis pour atteindre la zone de restriction est de 74 années (Figure SA-14 de l'Annexe 7). Ces paramètres sont des indications d'une faible proportion de la zone de restriction qui serait touchée par le relargage de particules.

7.4.1.3 Analyse du schéma « Arrêt »

On observe que les gradients verticaux (Figure SA-15 de l'Annexe 7) et les niveaux d'eau observés (Figure SA-16 de l'Annexe 7) reprennent une valeur constante associée à un régime permanent en moins de 45 jours après l'arrêt des puits de pompage au scénario SA. On observe une remontée rapide dans la première journée, associée à la remontée dans l'esker, suivie d'une longue remontée des rabattements associés à la remontée dans le roc.

Les cartes de migration de la zone contaminée de l'esker en fonction du temps après l'arrêt du pompage (Figure SA-17 de l'Annexe 7) indiquent que des particules relâchées à partir de la zone contaminée de l'esker commencent à s'échapper du piège hydraulique vers le sud 30 jours après l'arrêt du pompage, signe que le système de confinement hydraulique ne serait plus efficace à partir de ce temps après l'arrêt du pompage.

7.4.1.4 Analyse du schéma « Nord »

Le scénario SA est peu sensible à un pompage hypothétique en amont hydraulique pour l'approvisionnement en eau potable, jusqu'à concurrence de 5000 m³/jour répartis sur trois puits de pompage situés 1 km au nord de la limite de la zone de restriction. En effet, les gradients verticaux restent stables (Figure SA-18 de l'Annexe 7) et les niveaux d'eau (Figure SA-19 de l'Annexe 7) baissent légèrement jusqu'à cette limite. L'aire de captage des trois puits du schéma nord n'atteint pas le site des anciennes lagunes, et des particules relâchées dans la zone contaminée de l'esker restent captées par les puits du scénario SA initial (Figures SA-20 à SA-22 de l'Annexe 7). Il pourrait être possible de soutirer un débit total plus important en distribuant spatialement un plus grand nombre de puits de pompage au nord, mais ces scénarios n'ont pas été testés.

7.4.1.5 Analyse du schéma « Climat »

Le scénario de changement climatique (modèle S3R3 du rapport de Ballard et coll. 2022) ne semble pas affecter substantiellement les valeurs des critères calculés sur le scénario original SA (Figures SA-23 à SA-33 de l'Annexe 7). Les gradients verticaux ont une plus grande probabilité de rester positif avec le scénario SA_S3R3, tandis que l'aire de la zone de restriction touchée par le relargage est en baisse pour atteindre une valeur de 2500m² (Tableau 12).

7.4.1.6 Analyse des critères

Concernant l'analyse des critères relatifs à la conception du système, le scénario SA a l'avantage d'utiliser seulement trois puits de pompage qui sont déjà installés et fonctionnels. Cependant, les débits de pompage sont élevés et un grand volume d'eau doit être traité par l'UTES. Selon l'analyse du schéma « Kxy moyen », ce volume pourrait être diminué sans pour autant affecter la performance du piège hydraulique actuel.

En rapport aux critères relatifs à l'exploitation, le scénario SA maintient facilement les gradients hydrauliques vers les puits de pompage en aval, puisqu'il n'y a pas de puits de pompage situés en amont hydraulique. L'implantation des trois puits de pompage hypothétiques situés à environ 1 km au nord de la zone de restriction reste possible dans ce scénario, car un pompage jusqu'à 5000 m³/jour ne semble pas affecter les gradients horizontaux.

Selon les critères liés à la performance du système, on observe une très forte probabilité de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker. Le scénario actuel semble légèrement moins optimisé pour la capture de la zone contaminée au roc. Le système est résilient à un arrêt du système, pouvant rester à l'arrêt jusqu'à 30 jours sans migration de particules provenant de la zone contaminée de l'esker. Il est donc estimé que la transition vers le nouveau système de confinement devra s'effectuer à l'intérieur de ce délai de 30 jours.

7.4.2 Scénario A

Le scénario A représente un scénario similaire à la situation actuelle de l'UTES, mais en aménageant le positionnement des puits de pompage au roc en aval pour optimiser les débits de pompage requis pour conserver le confinement hydraulique. Les trois puits de pompage de l'UTES actuelle sont maintenus dans le scénario A, en gardant seulement la section crépinée dans l'esker. Trois puits de pompage supplémentaires sont positionnés en aval hydraulique au roc selon la carte de probabilité de dépassement d'un seuil de transmissivité (Figure 72). Les figures permettant l'évaluation du scénario A se trouvent aux Figures A-1 à A-33 à partir de la page 47 de l'Annexe 7. La Figure 75 présente la position des différentes composantes du scénario A.

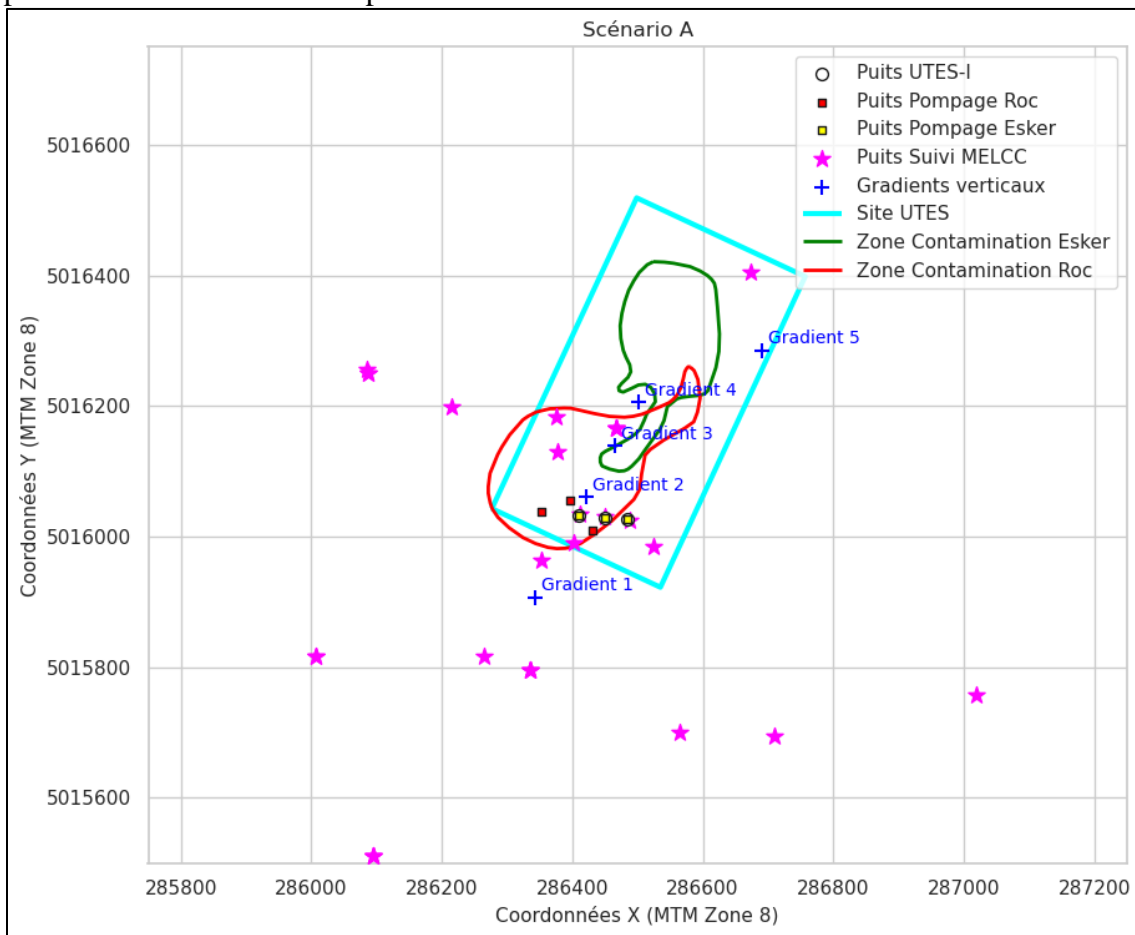


Figure 75. Position des différentes composantes du Scénario A.

7.4.2.1 Analyse du schéma « Kxy moyen »

Les tests effectués sur le schéma « Kxy moyen » comprennent 25 combinaisons possibles des débits de pompage pour les différents groupes de puits du scénario :

- Trois puits de pompage dans l'esker en aval hydraulique, débit total de :
 - 300, 750, **1500**, 3000, 6000 m³/jour
- Trois puits de pompage au roc en aval hydraulique, débit total de :
 - 150, **300**, 750, 1500, 3000 m³/jour.

Les tests du schéma « Kxy moyen » démontrent que plusieurs combinaisons de pompage donnent des résultats satisfaisants concernant les probabilités de captage des zones contaminées tout en minimisant les débits totaux nécessaires (Figures A-2 et A-3 de l'Annexe 7). Selon les tests effectués, la combinaison idéale serait un débit total de 1500 m³/jour aux trois puits de pompage de l'esker en aval hydraulique et de 300 m³/jour aux trois puits de pompage au roc en aval hydraulique. Ce scénario a l'avantage de conserver les trois puits actuels de l'UTES, et rajouter seulement trois nouveaux puits au roc en aval. Ces trois puits au roc permettent d'optimiser l'aire de captage et de minimiser le volume d'eau contaminée relarguée en aval hydraulique. Il serait possible d'utiliser des débits plus bas, mais cela diminuerait la probabilité de capter la totalité des zones sources tout en augmentant le risque d'admettre un relargage plus important de la masse d'eau stagnante située en aval hydraulique. Les débits maxima possibles afin de rajouter un facteur de sécurité au système de confinement sont de 2000 m³/jour par puits (6000 m³/jour total) dans l'esker et de 500 m³/jour par puits (1500 m³/jour total) dans le roc. Bien qu'assurant un meilleur confinement, des débits plus élevés sont susceptibles de générer des inversions de gradients verticaux entre le roc et l'esker (vers le bas) et vont assurément générer un plus grand volume d'eau à traiter à l'UTES.

7.4.2.2 Analyse du schéma « Probabiliste »

Les résultats de l'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario A sont présentés aux Figures A-4 à A-14 de l'Annexe 7. L'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario A nous montre que la majorité des réalisations conservent un gradient vertical positif entre le roc et l'esker pour les gradients 3, 4 et 5 (Figure A-4 de l'Annexe 7). En raison du pompage distinct dans des puits au roc en aval hydraulique, les gradients 1 et 2 restent négatifs (vers le bas) pour l'ensemble des réalisations, créant ainsi une inversion de gradients verticaux et pouvant laisser s'écouler des contaminants provenant de la zone source de l'esker vers l'aquifère du roc. Malgré cette inversion de gradients aux points de mesure 1 et 2, puisque ces points se trouvent dans l'aire de captage au roc du scénario A (Figure A-5), une contamination au roc à ces points serait redirigée vers l'UTES.

Les cartes de probabilités de captage du scénario A (Figures A-5 à A-12 de l'Annexe 7) sont utilisées pour évaluer la direction des gradients horizontaux et le captage des zones contaminées dans l'esker et au roc, avec un point de vue régional et local. Les gradients horizontaux sont conservés vers les puits en aval puisqu'il n'y a pas de pompage en amont dans ce scénario. Il y a 29% des réalisations du scénario A qui permettent de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker en moins de 5 ans. La proportion médiane captée de la zone contaminée de l'esker est de 98% à partir de l'ensemble des réalisations de ce scénario A. Ces critères sont en légère baisse par rapport au scénario SA, en raison des plus faibles débits utilisés dans l'esker. La proportion médiane de la zone contaminée au roc

captée est de 92%, et il y a une probabilité de 6% de capter la totalité de la zone contaminée au roc en moins de 25 ans. Ces proportions sont en hausse pour la zone contaminée au roc par rapport au scénario SA, en raison de l'optimisation du positionnement des puits au roc dans le scénario A.

L'aire médiane atteinte dans la zone de restriction par des particules relarguées à partir de la zone de relargage (Figure 73) après 100 ans de migration est de 16250 m² (Figure A-13 de l'Annexe 7). Le temps minimum médian requis pour atteindre la zone de restriction est de 62 années (Figure A-14 de l'Annexe 7). L'aire médiane est en hausse tandis que le temps de migration minimum est en baisse par rapport au scénario actuel, indiquant que les débits plus faibles utilisés dans ce scénario A pourraient admettre une migration plus importante de la contamination déjà présente en aval hydraulique.

7.4.2.3 Analyse du schéma « Arrêt »

On observe que les gradients verticaux (Figure A-15 de l'Annexe 7) reprennent une valeur constante associée à un régime permanent en moins de 30 jours suivant l'arrêt des puits de pompage au scénario A. Les niveaux d'eau observés (Figure A-16 de l'Annexe 7) remontent très rapidement en 1 journée, pour ensuite continuer une lente remontée pour atteindre un régime permanent en moins de 30 jours après l'arrêt des puits de pompage au scénario A.

Les cartes de migration de la zone contaminée de l'esker en fonction du temps après l'arrêt du pompage (Figure A-17 de l'Annexe 7) indiquent que les particules relâchées dans la zone contaminée de l'esker commencent à s'échapper du piège hydraulique vers le sud 7 jours après l'arrêt du pompage, signe que le système de confinement hydraulique ne serait plus efficace à partir de ce temps après l'arrêt du pompage.

7.4.2.4 Analyse du schéma « Nord »

De façon semblable au scénario SA, un pompage hypothétique en amont hydraulique affecte peu la performance du système de confinement hydraulique de ce scénario A (Figures A-18 à A-22 de l'Annexe 7), jusqu'à concurrence d'un débit de pompage de 5000 m³/jour réparti sur les trois de pompage.

7.4.2.5 Analyse du schéma « Climat »

Le scénario de changement climatique (modèle S3R3 du rapport de Ballard et coll. 2022) affecte peu les valeurs des critères comparativement au scénario A initial (Figures A-23 à A-33 de l'Annexe 7). On observe une petite amélioration sur la proportion de réalisations captant 100% de la zone contaminée de l'esker (passant de 29% à 35%), mais une baisse de cette proportion (passant de 6% à 1%) au niveau de la zone contaminée au roc. On remarque que l'aire de la zone de restriction touchée par le relargage est en nette baisse, passant d'une aire médiane de 16250m² à 10625m² (Tableau 12).

7.4.2.6 Analyse des critères

Concernant l'analyse des critères relatifs à la conception du système, le scénario A demande davantage de puits de pompage (6 puits) que le scénario SA, mais a l'avantage d'utiliser les 3 puits de pompage de l'UTES qui sont déjà installés et fonctionnels. Afin de

respecter les paramètres testés de ce scénario, les sections ouvertes au roc devraient être obturées afin de ne garder que la composante de pompage dans l'esker. Les débits de pompage sont moins élevés, générant un volume d'eau moins important à être traité par l'UTES. Selon l'analyse du schéma « Kxy moyen », il reste toutefois une incertitude importante sur les débits *in situ* pouvant optimiser ce scénario.

En rapport aux critères relatifs à l'exploitation, le scénario A maintient facilement les gradients hydrauliques vers les puits de pompage en aval, puisqu'il n'y a pas de puits de pompage situés en amont hydraulique. L'implantation des trois puits de pompage situés environ 1 km au nord de la zone de restriction reste possible dans ce scénario, car un pompage jusqu'à 5000 m³/jour ne semble pas affecter les gradients horizontaux.

Selon les critères liés à la performance du système, on observe une très forte probabilité de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker. Le scénario A semble légèrement optimisé pour la capture de la zone contaminée au roc par rapport au scénario SA. Le système est toutefois moins résilient à un arrêt du système, alors qu'il y aurait risque de migration 7 jours après l'arrêt des pompes, et retour au niveau permanent moins de 30 jours après l'arrêt des pompes.

La plage importante de débits de pompage pouvant être utilisée pour les puits en aval hydraulique dans l'esker et au roc est un avantage significatif au niveau de la transition des systèmes. Il serait ainsi possible d'augmenter les débits temporairement au début de la transition afin de maximiser le développement de la nouvelle aire de captage à la suite de l'implémentation du scénario A.

7.4.3 Scénario B

Le scénario B représente le scénario A additionné de puits de pompage en amont hydraulique dans le roc et l'esker pour tenter de diminuer les gradients hydrauliques horizontaux, et ainsi limiter l'apport d'eau non-contaminée au piège hydraulique. Cette composante a ainsi pour but de diminuer la quantité d'eau contaminée qui serait nécessaire de pomper et traiter pour ce scénario. Les six puits de pompage du scénario A sont maintenus dans ce scénario B, les puits additionnels dans l'esker sont positionnés selon un isopièze, et les puits additionnels au roc sont positionnés selon la carte de probabilité de dépassement d'un seuil de transmissivité (Figure 72). Les figures permettant l'évaluation du scénario B se trouvent aux Figures B-1 à B-33 à partir de la page 93 de l'Annexe 7. La Figure 76 présente la position des différentes composantes du scénario B.

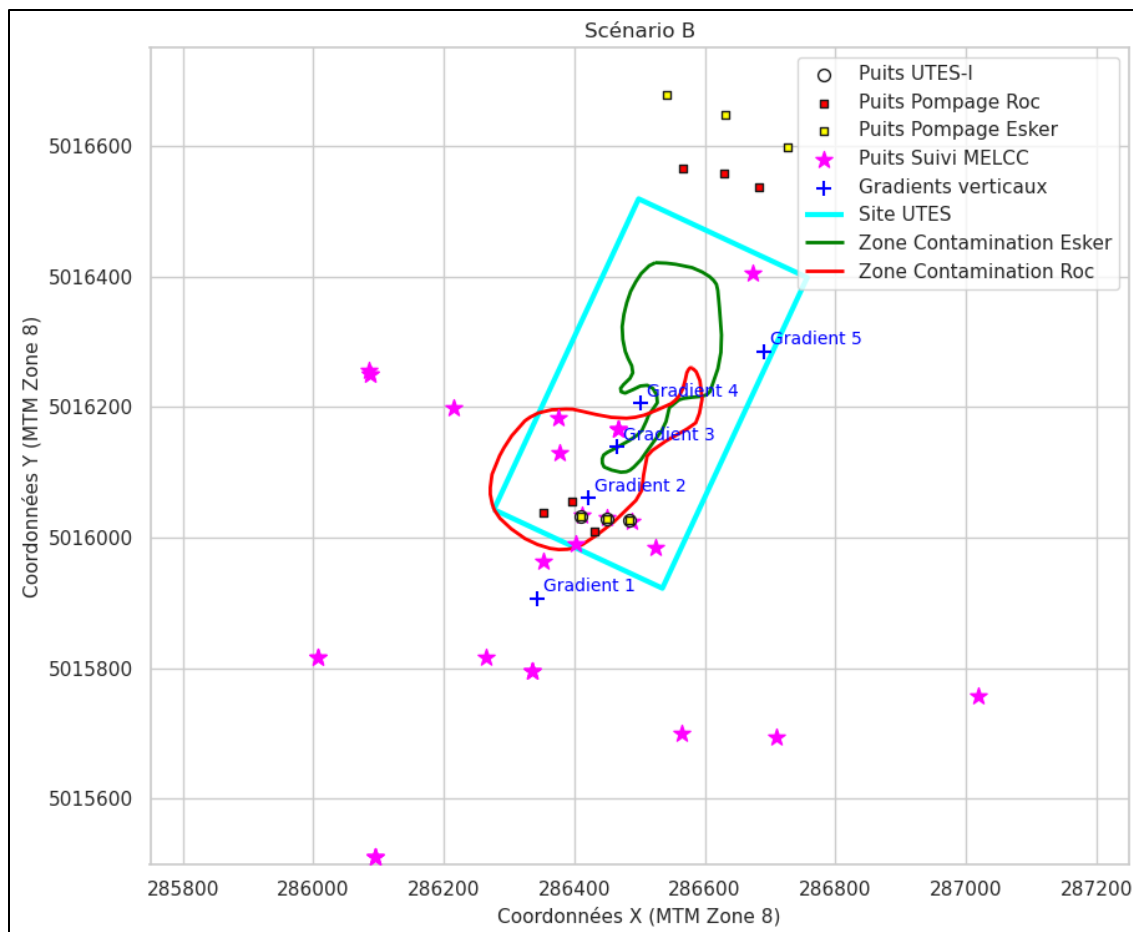


Figure 76. Position des différentes composantes du Scénario B.

7.4.3.1 Analyse du schéma « Kxy moyen »

Les tests effectués sur le schéma « Kxy moyen » comprennent les 54 combinaisons suivantes de débits de pompage selon les différents groupes de puits :

- Trois puits de pompage dans l’esker en aval hydraulique, débit total de :
 - 750, **1500**, 3000 m³/jour
- Trois puits de pompage au roc en aval hydraulique, débit total de :
 - **300**, 750 m³/jour.
- Trois puits de pompage dans l’esker en amont hydraulique, débit total de :
 - **300**, 750, 1500 m³/jour
- Trois puits de pompage au roc en amont hydraulique, débit total de :
 - **300**, 750, 1500 m³/jour.

Les débits en gras ci-dessus sont les débits optimaux conservés pour la suite des analyses du scénario B. Les débits des puits en aval hydraulique sont identiques à ceux du scénario A. Les tests du schéma « Kxy moyen » démontrent que quelques combinaisons de pompage donnent des résultats satisfaisants concernant les probabilités de captage tout en diminuant les débits totaux nécessaires (Figures B-2 et B-3 de l’Annexe 7). Les débits minima possibles pour garder un confinement hydraulique sont 250 m³/jour par puits (750 m³/jour total) dans l’esker et de 100 m³/jour par puits (300 m³/jour total) dans le roc. Les

débites maxima possibles afin de rajouter un facteur de sécurité au système de confinement sont de 1000 m³/jour par puits (3000 m³/jour total) dans l'esker et de 100 m³/jour par puits (300 m³/jour total) dans le roc. Des débits de pompage plus élevés en aval hydraulique dans le roc seraient susceptibles de générer des inversions de gradients verticaux entre le roc et l'esker. En raison du pompage au roc en amont hydraulique, il existe une marge moins importante sur les débits qui seraient possibles d'utiliser en aval hydraulique sans affecter la distribution des gradients hydrauliques.

Ce scénario possède toujours l'avantage de garder les trois puits actuels de l'UTES, mais implique de rajouter de nouveaux puits au roc en aval hydraulique (3) et de nouveaux puits au roc (3) et dans l'esker (3) en amont hydraulique, pour un total minimum de 9 nouveaux puits. Le nombre de puits n'est pas optimisé, mais sélectionné afin de pouvoir maintenir les débits prescrits. Les trois puits au roc en aval hydraulique permettent d'optimiser les aires de captage et ainsi minimiser le volume d'eau contaminée relarguée.

7.4.3.2 Analyse du schéma « Probabiliste »

Les résultats de l'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario B sont présentés aux Figures B-4 à B-14 de l'Annexe 7. L'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario B montre qu'il est plus difficile de garder un gradient vertical positif entre le roc et l'esker pour tous les points de mesure (Figure B-4 de l'Annexe 7), démontrant l'importance du pompage au roc en amont hydraulique pour le calcul des gradients. Un ajustement précis des débits est nécessaire afin de garder les gradients verticaux positifs ou près de zéro. Les gradients 1 et 2 restent toutefois négatifs pour l'ensemble des réalisations, en raison du pompage au roc en aval hydraulique qui génère des rabattements très importants.

Les cartes de probabilités de captage du scénario B (Figures B-5 à B-12 de l'Annexe 7) sont utilisées pour évaluer la direction des gradients horizontaux et le captage des zones contaminées dans l'esker et au roc, avec un point de vue régional et local. Selon la carte de probabilité de captage au roc à partir des puits en amont, il y a moins de 20% de probabilité que les gradients soient inversés vers le nord dans le roc.

Il y a 14% des réalisations de ce scénario B qui permettent de capter la totalité de la zone contaminée dans l'esker en moins de 5 ans. La proportion médiane captée est de 96% de la zone contaminée dans l'esker. Bien qu'aucune des réalisations ne capte la totalité de la zone contaminée au roc en moins de 25 ans, la proportion médiane captée qui est calculée sur l'ensemble des réalisations est de 85%. Ces proportions sont en baisse pour la zone contaminée de l'esker mais en hausse pour la zone contaminée au roc par rapport au scénario SA.

L'aire médiane atteinte dans la zone de restriction par des particules libérées à partir de la zone de relargage après 100 ans de migration est de 11250 m² (Figure B-13 de l'Annexe 7). Le temps minimum médian requis pour atteindre la zone de restriction est de 64 années (Figure B-14 de l'Annexe 7). L'aire médiane est en nette hausse et le temps minimum en baisse par rapport au scénario SA, largement causé par les débits de pompage plus modestes utilisés. Ces critères montrent toutefois une légère amélioration par rapport au

scénario A, en raison du pompage en amont hydraulique qui réduit les vitesses d'écoulement.

7.4.3.3 Analyse du schéma « Arrêt »

On observe que les gradients verticaux (Figure B-15 de l'Annexe 7) reprennent une valeur constante associée à un régime permanent en moins de 14 jours suivant l'arrêt des puits de pompage au scénario B. Les niveaux d'eau observés (Figure B-16 de l'Annexe 7) remontent rapidement en 1 journée, pour ensuite continuer une lente remontée pour atteindre un régime permanent en moins de 14 jours après l'arrêt des puits de pompage au scénario B.

Les cartes de migration de la zone contaminée de l'esker en fonction du temps après l'arrêt du pompage (Figure B-17 de l'Annexe 7) indiquent que les particules relâchées à partir de la zone contaminée de l'esker commencent à s'échapper du piège hydraulique vers le sud 7 jours après l'arrêt du pompage, signe que le système de confinement hydraulique n'est plus efficace à partir de ce temps après l'arrêt du pompage.

7.4.3.4 Analyse du schéma « Nord »

De façon semblable aux scénarios SA et A, le scénario B est peu sensible à un pompage hypothétique en amont hydraulique pour l'approvisionnement en eau potable, jusqu'à concurrence de 5000 m³/jour répartis sur trois puits de pompage situés 1 km au nord de la zone de restriction (Figures B-18 à B-22 de l'Annexe 7).

7.4.3.5 Analyse du schéma « Climat »

Le scénario de changement climatique affecte positivement les critères comparativement au scénario B initial (Figures B-23 à B-33 de l'Annexe 7). La probabilité de conserver des gradients positifs est plus élevée dans le schéma « Climat » que pour le scénario B initial. On observe également une probabilité accrue de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker (14% à 28%), alors que cette probabilité reste à 0% au niveau de la zone contaminée au roc. Les proportions médianes des zones contaminées captées restent les mêmes avec ce scénario de changement climatique. On remarque que l'aire de la zone de restriction touchée par le relargage est en baisse, passant d'une aire médiane de 11250 m² à 8125 m².

7.4.3.6 Analyse des critères

Concernant l'analyse des critères relatifs à la conception du système, le scénario B nécessite davantage de puits de pompage (12 puits) que les scénarios SA et A. Neuf de ces puits seraient des nouveaux puits à forer, puisque les 3 puits de pompage de l'UTES pourraient être utilisés dans ce scénario, en obturant les sections ouvertes au roc afin de ne garder que la composante de pompage dans l'esker. Les débits de pompage sont moins élevés que pour le scénario SA mais plus élevés que le scénario A en raison des puits de pompage en amont hydraulique. Selon l'analyse du schéma « Kxy moyen », il reste toutefois une incertitude importante sur les débits *in situ* pouvant optimiser ce scénario.

En rapport aux critères relatifs à l'exploitation et avec les débits de pompage testés pour ce scénario B, il est plus difficile de maintenir les gradients hydrauliques vers les puits de pompage en aval, en raison des puits de pompage situés en amont hydraulique. Des débits

de pompage trop élevés en amont hydraulique engendreraient un mouvement des particules des zones contaminées vers le nord.

L'implantation de puits hypothétiques d'approvisionnement en eau à environ 1 km au nord de la zone de restriction reste possible avec ce scénario. En effet, un pompage hypothétique jusqu'à 5000 m³/jour ne génère pas d'inversion de gradients hydrauliques horizontaux.

Selon les critères liés à la performance du système, on observe une forte probabilité de capter la totalité des zones contaminées, avec une proportion médiane captée de 96% et 85% pour la zone contaminée dans l'esker et au roc, respectivement. Le système semble toutefois moins résilient à un arrêt du système, pouvant rester à l'arrêt 7 jours avant de risquer une migration de particules, et de 14 jours avant que les niveaux d'eau reprennent un niveau stable. Il existe également une faible probabilité (7%) que les puits de pompage au roc en amont hydraulique captent la zone contaminée au roc.

La plage importante de débits de pompage pouvant être utilisée pour les puits en aval hydraulique dans l'esker et au roc est un avantage significatif au niveau de la transition des systèmes. Il serait ainsi possible d'augmenter les débits temporairement au début de la transition afin de maximiser le développement de la nouvelle aire de captage à la suite de l'implémentation du scénario B. Il existe également plus de leviers pour ajuster les gradients hydrauliques et optimiser le captage à la suite de l'ajout de puits de pompage en amont hydraulique.

Ce scénario prévoit, en amont hydraulique, un pompage minimum de 300 m³/jour d'eau non-contaminée aux puits de pompage au roc, ainsi qu'un pompage additionnel minimum de 300 m³/jour dans l'esker.

7.4.4 Scénario B_1

La Figure 77 présente la position des différentes composantes du scénario B_1. Le scénario B_1 est une variante du scénario B, où les puits de pompage au roc en amont hydraulique sont situés à l'est du site de l'UTES, afin d'intercepter cette composante de l'écoulement des eaux souterraines dans l'unité de roc. Seuls les puits de pompage au roc en amont hydraulique sont repositionnés dans ce scénario B_1, par rapport au scénario B. Ces puits sont positionnés selon la carte de probabilité de dépassement d'un seuil de transmissivité (Figure 72). Les figures permettant l'évaluation du scénario B_1 se trouvent aux Figures B_1-1 à B_1-33 à partir de la page 139 de l'Annexe 7.

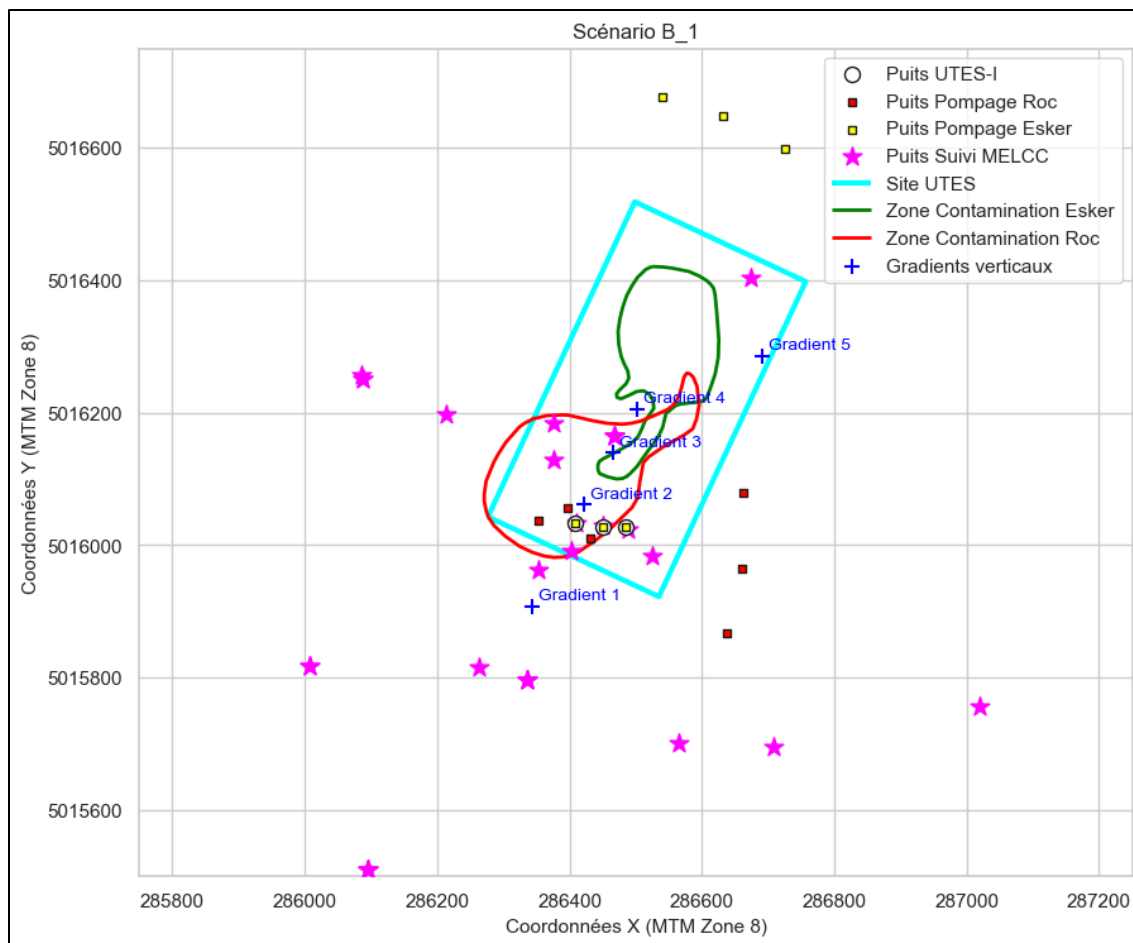


Figure 77. Position des différentes composantes du Scénario B_1.

7.4.4.1 Analyse du schéma « Kxy moyen »

Les tests effectués sur le schéma « Kxy moyen » comprennent les mêmes 54 combinaisons de débits de pompage analysées pour le scénario B :

- Trois puits de pompage dans l'esker en aval hydraulique, débit total de :
 - 750, **1500**, 3000 m³/jour
- Trois puits de pompage au roc en aval hydraulique, débit total de :
 - **300**, 750 m³/jour.
- Trois puits de pompage dans l'esker en amont hydraulique, débit total de :
 - **300**, 750, 1500 m³/jour
- Trois puits de pompage au roc en amont hydraulique à l'est, débit total de :
 - **300**, 750, 1500 m³/jour.

Les débits en gras ci-dessus sont les débits jugés optimaux qui sont gardés pour la suite des analyses du scénario B_1. Ces débits de pompage sont les mêmes que ceux du scénario B, seule la position des puits de pompage au roc en amont hydraulique varie. Les tests du schéma « Kxy moyen » démontrent que quelques combinaisons de pompage donnent des résultats satisfaisants concernant les probabilités de captage des zones contaminées tout en minimisant les débits totaux nécessaires (Figures B_1-2 et B_1-3 de l'Annexe 7). Les débits minima possibles pour garder un confinement hydraulique sont 500 m³/jour par puits

(1500 m³/jour total) dans l'esker et de 100 m³/jour par puits (300 m³/jour total) dans le roc. Les débits maxima possibles afin de rajouter un facteur de sécurité au système de confinements sont de 1000 m³/jour par puits (3000 m³/jour total) dans l'esker et de 250 m³/jour par puits (750 m³/jour total) dans le roc. Des débits plus élevés sont susceptibles de générer des inversions de gradients horizontaux vers les puits au roc en amont hydraulique. À partir de ces combinaisons satisfaisantes, la combinaison en gras ci-dessus est sélectionnée pour le reste des analyses du scénario B_1.

Ce scénario possède toujours l'avantage de garder les trois puits actuels de l'UTES, mais implique de rajouter de nouveaux puits au roc en aval hydraulique (3) et de nouveaux puits au roc (3) et dans l'esker (3) en amont hydraulique, pour un total de 9 nouveaux puits. Le nombre de puits n'est pas optimisé, mais sélectionné afin de pouvoir maintenir les débits prescrits. Les trois puits au roc en aval hydraulique doivent optimiser les aires de captage et minimiser le volume d'eau contaminée relarguée.

7.4.4.2 Analyse du schéma « Probabiliste »

Les résultats de l'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario B_1 sont présentés aux Figures B_1-4 à B_1-14 de l'Annexe 7. Similairement au scénario B, l'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario B_1 montre qu'il est difficile de garder un gradient vertical positif entre le roc et l'esker à l'exception du gradient 5, situé plus au nord du site (Figure B_1-4 de l'Annexe 7). Le pompage au roc en amont hydraulique à l'est du site de l'UTES affecte grandement le calcul des gradients en créant des rabattements importants au roc aux points de calcul des gradients verticaux. Un ajustement précis des débits sera nécessaire afin de garder les gradients verticaux positifs, ou du moins nuls. Les gradients 1 à 3 restent toutefois négatifs pour l'ensemble des réalisations.

Les cartes de probabilités de captage du scénario B_1 (Figures B_1-5 à B_1-12 de l'Annexe 7) sont utilisées pour évaluer la direction des gradients horizontaux et le captage des zones contaminées dans l'esker et au roc, avec un point de vue régional et local. Il y a 22% des réalisations du scénario B_1 qui permettent de capter la totalité de la zone contaminée dans l'esker en moins de 5 ans, avec une proportion médiane captée de 96%. Il y a 1% des réalisations qui captent la totalité de la zone contaminée au roc en moins de 25 ans, avec une proportion médiane captée de 92%. Cependant, le positionnement des puits de pompage au roc à l'est du site de l'UTES implique que 72% des réalisations sont susceptibles de capter la zone contaminée au roc à partir de ces puits situés en amont hydraulique au roc.

L'aire médiane atteinte dans la zone de restriction par des particules libérées à partir de la zone de relargage après 100 ans de migration relarguées dans la zone de restriction est de 9375 m² (Figure B_1-13 de l'Annexe 7). Le temps minimum médian requis pour atteindre la zone de restriction est de 66 années (Figure B_1-14 de l'Annexe 7). Cette aire médiane et ce temps minimum sont similaires à ceux calculés par le scénario B.

7.4.4.3 Analyse du schéma « Arrêt »

On observe que les gradients verticaux (Figure B_1-15 de l'Annexe 7) et les niveaux d'eau observés (Figure B_1-16 de l'Annexe 7) reprennent une valeur constante associée à un régime permanent 3 à 7 jours à la suite de l'arrêt des puits de pompage au scénario B_1. Les cartes de migration de la zone contaminée de l'esker en fonction du temps après l'arrêt du pompage (Figure B_1-17 de l'Annexe 7) indiquent également que les particules relâchées dans la zone contaminée commenceraient à migrer 3 jours suivant l'arrêt du pompage. L'utilisation de puits de pompage en amont hydraulique à l'est du site de l'UTES ne permet pas d'améliorer la résilience du système par rapport au scénario B à la suite d'un arrêt du pompage.

7.4.4.4 Analyse du schéma « Nord »

De façon semblable aux autres scénarios, le scénario B_1 est peu sensible à un pompage hypothétique en amont hydraulique pour l'approvisionnement en eau potable, jusqu'à concurrence de 5000 m³/jour réparti sur trois puits de pompage (Figure B_1-18 à B_1-22 de l'Annexe 7).

7.4.4.5 Analyse du schéma « Climat »

Le scénario de changement climatique affecte peu les valeurs des critères comparativement au scénario B_1 (Figure B_1-23 à B_1-33 de l'Annexe 7). La probabilité de conserver des gradients positifs est similaire dans le schéma « Climat » que pour le scénario B_1 initial. On n'observe pas d'amélioration sur la probabilité de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker (22% à 23%). Cette probabilité descend à 0% au niveau de la zone contaminée au roc. Les proportions médianes des zones contaminées captées restent les mêmes avec ce scénario de changement climatique. On remarque que l'aire de la zone de restriction touchée par le relargage est en baisse, passant d'une aire médiane de 9375m² à 8750m².

7.4.4.6 Analyse des critères

Concernant l'analyse des critères relatifs à la conception du système, le scénario B_1 nécessite autant de puits de pompage (12 puits) que le scénario B. Neuf de ces puits seraient des nouveaux puits à forer, puisque les 3 puits de pompage de l'UTES pourraient être utilisés dans ce scénario, en obturant les sections ouvertes au roc afin de ne garder que la composante de pompage dans l'esker. Les débits de pompage sont moins élevés que pour le scénario SA mais plus élevés que le scénario A en raison des puits de pompage en amont hydraulique. Selon l'analyse du schéma « Kxy moyen », il reste une incertitude importante sur les débits *in situ* pouvant optimiser ce scénario.

En rapport aux critères relatifs à l'exploitation, et avec les débits de pompage testés pour ce scénario B_1, il est plus difficile de maintenir les gradients hydrauliques vers les puits de pompage en aval, en raison des puits de pompage au roc en amont hydraulique du côté est de l'UTES. Des débits de pompes trop élevés en amont hydraulique à l'est engendrerait un mouvement des particules des zones contaminées vers l'est.

L'implantation de puits hypothétiques d'approvisionnement en eau à 1 km au nord de la zone de restriction reste possible dans ce scénario, car un pompage jusqu'à 5000 m³/jour n'induit pas d'inversion des gradients horizontaux.

Selon les critères liés à la performance du système, on observe une forte probabilité de capter la totalité des zones contaminées, avec une proportion médiane captée de 96% et 92% pour la zone contaminée dans l'esker et au roc, respectivement. Le système semble peu résilient à un arrêt du système, pouvant rester à l'arrêt de 3 à 7 jours seulement en raison des faibles débits de pompage.

La plage importante de débits de pompage pouvant être utilisée pour les puits en aval hydraulique dans l'esker et au roc est un avantage au niveau de la transition des systèmes. Il serait ainsi possible d'augmenter les débits temporairement au début de la transition afin de maximiser le développement de la nouvelle aire de captage à la suite de l'implémentation du scénario B_1.

En raison de la grande probabilité de capter les zones contaminées au roc à partir des puits de pompage situés à l'est en amont hydraulique, il demeure risqué de retourner cette eau au milieu naturel. Cette eau devra être réacheminée à l'UTES. L'eau prélevée par le pompage additionnel minimum de 300 m³/jour dans l'esker en amont hydraulique pourrait cependant être retournée au milieu naturel si elle demeure non-contaminée.

7.4.5 Scénario C

Le scénario C contient une composante de pompage dans le roc et l'esker à l'amont hydraulique de la zone contaminée, une composante de réinjection à l'aval hydraulique de ces mêmes portions, et une composante de pompage intermédiaire dans l'esker destinée à recueillir les eaux d'infiltration et permettant ainsi de maintenir la zone de stagnation des eaux souterraines contaminées créée par les deux autres composantes (Figure 78). Les figures permettant l'évaluation du scénario C se trouvent aux Figures C-1 à C-3 à partir de la page 185 de l'Annexe 7.

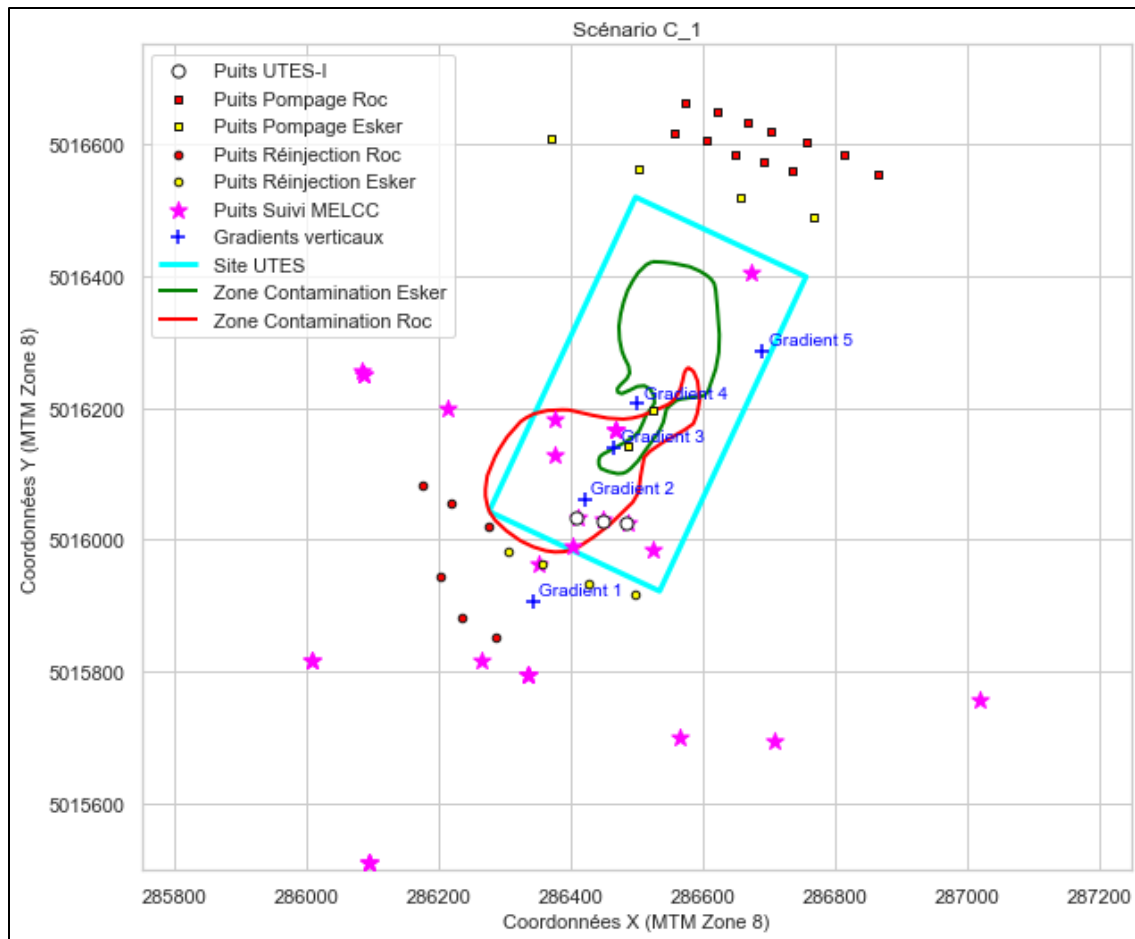


Figure 78. Position des différentes composantes des Scénarios C et C_1.

Dans ce scénario C, 72 combinaisons de débits de pompage et de réinjection sont testées pour représenter le plus fidèlement possible les différentes possibilités proposées par le MELCCFP, soit :

- 12 puits en pompage au roc en amont hydraulique, avec un débit total de 6540 ou 13625 m³/jour ;
- 4 puits de pompage dans l'esker en amont hydraulique, avec un débit total de 0, 2000 ou 4087 m³/jour ;
- 6 puits de réinjection au roc en aval hydraulique, avec un débit total maximal de 0, 600, ou 1090 m³/jour ;
- 4 puits de réinjection en aval hydraulique dans l'esker avec un débit d'injection de 545 ou 5450 m³/jour ;
- 2 puits de pompage au-dessus de la zone contaminée dans l'esker avec un débit total de 200 ou 1090 m³/jour.

Tout en restant fidèle au positionnement des puits proposés, la position des puits de pompage au roc est ajustée selon la carte de probabilité de dépassement de seuil de transmissivité (Figure 72), afin d'espérer atteindre les débits de pompage et d'injection mentionnés plus haut.

Les résultats du schéma « Kxy moyen » avec les 72 possibilités du scénario C démontrent que très peu de réalisations ont réussi à converger numériquement sur le modèle hydrogéologique moyen du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Ces résultats sont une indication que les débits de pompage pressentis sont trop élevés pour les capacités des aquifères de l'esker et de roc présent au site. Une version modifiée du scénario C, appelée scénario C_1 est donc testée avec des débits moins importants.

7.4.6 Scénario C_1

Le scénario C_1 comporte les mêmes composantes de pompage en amont hydraulique, de réinjection en aval hydraulique, et de pompage intermédiaire dans l'esker destinée à recueillir les eaux d'infiltration que celles incluses dans le scénario C (Figure 78). Les puits du scénario sont placés aux mêmes coordonnées que les puits du scénario C, selon le positionnement prescrit par le MELCCFP. Les figures permettant l'évaluation du scénario C_1 se trouvent aux Figures C_1-1 à C_1-33 à partir de la page 191 de l'Annexe 7.

7.4.6.1 Analyse du schéma « Kxy moyen »

72 nouvelles combinaisons de débits de pompage et de réinjection sont testées, soit :

- 12 puits en pompage au roc en amont hydraulique, avec un débit total de 600 ou **1200** m³/jour ;
- 4 puits de pompage dans l'esker en amont hydraulique, avec un débit total de 0, **400**, ou 2000 m³/jour ;
- 6 puits de réinjection au roc en aval hydraulique, avec un débit total maximal de 0, **300**, ou 1090 m³/jour ;
- 4 puits de réinjection en aval hydraulique dans l'esker avec un débit d'injection de **545** ou 5450 m³/jour ;
- 2 puits de pompage au-dessus de la zone contaminée dans l'esker avec un débit total de 200 ou **1090** m³/jour.

Les tests du schéma « Kxy moyen » démontrent que l'ajustement des débits de pompage et de réinjection est critique pour assurer le captage des zones contaminées, garder les gradients horizontaux vers les puits en aval hydraulique, et les gradients verticaux du roc vers l'esker. Aucune combinaison sur les 72 testées n'offre des résultats entièrement satisfaisants, suggérant que la combinaison optimale de débits et de positionnement de puits n'a pas été trouvée (Figures C_1-2 et C_1-3 de l'Annexe 7). La combinaison composée des débits en gras ci-dessus est celle offrant les meilleurs résultats selon les critères évalués et les combinaisons de débits testées. Cette combinaison est utilisée pour la suite des analyses du scénario C_1.

Les débits minima possibles pour garder un confinement hydraulique sont de 545 m³/jour par puits (1090 m³/jour total) dans l'esker. Les débits de pompage maxima en amont hydraulique sont de 1200 m³/jour dans le roc et de 400 m³/jour dans l'esker afin d'éviter une inversion des gradients horizontaux vers les puits en amont hydraulique. De plus, il faut garder les débits de réinjection relativement bas (300 m³/jour dans le roc et 545 m³/jour dans l'esker) en aval hydraulique pour éviter d'inverser l'écoulement des eaux souterraines vers les puits en amont.

7.4.6.2 Analyse du schéma « Probabiliste »

Les résultats de l'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario C_1 sont présentés aux Figures C_1-4 à C_1-14 de l'Annexe 7. L'analyse du schéma « Probabiliste » du scénario C_1 montre qu'il est facile de garder un gradient vertical positif entre le roc et l'esker pour les points de mesure 1 à 3 situés au sud du site de l'UTES, mais qu'il est difficile de garder un gradient vertical positif pour les points de mesure 4 et 5 situés au nord du site de l'UTES (Figure C_1-4 de l'Annexe 7). La réinjection dans le roc en aval hydraulique permet de maintenir les gradients verticaux positifs pour la zone sud du site de l'UTES, mais un pompage au roc trop important au nord du site de l'UTES en amont hydraulique fait inverser les gradients hydrauliques verticaux de l'esker vers le roc. L'ajustement précis des débits sur les différentes composantes de pompage et de réinjection du scénario C_1 doit être complété avec minutie afin de maintenir les gradients verticaux positifs, ou du moins nuls.

Les cartes de probabilités de captage du scénario C_1 (Figures C_1-5 à C_1-12 de l'Annexe 7) sont utilisées pour évaluer la direction des gradients horizontaux et le captage des zones contaminées dans l'esker et au roc, avec un point de vue régional et local. Bien que les puits au roc en aval hydraulique soient des puits d'injection, les puits intermédiaires complétés dans l'esker parviennent à capter des particules provenant du roc voyageant à travers les fenêtres au roc situées entre les puits intermédiaires et les puits actuels de l'UTES. Ces particules sont de plus poussées vers les puits intermédiaires par les puits d'injection au roc.

Il y a 16% des réalisations du scénario C_1 qui permettent de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker en moins de 5 ans, avec une proportion médiane captée de 94% calculée à partir de l'ensemble des réalisations de ce scénario. Il y a une probabilité nulle de capter la totalité de la zone contaminée au roc en moins de 25 ans pour le scénario C_1. La proportion médiane de la zone contaminée au roc captée est la plus faible de tous les scénarios, à 44% seulement. Cependant, le pompage en amont hydraulique est susceptible de capter la zone contaminée avec une probabilité de 99% dans le roc et une probabilité de 19% dans l'esker, risquant ainsi d'inverser les gradients hydrauliques horizontaux vers le nord dans le roc et dans l'esker.

L'aire médiane atteinte dans la zone de restriction par des particules libérées à partir de la zone de relargage après 100 ans de migration est de 13750 m² (Figure C_1-13 de l'Annexe 7), avec un temps minimum médian de 61 années requis pour atteindre la zone de restriction (Figure C_1-14 de l'Annexe 7). L'aire médiane est en hausse et le temps minimum est en baisse par rapport au scénario SA, en raison de la réinjection d'eau en aval hydraulique, aidant à pousser la masse d'eau stagnante vers l'aval hydraulique.

7.4.6.3 Analyse du schéma « Arrêt »

On observe que les gradients verticaux (Figure C_1-15 de l'Annexe 7) et les niveaux d'eau observés (Figure C_1-16 de l'Annexe 7) reprennent une valeur constante associée à un régime permanent en moins de 7 jours à la suite de l'arrêt des puits de pompage au scénario C_1.

Les cartes de migration de la zone contaminée de l'esker en fonction du temps après l'arrêt du pompage (Figure C_1-17 de l'Annexe 7) indiquent également que les particules relâchées dans la zone contaminée commenceraient à migrer 7 jours suivant l'arrêt du pompage. L'utilisation de puits de pompage en amont hydraulique et de réinjection en aval hydraulique ne semble pas améliorer la résilience du système par rapport aux scénarios A et B à la suite d'un arrêt du pompage.

7.4.6.4 Analyse du schéma « Nord »

De façon semblable aux autres scénarios, le scénario C_1 est peu affecté à un pompage hypothétique en amont hydraulique pour l'approvisionnement en eau potable, jusqu'à concurrence de 5000 m³/jour réparti sur trois puits de pompage situés 1 km au nord de la zone de restriction (Figure C_1-18 à C_1-22 de l'Annexe 7).

7.4.6.5 Analyse du schéma « Climat »

Le scénario de changement climatique affecte peu les valeurs des critères comparativement au scénario C_1 (Figure C_1-23 à C_1-33 de l'Annexe 7). La probabilité de conserver des gradients positifs est similaire dans le schéma « Climat » que dans le scénario C_1 initial. On observe une légère amélioration sur la proportion de réalisations captant la totalité de la zone contaminée de l'esker (probabilité augmente de 16% à 22%) à partir des puits de pompage en aval hydraulique. On observe également une baisse de la probabilité de capter la zone contaminée dans l'esker à partir des puits en amont hydraulique (19% à 14%). On remarque que l'aire de la zone de restriction touchée par le relargage est en légère baisse, passant d'une aire médiane de 13750 m² à 12500 m².

7.4.6.6 Analyse des critères

Concernant l'analyse des critères relatifs à la conception du système, le scénario C_1 a le désavantage d'utiliser un grand nombre (28) de nouveaux puits de pompage et de réinjection. Malgré l'analyse statistique effectuée sur 72 combinaisons différentes de débits, il y a une incertitude importante concernant les débits de pompage et de réinjection optimaux qui pourraient être utilisés pour ce scénario.

En rapport aux critères relatifs à l'exploitation, c'est-à-dire selon les débits de pompage et de réinjection testés pour ce scénario C_1, il est difficile de maintenir un gradient horizontal stable vers les puits intermédiaires de confinement dans l'esker.

L'implantation des puits de pompage hypothétiques situés 1 km au nord de la zone de restriction reste possible dans ce scénario, car un pompage jusqu'à 5000 m³/jour ne parvient pas à affecter la direction des gradients hydrauliques horizontaux.

Selon les critères liés à la performance du système, on observe une forte probabilité (94%) de capter la totalité de la zone contaminée de l'esker, mais une faible probabilité (44%) de capter la totalité de la zone contaminée au roc. Le système semble peu résilient à un arrêt du système, pouvant rester à l'arrêt jusqu'à 7 jours avant de risquer une migration des particules provenant de la zone contaminée de l'esker.

En raison de la grande probabilité de capter les zones contaminées au roc à partir des puits de pompage situés en amont hydraulique, il n'est pas recommandé de retourner ces eaux dans le milieu naturel. Cette eau devra être réacheminée à l'UTES pour être traitée. L'eau prélevée par le pompage additionnel minimum de 400 m³/jour dans l'esker en amont hydraulique pourrait être retournée vers le milieu naturel.

8 Recommandations, limitations du modèle et conclusion

Dans ce projet, nous avons compilé les données antérieures et nous avons fait des recommandations au MELCCFP pour l'acquisition de données complémentaires permettant de répondre en partie aux questions en suspens à la suite de l'analyse des données et modèles historiques. La stratégie d'acquisition en cascade propose de faire dans un premier temps des mesures à grand rendement spatial à un coût faible au mètre linéaire afin de suggérer des sites de forages sur lesquels sont effectuées des opérations ciblées plus onéreuses. Cette stratégie permet de maximiser l'information en minimisant les coûts.

Nous avons recommandé de faire l'acquisition de données de sismique réflexion. Ces données ont permis de guider l'interpolation des interfaces lithologiques à l'aplomb du site de Mercier. Ces mesures ont permis de définir l'extension spatiale de l'esker principal mais aussi de trouver des branches secondaires qui ont un impact substantiel sur l'écoulement.

Afin de valider ces cibles géophysiques, nous avons proposé au MELCCFP d'effectuer 10 sites d'acquisition de données en forage. Nous avons pris avantage des forages pour faire des mesures de diagraphie afin de raffiner la compréhension de la nature des couches géologiques et de les relier aux mesures géophysiques.

Ensuite, en se basant sur les diagraphies, nous avons ciblé les niveaux où faire des mesures in situ de la conductivité hydraulique et de son anisotropie. Ces mesures de conductivité hydraulique ont pour but de contraindre les modèles numériques d'écoulement. Les mesures de conductivité hydraulique dans le roc ont montré une très grande variabilité spatiale avec des zones conductrices mais aussi avec des zones très peu conductrices. Ces mesures ciblées ont une importance majeure sur le risque de forer de nouveaux puits de pompage ou d'injection qui soient efficaces.

Les mesures de conductivité hydraulique montrent une grande variabilité spatiale. En raison de la variabilité de la conductivité hydraulique, il existe donc une incertitude importante sur la conductivité hydraulique lorsqu'on s'éloigne des forages et aux endroits dépourvus de données géophysiques. Cette incertitude a été prise en compte grâce à la création des modèles hydrogéologiques stochastiques. L'incertitude hydrogéologique a été considérée pendant le processus d'écoulement de l'eau souterraine et le calcul des nombreux critères d'évaluation des différents scénarios de confinement hydraulique testés. Finalement, ceci a permis d'estimer la robustesse des scénarios face à l'incertitude géologique et hydrogéologique. Ce processus d'évaluation des différents scénarios permet de faire ressortir les avantages et inconvénients de chacun des scénarios selon une approche probabiliste.

Il est important de noter ici que nous ne faisons en aucun cas la recommandation d'un scénario par rapport aux autres. Nous avons simplement calculé une liste de critères établie conjointement avec le MELCCFP basés sur les modèles hydrogéologiques que nous avons développés. Cependant, les scénarios calculés à l'aide des connaissances que nous avons lors de leur création permettent de tirer des conclusions générales sur chaque type de

scénario. Ces conclusions peuvent changer si de nouvelles données ou connaissances sont acquises par la suite.

Le scénario SA possède l'avantage principal de sa simplicité de mise en fonction puisqu'il s'agit du scénario actuel. Ses capacités sont bien documentées, ses aires de captage couvrent bien les zones contaminées et son historique de fonctionnement est connu. Cependant, un volume important d'eau contaminée est soutiré des puits de pompage, et doit être traité à l'UTES. L'étendue des aires de captage générée par les débits de pompage importants apporte une bonne résilience de ce scénario face à un arrêt possible des pompes. Cette résilience du système permettra une transition sécuritaire entre ce scénario actuel et le scénario sélectionné, puisqu'il est évalué que le scénario actuel peut rester à l'arrêt pendant 30 jours avant que le régime d'écoulement des eaux souterraines ne revienne à son état permanent naturel. Il ne serait donc pas nécessaire de rouler deux scénarios en simultané pendant la transition des systèmes, si un changement de scénario de traitement est sélectionné. Selon les résultats de l'analyse de schéma « Kxy moyen », il serait possible de diminuer les débits de pompage tout en gardant un confinement hydraulique adéquat de la contamination. C'est donc un scénario qui a fait ses preuves et qui possède le niveau de risque le plus faible. Nous recommandons tout de même d'augmenter la redondance du système de pompage par rapport au système actuel. Si ce scénario est choisi et que des débits de pompage réduits sont appliqués, il sera important de faire un suivi de plusieurs mois lors de l'abaissement du pompage afin de s'assurer que les gradients hydrauliques respectent les critères et redeviennent stables.

Le scénario A possède l'avantage principal d'optimiser les débits de pompage et les aires de captage en crépinant seulement la portion dans l'esker des puits de l'UTES actuels, et en ajoutant 3 puits au roc seulement en aval hydraulique. À la suite de l'optimisation du positionnement des puits de pompage au roc et des débits de pompage, le scénario A possède un excellent potentiel pour remplacer le système de confinement hydraulique de l'UTES-I. Ce scénario possède plusieurs des avantages du scénario SA, et la séparation des pompes au roc et de l'esker permet un ajustement plus précis des niveaux d'eau et des débits à employer. L'installation de puits de pompage au roc seulement comporte une part de risque plus grande en raison de l'hétérogénéité élevée de la conductivité hydraulique au roc, affectant les débits de pompage pouvant réellement être utilisés. Une validation des conditions hydrauliques devra être effectuée pour valider les débits prescrits. L'utilisation de débits moins élevés enlève également une certaine résilience au système advenant un arrêt des pompes, et pourrait permettre une plus grande quantité d'eau relarguée en aval hydraulique en cas de panne. Ce scénario demanderait donc une plus grande redondance des systèmes de pompage et d'un système de surveillance plus fréquent et amélioré par rapport au système actuel.

Les scénarios B et B_1 sont intéressants car bien que les débits utilisés pour le pompage en aval hydrauliques soient identiques aux scénarios A et A_1, l'utilisation des puits de pompage en amont hydraulique pourrait permettre de baisser les gradients hydrauliques horizontaux et espérer limiter les quantités d'eau contaminée devant être extraites en aval hydraulique. L'eau récupérée en amont hydraulique, considérée exempte de contaminants, pourrait être retournée au milieu naturel. Il faut toutefois agir de prudence au sujet des

débits de pompage des puits situés en amont hydraulique afin de ne pas inverser les gradients hydrauliques horizontaux, et ainsi recirculer les zones contaminées vers le nord (Scénario B) ou vers l'est (Scénario B_1). L'utilisation de puits de pompage en amont hydraulique à l'est du site de l'UTES pour le scénario B_1 possède le risque de faire diverger le panache de contaminant dans cette direction. Ce scénario devra s'accompagner d'une étude plus précise sur les débits de pompage suggérés et devra certainement être modulé dans le temps pour permettre un ajustement possible des débits d'une saison à une autre et d'une année à une autre. Le scénario B est intéressant mais semble plus complexe à mettre en place de manière opérationnelle et est aussi plus onéreux à la conception et à l'opération. Si ce scénario est choisi, nous recommandons qu'un système de débit de pompage actif et ajustable soit mis en place en plus d'une redondance importante des systèmes de pompage afin d'avoir un contrôle accru sur l'exploitation du système.

Le scénario C défini selon les termes du MELCCFP ne semble pas viable du point de vue technique, car la grande majorité des réalisations ne pouvaient converger numériquement avec les débits de pompage élevés qui étaient prescrits. Le scénario C_1 présente une option viable avec des débits de pompage ajustés, mais l'analyse des critères de décision ne semble pas avantager ce scénario. Il y a une forte probabilité d'inverser les gradients horizontaux vers les puits en amont, et le nombre de puits importants devant être forés et complétés sont des inconvénients majeurs de ce scénario en raison de la forte variabilité spatiale de la conductivité hydraulique mesurée dans le roc.

Ce rapport fait ressortir les avantages et inconvénients de chacun des scénarios analysés, mais cette analyse se limite aux configurations présentées uniquement sur les modèles numériques utilisant l'information disponible au moment de leur création. Ainsi, pour le scénario qui sera retenu par le MELCCFP, il sera essentiel de faire une analyse plus exhaustive du scénario afin d'optimiser :

- le nombre de puits de pompage et/ou de réinjection nécessaire,
- le positionnement final des différentes composantes de pompage et/ou de réinjection, et
- les débits minimum et maximum exacts pouvant être prescrits à chaque composante du scénario pour assurer le confinement hydraulique.

Il est recommandé de mettre en place un système de suivi temporel des niveaux d'eau et de la qualité de l'eau souterraine, surtout si les scénarios plus complexes (B, B_1 ou C_1) sont sélectionnés. Le réseau de suivi temporel devrait être composé d'un groupe de puits positionnés à des endroits stratégiques dans les aires de captage simulées, au roc et dans l'esker. Des puits de suivi devraient être situés en amont hydraulique de la zone contaminée de l'esker. Si le pompage en amont hydraulique est envisagé, ces puits de suivi devraient être situés entre le site de l'UTES et les puits hypothétiques de pompage situés en amont. Ces puits permettraient de vérifier les gradients horizontaux ainsi que le potentiel de migration de la contamination vers l'amont hydraulique. Ce réseau de suivi temporel devra pouvoir réagir de manière précise dans le temps avec un pas d'échantillonnage au moins égal au temps de résilience estimé pour chacun de scénario, afin d'avoir un facteur de sécurité sur la performance du piège hydraulique. Idéalement, il est recommandé d'installer des sondes piézométriques pouvant enregistrer et relayer l'information sur les niveaux d'eau en continu à l'UTES. Il est d'ailleurs recommandé de vérifier si l'installation de sondes piézométriques automatiques pourrait être envisageable dans certains puits de suivi

existants afin d'améliorer le temps de réaction à la suite d'un hypothétique ajustement des débits aux puits de pompage de l'UTES. Afin d'utiliser à leur juste valeur ces sondes piézométriques, il est également suggéré de faire le suivi précis des débits de pompage (et/ou injection) en temps réel, de façon distincte pour chaque puits de l'UTES-II. Ce suivi en temps réel des débits et des niveaux d'eau permettrait de valider en continu les modèles hydrogéologiques calibrés et de réajuster les paramètres, si nécessaire.

Plus précisément, selon les cartes de probabilité de captage 25 ans à partir des puits aval au roc des scénarios SA, A et B, le réseau des puits de suivi du MELCCFP bénéficierait de l'ajout d'un puits de suivi au roc (puits S1 sur la Figure 79) au sud-est des puits de pompage actuels de l'UTES-I (coordonnées approximatives MTM Zone 8 : X = 286 750, Y = 5 015 900). Ce puits permettrait de surveiller une zone en amont hydraulique incluse dans l'aire de captage de la majorité des réalisations de ces scénarios, mais qui est sous-échantillonnée. Selon le même raisonnement, si le scénario B_1 est sélectionné, le réseau des puits de suivi du MELCCFP bénéficierait de l'ajout d'un puits de suivi au roc (puits S1 sur la Figure 79) au sud des puits de pompage actuels de l'UTES-I (coordonnées approximatives MTM Zone 8 : X = 286 500, Y = 5 015 900).

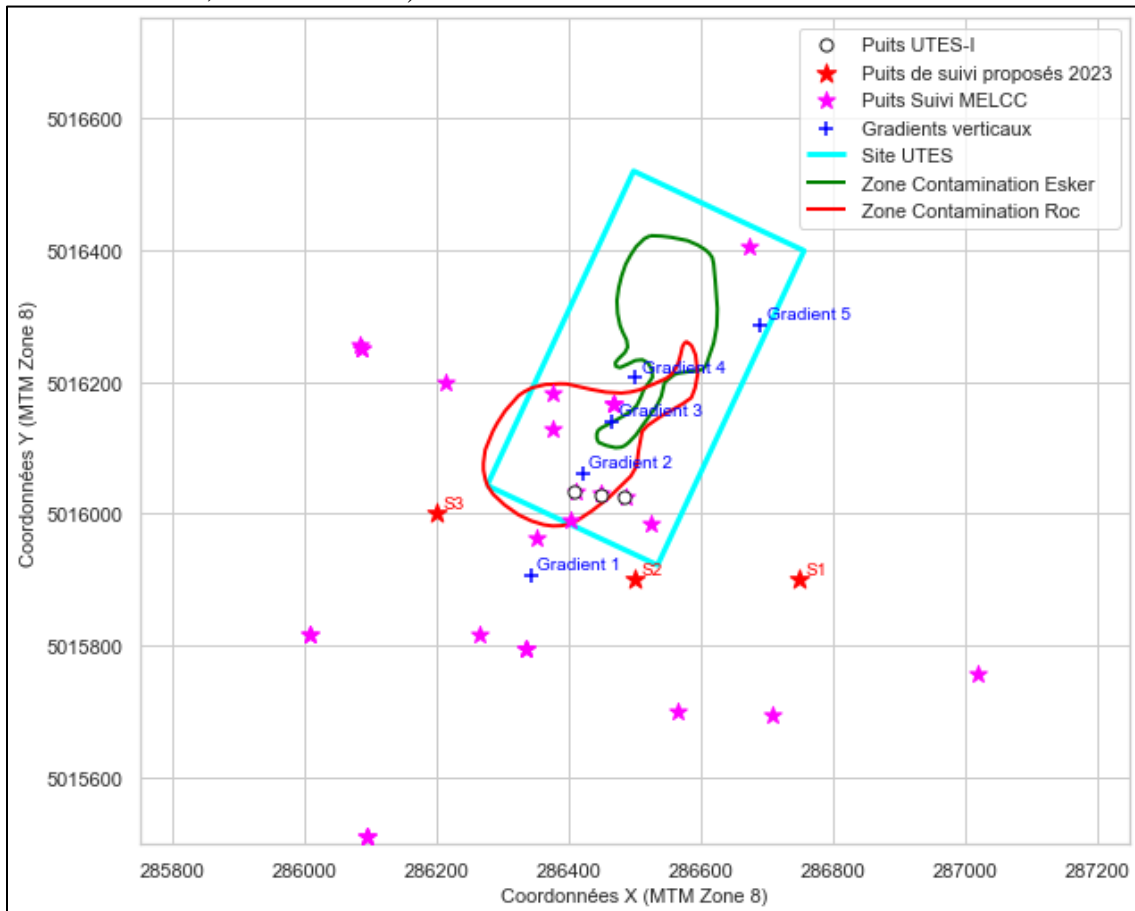


Figure 79. Position des puits de suivi supplémentaires proposés en 2023.

Selon les cartes de relargage de particules en aval hydraulique, il est également recommandé de positionner un puits de suivi supplémentaire au roc (puits S3 sur la Figure 79) et dans l'esker directement au sud-ouest du droit du site de l'UTES (coordonnées

approximatives MTM, Zone 8 : X = 286 200 et Y = 5 016 000). Ce puits viendrait compléter la couverture d'une migration potentielle en aval hydraulique dans une zone qui est faiblement suivie pour le moment, et qui se trouve à la limite des aires de captage de la plupart des scénarios.

Pour chaque nouveau puits de pompage et/ou de réinjection inscrit dans le scénario choisi, une validation de terrain devra être complétée afin de vérifier les conclusions des modèles hydrogéologiques. Il importera en effet de valider les profondeurs et les épaisseurs des différentes unités hydrostratigraphiques pour confirmer que le modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques reste valide. Il sera ensuite nécessaire de valider les conductivités hydrauliques et leur variations verticales, autant dans l'esker et dans le roc, le long du puits de forage par tests hydrauliques multi-niveaux afin d'assurer que les puits du scénario seront bien en mesure de fonctionner selon les débits prescrits afin d'assurer le confinement hydraulique des anciennes lagunes de Ville Mercier.

9 Livrables

- Base de données PostgreSQL ;
- Données géologiques et hydrogéologiques compilées et classées dans un fichier excel
- Projet GOCAD-SKUA du modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques du site des anciennes lagunes de Ville Mercier
- Ensemble de modèles hydrogéologiques régionaux en régime permanent du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Cet ensemble comprend :
 - Fichiers contenant les 69 réalisations de Kxy dans le roc et dans les faciès de l'esker ;
 - Projet Feflow contenant la moyenne des réalisations de Kxy et les puits de pompage de l'UTES actuel ;
 - Fichiers contenant la position des puits de pompage et débits estimés des différents scénarios testés pour l'UTES-II ;
 - Suite de scripts python afin de permettre de lancer en boucle les simulations de l'écoulement des eaux souterraines en régime permanent sur les modèles Feflow.
 - Suite de scripts python afin de faire l'interprétation des différents scénarios de confinement hydraulique.

10 Références

- Ballard, J.-M., Huchet, F., et R. Lefebvre. 2022. Modélisation numérique régionale des conditions actuelles et en climat futur des ressources en eau souterraine dans la région des anciennes lagunes de Mercier – Rapport final. Rapport de recherche R2120, INRS – Centre ETE, 120p., juillet 2022.
- Ballard, J.-M., Huchet, F., Raynauld M., Gosselin, J.-S., et R. Lefebvre. 2021. Réalisation de travaux de caractérisation complémentaire pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines à Mercier : conditions des ressources en eau souterraine dans la région et en amont des anciennes lagunes de Mercier – Rapport final. Rapport de recherche R2033, INRS – Centre ETE, 88p., avril 2021.
- Béraud, T., Claprood, M. et E. Gloaguen. 2019. Rapport préliminaire du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier. INRS – Centre ETE. Rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), juillet 2019, 105 pages.
- Biogénie, 1995. Campagne de forage dans la région de Mercier. Réf. MN5028.
- Claprood, M., Béraud, T., Gloaguen, E. et R. Martel. 2020. Rapport d'avancement 2020 du Projet UTES-II de Ville Mercier. INRS – Centre ETE. Rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), juin 2020, 42 pages.
- Claprood, M., Béraud, T., Gloaguen, E. et R. Martel. 2021. Rapport du modèle d'écoulement déterministe, Projet UTES-II Ville Mercier. INRS – Centre ETE. Rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), 31 août 2021, 42 pages.
- MDDEP, 2005. Rapport d'interprétation des essais de pompage et slug tests réalisés en août – septembre 2005 au site de Mercier. Rapport du ministère du Développement durable, de l'Environnement et Parcs du Québec.
- CNFS, 1991. Caractérisation exhaustive du site de Ville-Mercier. Compagnie nationale de forage et de sondage. Rapport final, préparé pour le Ministère de l'Environnement du Québec.
- CNFS, 1993. Caractérisation exhaustive du panache de contamination des anciennes lagunes de Ville-Mercier. Volume 1-5. Compagnie nationale de forage et de sondage. Rapport préparé pour le Ministère de l'Environnement du Québec.
- Croteau, A., Nastev, M. et R. Lefebvre. 2010. *Groundwater recharge assessment in the Châteauguay watershed*. Canadian Water Resources Journal. 35. 451-468. doi: 10.4296/cwrj3504451.
- DDH, 1992. Caractérisation supplémentaire, secteurs des anciennes lagunes de Ville Mercier. D' Aragon, Desbiens, Halde. Préparé pour le Ministère de l'Environnement du Québec.
- Denis, C. 1991. Caractérisation hydrogéologique du substratum rocheux fracturé du site pollué de Ville-Mercier. Centre d'Études sur les Ressources Minérales, Université du Québec à Chicoutimi, avril 1991, 190 pages.
- DHI, Mike Powered by DHI. 2021. *FEFLOW* (Version 7.4 [3D + 2D]). Interactive Graphics-based Finite Element Simulation System for Subsurface flow and Transport Processes.
- Dupuis, C.J. 2021. Mesures et analyse diagraphique aux lagunes de Mercier. Université Laval, Rapport final présenté au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), 15 mars 2021, 16 pages.

- Foratek International Inc., 1984. Projet MENVIQ – Mercier, rapport technique relatif à l'aménagement des ouvrages de captage et d'observation de la nappe aquifère contaminée de Ville Mercier. Projet FFH P3018, rapport no.619.
- Foratek International Inc., 1987. Tricil - Programme de forages. Rapport 857, projet 87014, 12pp et annexes.
- Gélinas, P., Isabel, D. et A. Rousseau, 1993. Aquifer decontamination for toxic organics: the case of Mercier, Québec. Contract KE405-8-6001/01-SS. Université Laval. Rapport final présenté à Environnement Canada, Wastewater Technology Center.
- Geovariances. 2021. *Isatis.Neo*. Geostatistics made available.
- Gloaguen, E. et D. Paradis. 2021. Mesures et analyses des essais hydrauliques aux lagunes de Mercier (Québec). CGQ - Rapport final, 3 octobre 2021, 19 pages.
- Globensky, Y., 1986. *Géologie de la région de St-Chrysostome et de Lachine*. Rapport MM 84-02, Ministère de l'énergie et des ressources du Québec.
- Hunter, J.-A., Burns, R.A., Good, R.L., Douma, M. et T. Cartwright. High resolution seismic reflection surveys Chateauguay, Quebec area. OPENFILE de la Commission Géologique du Canada., 19 pages.
- Lefebvre, R., 2007. *Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Mercier (Québec), Canada*. Rapport R-914, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport d'expertise soumis à la direction des politiques de l'eau, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, mars 2007.
- Leppert, 2005. Rapport d'interprétation des essais de pompage et slug tests réalisés en août – septembre 2005 au site de Mercier. Rapport soumis par Clean Harbor au Ministère du Développement Durable, Environnement et des Parcs du Québec. Septembre 2005, 90 pages, communication confidentielle du MELCCFP.
- Martel, R., Robert, T., Batailler, É., Boutin, M., Deschênes-Rancourt, C. et L. Trépanier, 2018. Revue de littérature sur les technologies de réhabilitation des sols et des eaux souterraines et réévaluation du potentiel de réhabilitation du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier. Rapport R1783, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport final présenté au Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 17 octobre 2007.
- MBMS, 2021. Levés de sismique réflexion pour la caractérisation hydrogéologique Ville Mercier, QC. Rapport présenté au Passif environnemental du ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 18 juin 2021, 23 pp.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF), 1997. Rapport technique, anciennes lagunes de Ville Mercier. Préparé par le Bureau des enquêtes de Montréal, 18 volumes.
- Ministère du Développement durable, Environnement et Parc, 2007. Site des anciennes lagunes de Mercier, Document d'information. Décembre 2007. ISBN : 978-2-550-51588-3.
- Paradigm SKUA-GOCAD, Logiciel de modélisation géologique. <http://www.pdgm.com/products/gocad/>.
- PESTPP. Tools for non-intrusive and scalable parameter estimation and uncertainty quantification, <https://github.com/usgs/pestpp>.
- Pontlevoy, O., 2004. Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec.
- Poulin, M., 1977. Groundwater contamination near a liquid waste lagoon, Ville Mercier, Québec. Mémoire de maîtrise, University of Waterloo, Ontario.
- Système d'Information Hydrogéologique (SIH). accédé le 11 janvier 2021. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>

-
- TechnoRem, 2008a. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières Norton, Esturgeons, Saint-Pierre et de la Tortue – Montérégie. Rapport soumis au Syndicat des producteurs maraîchers de Saint-Jean-Valleyfield. No de Projet : 5074, mars 2008.
 - TechnoRem, 2008b. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières L'Acadie et de la Tortue – Montérégie. Rapport soumis au Syndicat des producteurs maraîchers de Saint-Jean-Valleyfield. No de Projet : 5073, mars 2008.
 - TechnoRem, 2021. Rapport sur les forages complémentaires effectués au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Rapport soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques.

Annexes

Annexe 1

Rapport préliminaire du modèle conceptuel
des lagunes de Ville-Mercier, juillet 2019

Rapport du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier

Soumis par

Thomas Béraud, Doctorant
Maxime Claprood, ing., Ph.D., Associé de recherche
Erwan Gloaguen, Ph.D., Professeur

24 juillet 2019



Institut national
de la recherche
scientifique

Table des matières

1.	Introduction.....	1
1.1.	Définition du modèle conceptuel	1
1.2.	Chronologie du projet.....	3
1.3.	Mandat.....	3
1.4.	Objectifs	4
1.5.	Source des données utilisées	6
2.	Contexte général et limites du domaine d'études	7
3.	Contexte géologique	9
3.1.	Définition des unités présentes au site des anciennes lagunes.....	11
3.2.	Distribution et mise en carte des unités dans la zone d'étude.....	13
3.3.	Analyse granulométrique	20
3.4.	Analyse conductivité hydraulique.....	22
3.5.	Représentation 3D des unités dans la zone d'étude	26
4.	Contexte hydrogéologique.....	28
4.1.	Système d'écoulement hydrogéologique régionale.....	30
4.2.	Système d'écoulement hydrogéologique local des anciennes lagunes	31
4.3.	Piège hydraulique et migration des contaminants.....	32
4.4.	Recharge.....	34
4.5.	Utilisation de l'eau souterraine	34
5.	Conclusions.....	36
6.	Références.....	36
	Annexes	

Liste des Figures

Figure 1.	Coupe schématique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).	2
Figure 2.	Image satellite de la zone d'étude avec données disponibles et les limites du domaine de modélisation envisagées pour le modèle conceptuel présenté dans ce rapport.	8
Figure 3.	Carte géologique de la région d'étude (modifié de Tremblay, 2008).	10
Figure 4.	Carte géologique et structurale du substratum rocheux à proximité de la zone d'étude. Fond de carte OpenStreetMap sous licence CC BY-SA.	11

Figure 5. Carte topographique krigée de l'élévation régionale du roc	14
Figure 6. a) Levé sismique AB provenant de la Commission Géologique du Canada, et b) son interprétation. Figure de Tremblay et coll. (2013).	15
Figure 7. a) Levé sismique CE provenant de la Commission Géologique du Canada, et b) son interprétation. Figure de Tremblay et coll. (2013).	16
Figure 8. a) Levé sismique FG provenant de la Commission Géologique du Canada, et b) son interprétation. Figure de Tremblay et coll. (2013).	17
Figure 9. Carte topographique de l'élévation régionale du roc sur les limites du modèle intermédiaire (modifié de Pontlevoy, 2004)	18
Figure 10. Carte d'épaisseur régionale des dépôts meuble.....	20
Figure 11. Analyse statistique de l'Indice Granulométrique pour chaque horizon géologique étudié.	21
Figure 12. Localisation des échantillons analysés pour l'étude de conductivités hydrauliques.....	23
Figure 13. Analyse statistique des conductivités hydrauliques (k) pour chaque horizon géologique.....	23
Figure 14. Conductivités hydrauliques des différents échantillons en fonction de la lithologie.	24
Figure 15. Projection des conductivités hydrauliques sur les axes X et Y en fonction de l'élévation de l'échantillon analysé.....	25
Figure 16. Vue en perspective de la distribution 3D des unités stratigraphiques sur le site des lagunes de Ville Mercier, modèle local provenant du MELCC.	26
Figure 17. Coupes verticales sur l'étendue du domaine régional de modélisation 2019, montrant les données à intégrer. La trace des coupes verticales sur trouve sur la Figure 2.	28
Figure 18. Illustration schématique du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier, de Lefebvre (2007).	29
Figure 19. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier représentant les unités géologiques et l'écoulement de l'eau souterraine, de Lefebvre (2007).	29
Figure 20. Charges hydrauliques au roc relevées au printemps 2004 dans les puits de surveillance de l'UTES. L'encadré montre les charges hydrauliques modélisées localement (Pontlevoy, 2004).	30
Figure 21. Charges hydrauliques dans l'esker relevées au printemps 2004 dans les puits de surveillance de l'UTES.	31
Figure 22. Piézométrie dans l'unité de sable et gravier représentant l'esker (données et figure provenant du MELCC).	32
Figure 23. Zones sources, panaches de dispersion et directions générales d'écoulement dans l'esker (gauche) et dans le roc sous-jacent (droite). Figure provenant de Lefebvre (2007).	33

Figure 24. Utilisateurs d'eau souterraine et de surface dans les limites du modèle 2019, incluant une zone tampon de 1km autour des limites. 35

Liste des Tableaux

Tableau 1. Tests de granulométries effectués par formation géologique. 20

Tableau 2. Tests de conductivité hydraulique effectués par formation géologique. 22

Liste des Annexes

Annexe 1. Document explicatif de la base de données

Annexe 2. Chroniques temporelles du niveau d'eau des puits de surveillance de l'UTES

Annexe 3. Schémas et chroniques temporelles du niveau d'eau des puits du réseau de suivi de MELCC

Annexe 4. Site de prélèvement d'eau souterraine et d'eau de surface dans la région d'étude

1. Introduction

Le 19 mars 2018, le gouvernement du Québec a annoncé la construction d'une nouvelle usine en vue d'optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier (le site). Dans le cadre de cet engagement gouvernemental, le ministère de l'Environnement et Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) désire établir une base de données apte à produire une définition détaillée du contexte géologique et hydrogéologique du secteur de Mercier, tout particulièrement du site des anciennes lagunes. Cette base de données doit être suffisamment précise pour l'élaboration d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale, c'est-à-dire couvrant le site des anciennes lagunes de Mercier et ses environs immédiats, et à l'échelle régionale, c'est-à-dire couvrant partiellement le territoire des municipalités de Mercier, de Saint-Isidore et de Sainte-Martine.

Le site des anciennes lagunes de Mercier est affecté par un mélange de nombreux contaminants constitué de liquides immiscibles légers (LIL) et denses (LID) à la suite de l'utilisation d'une ancienne sablière se trouvant dans un esker comme lieu d'entreposage d'huiles usées. Au site, une partie des LID s'est écoulée dans les sables et graviers de l'esker (aquifère granulaire local) d'une profondeur allant jusqu'à 30 m et au moins jusqu'à 15 m plus bas dans le roc fracturé sous-jacent à l'esker (aquifère rocheux régional). Afin de limiter l'écoulement des contaminants plus en aval, un système de pompage et une usine de traitement des eaux souterraines (UTES) sont en fonction au site depuis 1984. Le rôle de ce système de pompage est de contenir de façon hydraulique l'eau souterraine contaminée (panache) s'écoulant au travers des zones sources de LIL et de LID qui se situent en amont hydraulique des puits de pompage, à l'intérieur de l'esker et du till au droit du site, et plus en aval dans le roc fracturé. La Figure 1 présente en coupe un modèle conceptuel schématisé du contexte hydrogéologique et de l'état de la contamination au site.

1.1. Définition du modèle conceptuel

L'INRS-ETE définit un modèle hydrogéologique conceptuel comme étant la représentation numérique des éléments physiographiques, hydrologiques, géologiques et hydrogéologiques de la région à l'étude. Le modèle conceptuel inclut donc, au minimum :

- la topographie du niveau du sol par un modèle numérique de terrain (MNT) d'un niveau de résolution approprié pour :
 - identifier les différentes zones de recharge et résurgence de l'eau souterraine en incluant la végétation et les données de météo ;
- une représentation numérique du réseau hydrographie pour :
 - définir l'écoulement général en surface et les limites hydrauliques ;
- les unités hydrogéologiques à considérer dans le modèle numérique de l'écoulement des eaux souterraines ;
- les différents horizons stratigraphiques ou géologiques interpolés ou simulés par méthodes géostatistiques dans un cadre tridimensionnel (3D) afin de :
 - représenter la continuité spatiale des horizons géologiques ;
 - établir les relations spatiales entre les différents horizons ;

- identifier les rôles hydrauliques de chaque horizon permettant de définir les unités hydrogéologiques du modèle hydrogéologique ;
- connaître les incertitudes et la variabilité spatiale des unités géologiques ;
- les paramètres hydrauliques (principalement la conductivité hydraulique) de chacune des unités hydrauliques et leur représentation numérique (valeur unique moyenne, champs de conductivité interpolée, plusieurs réalisations stochastiques de la conductivité).
- Les flux hydrologiques majeurs
 - recharge
 - utilisation de l'eau souterraine

Le modèle conceptuel a pour objectif de valoriser l'ensemble des données disponibles avec la connaissance du terrain visant à la construction d'un modèle hydrogéologique du site à l'étude. Il fut envisagé, dans les discussions initiales entre le MELCC et l'INRS, de construire deux modèles hydrogéologiques, un premier à l'échelle régionale et le second à l'échelle locale. Cependant, nous préférons bâtir un seul modèle hydrogéologique à l'échelle régionale dont le maillage adaptatif sera raffiné localement au niveau de la zone des anciennes lagunes et autres zones d'intérêt. Cela permettra d'intégrer notre connaissance de la géologie et du contexte hydrogéologique régional (recharge et écoulement régional) et son implication dans le contexte local des anciennes lagunes (changements locaux de conductivité hydraulique). Nos capacités informatiques permettent de faire rouler ces modèles de grandes dimensions sans compromis sur la taille des cellules.

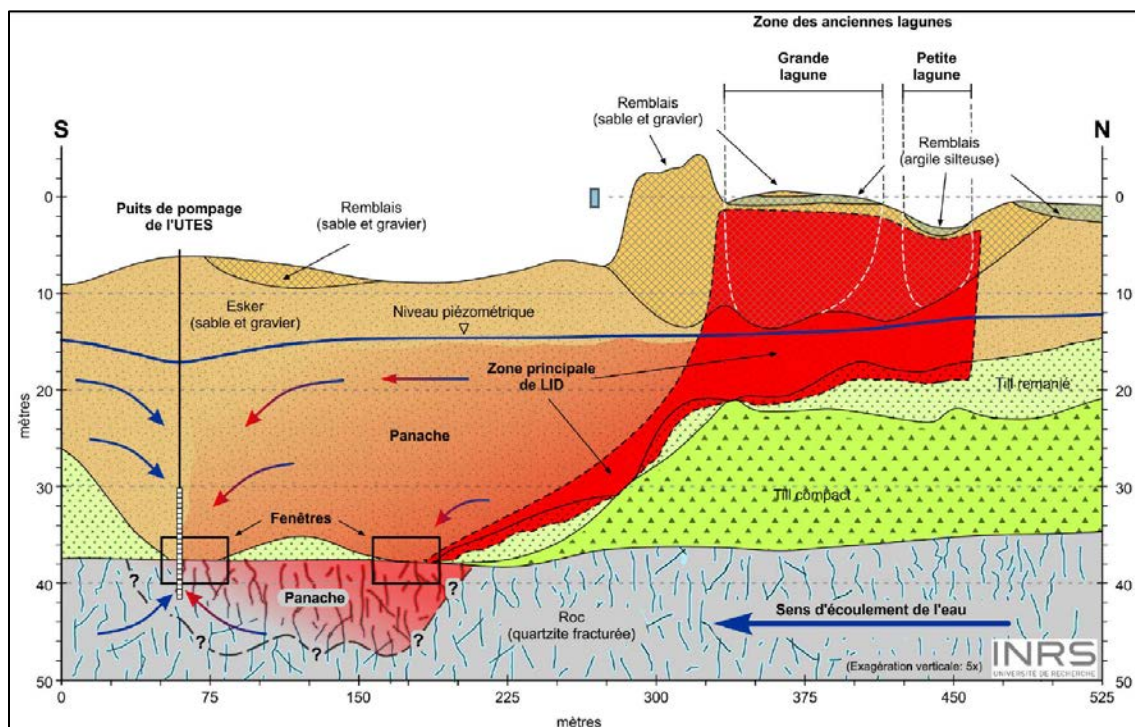


Figure 1. Coupe schématique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).

1.2. Chronologie du projet

- 19 mars 2018 :
Le gouvernement du Québec annonce la construction d'une nouvelle usine en vue d'optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier.
- 26 juillet 2018 :
L'INRS présente la proposition de recherche : *Conception du modèle d'écoulement pour la mise en place du nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES 2) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier.*
- 7 janvier 2019 :
Signature du contrat entre le MELCC et l'INRS, dont le mandat est décrit à la Section 1.1.
- 21 janvier 2019 :
Réunion de démarrage entre les représentants du MELCC et de l'INRS-ETE.
- 26 février 2019 :
Réunion pour discuter du plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et commencer la planification de la campagne de terrain 2019 (tâche 3 du mandat décrit à la Section 1.1).
- 30 mai 2019 :
Réunion pour préciser les besoins de caractérisation complémentaire, afin de finaliser l'appel d'offre pour la supervision des travaux de terrain. Il a été conclu que les travaux de terrain consisteront en :
 - La réalisation de 7 forages roto-sonique dans les dépôts meubles avec prélèvement d'échantillons.
 - La réalisation de 7 forages dans les dépôts meubles avec l'aménagement de 7 puits d'observation sans massif-filtrant sur environ 30 mètres.
 - La réalisation de 3 forages verticaux au roc avec l'aménagement de puits d'observation ouvert au roc sur environ 30 mètres.
 - La réalisation de 2 forages au roc inclinés de 25° par rapport à la verticale avec l'aménagement de puits d'observation ouvert au roc sur environ 15 mètres.
- 14 juin 2019 :
Réunion pour préciser les éléments à intégrer dans le présent rapport préliminaire du modèle conceptuel du contexte hydrogéologique du site.

1.3. Mandat

Le présent mandat est décrit comme suit :

Site des anciennes lagunes de Ville Mercier : soutien technique pour l'élaboration du plan de caractérisation complémentaire du site et conception d'un modèle d'écoulement pour soutenir la conception d'un nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES-2).

Plus spécifiquement, le mandat couvre les tâches suivantes :

1. Compiler et structurer les données existantes;
2. Élaborer un modèle conceptuel du contexte hydrogéologique du site des anciennes lagunes;
3. Conseiller le MELCC sur l'élaboration d'un plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et de la région, puis sur sa mise en œuvre;
4. Ajouter les données recueillies lors de la caractérisation complémentaire à la base de données et mettre à jour le modèle conceptuel;
5. Élaborer des scénarios équiprobables représentant la variabilité et l'incertitude des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique, porosité...) en dehors des points de mesures, mais semblables au modèle conceptuel;
6. Concevoir un modèle d'écoulement hydrogéologique à l'échelle locale et régionale apte à répondre aux besoins décrits précédemment;
7. Appliquer le modèle d'écoulement à trois scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier.

1.4. Objectifs

L'objectif du présent rapport est de résumer les tâches 1 et 2 énumérées à la Section 1.3, concernant les données disponibles et leur structuration en base de données, ainsi que l'élaboration d'un modèle hydrogéologique conceptuel développé à partir des données présentement disponibles et analysées.

Le modèle d'écoulement aux échelles locale et régionale sera élaboré de manière à permettre :

- la conception du nouveau système de confinement hydraulique (UTES-2) destiné à remplacer le système actuellement en opération depuis 1984 (UTES);
- la définition du scénario de transition entre l'UTES et l'UTES-2;
- la détermination des règles d'opération à long terme de l'UTES-2, et ce, dans une perspective de changement climatique;
- l'établissement de règles d'exploitation des eaux souterraines à l'échelle régionale, de manière à ce que l'octroi de futures autorisations de prélèvement d'eau souterraine dans la région ne compromette pas l'intégrité de l'UTES-2.

L'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale et régionale devra pouvoir être simulée de façon suffisamment précise pour répondre aux besoins décrits précédemment, mais également de manière à permettre la quantification de l'incertitude entourant les résultats. Les résultats de modélisation des divers scénarios aideront le MELCC à évaluer trois scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier :

1. Les portions de milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de liquides immiscibles denses (LID) ou légers (LIL) sont confinées hydrauliquement en aménageant une composante de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker) à l'aval hydraulique de ces portions du milieu poreux et fracturé.

2. Les portions de milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de LID et LIL sont confinées hydrauliquement en aménageant deux composantes de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker), soit une à l'amont hydraulique de ces portions et une autre à l'aval hydraulique.
3. Les portions de milieux poreux et fracturés contaminées par la présence de LID et LIL sont confinées hydrauliquement en aménageant une composante de pompage (puits de pompage dans le roc et l'esker) à l'amont hydraulique de ces portions, une composante d'injection (d'une partie des eaux pompées en amont) à l'aval hydraulique de ces mêmes portions, puis une composante de pompage intermédiaire (entre les deux précédentes) destinée à recueillir les eaux d'infiltration et permettant ainsi de maintenir la zone de stagnation des eaux souterraines contaminées créée par les deux autres composantes.

L'INRS-ETE peut également proposer un scénario additionnel de confinement hydraulique qui, d'un point de vue technique, serait prometteur et mériterait d'être évalué par modélisation.

Ce rapport présente le modèle conceptuel préliminaire du site, en fonction de notre connaissance actuelle du site et des données disponibles en date de la rédaction du rapport. Ce modèle conceptuel préliminaire servira notamment à orienter la prochaine campagne de terrain pour l'acquisition de données complémentaires, et permettra de mettre en évidence les zones peu documentées pouvant jouer un rôle clé dans la modélisation du comportement des eaux souterraines, par exemple :

- Quelle est la forme des fenêtres entre l'esker et le roc ? Est-ce une fenêtre continue tout le long de l'esker ou sont-ce des fenêtres distinctes ?
- Quelle est l'étendue de l'esker en aval ?
- Quelle est la géométrie de l'esker sur ses flancs (épaisseur de till vs sable) ?
- Nous n'avons pas encore assez de connaissances sur la variabilité spatiale de la profondeur au roc entre les forages et aussi sur la répartition spatiale des sables et graviers dans l'esker.
- Il sera important de vérifier les niveaux de la nappe au nord de l'esker pour valider les hypothèses sur l'écoulement.
- Il est important de faire des essais hydrauliques in situ dans les matériaux meubles de l'esker et dans le roc fracturé afin de mieux modéliser le comportement de l'écoulement et des transferts entre l'esker et le roc.

Le modèle conceptuel se veut un support numérique permettant de justifier les différentes étapes de construction des modèles géologiques et hydrogéologiques 3D. La construction de ce modèle conceptuel permet de mettre en format numérique notre connaissance du site afin de faciliter l'intégration des données provenant de sources diverses. Le modèle conceptuel est principalement construit dans le logiciel SKUA-GOCADTM (Paradigm, maintenant part d'Emerson), avec l'aide du logiciel Q-GIS et de scripts python afin d'aider au positionnement spatial et la mise en carte des différentes données. Les étapes d'interpolation spatiale et de modélisation géologique sont principalement effectuées dans GOCAD-SKUA. Le modèle conceptuel sera ensuite représenté de façon numérique dans

le logiciel Feflow (Mike Powered by DHI), qui sera utilisé pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines autour des anciennes lagunes de Ville Mercier.

1.5. Source des données utilisées

Pour faire une synthèse du contexte général de Ville Mercier, nous avons pris connaissance de la majorité des études réalisées au site, dont les principales sont listées ici et dont la référence complète se retrouve dans la bibliographie (Section 6).

- Rapports, thèses de doctorat et mémoire de maîtrise :
 - Martel et coll. 1998
 - Pontlevoy, 2004
 - Lefebvre, 2007
 - Tremblay, 2008
 - Martel et coll. 2018
- Articles :
 - Croteau et coll. 2010
 - Lavigne et coll. 2010
 - Nastev et Lamontagne, 2010
 - Tremblay et coll. 2013

Nous avons aussi consulté et trié les données recueillies lors des programmes de caractérisation et de modélisation antérieurs. Plusieurs données de puits de forage sont disponibles et proviennent de plusieurs sources :

- Compilation de puits privés provenant des études de firmes de génie-conseil :
 - Stratigraphie, paramètres hydrauliques, piézométrie, géochimie
- Système d'information hydrogéologique, accédé le 1^{er} mai 2019 :
 - <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>
 - Stratigraphie (profondeur au roc), piézométrie
- Réseau d'information sur les eaux souterraines (RIES) :
 - http://gin.gw-info.net/service/api_ngwds:gin2/fr/gin.html
 - Stratigraphie, paramètres hydrauliques, piézométrie, géochimie
- Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec :
 - <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>
 - Piézométrie
- Puits de suivi de l'UTES
 - Piézométrie, stratigraphie

Toutes ces données de puits sont intégrées dans une base de données qui a initialement été mise en place pour les Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Québec. L'intégration des données propres au site des anciennes lagunes de Ville Mercier dans cette base de données permet de faire une assurance-qualité et un contrôle-qualité (Qa/Qc) sur les données selon les standards normalisés préalablement établis. La base de données en format PostgreSQL, fournie au MELCC et mise à jour en date de ce rapport, est basée sur le modèle de base de données de l'Open Geospatial

Consortium (OGC). Les détails concernant la base de données se retrouvent en Annexe 1. Il est important de noter que cette base de données est continuellement mise à jour afin de permettre l'intégration des nouvelles données.

Des données de sismique réflexion haute résolution ont été acquises par la Commission Géologique du Canada (CGC) en 2006 avec pour objectif d'identifier et de cartographier la présence d'esker enfouis (Hunter et coll., 2006). Le processus d'acquisition et l'interprétation de quatre levés sismiques sont décrits dans Tremblay et coll. (2013). Bien que les données ne soient pas disponibles, les images des lignes sismiques traitées leur interprétation permettent d'orienter la modélisation afin de respecter les conclusions obtenues.

Quelques modèles géologiques et hydrogéologiques ont été construits lors de la réalisation des études précédentes au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les données de certains de ces modèles seront valorisées afin de contraindre le modèle géologique 3D régional. Parmi ceux-ci, on note un modèle local de Martel et Coll. (1998) représentant les principales unités stratigraphiques au site des anciennes lagunes, ainsi qu'un modèle géologique intermédiaire (Pontlevoy, 2004), ainsi que différentes cartes d'épaisseurs des principales unités géologiques au niveau du bassin versant de la rivière Châteauguay (Lavigne, 2006; Tremblay, 2008).

Pour améliorer l'interprétation et surtout mieux interpoler la continuité des horizons stratigraphiques entre les données de forage, une autre campagne de levés sismiques a été complétée en 2018-2019. Les données interprétées ne sont pas encore disponibles et n'ont donc pas pu être utilisées pour développer le modèle conceptuel présenté dans ce rapport.

Le modèle conceptuel du site en date du présent rapport est développé à partir de ces travaux énumérés ci-haut, auxquels s'intègrent les données fournies par le MELCC.

2. Contexte général et limites du domaine d'études

Les anciennes lagunes de Ville Mercier (Figure 2) reposent sur un système aquifère constitué de roc fracturé recouvert par deux unités successives de till. Des sables et graviers d'origine fluvioglaciaire déposés par-dessus les tills constituent un deuxième aquifère superficiel de type esker, faisant quelques centaines de mètres de largeur et quelques kilomètres de longueur. Au début des années 70, une ancienne gravière a été utilisée pour entreposer des liquides organiques qui ont été directement déversés dans les sables et graviers de l'esker. Les contaminants ont migré à l'intérieur de l'unité fluvioglaciaire pour ensuite pénétrer dans l'aquifère rocheux sous-jacent par l'intermédiaire des contacts directs entre les deux aquifères où les tills sont absents (fenêtres dans les tills créés par l'érosion associée au dépôt de l'unité fluvioglaciaire). La lente solubilisation de ces composés contamine les eaux souterraines qui y circulent et génère ainsi des panaches d'eau contaminée dans le roc et dans les sables et graviers. Le MELCC a réagi en procédant à l'installation d'un réseau d'aqueduc pour alimenter les résidences affectées, en contrôlant la migration des eaux souterraines contaminées par la mise en place d'un piège hydraulique et d'une usine de traitement. Également, le MELCC a défini deux régions; une dans laquelle l'usage de l'eau souterraine est interdit et l'autre à l'intérieur de laquelle l'usage

des eaux souterraines est réglementé. Depuis 1984, trois puits pompent l’eau souterraine contaminée émise au site et l’acheminement à l’usine de traitement des eaux souterraines (UTES) aménagée et exploitée par le MELCC. Cependant, la durée de vie du système de pompage et traitement arrive à son terme.

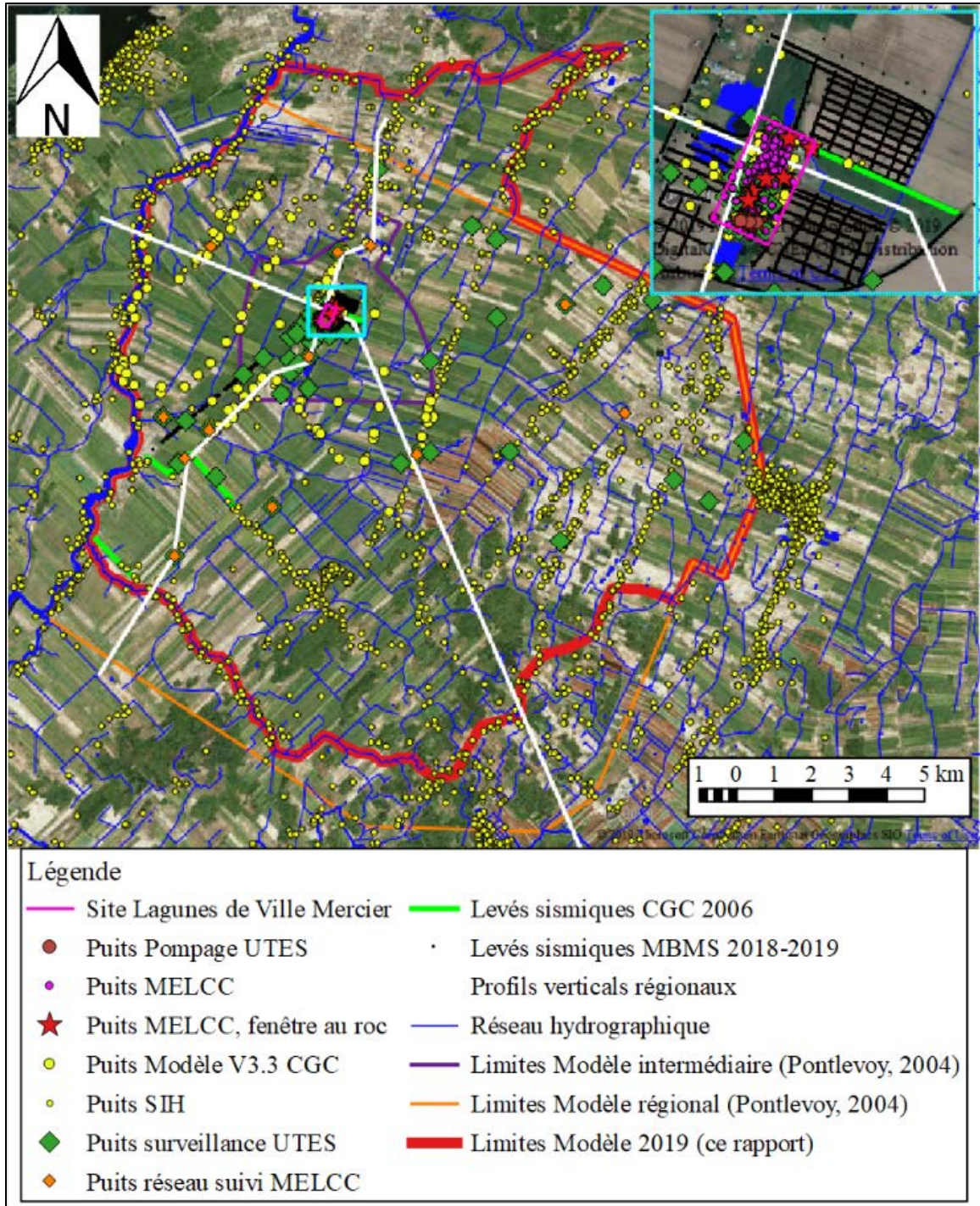


Figure 2. Image satellite de la zone d'étude avec données disponibles et les limites du domaine de modélisation envisagées pour le modèle conceptuel présenté dans ce rapport.

Le site des anciennes lagunes de Mercier est situé au sud-est de cette municipalité de Mercier. L'occupation du sol sur la région a principalement une vocation agricole, surtout maraîchère. Le réseau hydrographique de la région est bien développé, il coule essentiellement sur l'argile et est utilisé comme principale source d'irrigation des terres cultivées. Les rivières principales sont la rivière Châteauguay à l'ouest des lagunes et la rivière Esturgeon au sud qui sont par endroit en contact hydraulique avec le roc. Un débit à l'étiage de la rivière Esturgeon de $8640 \text{ m}^3/\text{d}$ a été mesuré par D'Anjou (1991). Il faut cependant noter que l'usine de traitement des eaux contaminées du MELCC (UTES) renvoie l'eau traitée dans la rivière Esturgeon, soit un débit supplémentaire de $4000 \text{ m}^3/\text{d}$ (Direction régionale de la Montérégie). Le débit réel naturel de la rivière serait donc de $4640 \text{ m}^3/\text{d}$. Les précipitations annuelles sont de $822,6 \text{ mm}$ pour Ville-Mercier et de 919 mm à Sainte-Martine.

La région d'étude est bordée à l'ouest par la rivière Châteauguay et à l'est par des collines correspondant à une ligne de partage des eaux souterraines. La rivière Châteauguay coule en partie sur le roc et constitue une limite hydraulique naturelle en raison de son contact avec l'aquifère. La rivière Châteauguay et la ligne de partage des eaux souterraines forment les limites ouest et est de la région d'étude du modèle d'écoulement. Ces limites avaient également été définies par Pontlevoiy (2004) et reprises par Lefebvre (2007). Les affleurements rocheux ainsi que les affleurements de till remanié associés à des renflements de socle rocheux ont permis de tracer une première ébauche des limites sud-est du domaine. La limite sud-est a été légèrement modifiée afin de suivre plus fidèlement la ligne de partage des eaux souterraines, selon la carte topographique et le réseau hydrographique. La rivière l'Esturgeon forme la frontière sud du modèle, et représente une limite naturelle en raison de son contact hydraulique avec l'aquifère du roc. La limite nord du modèle avait initialement été fixée comme la limite approximative du bassin versant (Pontlevoiy, 2004). La limite nord fut étendue vers le nord pour inclure toute la portion de l'esker identifiée sur la carte de géologie de surface (voir Figure 3), permettant ainsi de mieux représenter la géologie dans le modèle conceptuel.

3. Contexte géologique

Reprenant le contexte géologique décrit dans Lefebvre (2007), on retrouve dans la région de ville Mercier un socle rocheux fracturé qui est recouvert par des dépôts meubles provenant du dernier épisode glaciaire ayant touché l'ensemble du Québec. Le socle rocheux est ainsi recouvert par une couche de till formé par l'abrasion des glaciers sur le socle rocheux. Le till est un matériel peu perméable constitué de sédiments fins, mais contenant aussi des blocs. Lors du retrait des glaces, de grands volumes d'eau de fonte se sont écoulés à la base des glaciers et ont laissé par endroits de longs cordons de sable et gravier qui constituent des eskers. La mise en place des eskers a érodé le till par endroits, mettant ainsi directement en contact le sable et le gravier de l'esker avec le socle rocheux sous-jacent. Le retrait des glaces a été suivi par l'envahissement du territoire par la mer de Champlain. Les sédiments fins amenés dans cette mer par les cours d'eau ont recouvert le fond de la mer. On retrouve donc maintenant une couche d'argile marine recouvrant la surface des régions basses. Cette argile recouvre partiellement l'esker de Mercier, mais elle est absente des collines à l'est de la région (Figure 3).

La géologie de surface sur le domaine de modélisation comprend surtout les argiles marines de la Mer de Champlain (Ma et Mb sur la Figure 3), et les tills (T) provenant de l'érosion du socle rocheux par les glaciers. On y remarque également la présence de l'esker (Gs et Gx), affleurant au droit du site UTES de Mercier.

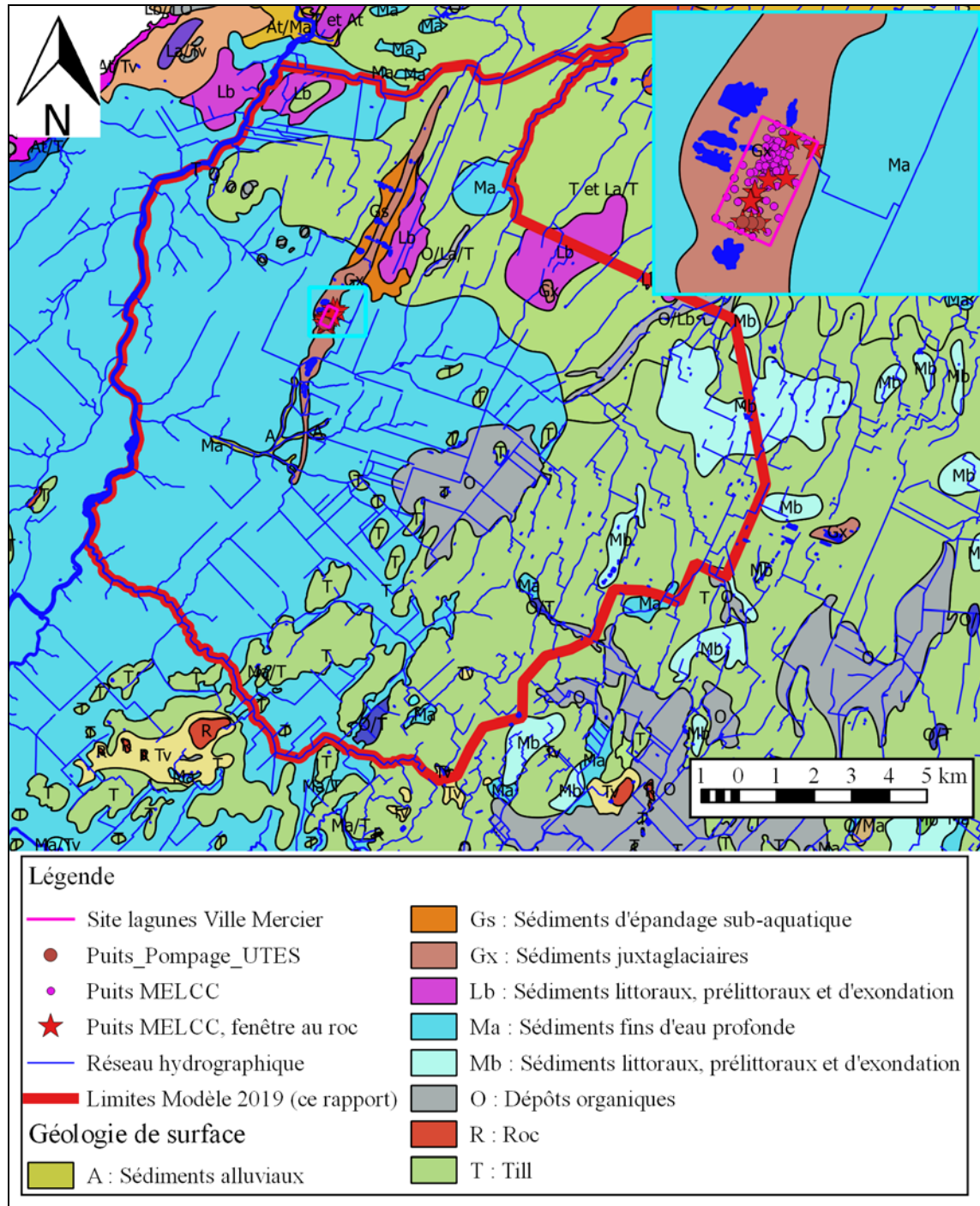


Figure 3. Carte géologique de la région d'étude (modifié de Tremblay, 2008).

3.1. Définition des unités présentes au site des anciennes lagunes

La description des formations géologiques est issue des travaux antérieurs de l'INRS et synthétisée dans les travaux de Pontlevoy (2004) et Tremblay (2008), à partir des différents logs de forages réalisés au droit de la zone d'étude. Les codes correspondants aux formations géologiques ont été définis spécifiquement au site des anciennes lagunes et sont basés sur des considérations sédimentologiques (M. Parent, comm. pers.). Les correspondances appropriées ont été établies afin de permettre l'intégration de ces données décrites avec la nomenclature locale avec les données des modèles déjà construits et décrits avec la nomenclature provinciale.

Unité 5, roc

Cette unité de quartzite blanche représente la roche en place sous les dépôts meubles. Le socle est constitué par des roches sédimentaires d'âge Cambrien à Ordovicien (Globensky, 1986). Les roches du Cambrien sont les grès du groupe de Potsdam tandis que les grès, dolomies et shales du groupe de Beekmantown représentent les roches datant de l'Ordovicien. Ces formations ont subi une légère déformation structurale lors de l'orogénèse taconienne qui se résume par des failles et joints, et par des synclinaux et anticlinaux de grande amplitude (Figure 4).

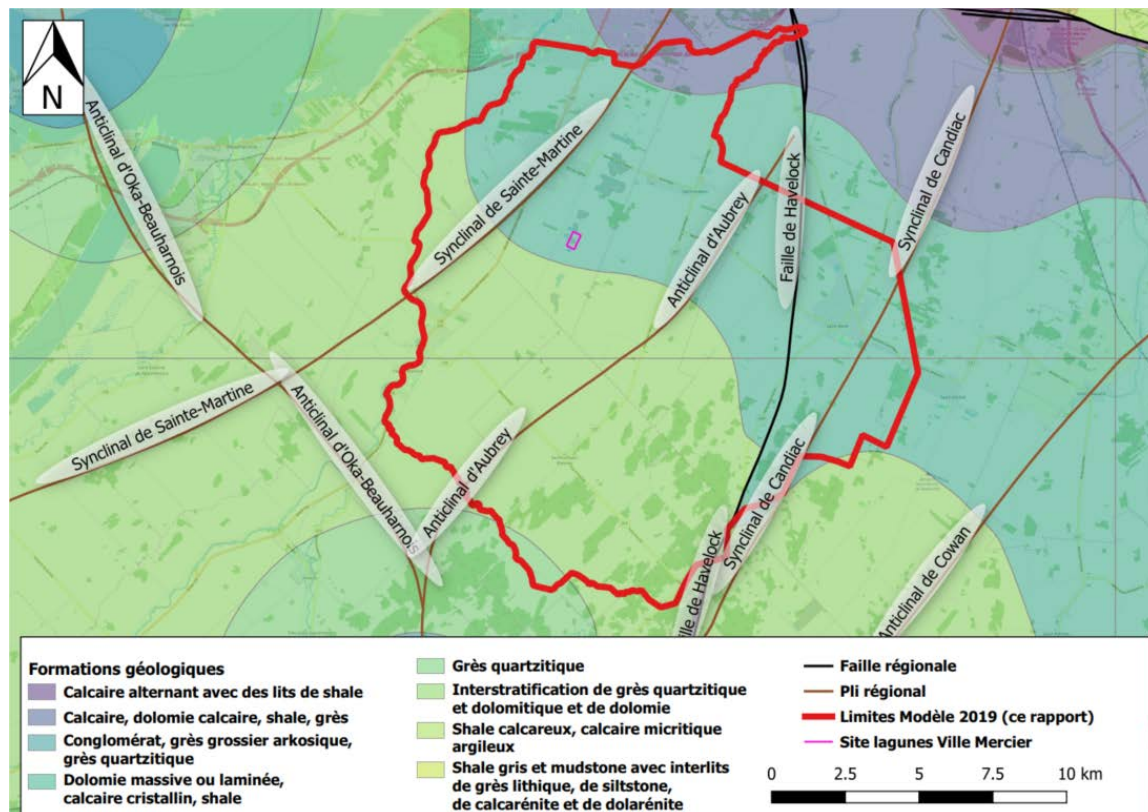


Figure 4. Carte géologique et structurale du substratum rocheux à proximité de la zone d'étude. Fond de carte OpenStreetMap sous licence CC BY-SA.

Les fractures à pendage sub-vertical peuvent être divisées en deux familles. La première famille, de moindre importance, est orientée N030E et présente des espacements de joints

variant de 0,1 m à 0,45 m tandis que la seconde famille, plus importante, est orientée N120E avec des espacements de joints variant de 0,1 m à 1,0 m.

Trois axes de plis traversent de part et d'autre la zone d'étude. Ce sont les synclinaux de Sainte-Martine et de Candiac et l'anticlinal d'Aubrey. Les couches sédimentaires affectées par ces déformations présentent de faibles pendages avec des angles jamais supérieurs à 10 degrés. La faille de Havelock devrait avoir un impact léger sur l'écoulement des eaux souterraines. En effet le sommet de l'anticlinal d'Aubrey devrait agir comme une ligne de séparation des eaux souterraines. La fracturation de l'unité 5 est décrite davantage par Denis (1991) et Gélinas et coll. (1989).

Après la longue période d'érosion glaciaire du Wisconsinien donnant son aspect très accidenté à la surface du socle, les dépôts meubles datant du Pléistocène recouvrent le roc. Les premiers à se déposer sur le socle rocheux sont le till basal et le till remanié, puis les sables et graviers d'origine fluvio-glaciaires, et enfin les argiles résultant de la transgression marine à l'origine de la mer de Champlain.

Unité 4B, till inférieur ou till basal

Cette unité de couleur grise comprend un mélange de sédiments non classés contenant une large gamme de tailles granulométriques (diamicton). La matrice est siltosableuse et dominante; l'homogénéité est globale. L'unité est compacte. Des galets striés sont présents. Localement, il peut y avoir de petits lits de sable.

Unité 4A, till supérieur ou till remanié

Cette unité de couleur grise comprend un mélange de sédiments non classés contenant une large gamme de tailles granulométriques (diamiction) ; des lits sablonneux ou graveleux peuvent s'y intercaler. La matrice est silto-sableuse et plus ou moins homogène. Il y a parfois présence de zones compactes. Les galets sont généralement non striés. Cette unité 4A correspond à l'unité D1 du code CGC.

Unité 3, sable et gravier (esker)

Cette unité contient du gravier sablonneux à du sable graveleux avec des traces de silt et des quantités variables de cailloux et blocs. Ce dépôt est généralement gris noir, mais parfois la partie supérieure est brune en raison d'une forte oxydation. Les sables et graviers de cette unité présentent généralement une forte conductivité hydraulique (de l'ordre de 10^{-4} m/s). L'unité 3 correspond aux unités S et SG du code CGC.

Unité 2B, argile silteuse

Cette unité de couleur grise et brune est constituée d'argile silteuse avec un peu de silt et des quantités variables de cailloux et blocs. L'argile silteuse de cette unité présente une conductivité hydraulique très faible ($6,4 \times 10^{-10}$ à 4×10^{-10} m/s; Pontlevoy, 2004).

Unité 2A, silt et sable argileux

Cette unité de couleur brune est constituée de silt sablonneux à du sable silteux et argileux avec des proportions variables de gravier, cailloux, et blocs. Cette unité argileuse se retrouve au-dessus de l'unité argileuse 2B. Selon les travaux de correspondance des

élévations complétés entre les différentes sources de données, l'unité 2A doit correspondre à l'unité F1 (code CGC) du modèle géologique existant (Pontlevoy, 2004).

Unité 1B, remblai

Cette autre unité de remblai est constituée de tous les matériaux, autres que ceux de l'unité 1A, ayant servis de remblai sur le site. Généralement, ces matériaux sont du sable et gravier gris et brun avec des proportions variables de silt, cailloux et blocs ; localement, de l'argile est retrouvée. Cette unité est constituée de matériaux naturels mais présente des corps étrangers non naturels indiquant que ces matériaux ont été remaniés.

Unité 1A, remblai

Cette sous-unité de remblai est constituée d'argile silteuse grise et brune avec des traces à un peu de sable et gravier. Localement, elle peut renfermer des racines et des coquillages. L'unité affleure ou se retrouve très près de la surface au niveau des anciennes lagunes comme couche de recouvrement des matériaux de remplissage plus grossiers (unité 1B). Cette unité est constituée de matériaux fins (silt, argile) semblables à ceux des unités argileuses 2A et 2B. Cette nouvelle sous-unité a été définie pour permettre de distinguer les matériaux fins ayant servi au recouvrement des anciennes lagunes, des autres matériaux généralement plus grossiers constituant les remblais pour les lagunes ou d'autres endroits du site (unité 1B).

3.2. Distribution et mise en carte des unités dans la zone d'étude

Roc

Un modèle initial régional de la topographie du roc (Figure 5) a été obtenu en utilisant les puits du Système d'Information Hydrogéologique (SIH) existants dans la région (environ 2700 puits). Pour cette version préliminaire de la représentation de la topographie du roc, les données du SIH uniquement ont été utilisées pour avoir une tendance régionale. Dans une prochaine étape, la carte d'élévation du roc sera raffinée localement pour tenir compte de l'ensemble des données répertoriées au droit des anciennes lagunes de Mercier, incluant les puits du MELCC et les données sismiques interprétées de MBMS.

Les puits présentant des variations extrêmes de niveau d'élévation du roc ont été filtrés (environ 30 puits). Une variation d'une trentaine de mètres du niveau du toit du roc sur une distance d'une centaine de mètres en domaine sédimentaire semble peu probable (à l'exception de la présence d'une faille). Ces variations pourraient venir d'erreurs de saisies sur les logs ou de la part des puisatiers. La banque des puits SIH est uniquement utilisée pour définir la topographie du roc, les descriptions lithologiques des autres formations géologiques n'étant pas assez précises pour parvenir à une interprétation fiable. L'interpolation des élévations du roc a été effectuée par krigeage.

Le krigeage est une méthode d'interpolation classique permettant de minimiser le biais d'interpolation, une méthode standard employée par les industries pétrolière et minière. La topographie du roc a été krigée sur une zone rectangulaire de 24km par 30km, englobant entièrement les limites du domaine de modélisation. La zone d'interpolation est plus grande que les limites du modèle conceptuel afin de minimiser les biais d'extrapolation pouvant

exister aux limites du modèle. Les marqueurs ont permis de définir un variogramme pour exprimer la corrélation spatiale entre l'élévation du roc au niveau de tous les puits. Le modèle théorique de variogramme qui ajuste le mieux le variogramme expérimental est composé d'un modèle exponentiel anisotrope avec une direction principale de 30° azimuth de courte portée, et d'un autre modèle régional isotrope lui aussi exponentiel. Les portées du modèle anisotrope sont de 5500 m et 4800 m respectivement et le modèle plus régional a une portée de 40000 m a été modélisée afin de reproduire une tendance régionale dans la direction préférentielle de 30° azimuth. Ce modèle de variogramme est similaire à celui déterminé à partir des données de sismique réflexion pour le projet PACES de la Montérégie-Est (Blouin et Gloaguen, 2015). La tendance régionale est visible sur la Figure 5 avec un gradient d'élévation allant du sud-est au nord-ouest. Un effet pépite de 11,5 m² a été appliqué pour coller aux variations à très courte distance entre les puits. Ce fort effet pépite démontre qu'il existe toujours une structure à plus petite échelle dans les données qui n'est pas représentée dans la surface krigée. Il sera possible de raffiner les futures modélisations en tenant compte des forages effectués au droit du site à très courte distance les uns des autres.

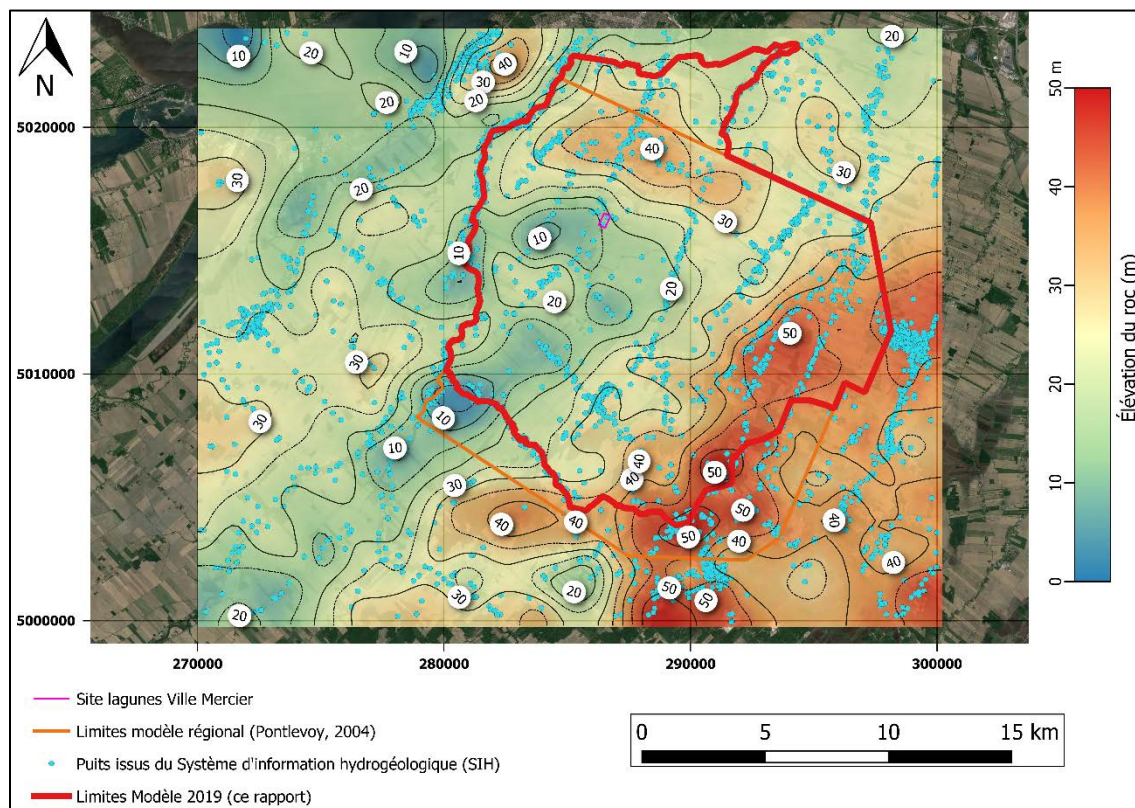


Figure 5. Carte topographique krigée de l'élévation régionale du roc

Les données de puits MELCC et du réseau de suivi n'ont pas été considérées dans ce premier modèle car certaines de ces données ont été retrouvées à partir de plusieurs projets différents, et les données ne concordent pas toutes entre ces différents projets. Un travail de filtrage et de correspondance des données est en cours afin de statuer sur les données finales à utiliser dans modèle final. Il est prévu de déformer la carte préliminaire du roc

afin d'honorer les marqueurs stratigraphiques des puits MELCC, localement, et du réseau de suivi, régionalement.

Il est présentement impossible d'inclure directement les données sismiques CGC 2006 dans le modèle car les données numériques n'ont pas été retrouvées par l'INRS-ETE. Il est simplement possible de se servir des images afin de guider qualitativement les interpolations. La Figure 6 présente un exemple de ligne sismique de la CGC, et son interprétation. Ce levé sismique se situe juste à l'est du site des anciennes lagunes de Mercier (ligne verte dans l'encadré de la Figure 2).

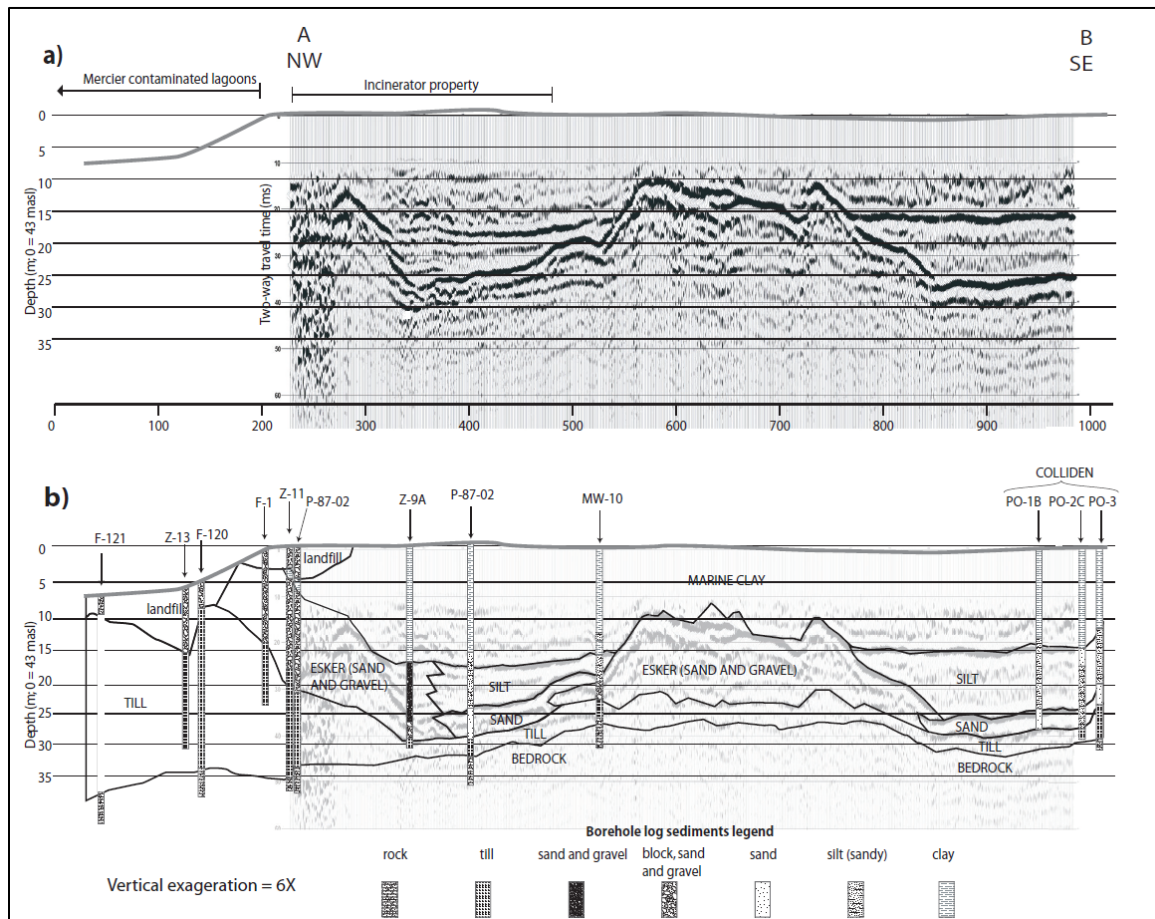


Figure 6. a) Levé sismique AB provenant de la Commission Géologique du Canada, et b) son interprétation. Figure de Tremblay et coll. (2013).

Similairement, les données sismiques MBMS 2018-2019 ne sont pas incluses dans cette première version du modèle géologique conceptuel car le traitement des données a été effectué pendant la rédaction de ce rapport préliminaire et l'interprétation n'a pas pu être complétée. La séquence de traitement pour convertir les données brutes en données traitées utilisables pour l'interprétation inclut :

- l'assignation à la géométrie ;
- le rehaussement du signal par une série de filtres (passe-bande avant et après sommation) et de gains (AGC) ; et

- sommation avec une vitesse de sommation vitesse simple (entre 160 m/s et 200 m/s) pour la conversion temps-profondeur.

La Figure 5 montre que l'élévation du roc se situe entre 15 et 20 m au-dessus du niveau moyen des mers au droit du site UTES de Mercier. L'anticlinal d'Aubrey visible sur la structure du roc présent au nord du domaine pourrait former une ligne de partage des eaux souterraines. L'élévation maximale du roc est de plus de 50 m au-dessus du niveau moyen des mers sur une ligne de crête près de la limite est du modèle. L'élévation minimale du roc est de moins de 10 m au sud-ouest du modèle et semble coïncider avec la présence de l'esker de Mercier, qui s'est formé dans les creux du roc. Bien que l'esker ne soit plus visible en surface dans le sud de la région d'étude, le bas topographique du roc suggère que l'esker y est toujours présent. Le levé sismique CE (Figure 7) de la CGC situé à l'est de la municipalité de Sainte-Martine suggère que l'esker est toujours présent sous une faible couche d'argile, tandis que le levé FG (Figure 8) de la CGC suivant la rivière des Fèves à la limite sud du modèle suggère plutôt que l'esker est absent et qu'une épaisse couche de till est présente. L'extension maximale de l'esker vers le sud serait donc entre la municipalité de Sainte-Martine et la rivière des Fèves.

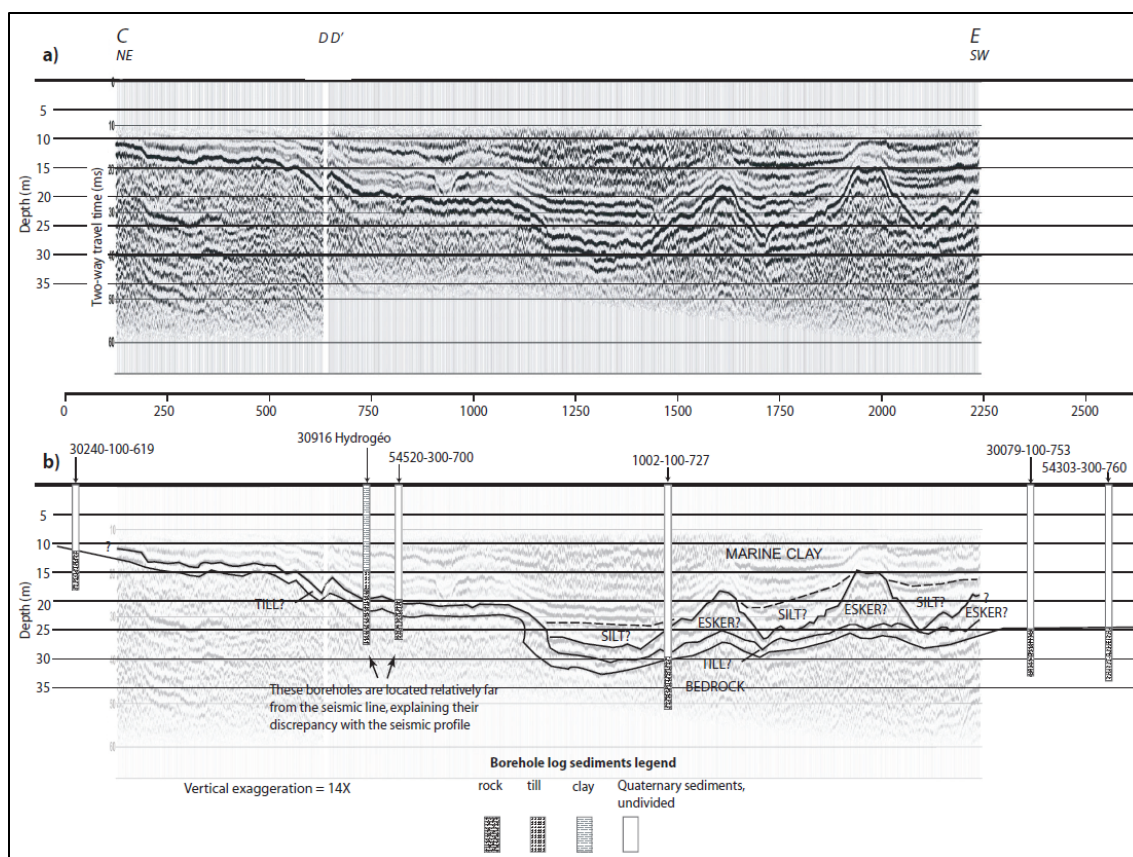


Figure 7. a) Levé sismique CE provenant de la Commission Géologique du Canada, et b) son interprétation. Figure de Tremblay et coll. (2013).

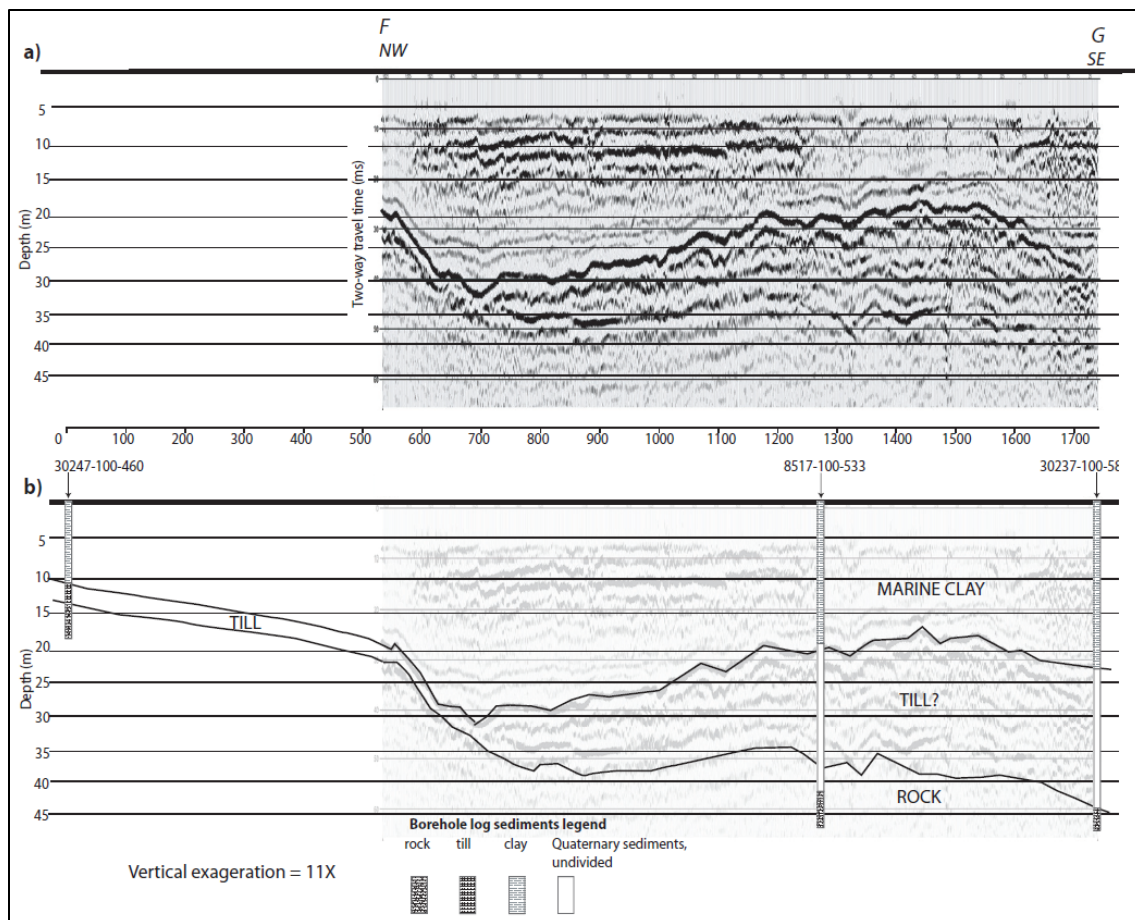


Figure 8. a) Levé sismique FG provenant de la Commission Géologique du Canada, et b) son interprétation. Figure de Tremblay et coll. (2013).

La carte topographique krigée du roc de la Figure 5 se compare bien avec la carte du roc interpolée de Pontlevois (2004), reproduite à la Figure 9 et les travaux de Lise Lamarche, dont les résultats se retrouvent dans les mémoires de maîtrise de Lavigne (2006) et Tremblay (2008). On voit que les structures principales sont reproduites, principalement la tendance régionale où l'élévation du roc diminue du nord au centre du domaine de modélisation. On observe que la plus faible quantité de données utilisée par Pontlevois (2004) génère une topographie du roc plus lissée, alors que davantage de variations sont visibles sur la carte du roc krigée dans ce projet (Figure 5). On observe aussi, sur la Figure 9, un effet de support, où quelques données éparses semblent tirer exagérément l'interpolation, avec un effet de « bulls-eye » apparent.

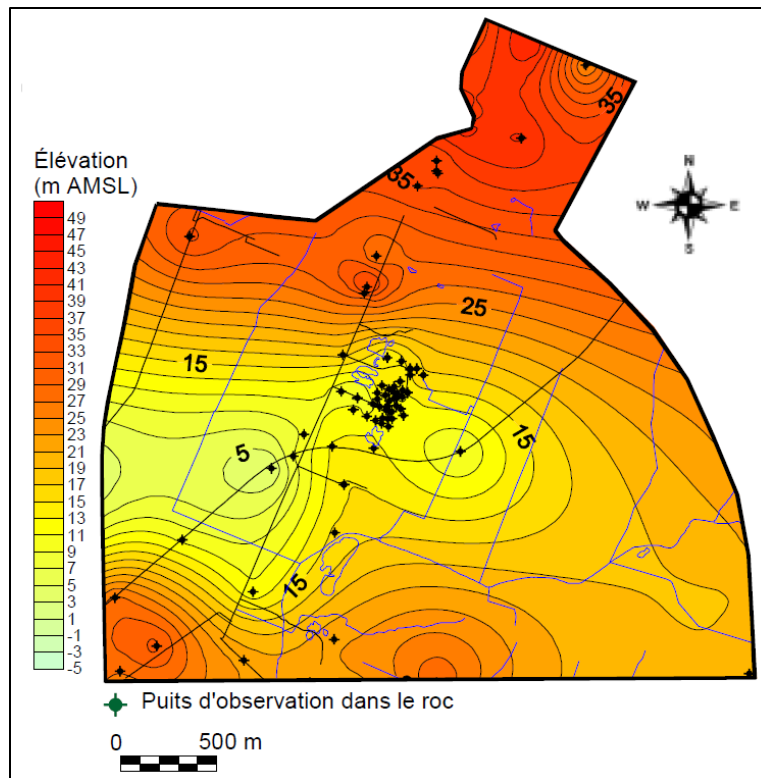


Figure 9. Carte topographique de l'élévation régionale du roc sur les limites du modèle intermédiaire (modifié de Pontlevoy, 2004)

Les tills

Le socle est recouvert par le till basal, un matériel très compact, dense et peu perméable, résultant de l'érosion de la roche par les glaciers. Au-dessus du till basal, on retrouve par endroit un till remanié moins compact et plus perméable qui serait un till d'ablation déposé lors de la fonte d'une glace mince. Ces deux tills présentent localement des fenêtres qui mettent en contact directement le roc avec l'unité de sable et gravier de l'esker. Les preuves actuelles (forages) montrent que ces fenêtres ne sont présentes qu'au niveau du complexe fluvio-glaciaire. Elles pourraient être expliquées par le fort courant de la rivière sous-glaciaire au centre de l'esker.

Pontlevoy (2004) indique une épaisseur moyenne régionale de till de 2m alors que Tremblay (2008) précise une épaisseur inférieure à 3m (souvent inférieure à 1m). Pour notre modèle régional, une couche de till de 2m d'épaisseur constante a été retenue par-dessus la topographie du roc krigée afin de contrôler l'interpolation du till aux zones de faible densité de données. L'information présente dans la banque de données des puisatiers ne permettait pas de raffiner l'épaisseur de till de manière régionale, et l'ajout de cette contrainte permettra de stabiliser l'interpolation. L'étape suivante de la modélisation sera de déformer cette couche régionale avec les données locales de Mercier afin d'honorer les marqueurs aux puits. La densité de forage sous les lagunes de Mercier permettra de contraindre l'interpolation pour bien représenter la présence connue de fenêtres au roc, et d'étudier la présence d'autres fenêtres dans le till permettant la communication entre le roc et l'esker.

Les sables et graviers de l'esker

Ce sont des dépôts fluvio-glaciaires qui se sont déposés aux embouchures des rivières créées par la fonte et le recul glaciaire. La granulométrie est très grossière et reflète la force des courants et va de sable grossier à graviers et blocs. La variabilité de la granulométrie des dépôts de l'esker ressort bien dans l'analyse granulométrique présentée à la Section 3.3. Ces dépôts sont très perméables et sont en partie affleurant au niveau de Ville-Mercier sous la forme d'un esker de plus de 11 km de long.

Les argiles

Suite à la période de déglaciation, la transgression de la mer de Champlain favorise le recouvrement des dépôts glaciaires par des argiles. Elles recouvrent une bonne partie de la région et sont considérées comme des matériaux imperméables, bien qu'au niveau de la surface, les deux premiers mètres plutôt silto-sableux soient plus perméables.

L'étude de l'élévation des argiles sur les forages disponibles a révélé une élévation subhorizontale relativement constante autour de 42 m a.s.l. (écart type à 4 m), observations compatibles avec un dépôt marin non remanié. Le toit de l'horizon d'argiles sur le modèle régional a donc été bâti comme une surface d'élévation constante à 42 m a.s.l.. De façon similaire à la surface du till, cet horizon régional d'argile sera déformé localement afin d'honorer les marqueurs aux puits.

Les horizons géologiques modélisés sont ensuite recoupés par le modèle numérique de terrain (modèle de la NASA avec une résolution de 15 ou 20m) de la région pour correspondre aux altitudes de surfaces observées sur le terrain. Des données LIDAR ont été extraites à partir du site d'imagerie forestière du gouvernement (ftp://transfert.mffp.gouv.qc.ca/Public/Diffusion/DonneeGratuite/Foret/IMAGERIE/Produits_derivés_LiDAR) et pourront être utilisées si une précision plus grande est nécessaire.

La carte d'épaisseur des dépôts meubles (Figure 10) a été obtenue en réalisant la différence entre l'élévation du sol et la profondeur du roc krigée. L'épaisseur totale des dépôts meubles varie entre 0 m (roc affleurant) au sud-est du modèle à plus de 40 m au sud-ouest du modèle. L'épaisseur des dépôts meubles est approximativement de 30 m au droit du site UTES de Mercier. Les variations d'épaisseurs sont similaires en magnitude et en localisation à celle observée par Pontlevoy (2004) et régionalement par les travaux de Lise Lamarche, publiés dans Lavigne (2006) et Tremblay (2008).

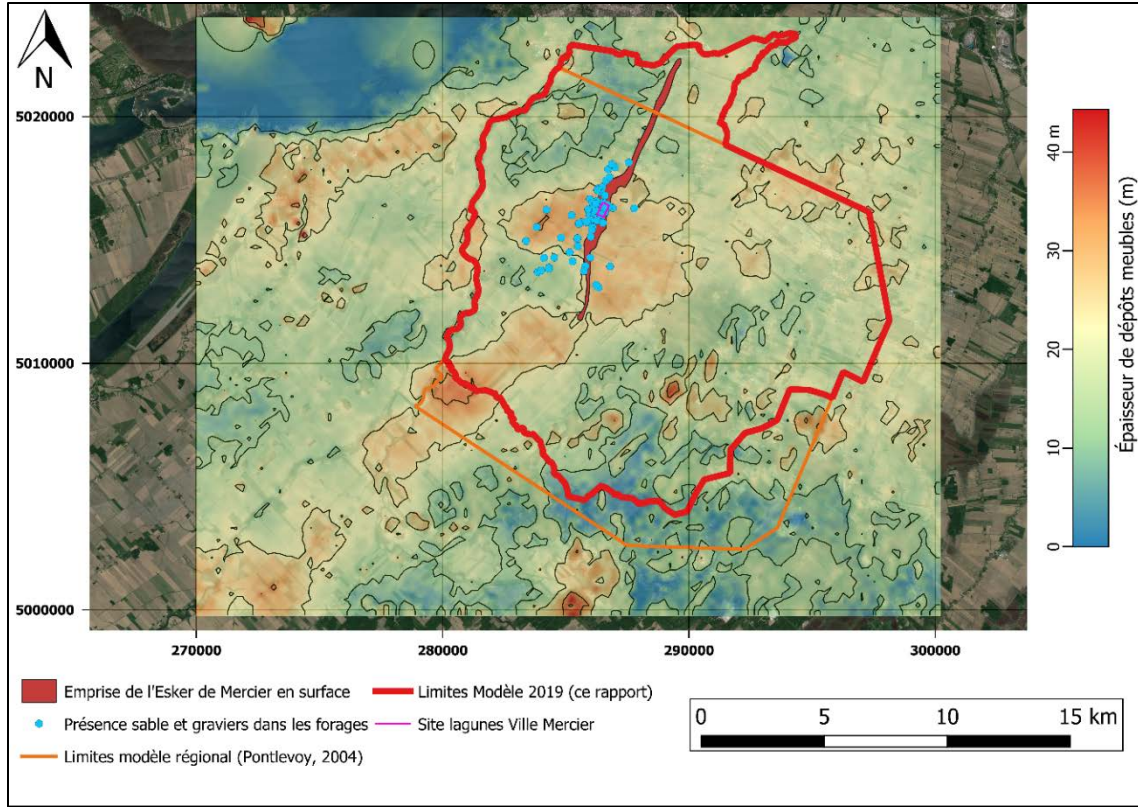


Figure 10. Carte d'épaisseur régionale des dépôts meuble.

3.3. Analyse granulométrique

Les données utilisées pour l'analyse granulométrique sont issues des travaux du ministère de l'environnement réalisés en 1999. 59 analyses granulométriques ont été effectuées sur différentes formations, un récapitulatif de la distribution de ces tests est donné dans le Tableau 1.

Tableau 1. Tests de granulométries effectués par formation géologique.

Formations	1a	1b	2a	2b	3	4a	4b	5
Tests	13	15	0	1	23	4	3	0

Le nombre de tests indique la fiabilité des interprétations effectuées par la suite. Aucun test n'a été effectué dans le roc (5) ou dans la couche silto-sableuse (2a). L'unique test dans l'horizon d'argile silteuse (2b) ne permettra pas d'étude statistique. Enfin, les horizons de till (4a et 4b) présenteront des statistiques sur un nombre d'échantillons très faible. Pour une interprétation visuelle plus simplifiée, l'analyse sera faite à travers un ratio appelé indice granulométrique. L'indice granulométrique est le rapport entre la proportion de particules grossières (graviers et sables avec des diamètres supérieurs à 0.08mm) sur la proportion de particules fines (silt et argiles avec des diamètres inférieurs à 0.08mm).

Indice Granulométrique (IG) :

$$IG = \frac{(\%Gravier + \%Sable)}{(\%Silt + \%Argile)}$$

Ce ratio permet une classification des sols étudiés par rapport à la taille des grains le constituant. Un ratio supérieur à 1 indique donc un sol majoritairement constitué de graviers et des sables (diamètres supérieurs à 0,08 mm). Au contraire ; un ratio inférieur à 1 indique un sol majoritairement constitué de silts et d'argiles (diamètres inférieurs à 0,08 mm). La Figure 11 montre la variabilité de l'indice granulométrique dans chaque formation géologique.

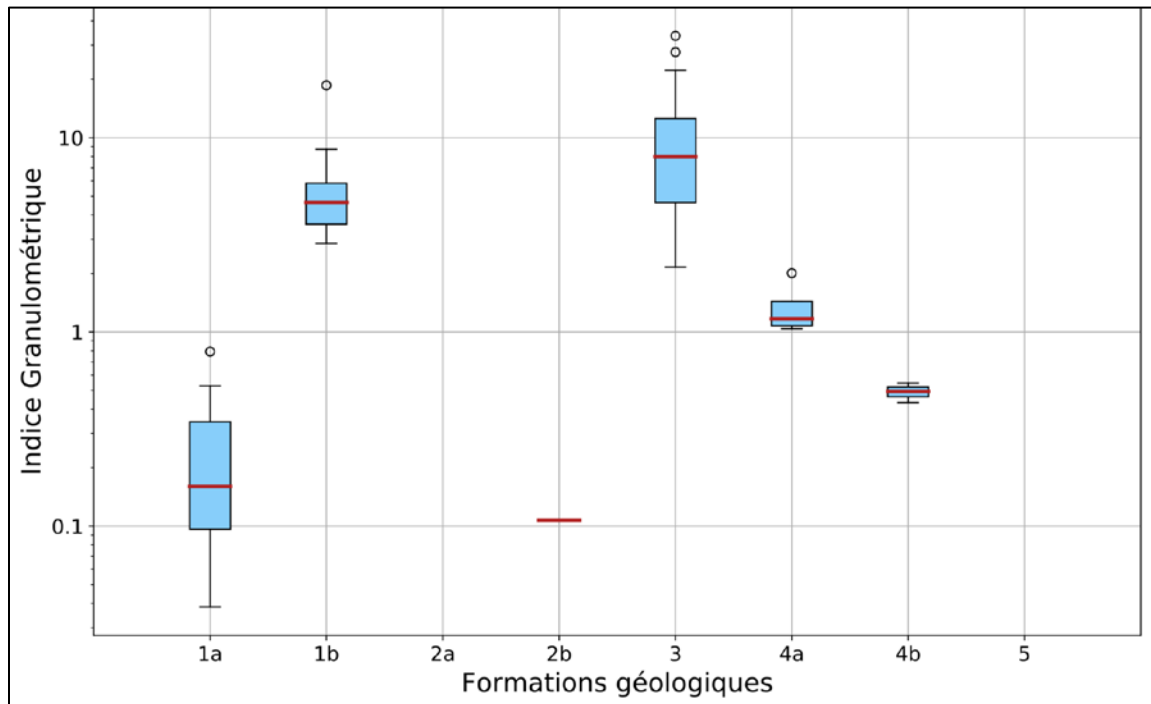


Figure 11. Analyse statistique de l'Indice Granulométrique pour chaque horizon géologique étudié.

L'interprétation de la Figure 11 prendra en compte seulement les formations 1a, 1b et 3 présentant un nombre d'échantillons représentatif (Tableau 1). Les tills indiquent une composition granulométrique assez proche sur ces quelques échantillons. Les différences pétrophysiques proviendraient plutôt du remaniement de l'horizon 4a plutôt que d'une réelle différence de composition. L'esker, constitué majoritairement de sable et de graviers ressort bien à travers son indice granulométrique. Avec un indice moyen près de 10, les fractions fines sont quasiment absentes (10 fois moins présentes). Ceci correspond aux descriptions faites de cette unité dans la maîtrise Pontlevoy (2004) et dans les différentes sources utilisées par ce dernier. Tremblai (2004) décrit une partie sous-glaciaire de l'esker plutôt graveleuse reposant sous une partie éventail subaquatique sableuse. Il indique également la présence de cailloux sub-arrondis à arrondis dans l'esker, mais sans précision sur la taille de ces derniers.

Les unités 1a et 1b constituées des remblais de surface présentent des indices de granulométries bien différents. Ces remblais sont uniquement présents au droit des anciennes lagunes de Mercier, c'est le matériel qui a été apporté pour les combler. La matrice argileuse observée lors des forages dans l'horizon 1a ressort sur cette figure, un IG moyen autour de 0,15 indiquant environ 7 fois plus de grains fins que de grains grossiers dans les échantillons. La distribution des échantillons de l'horizon 1b est bien séparée de

celle de 1a avec un indice moyen d'environ 5. Toutefois, la recharge en eau sera très limitée au droit de ces remblais. En effet d'après Richard Martel une couche d'argile est présente en surface des anciennes lagunes (1a). Il sera donc intéressant d'étudier l'importance de garder ces deux formations de manière indépendante dans les futurs modèles numériques ou bien de les réunir dans une unité hydrostratigraphique unique.

3.4. Analyse conductivité hydraulique

Notre compréhension de l'écoulement de l'eau souterraine passe par notre capacité à comprendre et à modéliser en trois dimensions la distribution spatiale de la conductivité hydraulique (K). En effet, la conductivité hydraulique exprimée en m/s permet d'exprimer la capacité d'un matériau à se laisser traverser par un fluide visqueux. Une valeur faible traduira un horizon géologique empêchant la circulation de fluides. Un milieu est considéré imperméable lorsque sa conductivité hydraulique est de l'ordre de 10^{-9} m/s et moins. Les données compilées pour l'analyse suivante sont issues des travaux préliminaires de Poulin (1977), Hydrogéol (1981), Foratek International (1987), CNFS (1993), Greggi (1993) et Experts-Conseils Hydrogéol Inc. (2009). 275 analyses ont été retenues pour l'étude statistique. Lorsqu'un même échantillon fait l'objet de plusieurs tests, il a été décidé de garder les valeurs individuelles plutôt que la moyenne pour avoir une meilleure représentativité de la variabilité. Les formations géologiques les plus représentées dans le Tableau 2 sont celles présentant une plus grande importance pour la modélisation hydrogéologique. Les incertitudes sur la distribution de K sont liées principalement à l'esker et son interface avec le roc, ainsi que la capacité d'écoulement au sein du roc fracturé. C'est donc ces deux horizons qui ont subi le plus grand nombre de tests.

Tableau 2. Tests de conductivité hydraulique effectués par formation géologique.

Formations	1a	1b	2a	2b	3	4a	4b	5
Tests	0	10	0	0	75	8	14	168

Les valeurs de conductivité hydraulique ont été obtenues à partir de différents tests (Bouwer et Rice, 1976; Cooper et al., 1967). Toutes les valeurs ont été retenues pour ne pas privilégier une méthode par rapport à une autre. La plupart des tests sont des slug tests afin de caractériser une fenêtre précise dans les piézomètres installés. De cette manière, les formations géologiques ont pu être caractérisées individuellement. La localisation des forages utilisés pour cette analyse est donnée sur la Figure 12. L'analyse statistique des conductivités hydrauliques sur chaque formation géologique est présentée sur la Figure 13.

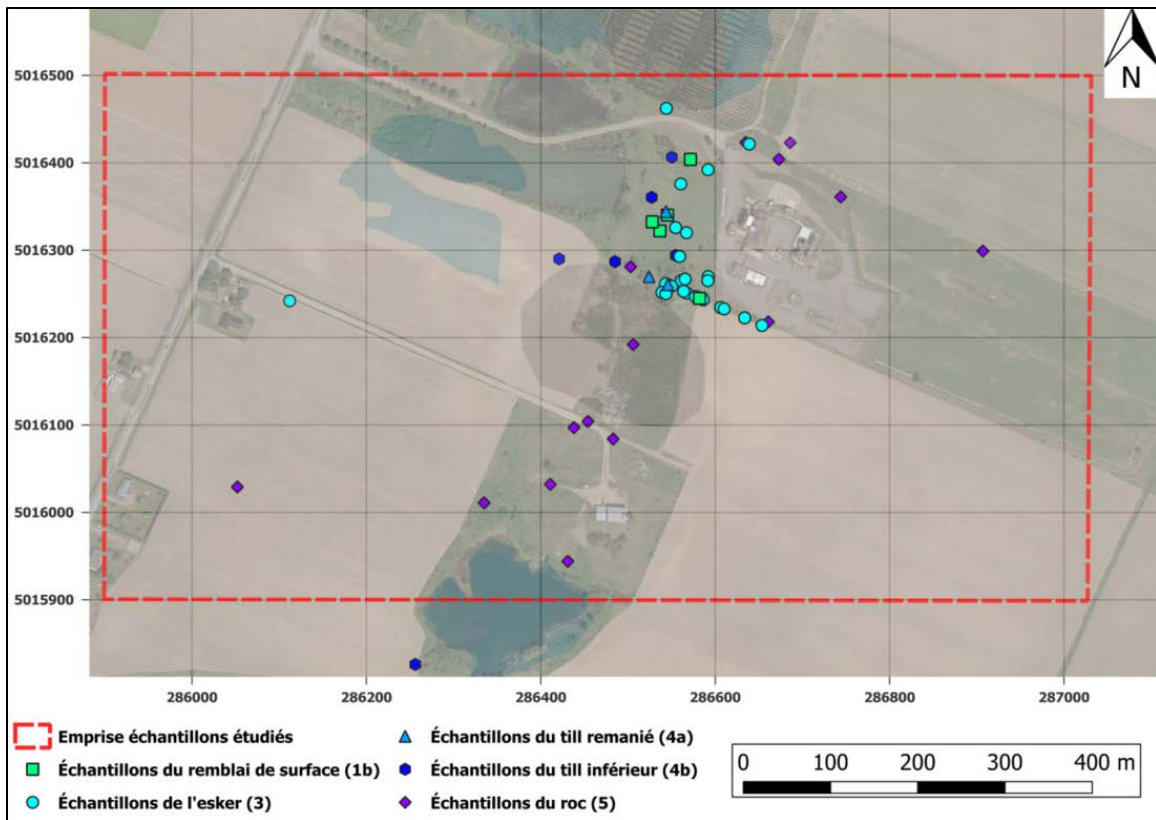


Figure 12. Localisation des échantillons analysés pour l'étude de conductivités hydrauliques.

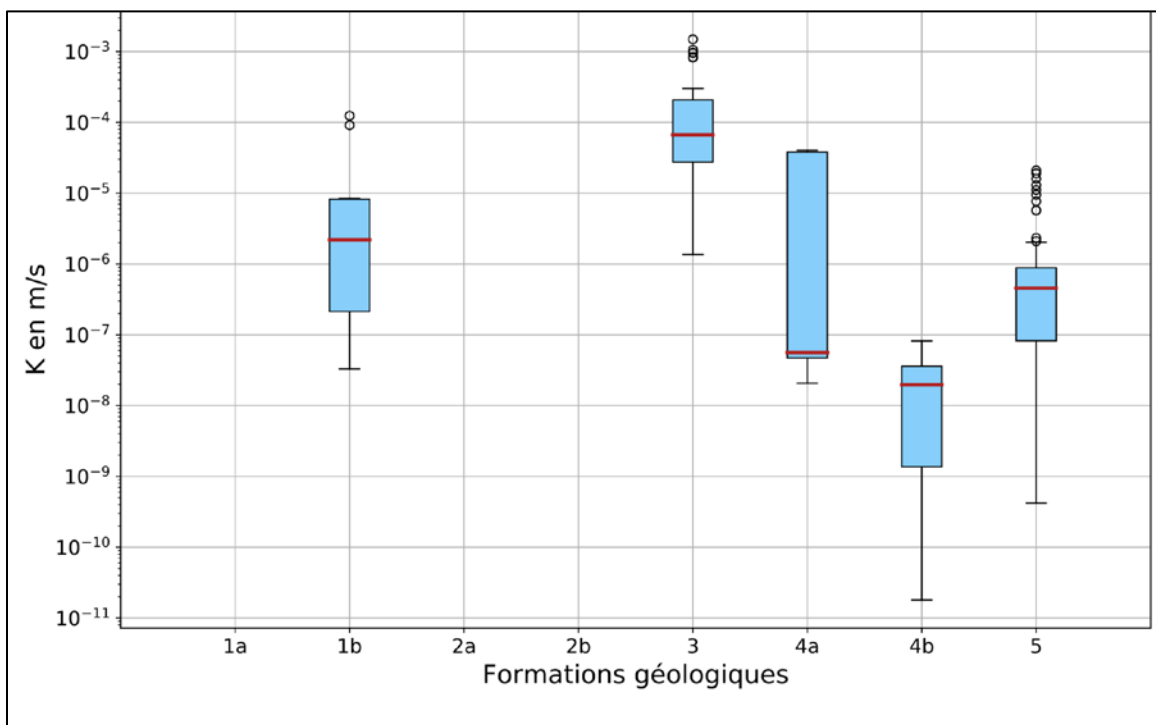


Figure 13. Analyse statistique des conductivités hydrauliques (k) pour chaque horizon géologique.

Pour visualiser les valeurs de conductivités hydrauliques en carte, les positions X, Y des échantillons provenant d'un même forage ont été légèrement modifiées. De cette manière toutes les conductivités connues sont visibles et non masquées derrière l'échantillon le plus proche de la surface. Les cartes et profils verticaux de conductivités hydrauliques des différentes formations géologiques analysées sont présentés sur les Figure 14 et Figure 15.

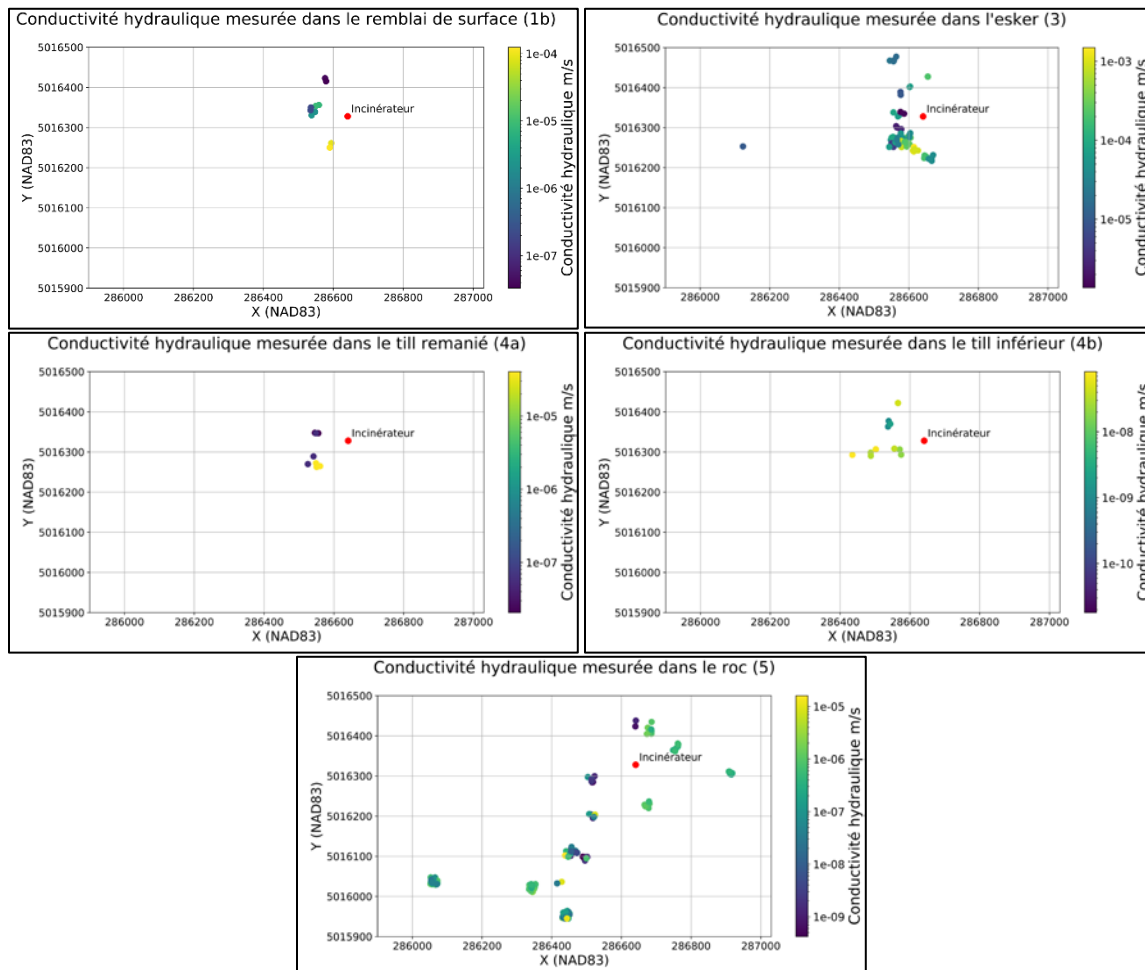


Figure 14. Conductivités hydrauliques des différents échantillons en fonction de la lithologie.

Pour étudier la distribution en profondeur des conductivités hydrauliques, toutes les valeurs mesurées ont été affichées. Les coupes de la Figure 15 sont simplement une projection sur l'axe X ou sur l'axe Y, et permettent de distinguer clairement l'esker au-dessus du roc. Les conductivités plus faibles en jaune/vert clair sont de l'ordre de 10^{-5} m/s alors que les formations sous-jacentes d'un bleu turquoise à bleu foncé sont autour de 10^{-7} m/s.

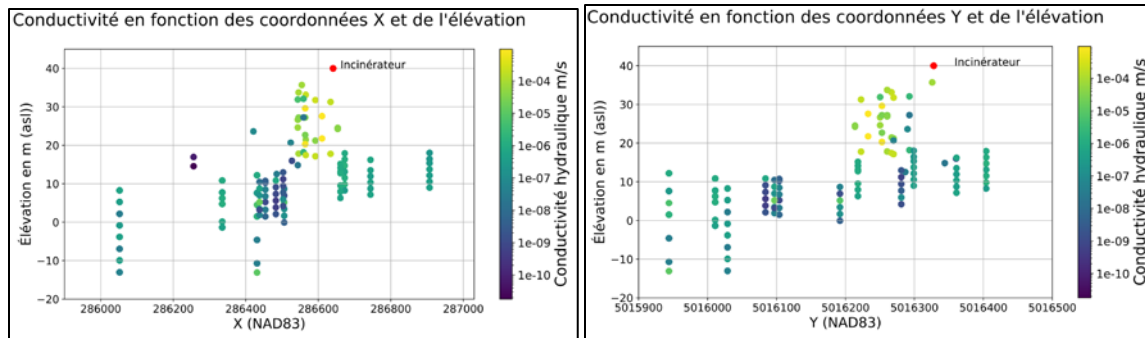


Figure 15. Projection des conductivités hydrauliques sur les axes X et Y en fonction de l'élévation de l'échantillon analysé.

L'horizon géologique des tills (4) comporte peu de tests. Cependant, une première tendance semble se dessiner. Le till remanié (4a) présente des conductivités hydrauliques plus élevées. La moyenne est quasiment identique à celle du till (4b) autour de 5×10^{-8} m/s, cependant des valeurs beaucoup plus hautes ont été mesurées jusqu'à 5×10^{-5} m/s. Le till non remanié (4b) a une moyenne autour de 2×10^{-8} m/s mais des valeurs beaucoup plus faibles de conductivité ont été mesurées jusqu'à 2×10^{-11} m/s. Les deux familles présentes donc des différences pétrophysiques visibles. Garder cette distinction dans les futurs modèles numérique sera important. La réponse des écoulements des eaux souterraines devrait être différente en considérant deux couches aux propriétés différentes qu'une couche moyennant les deux horizons. En effet les travaux de Freeze et Whitherspoon (1966, 1967 et 1968) ont mis en évidence que les contrastes de perméabilité affectaient l'écoulement des fluides en milieu poreux.

La conductivité hydraulique dans les sables et graviers de l'esker est beaucoup plus élevée. La moyenne est de 7×10^{-5} m/s avec des valeurs variant de 10^{-6} à 10^{-3} m/s. Une conductivité hydraulique élevée aura un impact sur la région étudiée et les modèles hydrogéologiques. L'eau pourra donc circuler plus facilement dans l'esker que dans les tills. Les tests sur le roc (5) indiquent une très grande variabilité sur les conductivités hydrauliques. Elles varient de 5 ordres de grandeur entre 5×10^{-10} m/s et 3×10^{-5} m/s. Le roc pourra donc se comporter comme un horizon imperméable et perméable en fonction de sa localisation.

Une campagne de caractérisation complémentaire comprenant des diagraphies et une étude de la fracturation pourrait aider à comprendre la distribution de ces valeurs en profondeur. L'analyse des propriétés pétrophysiques des horizons géologiques disponibles permet de conclure sur le nombre d'horizons à conserver pour le modèle conceptuel. La variabilité de composition granulaire entre les horizons 1a et 1b indique qu'il peut être intéressant de garder ces deux horizons distincts. Des tests devront être effectués pour évaluer l'impact d'un si petit volume de sol (remblais des anciennes lagunes de Mercier) avec une surface argileuse pour empêcher la recharge. Les tills (4a et 4b) doivent être modélisés de manière distincte également. La grande variabilité dans la conductivité hydraulique des différents matériaux engendrera des variabilités importantes dans l'écoulement lors de la modélisation hydrogéologique au droit du site. L'esker (3) présentant une conductivité hydraulique élevée et étant constitué de sable et de gravier, constituera un couloir préférentiel d'écoulement. Enfin, les silts (2a et 2b) devraient présenter des propriétés pétrophysiques assez différentes d'après les observations réalisées lors des forages. La

maîtrise de Pontlevoy (2004) confirme ces différences, bien que les données permettant cette conclusion n'aient pas été retrouvées.

3.5. Représentation 3D des unités dans la zone d'étude

Un modèle géologique 3D fourni par le MELCC a été construit au droit du site local des anciennes lagunes de Ville Mercier (rectangle rose, Figure 2). Des coupes transversale et longitudinale à travers l'assemblage d'unités présentes dans la zone d'étude de ce modèle sont présentées à la Figure 16. Ces figures mettent en évidence la variation de la section d'écoulement de l'eau souterraine dans l'unité 3 de sable et gravier qui résulte de la topographie accentuée de la surface des tills 4B et 4A ainsi qu'à la présence des unités argileuses 2B et 2A. Ces figures montrent l'existence d'un mince couloir d'érosion, plus ou moins continu, qui constitue un contact direct entre les deux aquifères où les tills ont été érodés lors de la déposition des sédiments granulaires de l'esker (fenêtres dans les tills). Ceux-ci permettent des échanges hydrauliques entre les unités 3 (sable et gravier) et 5 (roc).

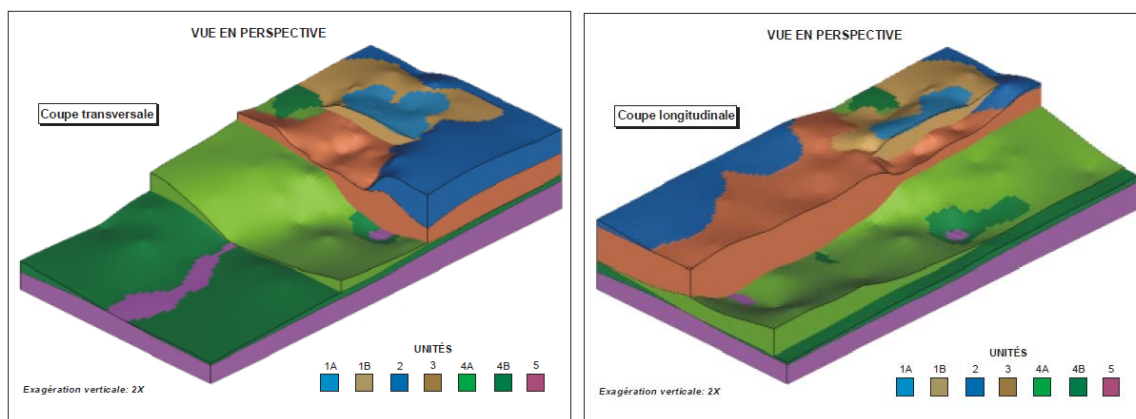


Figure 16. Vue en perspective de la distribution 3D des unités stratigraphiques sur le site des lagunes de Ville Mercier, modèle local provenant du MELCC.

Les anciennes lagunes sont recouvertes d'une couche de matériaux argileux de l'unité 1A, généralement de 0,5 à 2 m d'épaisseur. Le secteur des anciennes lagunes forme un "dôme" plus élevé que les terrains situés au nord, à l'ouest ou au sud. Des remblais grossiers de l'unité 1B (principalement du sable et gravier) sont présents surtout dans le secteur des anciennes lagunes où ils représentent des anciennes digues ou du matériel de remplissage des anciennes lagunes. Les matériaux argileux constituant les unités 2A et 2B entourent la zone d'étude et présentent des épaisseurs considérables principalement du côté est. La surface de l'unité 3 de sable et gravier présente des irrégularités qui résultent en partie de son exploitation en tant que gravière ainsi que des opérations liées aux anciennes lagunes.

La surface du till inférieur (Unité 4B) présente un relief important. Le till 4B est très épais (jusqu'à 24 m) au nord-ouest de la zone d'étude locale et il possède une pente importante surtout vers l'Est, sous les anciennes lagunes et vers le Sud en aval des anciennes lagunes. De plus, sous le côté Est des anciennes lagunes, une vallée subsidiaire ou secondaire est présente sur le flanc de la vallée. La cartographie de Tremblay (2008) met en évidence la présence de nombreux drumlins dans la région à l'étude et il est possible que le site soit

situé sur le flanc est d'un de ces drumlins Le till supérieur (unité 4A) recouvre généralement le till 4B et présente le même type de relief.

La distribution du till 4A est cependant distincte du till 4B car l'élévation du till 4A remonte du côté est de la zone d'étude où il devient plus épais. Par contre, le till 4A s'amincit par endroits et est même absent au centre, au nord-est et au nord-ouest de la zone d'étude. La surface de l'unité 4A a la forme générale d'une "vallée" qui contient les épaisseurs les plus importantes de l'unité 3 de sable et gravier. Au centre de cette dépression, les unités 4B et 4A ne sont pas présentes sur l'ensemble de la surface du roc, de sorte que l'unité de sable et gravier se trouve par endroits directement en contact avec le roc. Ces fenêtres sont susceptibles d'avoir permis la migration initiale des contaminants immiscibles ou sous forme dissoute en provenance du sable et gravier vers le roc. La présence de ces fenêtres semble aussi affecter l'écoulement des eaux souterraines en réponse au pompage intensif à l'UTES. Les forages récents ont de plus mis en évidence la présence d'une petite vallée subsidiaire immédiatement sous les lagunes.

Afin de compléter le modèle géologique 3D des unités stratigraphiques sur l'étendue des limites du modèle régional 2019, le modèle local provenant du MELCC sera intégré au modèle intermédiaire de Pontlevoy (2004), lesquels seront ajustés localement aux marqueurs de formation mise à jour fournie par le MELCC et aux données sismiques interprétées. Régionalement, l'information des puits SIH et les hypothèses émises concernant la distribution et l'épaisseur des unités d'argile (2a et 2b), de till (4a et 4b) et du roc (5) servira afin d'étendre le modèle géologique sur le domaine de modélisation. L'intégration de toutes ces données n'est pas complétée en date de ce rapport et devrait être complétée pour la fin de 2019.

La Figure 17 montre deux coupes verticales régionales démontrant :

- Les limites du domaine de modélisation
- Le modèle numérique de terrain de la NASA
- La surface du roc krigée
- Les puits du MELCC
- Les puits SIH
- Le modèle géologique intermédiaire de Pontlevoy (2004)
- Le modèle géologique local provenant du MELCC.

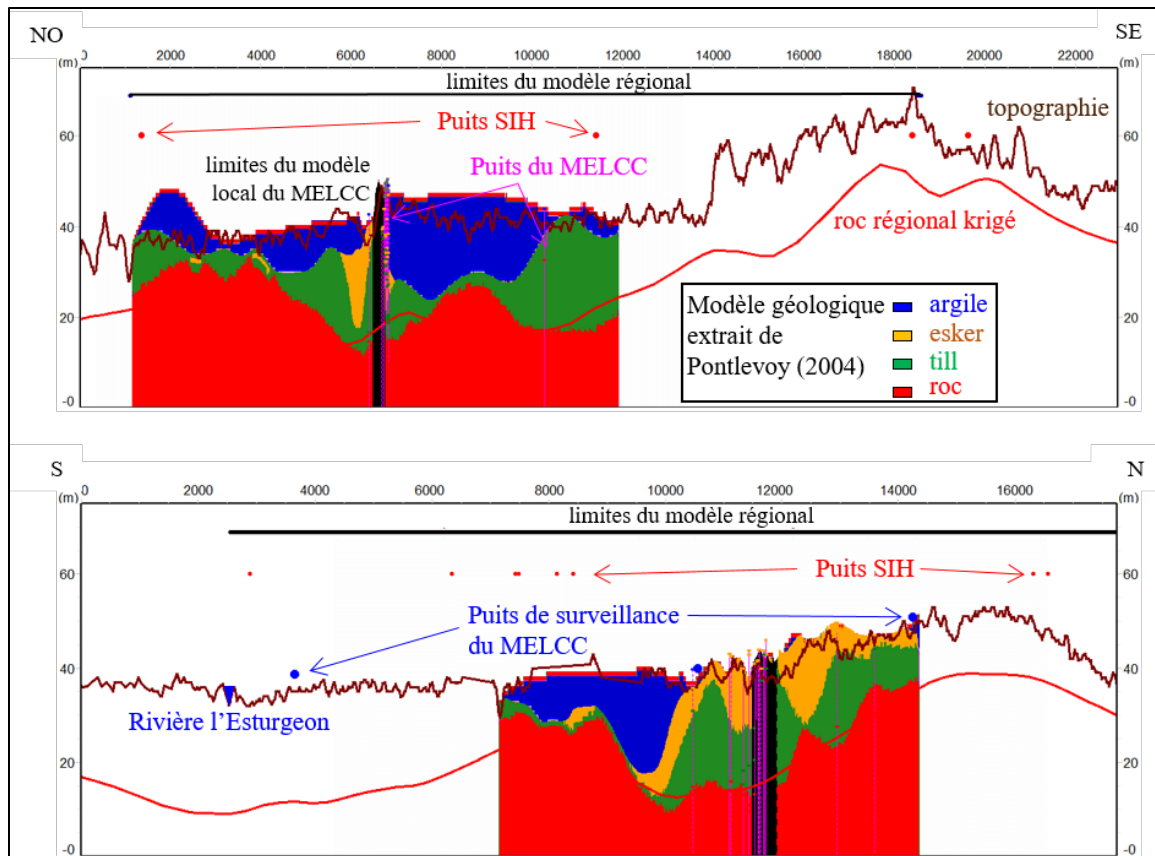


Figure 17. Coupes verticales sur l'étendue du domaine régional de modélisation 2019, montrant les données à intégrer. La trace des coupes verticales sur trouve sur la Figure 2.

La Figure 17 nous permet bien de voir la quantité de données à intégrer localement, sans compter sur les données sismique de la CGC et de MBMS qui ne sont pas montrées sur cette figure. La figure démontre aussi la complexité d'intégration de ces données de différentes échelles, et dont les interprétations déjà complétées par les différents acteurs ne concordent pas toujours parfaitement.

4. Contexte hydrogéologique

Les deux figures suivantes (Figure 18 et Figure 19) résument parfaitement le contexte hydrogéologique aux alentours du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, schématisant le contexte régional géologique et son impact pour l'écoulement des eaux souterraines.

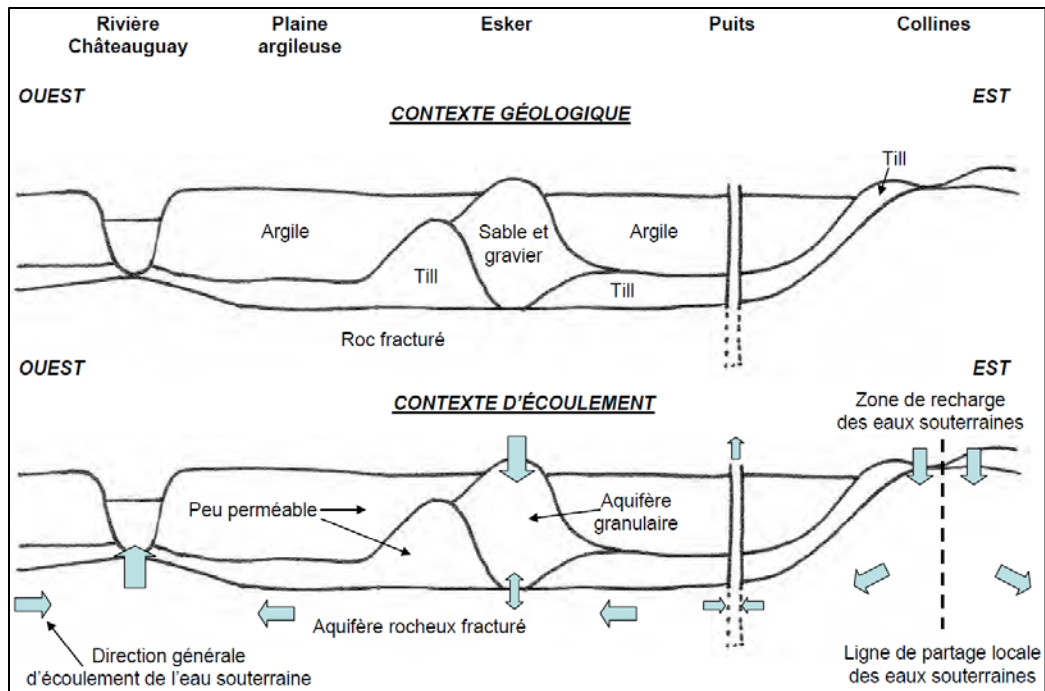


Figure 18. Illustration schématique du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier, de Lefebvre (2007).

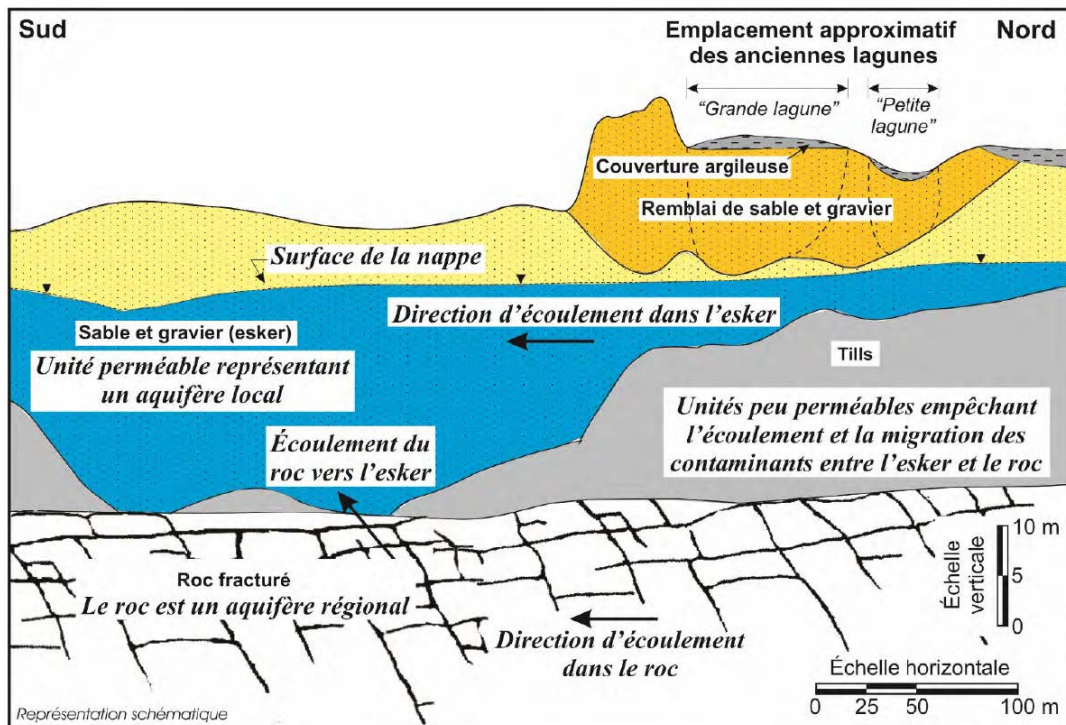


Figure 19. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier représentant les unités géologiques et l'écoulement de l'eau souterraine, de Lefebvre (2007).

4.1. Système d'écoulement hydrogéologique régionale

L'écoulement dans le roc se fait globalement de l'est vers l'ouest avec une légère composante vers le sud au niveau de Ville-Mercier qui semble due en partie à l'effet du piège hydraulique en fonctionnement dans les anciennes lagunes (Figure 20). Les chroniques temporelles, avec les niveaux d'eau relevés bi-annuellement au printemps et à l'automne, de tous les puits de surveillance de l'UTES de 1999 à 2019 se trouvent en Annexe 2. Les chroniques temporelles de 12 puits de surveillance du MELCC (localisation à la Figure 2) seront également utilisées afin de contraindre les patrons d'écoulement de l'eau souterraine et calibrer le modèle hydrogéologique régional. Les schémas de piézomètres et les chroniques temporelles des puits de surveillance du MELCC se trouvent à l'Annexe 3. Dans Pontlevoy (2004) il est montré que 95% de la région étudiée est recouverte par plus de 2 m d'argile, ce qui permet de considérer l'aquifère du roc comme étant confiné. Dans la partie est de la région d'étude les niveaux piézométriques élevés sont associés aux hauts topographiques du socle rocheux. Selon Lefebvre et Pontlevoy (2004) et validé par les données de sismique de la CGC (levé CE, Figure 7), l'embouchure de la rivière Esturgeon constitue un exutoire de la nappe au niveau de Sainte-Martine. La comparaison des débits de la rivière Châteauguay avec les relevés piézométriques du puits 03097094, situé à environ 1 km en amont de la jonction de la rivière Châteauguay avec la rivière Esturgeon, ont clairement montré un lien entre l'aquifère et la rivière Châteauguay.

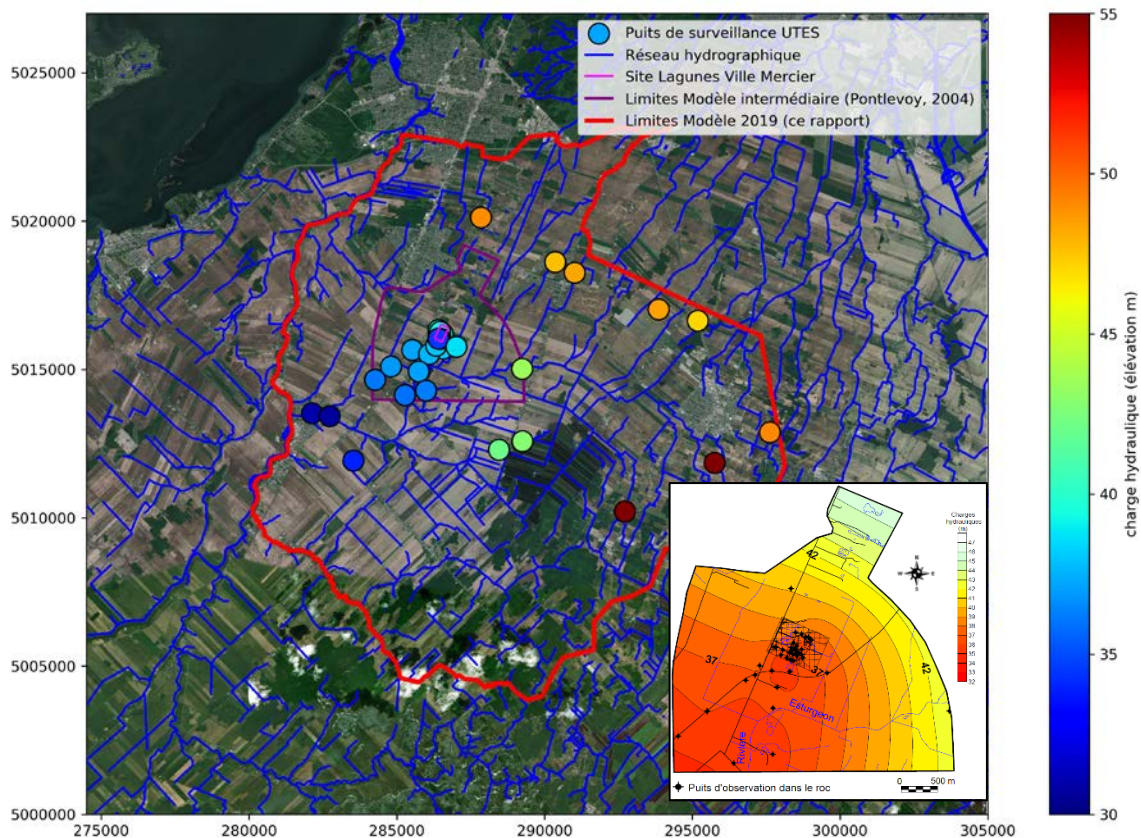


Figure 20. Charges hydrauliques au roc relevées au printemps 2004 dans les puits de surveillance de l'UTES. L'encadré montre les charges hydrauliques modélisées localement (Pontlevoy, 2004).

4.2. Système d'écoulement hydrogéologique local des anciennes lagunes

L'écoulement de l'eau souterraine dans l'esker (Figure 21) va du nord vers le sud au niveau de Ville-Mercier en fonction de la topographie du roc et parallèlement à l'axe de l'esker. Selon la carte de l'élévation du roc (Figure 5), il pourrait y avoir une ligne de partage des eaux qui induirait un écoulement des eaux souterraines vers le nord pour la partie nord de l'esker. Cette interprétation reste à prouver car il n'existe pas de données de charge hydraulique dans le nord de l'esker.



Figure 21. Charges hydrauliques dans l'esker relevées au printemps 2004 dans les puits de surveillance de l'UTES.

La Figure 22 provenant de données de MELCC montre la piézométrie de la surface libre déterminée pour l'unité 3 de sable et gravier ainsi que les puits utilisés pour déterminer les niveaux d'eau. Également, il est indiqué sur cette figure le secteur, à l'est de la zone d'étude, où l'aquifère de l'unité 3 est captif (où le niveau piézométrique est plus élevé que la limite supérieure de l'unité 3). La zone sans contours de niveau d'eau dans le coin nord-ouest représente un secteur où l'unité 3 de sable et gravier est soit absente ou non saturée. Les directions générales d'écoulement peuvent être déduites de la piézométrie des Figure 21 et Figure 22.

L'effet de la présence d'une zone épaisse de sable et gravier à l'est des anciennes lagunes est apparent à partir de la piézométrie. Le fort écoulement dans cette zone draine l'eau provenant du secteur ouest moins épais où se situent les anciennes lagunes. La piézométrie indique également que les eaux souterraines dans le sable et gravier en provenance des

anciennes lagunes sont captées efficacement par les puits de pompage de l'UTES et que les contaminants émis dans cette unité ne dépassent sûrement pas ces puits.

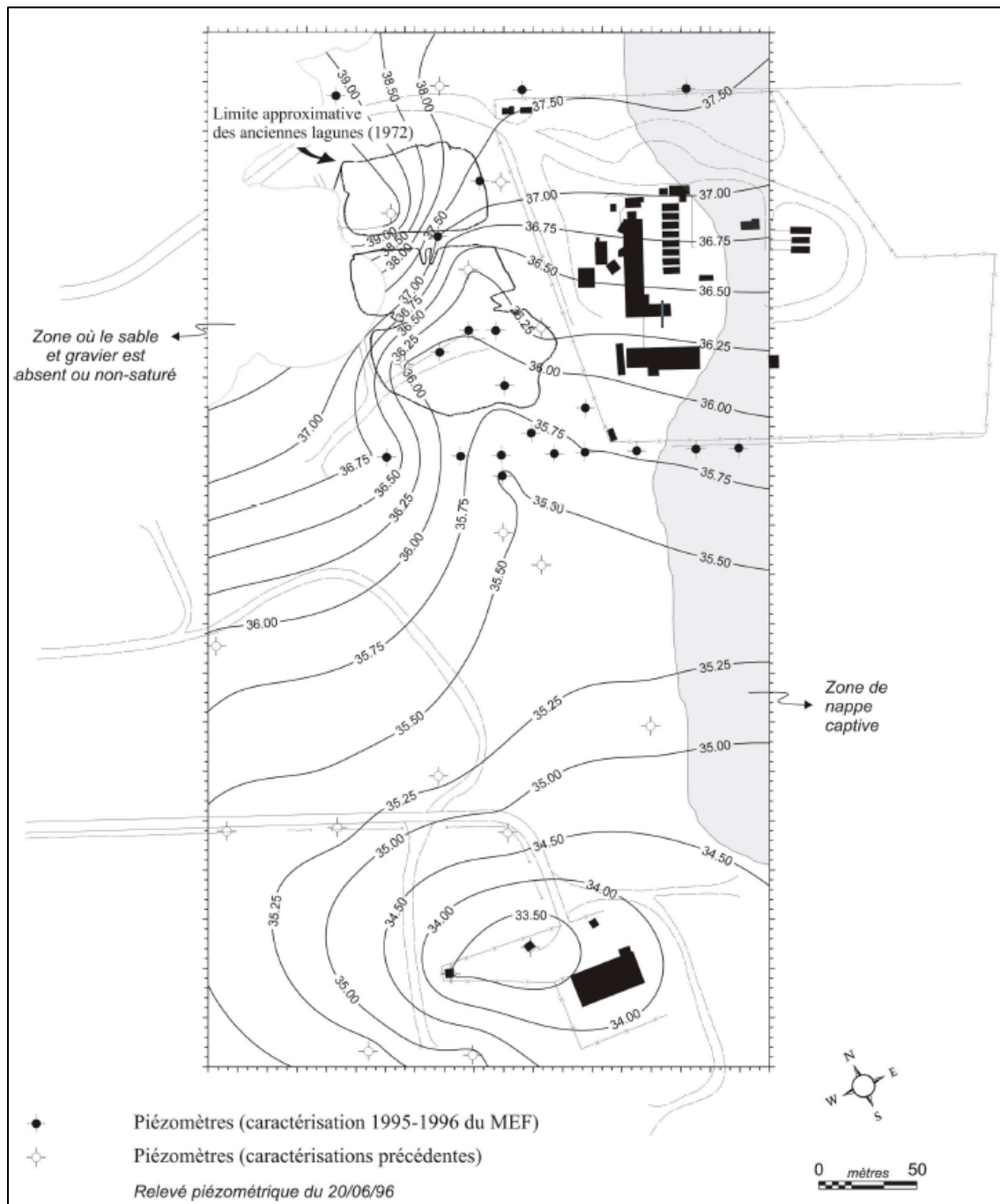


Figure 22. Piézométrie dans l'unité de sable et gravier représentant l'esker (données et figure provenant du MELCC).

4.3. Piège hydraulique et migration des contaminants

La Figure 20 représentant les charges hydrauliques mesurées dans le roc, ainsi que l'encadré représentant la carte des charges interpolées démontrent que l'effet du piège

hydraulique est bien visible, détournant les lignes de contour. La Figure 23 ci-dessous (de Lefebvre, 2007) démontre bien la formation de panaches de contaminants dissous au contact de l'eau souterraine avec les zones sources qui migrent suivant l'écoulement de l'eau souterraine. La zone de fenêtres où les tills sont de faible épaisseur ou absents permet des échanges d'eau souterraine entre les aquifères de l'esker et du roc fracturé.

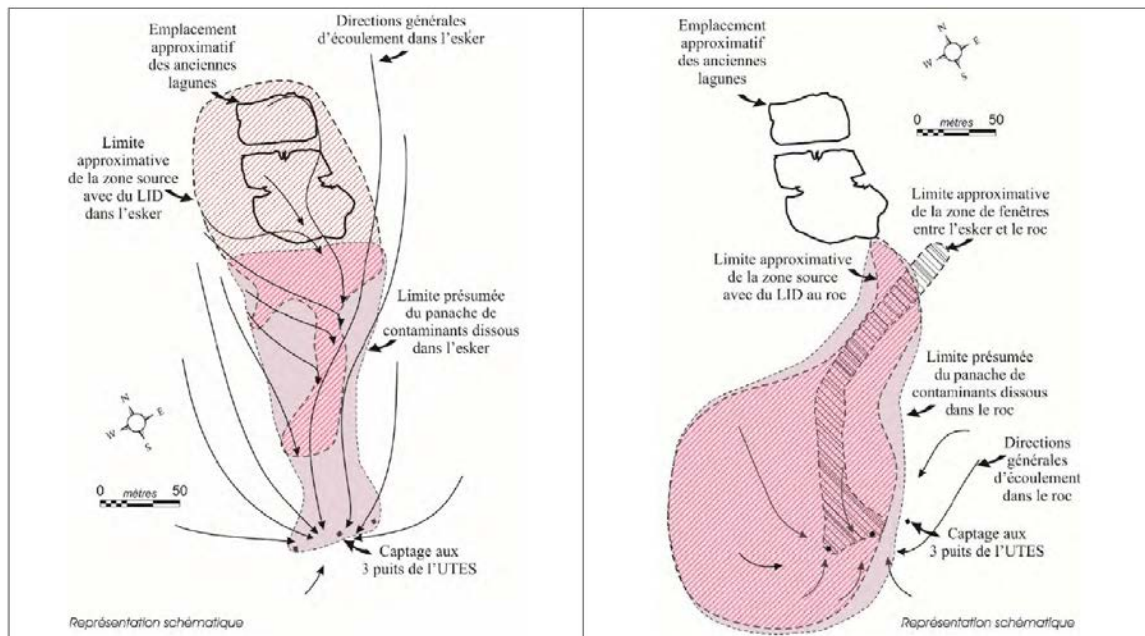


Figure 23. Zones sources, panaches de dispersion et directions générales d'écoulement dans l'esker (gauche) et dans le roc sous-jacent (droite). Figure provenant de Lefebvre (2007).

La Figure 23 montre que la zone d'eau souterraine contaminée est assez large dans le secteur des anciennes lagunes. Cependant, les patrons d'écoulement confinent l'intervalle à travers lequel les contaminants peuvent migrer de sorte que le panache d'eau contaminée dans l'aquifère granulaire est relativement restreint. Bien que le panache d'eau contaminée de la Figure 23 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** soit approximatif, il est possible de constater que l'aire d'alimentation des puits de captage de l'UTES englobe un secteur beaucoup plus large que le panache. Ceci implique que le piège hydraulique est sûrement efficace pour empêcher la migration de la contamination dans l'aquifère granulaire. Cependant, il y a beaucoup de dilution de l'eau provenant du panache avec de l'eau non contaminée de sorte qu'une très grande quantité d'eau doit être traitée pour extraire les contaminants captés, d'où l'importance d'analyser les différents scénarios envisagés de confinement hydraulique de l'UTES-2 au site des anciennes lagunes de Mercier.

Selon Poulin (1977), l'aquifère de sable et gravier se déchargeait dans la rivière Esturgeon. Le pompage exercé par le piège hydraulique semble avoir inversé l'écoulement, la rivière Esturgeon alimentant les puits de pompage de l'UTES et empêchant la propagation du panache de contamination (Pontlevoy, 2004). Ainsi, avant le début du pompage en 1984, l'esker rechargeait le roc dans la zone des anciennes lagunes, ce qui aurait permis la contamination de l'aquifère du roc avant cette période par la connexion hydraulique présentant dans les fenêtres de till. Cette recharge du roc n'est plus le cas aujourd'hui dans le site des lagunes, le piège hydraulique ayant inversé le sens de l'écoulement, localement.

4.4. Recharge

Les conditions géologiques de la région contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine. Dans la région, le roc fracturé est un aquifère exploité régionalement, tandis que l'esker est un aquifère local. Les collines à l'est de la région représentent une zone de recharge de l'aquifère rocheux, car elles ne sont pas recouvertes de sédiments imperméables et permettent donc l'infiltration des précipitations et de l'eau de fonte des neiges printanière. L'aquifère de l'esker est aussi rechargé fortement, car il est formé de matériaux très perméables qui affleurent à la surface. Ailleurs, dans la plaine argileuse, la présence de la couche d'argile marine peu perméable au-dessus du till empêche la recharge de l'aquifère rocheux. Cette condition protège l'aquifère au roc d'une potentielle contamination par des activités de surface, notamment l'usage de fertilisants qui peuvent amener des augmentations des concentrations en nitrates dans l'eau souterraine (Fagnan et coll., 1999; Paradis et coll., 2006). Dans cette région pourtant très agricole, Pontlevoy (2004) a cité la quasi-absence de nitrates dans les eaux souterraines comme évidence de la faible vulnérabilité de l'aquifère rocheux, sauf où il se trouve en contact direct avec l'esker.

4.5. Utilisation de l'eau souterraine

En date du 8 juillet 2019, il y avait 94 puits municipaux ou privés exploitant l'eau souterraine ou de surface à l'intérieur des limites ou à moins d'un kilomètre des limites du modèle régional 2019 de Ville Mercier. Le positionnement de puits est montré en Figure 24, et le détail de chacun des puits se trouve en Annexe 4.

Il existe deux grandes catégories d'utilisateurs de l'eau souterraine dans la région d'étude. La première utilisation de l'eau souterraine comprend les municipalités de Saint-Rémi et Saint-Isidore qui pompent l'eau souterraine avec un rendement et des débits annuels élevés pour alimenter les populations. Les puits de Sainte-Martine ont cessé leurs pompages en 1984 suite à la construction des canalisations d'alimentation en eau potable. La deuxième catégorie comprend les exploitations agricoles qui pompent l'eau pendant les 4 mois estivaux avec des débits très variables (de très faibles à très élevés) essentiellement pour irriguer les cultures. On note également la présence dans cette liste des 3 puits de pompage de l'UTES. Le ministère de l'environnement a défini une zone d'exclusion de pompage autour de la zone de pompage et traitement sur le site des lagunes afin de ne pas nuire au piège hydraulique.

Parmi les plus grands utilisateurs d'eau de la région (volume d'eau prélevé plus grand que 379 m³/jour), on note :

- les puits de pompage de l'UTES et l'incinérateur des services environnementaux de Clean Harbours au droit du site ;
- la station de purification de Saint-Isidore au nord-est du site des anciennes lagunes ;
- le système d'approvisionnement en eau de Saint-Rémi à l'est du site ;
- l'usine de béton Sintra au nord du site (à l'extérieur du domaine de modélisation) ;
- le lac artificiel de Guinois & Frères au sud-est du site ; et

- le Club de Golf Triangle d'Or et les lieux d'élevage de Simon Martin et Guylaine Trudeau à l'extrémité est du domaine d'étude.

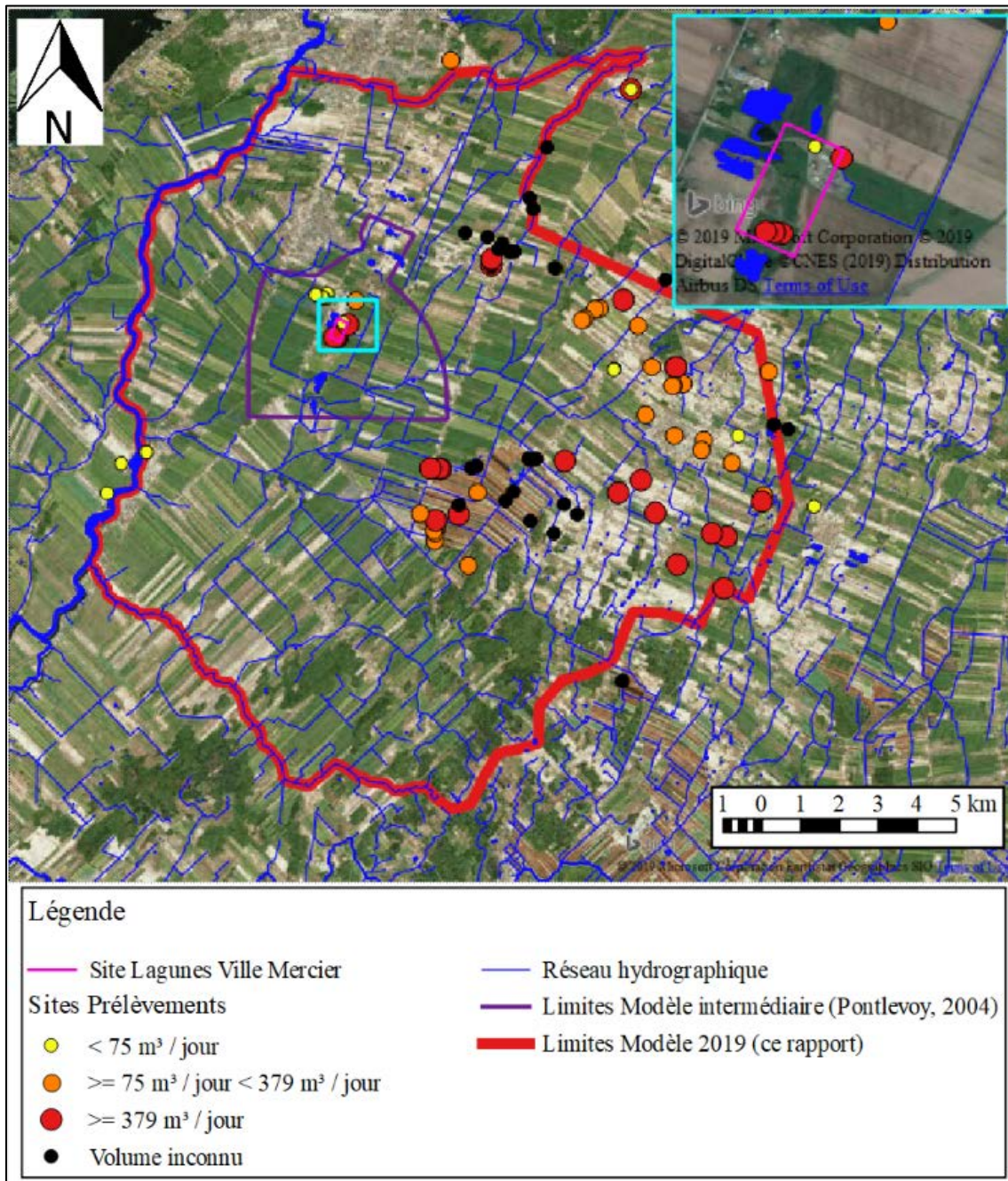


Figure 24. Utilisateurs d'eau souterraine et de surface dans les limites du modèle 2019, incluant une zone tampon de 1km autour des limites.

5. Conclusions

Notre modèle conceptuel est en accord avec le modèle de Pontlevoy (2004). L'écoulement de l'eau pluviale se fait essentiellement par ruissellement jusque dans les ruisseaux et rivières. Les rivières principales de la région d'étude (rivières Châteauguay et Esturgeon) sont en contact hydraulique avec le roc fracturé et sont donc des frontières naturelles. L'écoulement de l'eau souterraine se fait essentiellement dans l'aquifère confiné du roc fracturé (Lefebvre, 2007). Seul l'aquifère de l'esker est à nappe libre et présente des contacts hydrauliques directs avec l'aquifère du roc fracturé. Le piège hydraulique actuel et le réseau de suivi de la hauteur de la nappe serviront de base pour le calage des modèles hydrogéologiques. Cependant, il manque plusieurs informations et il reste encore des inconnues à évaluer afin de penser pouvoir modéliser de manière précise et à haute résolution les modèles régional et local:

- Quelle est la forme des fenêtres entre l'esker et le roc ? Est-ce une fenêtre continue tout le long de l'esker ou sont-ce des fenêtres distinctes ?
- Quelle est la géométrie de l'esker sur ses flancs (épaisseur de till vs sable)
- Nous n'avons pas encore assez de connaissances sur la variabilité spatiale de la profondeur au roc entre les forages et aussi sur la répartition spatiale des sables et graviers dans l'esker.
- Il sera important de vérifier les niveaux de la nappe au nord de l'esker pour valider les hypothèses sur l'écoulement.
- Il est important de faire des essais hydrauliques in situ dans les matériaux meubles de l'esker et dans le roc fracturé afin de mieux modéliser le comportement de l'écoulement et des transferts entre l'esker et le roc.

6. Références

- Blouin, M. et E. Gloaguen. 2015. *Comprehensive geophysical data integration and stratigraphic contacts delineation in a regional hydrogeological characterization study*. Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 20(2), 183-193, doi: 10.2113/JEG20.2.183.
- Bouwer, H. et R.C. Rice, 1976. *A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells*. Water Resources Research. 12(3), 423-428.
- CNFS, 1993. *Caractérisation exhaustive du panache de contamination des anciennes lagunes de Ville-Mercier*. Volume 1-5, ministère de l'Environnement du Québec.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D., I.S. Papadopoulos, 1967. *Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water*. Water Resources Research 3(1), 263-269.
- Croteau, A., Nastev, M. et R.. Lefebvre, 2010. *Groundwater recharge assessment in the Châteauguay River watershed*, Canadian Water Resources Journal, 35(4), 451-468, doi: 10.4296/cwrj3504451.
- D'Anjou, N., 1991. *Simulation de pièges hydrauliques par éléments finis pour l'aquifère fracturé de Ville Mercier*. Mémoire de maîtrise en géologie, Université Laval, Québec.
- Denis, C. 1991. *Caractérisation hydrogéologique du substratum rocheux fracturé du site pollué de Ville-Mercier*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- DHI, Mike Powered by DHI. 2019. *FEFLOW (Version 7.1 [3D + 2D])*. Interactive Graphics-based Finite Element Simulation System for Subsurface flow and Transport Processes.

- Experts-Conseils HydrogéoSol Inc. 2009.
- Fagnan, N. et coll., 1999. *Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la mer de Champlain*. Hydrogéologie, 4, 9-22
- Foratek International, 1987. Tricil, programme de forages. Rapport 857, projet 87014, Foratek Inc., 33p.
- Freeze, R.A. et P.A. Witherspoon, 1966. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow – 1. Analytical and Numerical Solutions to the Mathematical Model*. Water Resources Research, 2(4).
- Freeze, R.A. et P.A. Witherspoon, 1967. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow – 2. Effect of Water-Table Configuration and Subsurface Permeability Variation*. Water Resources Research, 3(2).
- Freeze, R.A. et P.A. Witherspoon, 1968. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow – 3. Quantitative Interpretations*. Water Resources Research, 4(3).
- Gélinas, P., Isabel, D. et A. Rousseau, 1989. *Aquifer decontamination for toxic organics: the case of Mercier, Québec*. Contract KE405-8-6001/01-SS, Université Laval et U.Q.A.C.
- Globensky, Y., 1986. *Géologie de la région de St-Chrysostome et de Lachine*. Rapport MM 84-02, Ministère de l'énergie et des ressources du Québec.
- Gregi, 1993. *Aquifer decontamination for toxic organics: the case study of Ville-Mercier, Québec*. Final report, volume II. Université Laval, 270p.
- Hunter, J.A., Burns, R.A., Good, R.L., Douma, M. et T. Cartwright. 2006. *High resolution seismic reflection surveys Chateauguay Quebec Area*, Open File non publié de la Commission Géologique du Canada.
- Hydrogéo Canada Inc. 1981. *Hydrogéologie et contamination des eaux souterraines, Ville Mercier*. Rapport hydrogéologique, ministère de l'Environnement du Québec, 30p.
- Lavigne, M.-A., 2006. *Modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec.
- Lavigne, M.-A., Nastev, M. et R. Lefebvre, 2010. *Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay River aquifers*, Canadian Water Resources Journal, 35(4), 469-486.
- Lefebvre, R., 2007. *Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Mercier (Québec), Canada*. Rapport R-914, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport d'expertise soumis à la direction des politiques de l'eau, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, mars 2007.
- Martel, R., Lepage, N. et R. Lefebvre, 1998. *Distribution des contaminants organiques dans les sols du secteur des anciennes lagunes de Mercier, propriété des services environnementaux Laidlaw (Mercier) Ltée*. Rapport 1998-04, INRS – Géoressources, Rapport soumis à la Direction des enquêtes du Ministère de l'Environnement et de la Faune, avril 1998.
- Martel, R., Robert, T., Batailler, É., Boutin, M., Deschênes-Rancourt, C. et L. Trépanier, 2018. *Revue de littérature sur les technologies de réhabilitation des sols et des eaux souterraines et réévaluation du potentiel de réhabilitation du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier*. Rapport R1783, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport final présenté au Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 17 octobre 2007.
- Nastev, M. et C. Lamontagne, 2010. *Survol hydrogéologique de l'aquifère transfrontalier du bassin versant de la Rivière Châteauguay, Canada – États-Unis*. Canadian Water Resources Journal. 35(4). 359-376.
- Paradigm SKUA-GOCAD, Logiciel de modélisation géologique.
<http://www.pdgm.com/products/gocad/>.

-
- Paradis, D., et coll., 2006. *Impact of agricultural activities on nitrate in ground and surface water in the Wilmot watershed, PEI, Canada*. Proceedings, 59th Canadian Geotechnical Conference and 7th Joint CGS/IAH Conference, Vancouver, BC, Canada, Paper 244.
 - Pontlevoy, O., 2004. *Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec.
 - Poulin, M., 1977. *Groundwater contamination near a liquid waste lagoon, Ville Mercier, Québec*. Mémoire de maîtrise, University of Waterloo, Ontario.
 - QGIS, disponible Open-Source à : <https://www.qgis.org/fr/site/about/index.html>
 - Tremblay, T., 2008. *Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la Rivière Châteauguay, Québec*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal.
 - Tremblay, T., Hunter, J., Lamontagne, C. et M. Nastev, 2013. *High resolution seismic survey in a contaminated esker area, Chateauguay River watershed, Quebec*. Canadian Water Resources Journal, 35(4), 417-432, doi: 10.4296/cwrj3504417.

Annexes

Annexe 1. Document explicatif de la base de données

1 Modèle conceptuel de l'OGC d'Observations et de mesures

L'Open Geospatial Consortium (OGC) est une organisation internationale à but non lucratif dédié à l'élaboration de standard ouvert de haute qualité dans le domaine des données spatiales. Elle est formée d'université, d'entité gouvernementale et de compagnie privée. Ces standards permettent d'implémenter des modèles de base de données appliqués à divers domaines soit, l'environnement, l'agriculture, la météorologie, et les eaux souterraines, entre autres. Pour la base de données qui est créée dans le cadre du projet de Ville de Mercier, le standard utilisé est celui d'Observations et de Mesures. Ce standard n'est pas centré sur les éléments usuels, en ce qui nous concerne (puits, échantillons, aquifère), mais plutôt sur l'observation faite sur ces éléments ainsi que les mesures pouvant y être effectuées. Ce qui permet de généraliser le concept d'observation comme par exemple, la construction d'un puits comme une observation avec un résultat (le détail de la construction) aussi bien que la composition chimique de l'eau à un certain point de l'aquifère ou bien la stratigraphie du sol, obtenue à partir de levées géophysiques.

À partir de ce standard, un modèle conceptuel est généré afin de pouvoir l'implémenter vers un modèle physique de base de données (schémas, tables, vues, fonctions, etc.) (Malet 2017). Pour ce projet, le serveur de base de données PostgreSQL est utilisé. Ce dernier qui a été développé durant le milieu des années 90, est un logiciel à licence libre qui a été grandement éprouvé, avec une énorme communauté d'utilisateurs et de développeurs qui en fait un serveur, avancé, robuste et l'un des plus rapides. De plus, l'extension PostGIS qui y est intégrée, permet de transformer PostgreSQL en serveur de base de données géographique le rendant très polyvalent.

Avec le modèle développé à partir du standard d'Observations et Mesures et le serveur PostgreSQL-PostGIS, il est ainsi possible de stocker les données scientifiques spatialisées, comme celles reliées à l'eau souterraine, qui comporte une partie de données de position géographique et de profondeur, et des résultats d'analyses permettant de caractériser le milieu étudié. Contrairement aux autres modèles de base de données utilisés par le passé, celui-ci qui est plus abstrait et complexe, permet de rendre les données plus inter relié. Exemple, le schéma des processus qui est nouveau, permet de faire le lien entre les mesures effectuées et les différents protocoles et appareils utilisés. IL la base de données a été aussi créée dans le but de répondre au besoin d'une plus grande efficacité au niveau de la structure des données, de la polyvalence pour remettre (ici dans les sens de redonner) les données dans des formats complexes.

La base de données est divisée en différents schémas qui contiennent les tables correspondant à un ensemble logique de données, en voici une description :

- **bdvmercier** : contient les tables générales de
 - **localisation** : permet de localiser en 3 dimensions les éléments avec données géo référencée
 - **element_caracteristique** : élément sur lesquels sont faits les observations (Puits, échantillon, etc.)
 - **observation** : présente la date ainsi que le pourquoi de cette observation.
- **librairies** : contient les tables qui définissent les termes reliés à différent type d'observation ou de mesures.
- **metadonnees** : contient les tables reliées aux métadonnées des différents types de données de la base de données.
- **processus** : contient les tables reliées au processus d'acquisition des données à travers les différentes méthodes et appareils utilisés

-
- résultat : contient les résultats des mesures effectuées à un point donné de l'espace ou des analyses effectuées sur un échantillon pris à un point donné de l'espace. Les résultats peuvent être du type :
 - générique : un niveau d'eau, résultats d'analyse d'un échantillon
 - intervalle : Construction de puits, données stratigraphiques
 - temporelles : Mesure en continu sur l'aquifère.

Un exemple du diagramme du modèle conceptuel avec les liens d'intégrités, ainsi qu'une description de certaines tables se retrouve à la page suivante.


2 Base de données Ville Mercier diagramme





Diagramme de modélisation des données pour 'Base de données Ville de Mercier'


Figure 1: Base de données Ville de Mercier


2.1 resultats.canal_temporel



Table de résultat dans laquelle sont insérées les données temporelles 'Ville Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 canal_id	integer	True	

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 obs_property_id	integer	False	
 observation_uuid	uuid	False	
 id_corr_type	integer	False	
 canal_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 canal_temporel_pkey	canal_uuid	

TYPE / NAME	COLUMNS	COMMENTS
 «index» ind_canal_uuid	canal_uuid	

FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 fk_canal_id_corr_type	id_corr_type	libraries.correction_type(id_corr_type)
 fk_canal_obs_observation_uuid	observation_uuid	bdvmercier.observation(observation_uuid)






2.2 librairies.cast_number








Table de la base de données de 'Ville de Mercier'


COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 no_cast_number	varchar(15)	False	




2.3 bdvmercier.elements_caracteristique

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 elemcarac_id	integer	True	
 elemcarac_nom	varchar(250)	False	
 elemcarac_date	timestamp without time zone	False	
 process_uuid	uuid	False	
 interet_id	integer	False	

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 metadata_uuid	uuid	False	
 elemcarac_note	text	False	
 spe_material_id	integer	False	Initial value: '-9999'
 elemcarac_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()
 location_de	double precision	False	
 location_a	double precision	False	
 loc_id	integer	True	Properties: AutoNum = 1 Increment = 1 property = AutoNum=1;StartNum=1;Increment=1; SequenceName = elements_caracteristique_localisation_id_s eq StartNum = 1

PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 elements_caracteristique_pk	elemcarac_uuid	

FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 fk_elem_process_uuid	process_uuid	processus.processus(process_uuid)
 fk_localisation_loc_id	loc_id	bdvmercier.localisation(loc_id)
 fk_elem_interet_id_temp	interet_id	librairies.elem_interest(interet_id)

2.4 bdvmercier.elements_caracteristique_context

Table de la base de données de 'Ville Mercier'










COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 elmcarac_id_enfant	integer	False	
 elmcarac_id_parent	integer	False	
 relation_type	integer	False	


Table de la base de données de 'Ville de Mercier'










COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 no_piezometre	varchar(12)	False	
 la_date	timestamp with time zone	False	
 heure	timestamp with time zone	False	
 lecture_profondeur	real	False	
 generic_res_id	serial	True	


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 generique_pkey	generic_res_id	


2.5 resultats.intervalles

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 interv_id	integer	True	Properties: AutoNum = 1 Increment = 1 property AutoNum=1;StartNum=1;Increment=1; =

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
			SequenceName interval_result_interv_id_seq = StartNum = 1
 observation_id	integer	False	
 interv_from	double precision	False	
 interv_to	double precision	False	
 interv_desc	varchar(1024)	False	
 interv_element_prim	integer	False	
 interv_element_second	integer	False	
 interv_element_ter	integer	False	
 interv_element_quat	integer	False	
 diameter	numeric	False	Initial value: 0

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
			Pour la construction du puits, cette information peut être utiliser afin d'indiquer le diamètre des éléments
 observation_uuid	uuid	False	




PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_interval_result	interv_id	


 fk__xm_observed_property_id_prim	interv_element_prim	librairies.xm_observed_property(obs_property_id)
 fk_interval_result_obs_uuid	observation_uuid	bdvmercier.observation(observation_uuid)
 fk__xm_observed_property_id_ter	interv_element_ter	librairies.xm_observed_property(obs_property_id)
 fk__xm_observed_property_id_second	interv_element_second	librairies.xm_observed_property(obs_property_id)

2.6 librairies.lib_instrument_mddep

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'



COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS



COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 instrument_marque	varchar(250)	False	
 instrument_model	varchar(250)	True	
 instrument_id	integer	True	


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_lib_instrument_mddep	instrument_id	


2.7 librairies.lib_obs_parameter


Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 param_id	integer	True	Properties: AutoNum = 1 Increment = 1 property AutoNum=1;StartNum=1;Increment=1; = SequenceName xm_lib_obs_parameter_param_id_seq = StartNum = 1
 param_abb	varchar(15)	True	

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 param_cat_id	integer	False	
 param_descr	varchar(100)	False	



PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_om_lib_obs_parameter	param_id	



FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 xm_lib_obs_parameter_param_cat_id_fkey	param_cat_id	librairies.lib_obs_parameter_cat(param_cat_id)

PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 xm_lib_obs_parameter_cat_pkey	param_cat_id	

2.8 metadonnees.lien_avec_sih







Table de la base de données de 'Ville de Mercier'


COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 cle_puits_annee	smallint	False	
 no_projet	smallint	False	


COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 cle_puits_no_seq	integer	False	
 no_piezometre	varchar(12)	False	

2.9 bdvmercier.localisation

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'



COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 nom_communn	varchar(50)	False	
 latitude_8	double precision	False	
 longitude	double precision	False	
 station_active	boolean	False	
 remarque	text	False	
 loc_id	serial	True	


COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 geom	geometry	False	

PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 localisation_pkey	loc_id	

2.10 metadonnees.metadata

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'









COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 metadata_id	integer	True	
 metadata_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 metadata_pkey	metadata_uuid	


2.11 bdvmercier.observation



Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

observation
Version 1.0 Phase 1.0 Proposed
vigneaha created on 2019-07-11. Last modified 2019-07-11
DBMS PostgreSQL

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 observation_id	integer	True	
 observation_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()
 date_relv_hg	timestamp without time zone	False	
 hre_relv_hg	timestamp without time zone	False	
 elemcarac_id	integer	False	
 elemcarac_uuid	uuid	False	
 process_uuid	uuid	False	
 metadata_uuid	uuid	False	

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 param_id	integer	False	


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 observation_pkey	observation_uuid	



FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 fk_elemcarac_obs_elemcarac_uuid	elemcarac_uuid	bdvmercier.elements_caracteristique(elemcarac_uuid)
 fk_param_obs_param_id	param_id	librairies.lib_obs_parameter(param_id)


2.12 librairies.observation_type

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

observation_type
Version 1.0 Phase 1.0 Proposed
vigneaha created on 2019-07-11. Last modified 2019-07-11
DBMS PostgreSQL

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 id_type_observation	integer	True	




COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 desc_brev	varchar(24)	True	
 desc_long	varchar(254)	False	

PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_id_type_obs	id_type_observation	

2.13 librairies.param_physico_chimique




Table de la base de données de 'Ville de Mercier'


param_physico_chimique
Version 1.0 Phase 1.0 Proposed
vigneaha created on 2019-07-11. Last modified 2019-07-11
DBMS PostgreSQL

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 code_param_phys_chim	varchar(8)	False	
 nom_param_phys_chim	varchar(50)	False	
 no_cast_number	varchar(15)	False	

2.14 processus.processus

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'




COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 process_id	integer	True	Properties: AutoNum = 1 Increment = 1 property AutoNum=1;StartNum=1155911;Increment=1; SequenceName om_process_process_id_seq StartNum = 1155911
 process_type	varchar(50)	False	
 process_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_om_process_process_uuid	process_uuid	



2.15 processus.processus_deploiement



Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS



COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 process_id	integer	True	
 deploiemnt_id	integer	True	
 process_uuid	uuid	True	

PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_deployement_process_uuid	process_uuid	

TYPE / NAME	COLUMNS	COMMENTS
 «index» idx_deployement_process_uuid	process_uuid	
 «index» idx_deploy_process_deploy_id	deploiemnt_id	






TRIGGER NAME	COMMENTS
 trg_ad_dep_process	
 trg_bi_dep_process	

FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES

 fk_deploy_process_deploy_id	deploiement_id	processus.sonde_installation(deploiement_id)
 fk_deployment_process_uuid	process_uuid	processus.processus(process_uuid)

2.16 metadonnees.remarques











Table de la base de données de 'Ville de Mercier'


COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 no_piezometre	varchar(12)	False	
 la_date	timestamp with time zone	False	
 remarque	text	False	
 id_remarque	integer	False	
 metadata_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()


2.17 metadonnees.sonde_caracteristiques



Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 no_sonde	varchar(50)	True	
 date_reception	timestamp with time zone	False	
 date_retrait	timestamp with time zone	False	
 en_reparation	boolean	False	
 hors_service	boolean	False	
 perdue	boolean	False	
 hors_reseau	boolean	False	
 remarque	varchar(50)	False	
 no_sonde_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()
 instrument_id	smallint	False	





COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 metadata_uuid	uuid	False	





PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_no_sonde_uuid	no_sonde	


FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 fk_id_sonde_lib	instrument_id	libraries.lib_instrument_mddep(instrument_id)
 fk_sc_metadata_uuid	metadata_uuid	metadonnees.metadata(metadata_uuid)

2.18 processus.sonde_installation

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'



COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 no_piezometre	varchar(12)	False	
 no_sonde	varchar(20)	False	
 date_debut	timestamp with time zone	False	
 heure_debut	timestamp with time zone	False	

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 date_fin	timestamp with time zone	False	La date ou l'observation commence
 heure_fin	timestamp with time zone	False	
 profondeur	real	False	
 deploiement_id	serial	True	


PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 sonde_installation_pkey	deploiement_id	


2.19 resultats.temporel_corrige

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 valeur	double precision	False	
 temp_non_cor_uuid	uuid	False	






TYPE / NAME	COLUMNS	COMMENTS
-------------	---------	----------


 «index» idx_temp_corr_resultats.temporel_non_corrige	temp_non_cor_uuid	
---	-------------------	--



FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 fk_temp_non_cor_uuid	temp_non_cor_uuid	resultats.temporel_non_corrige(temp_non_cor_uuid)


2.20 resultats.temporel_non_corrige

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 canal_id	integer	False	
 date_temps	timestamp without time zone	True	
 valeur	double precision	False	
 canal_uuid	uuid	False	
 temp_non_cor_uuid	uuid	True	Initial value: public.gen_random_uuid()



PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 temporel_non_corrige_pkey	temp_non_cor_uuid	

TYPE / NAME	COLUMNS	COMMENTS
 «index» idx_tempo_n_corrige_canal_uuid	canal_uuid	
 «index» idx_tempo_non_cor_uuid	temp_non_cor_uuid	

FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
 fk_canal_canal_uuid	canal_uuid	resultats.canal_temporel(canal_uuid)

2.21 librairies.unite_mesure






Table de la base de données de 'Ville de Mercier'


COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 code_unite_mesure	varchar(2)	False	
 nom_unite_mesure	varchar(12)	False	

2.22 librairies.xml_observed_property

Table de la base de données de 'Ville de Mercier'

table contenant la définition de l'ensemble des éléments observés. On peut y trouver de la stratigraphie, des éléments géochimiques, de la construction de puits...

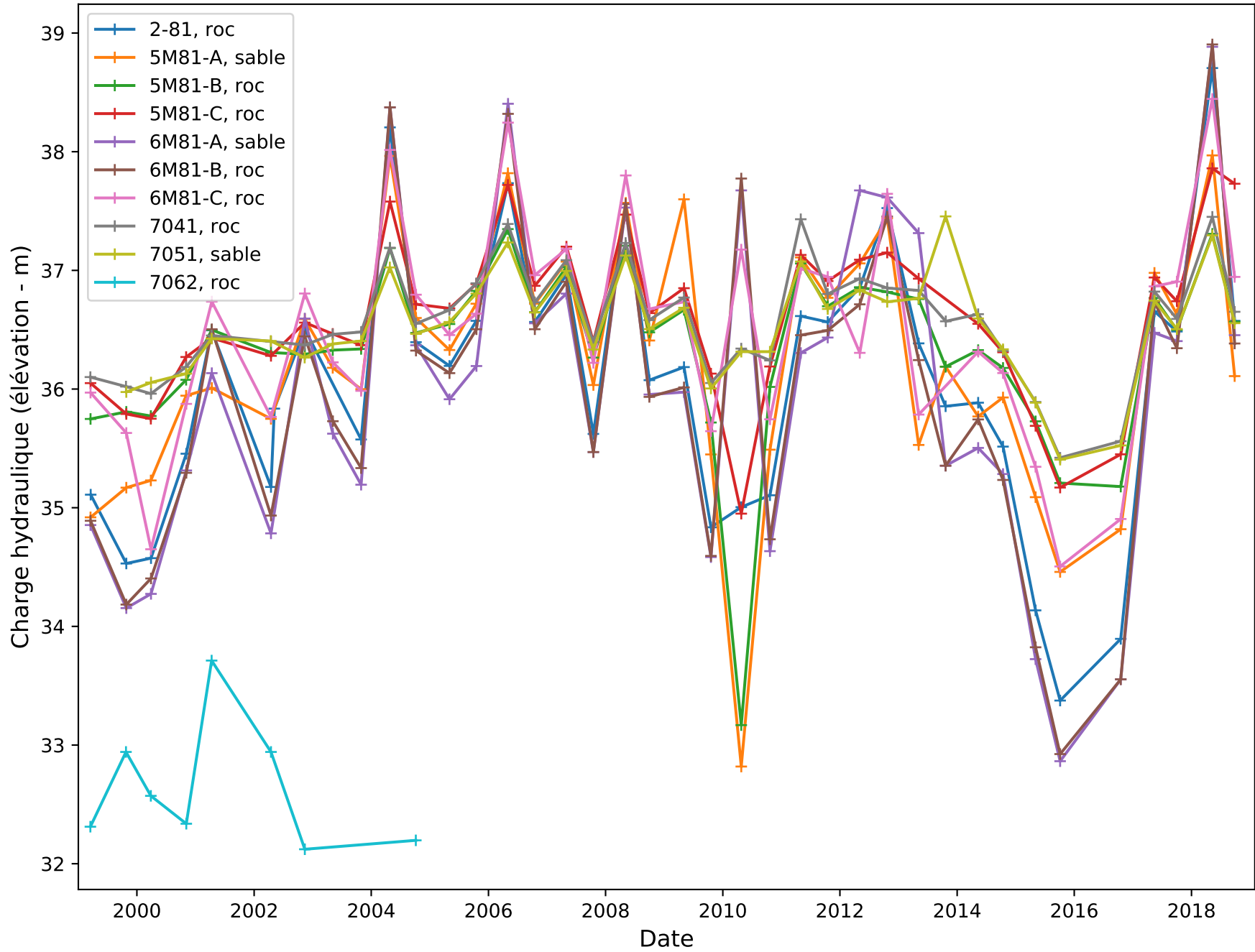
COLUMN NAME	DATATYPE	NOT NULL	COMMENTS
 obs_property_id	integer	True	
 observed_property	varchar(150)	False	
 observed_property_desc ription	varchar(1500)	False	
 unit	varchar(32)	False	
 id_type_observation	integer	False	

PRIMARY KEY NAME	COLUMNS	COMMENTS
 pk_xm_analyte	obs_property_id	

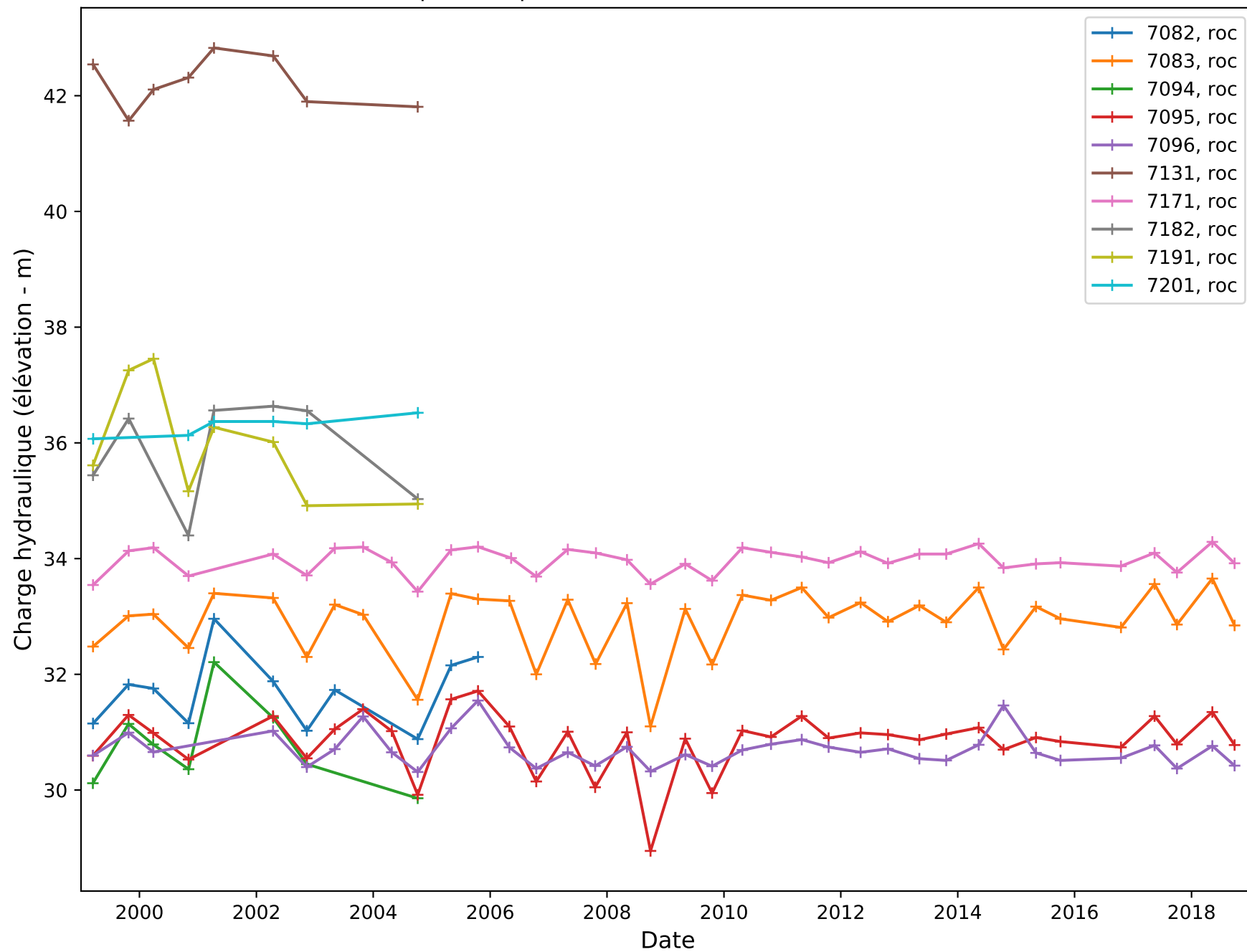
FOREIGN KEY NAME	COLUMNS	REFERENCES
fk_xm_observed_property_id_type_observation	id_type_observation	libraries.observation_type(id_type_observation)

Annexe 2. Chroniques temporelles du niveau d'eau des puits de surveillance de l'UTES

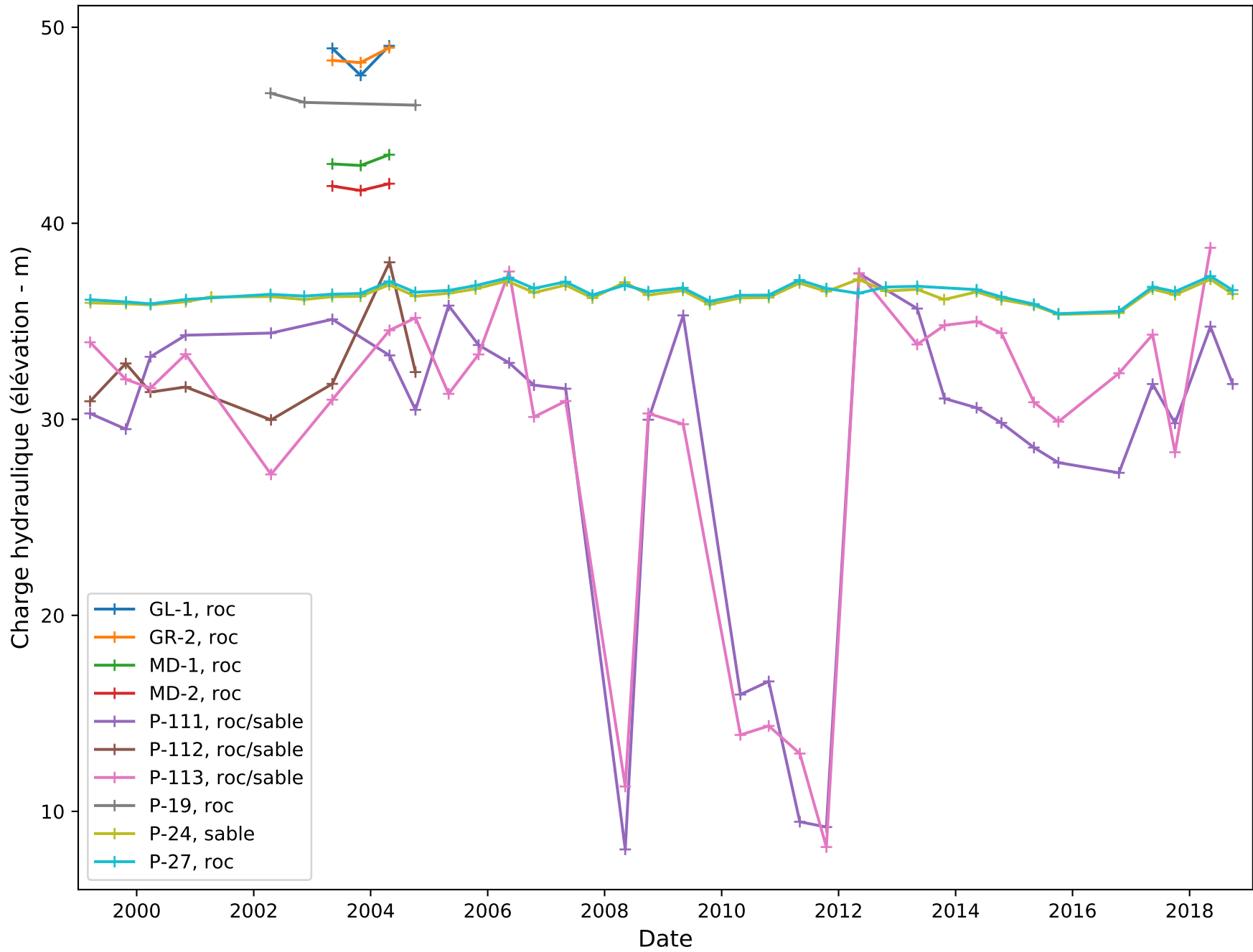
Chroniques temporelles Puits de surveillance de l'UTES, 1



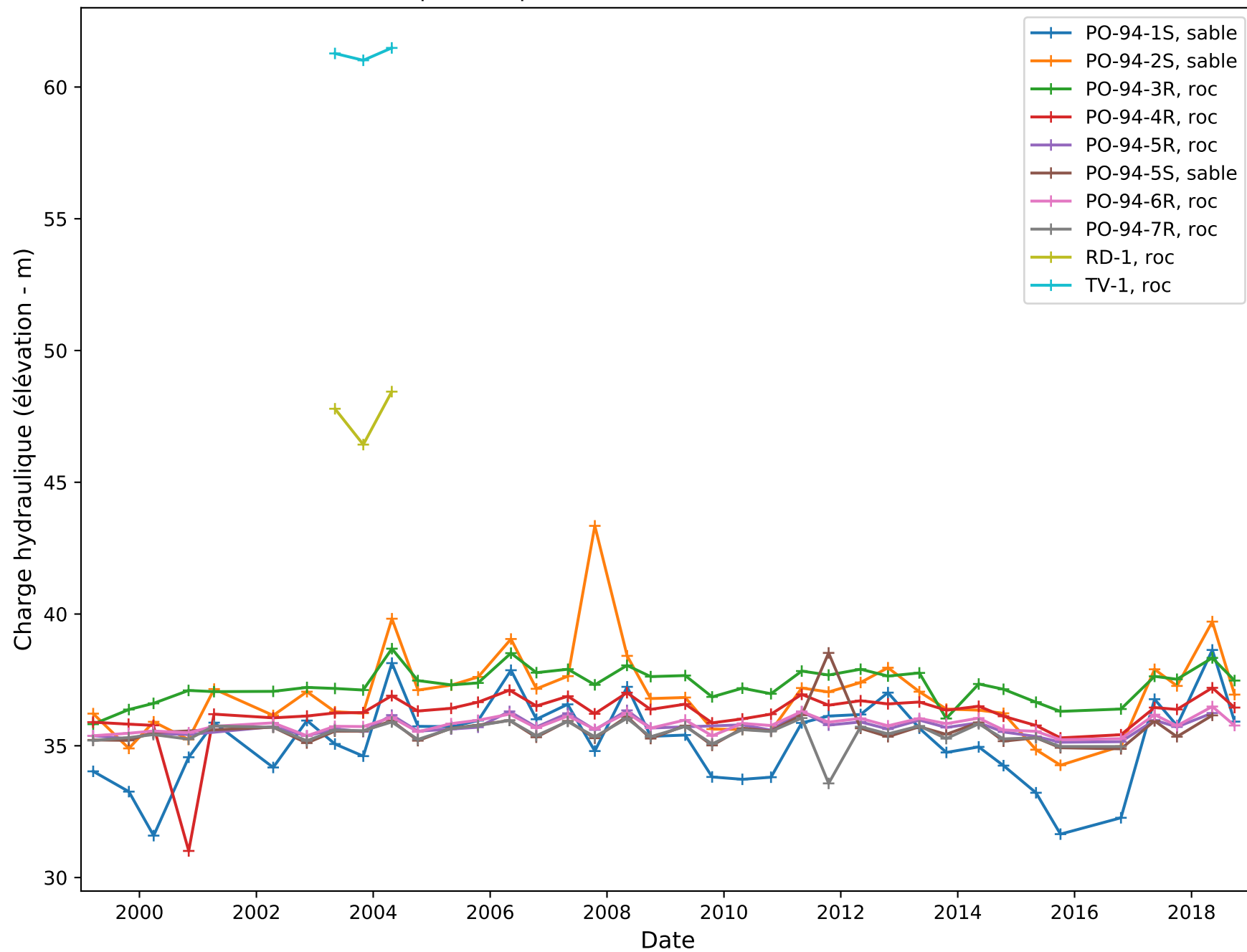
Chroniques temporelles Puits de surveillance de l'UTES, 2



Chroniques temporelles Puits de surveillance de l'UTES, 4



Chroniques temporelles Puits de surveillance de l'UTES, 5



Annexe 3. Schémas et chroniques temporelles du niveau d'eau des puits du réseau de suivi de MELCC

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03000003

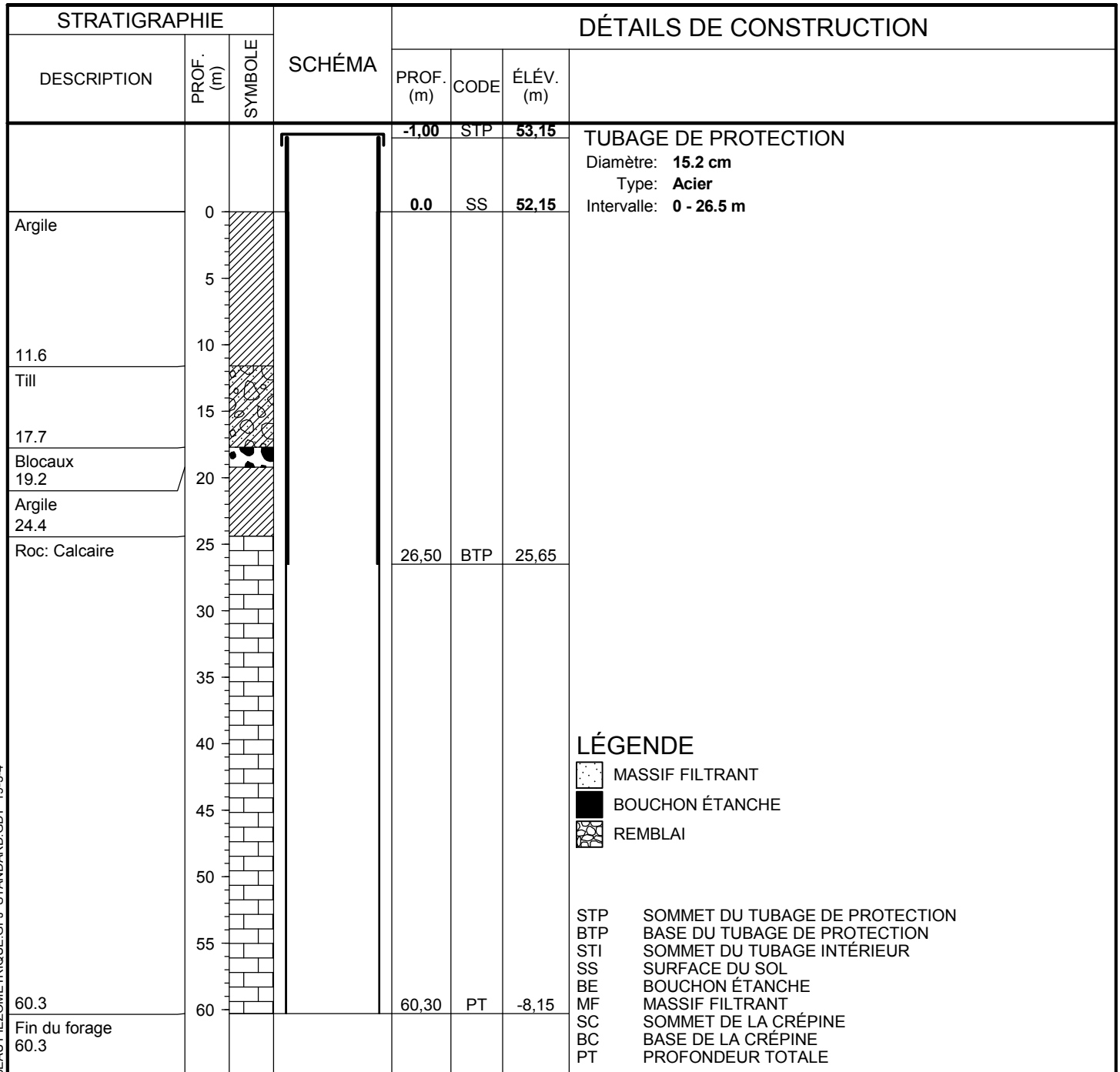
MUNICIPALITÉ: **Saint-Rémi**

LONGITUDE: **-73.65223**

LATITUDE: **45.28854**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **52.15**



SCHEMA.DIFFUSION - RESEAU.PIEZOMETRIQUE.GPJ - STANDARD.GDT - 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques



SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03090001

MUNICIPALITÉ: **Mercier**

LONGITUDE: **-73.71853**

LATITUDE: **45.30259**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **50.715**

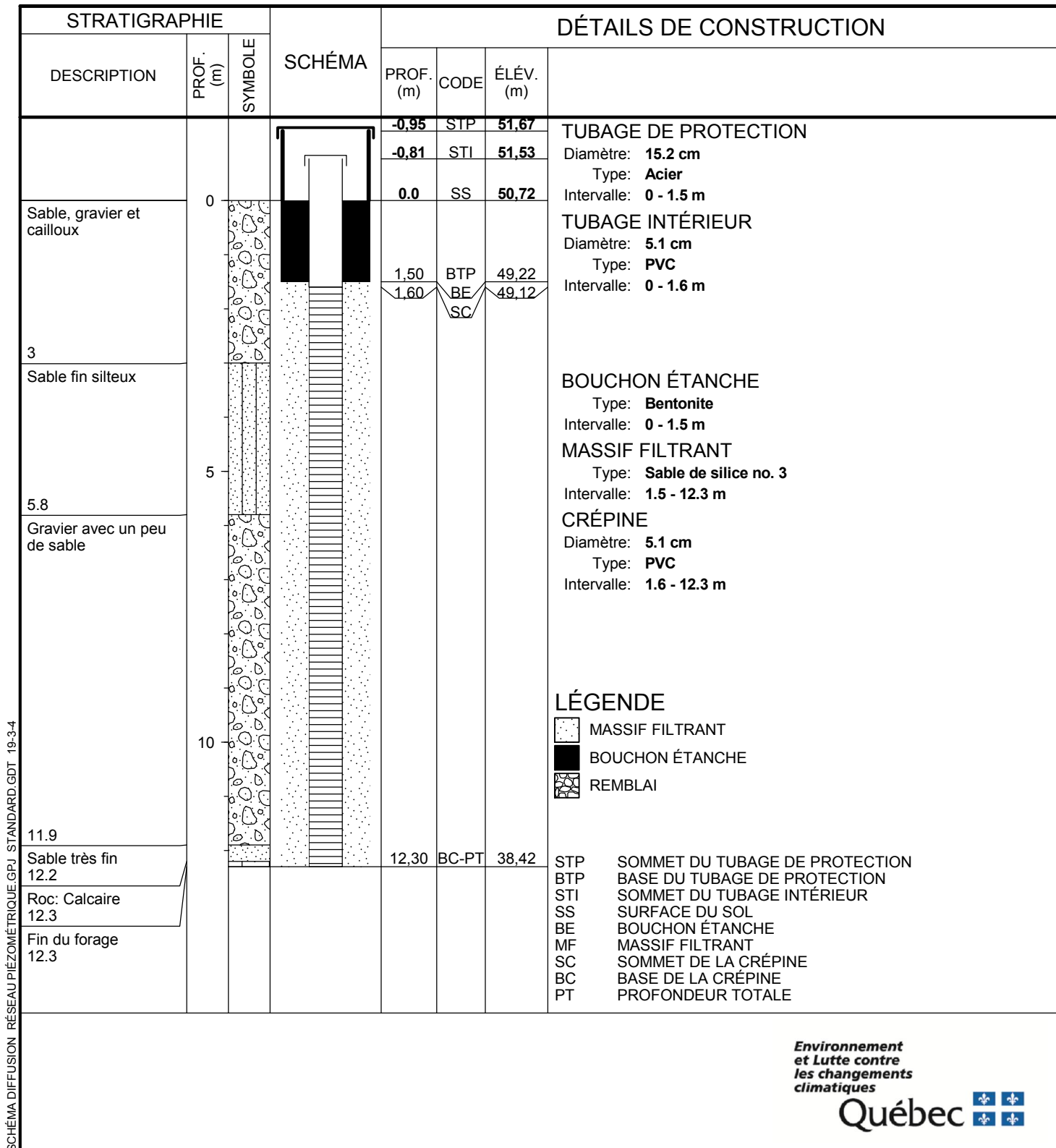


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03090002

MUNICIPALITÉ: **Mercier**

LONGITUDE: **-73.77288**

LATITUDE: **45.30226**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **40.477**

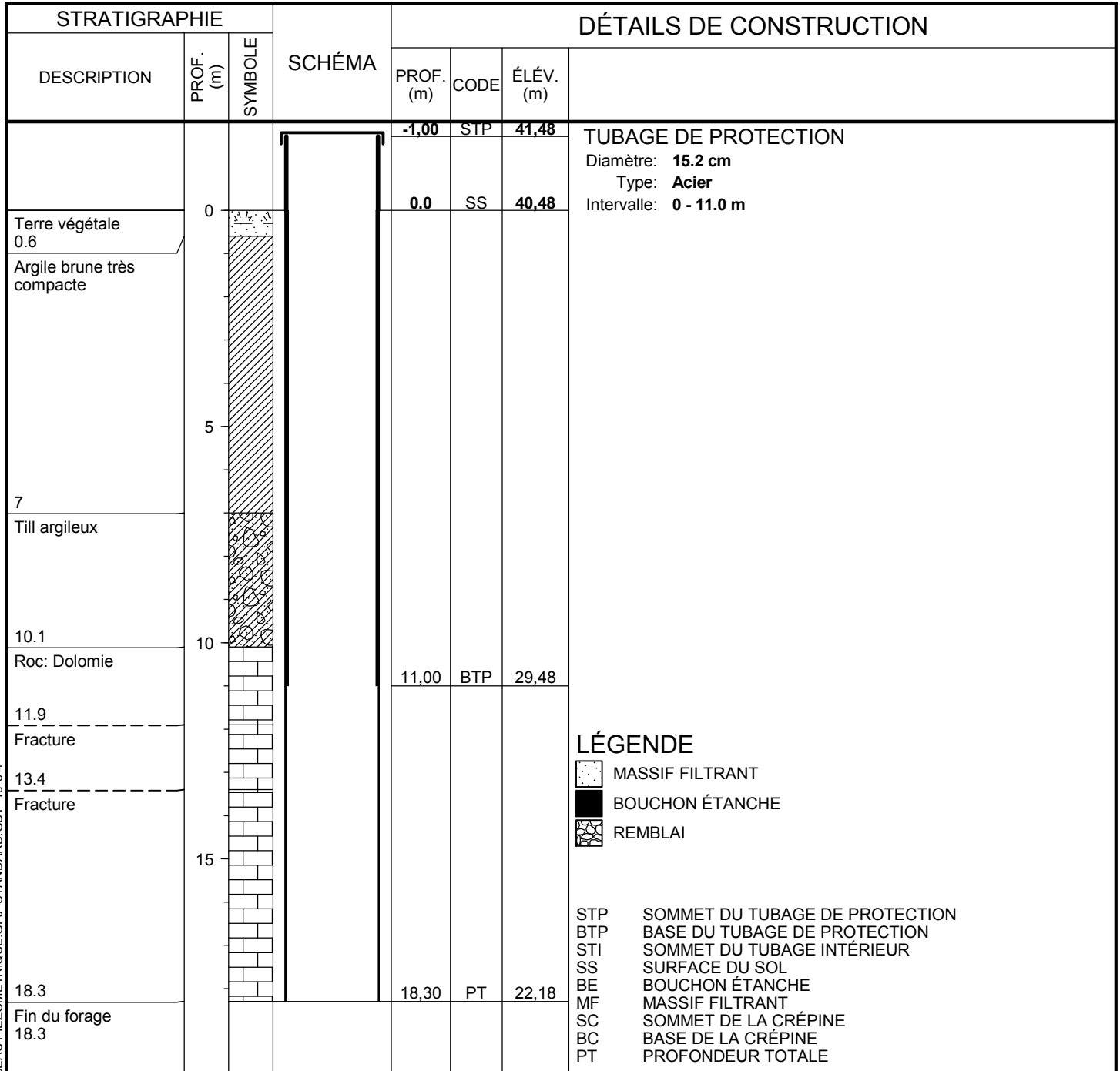


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques



SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03090021

MUNICIPALITÉ: **Mercier**

LONGITUDE: **-73.72968**

LATITUDE: **45.30094**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **47.11**

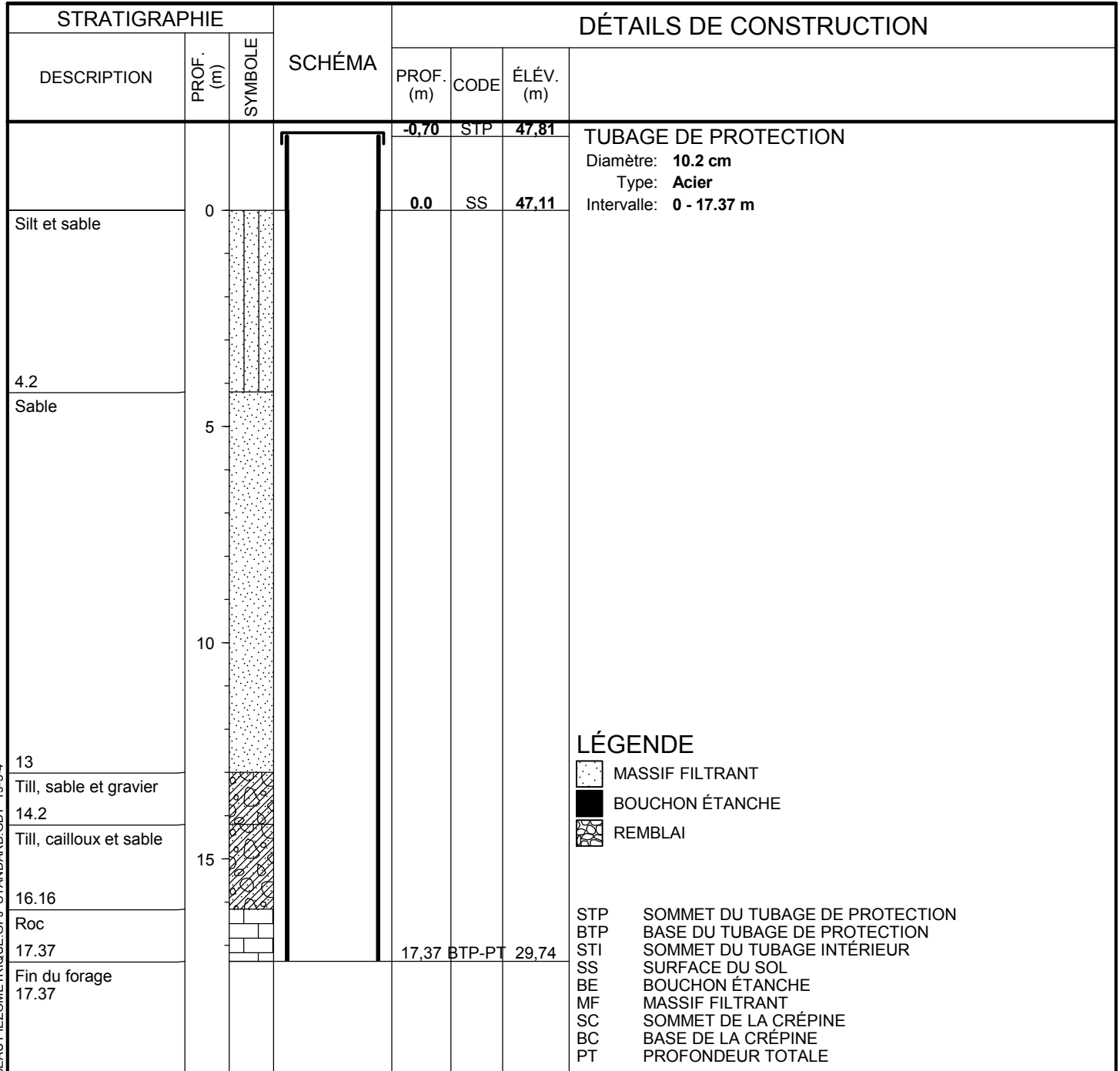


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-34

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097062

MUNICIPALITÉ: **Sainte-Martine**

LONGITUDE: **-73.77324**

LATITUDE: **45.25818**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **38.32**

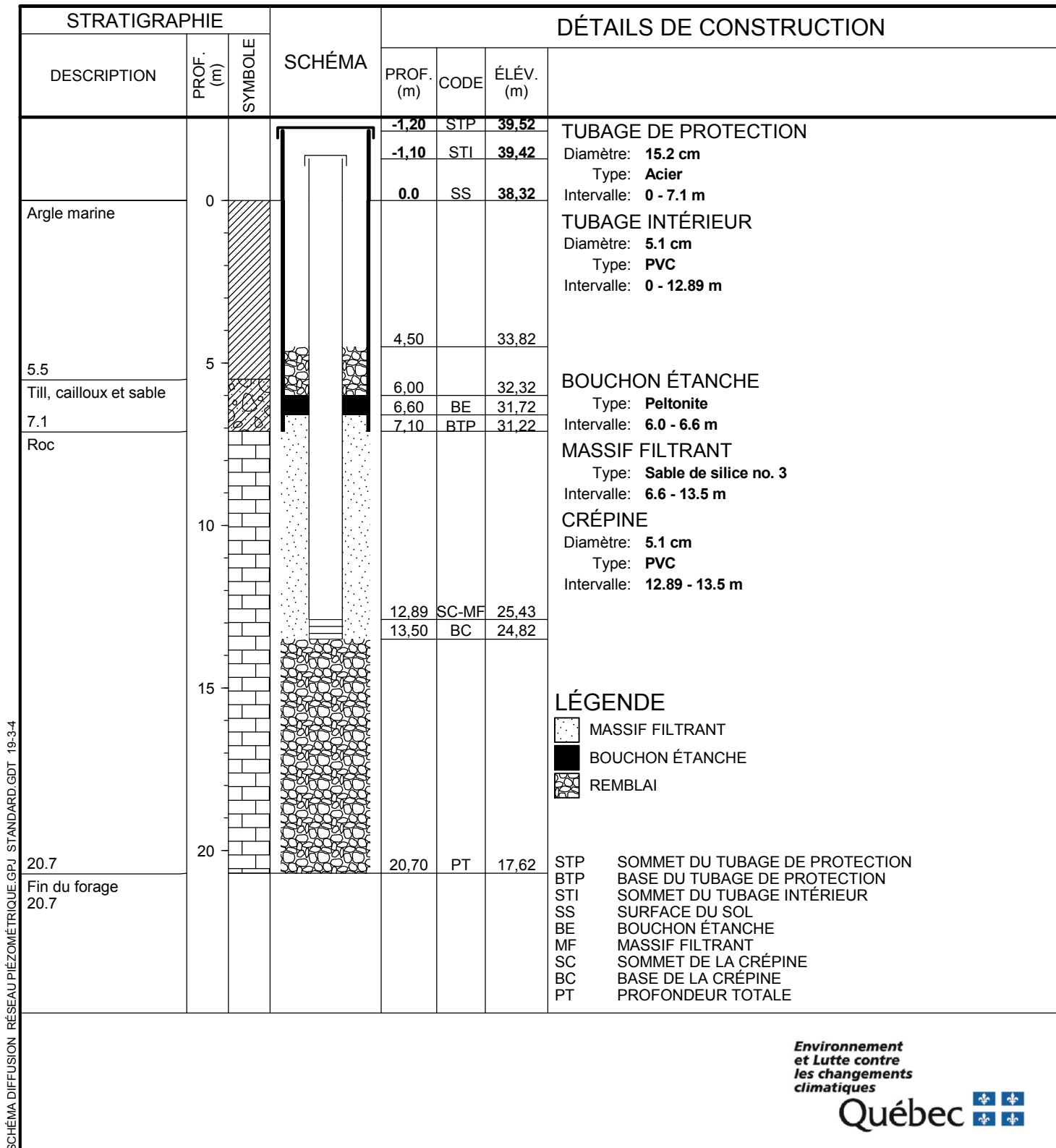


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097082

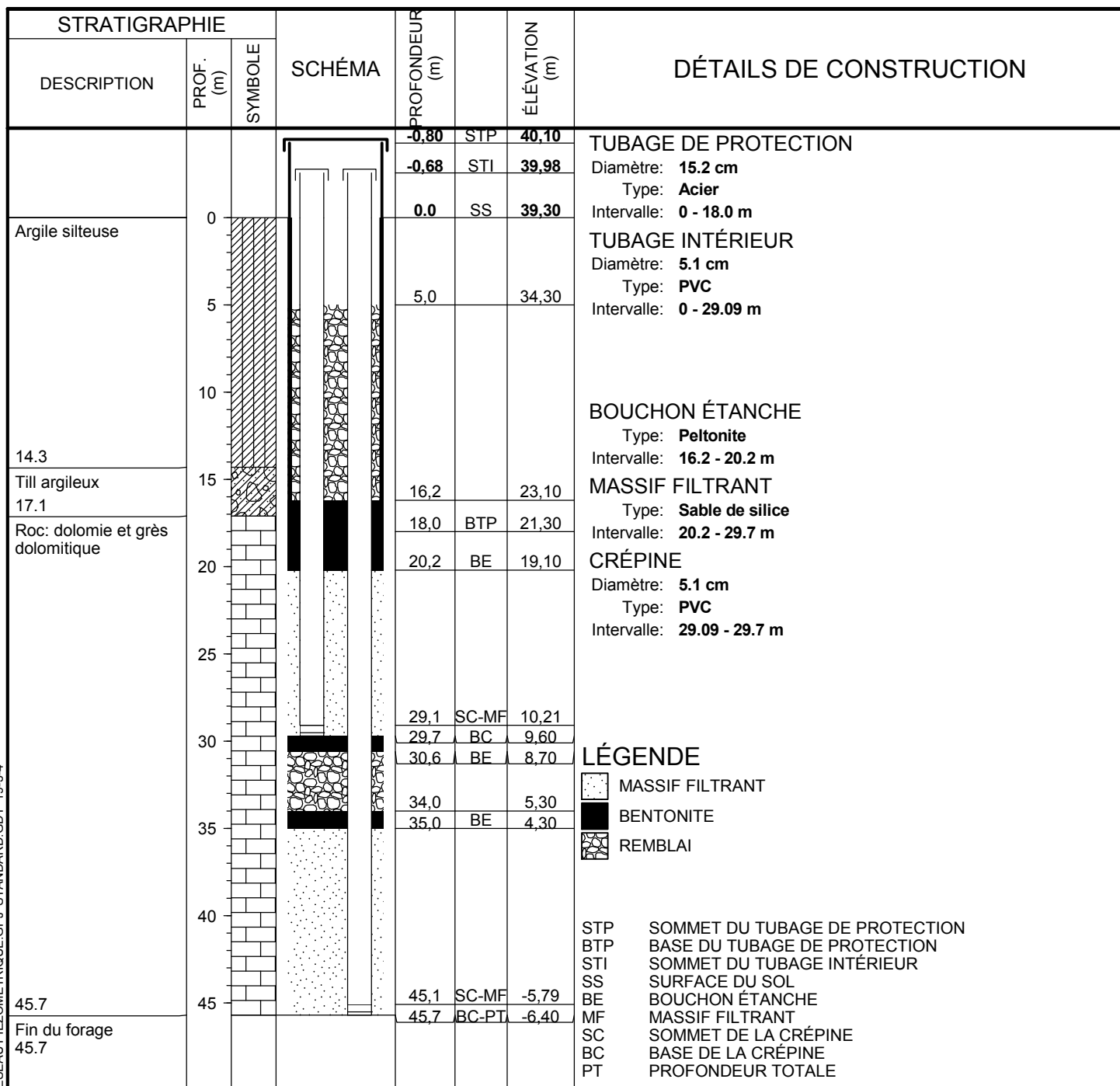
MUNICIPALITÉ: **Sainte-Martine**

LONGITUDE: **-73.78149**

LATITUDE: **45.25137**

NAD: **83**

ALTITUDE (m): **39.3**



2 NIVEAUX DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097094

MUNICIPALITÉ: **Sainte-Martine**

LONGITUDE: **-73.7888**

LATITUDE: **45.26128**

NAD: **83**

ALTITUDE (m): **37.31**

STRATIGRAPHIE			SCHÉMA	PROFONDEUR (m)		ÉLEVATION (m)	DÉTAILS DE CONSTRUCTION	
DESCRIPTION	PROF. (m)	SYMBOLE						
				-1,50	STP	38,81	TUBAGE DE PROTECTION Diamètre: 15.2 cm Type: Acier Intervalle: 0 - 10.7 m	
				-1,40	STI	38,71		TUBAGE INTÉRIEUR Diamètre: 5.1 cm Type: PVC Intervalle: 0 - 25.49
				0.0	SS	37,31		
Argile silteuse	0						BOUCHON ÉTANCHE Type: Peltonite Intervalle: 16.5 - 16.8 m	
6.1	5				6.7	30,61		
Till silteux compact	8.5						MASSIF FILTRANT Type: Sable de silice Intervalle: 16.8 - 27.1 m	
8.5					10.7	BTP		26,61
Roc fracturé: Dolomie	9.4						CRÉPINE Diamètre: 5.1 cm Type: PVC Intervalle: 25.49 - 26.1 m	
9.4	10				16.5	BE		20,81
Grès dolomitique					16.8		20,51	
	15				25.5	SC-MF	11,82	
	20				26.1	BC	11,21	
	25				27.1		10,21	
	30				27.7		9,61	
	35				35.2	BE	2,11	
	35			35.8		1,51		
	40			44.2	SC-MF	-6,88		
	45			44.8	BC	-7,49		
45.7	45			45.7	PT	-8,39		
Fin du forage	45.7							

LÉGENDE

- MASSIF FILTRANT
- BENTONITE
- REMBLAI

- STP SOMMET DU TUBAGE DE PROTECTION
- BTP BASE DU TUBAGE DE PROTECTION
- STI SOMMET DU TUBAGE INTÉRIEUR
- SS SURFACE DU SOL
- BE BOUCHON ÉTANCHE
- MF MASSIF FILTRANT
- SC SOMMET DE LA CRÉPINE
- BC BASE DE LA CRÉPINE
- PT PROFONDEUR TOTALE

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097102

MUNICIPALITÉ: **Saint-Rémi**

LONGITUDE: **-73.63196**

LATITUDE: **45.2625**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **52.70**

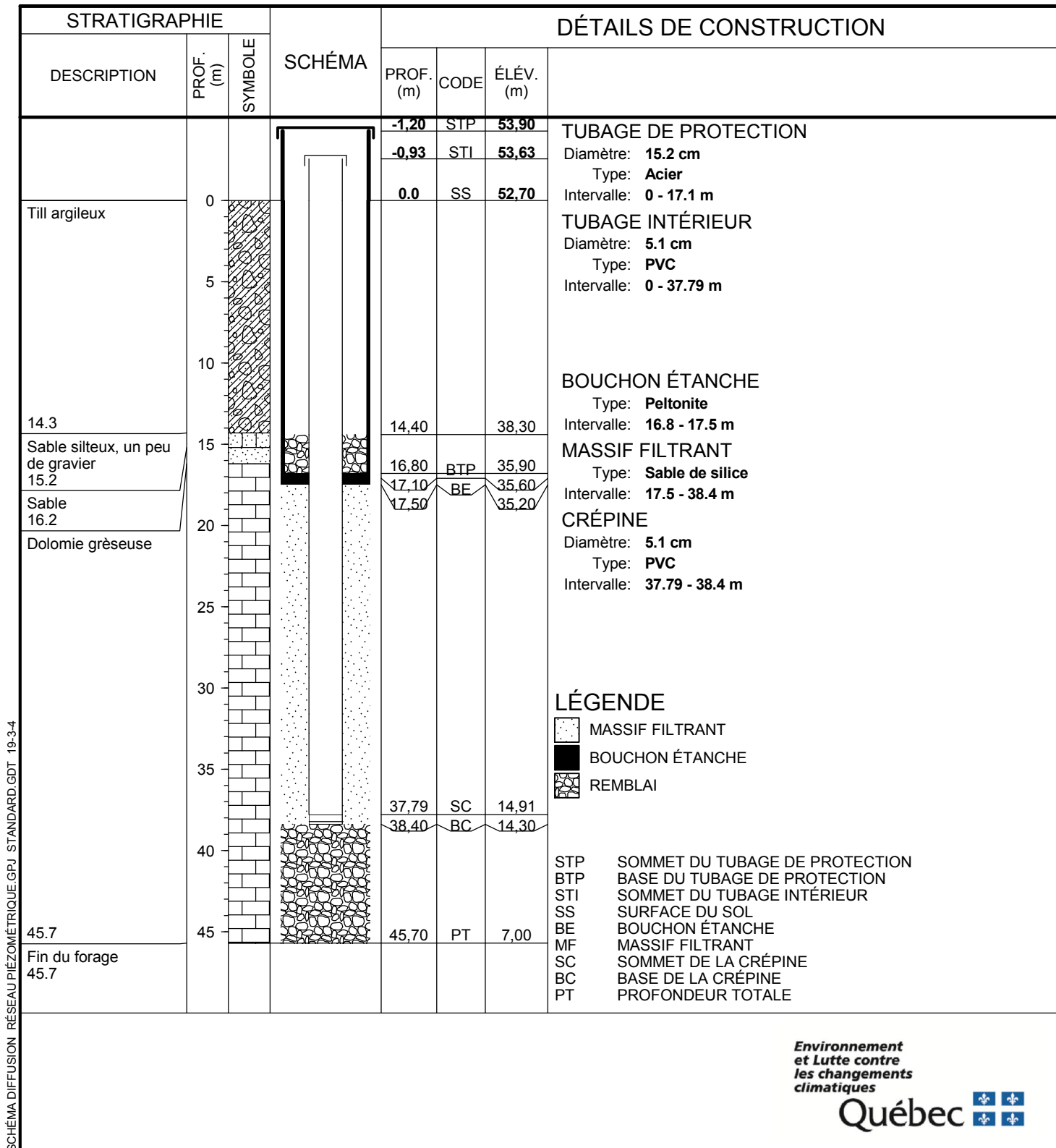


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097131

MUNICIPALITÉ: **Saint-Isidore**

LONGITUDE: **-73.70262**

LATITUDE: **45.25247**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **44.04**

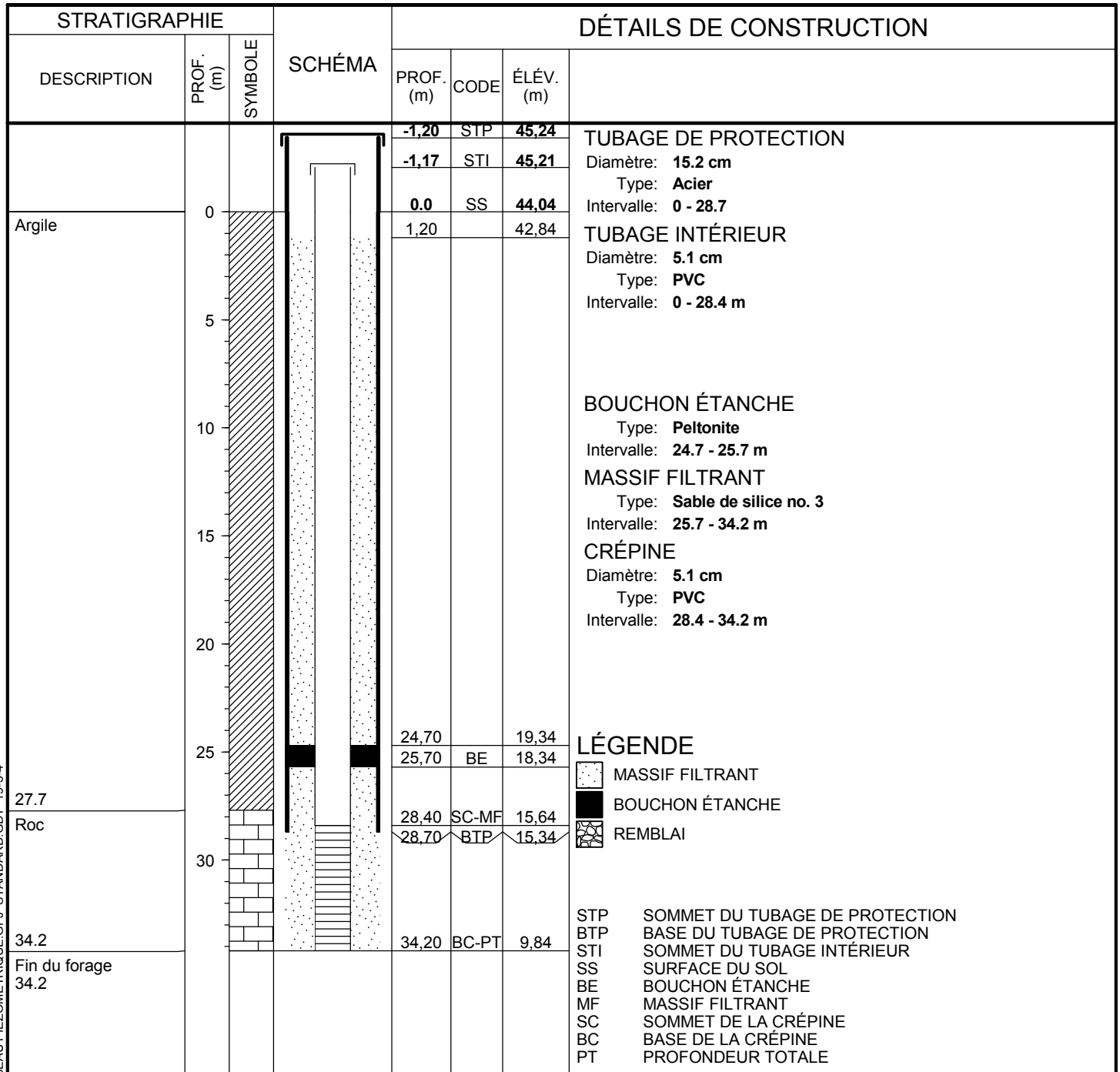


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097182

MUNICIPALITÉ: **Saint-Urbain-Premier**

LONGITUDE: **-73.75175**

LATITUDE: **45.23978**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **39.85**

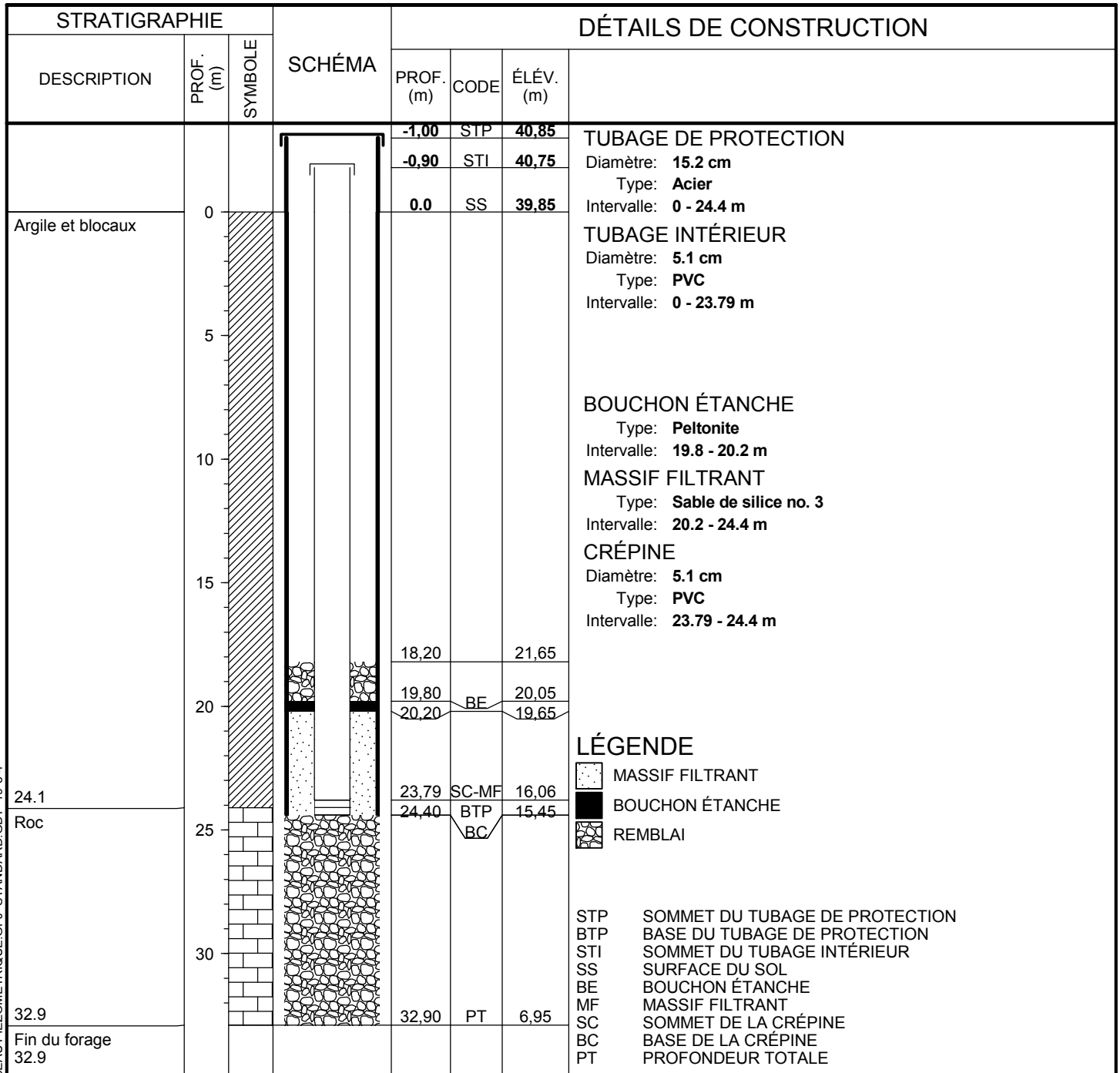


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097191

MUNICIPALITÉ: **Sainte-Martine**

LONGITUDE: **-73.78481**

LATITUDE: **45.228**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **38.59**

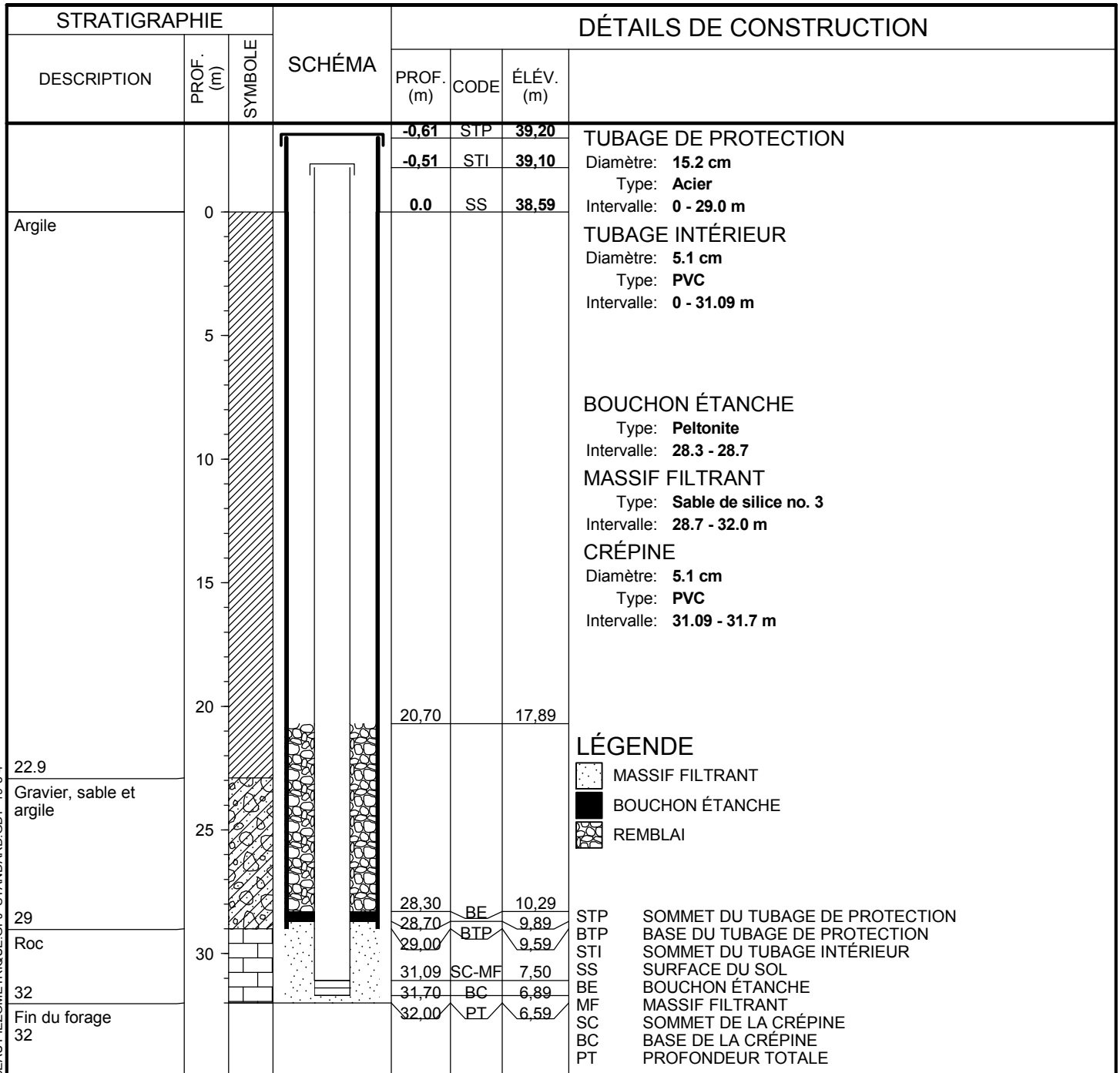


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-34

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 03097201

MUNICIPALITÉ: **Mercier**

LONGITUDE: **-73.73942**

LATITUDE: **45.27588**

NAD: **83**

ALTITUDE DU SOL (m): **39.83**

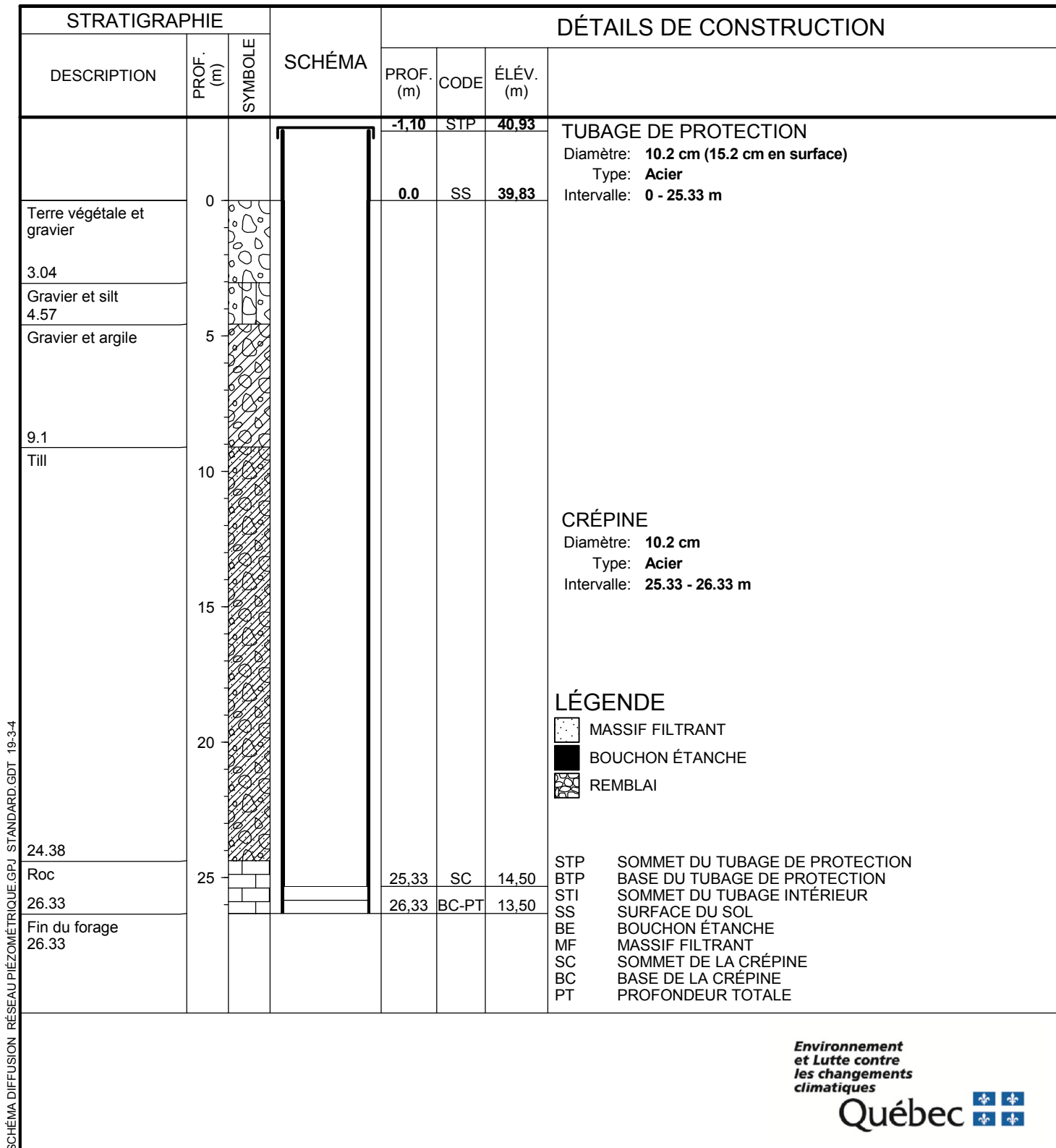
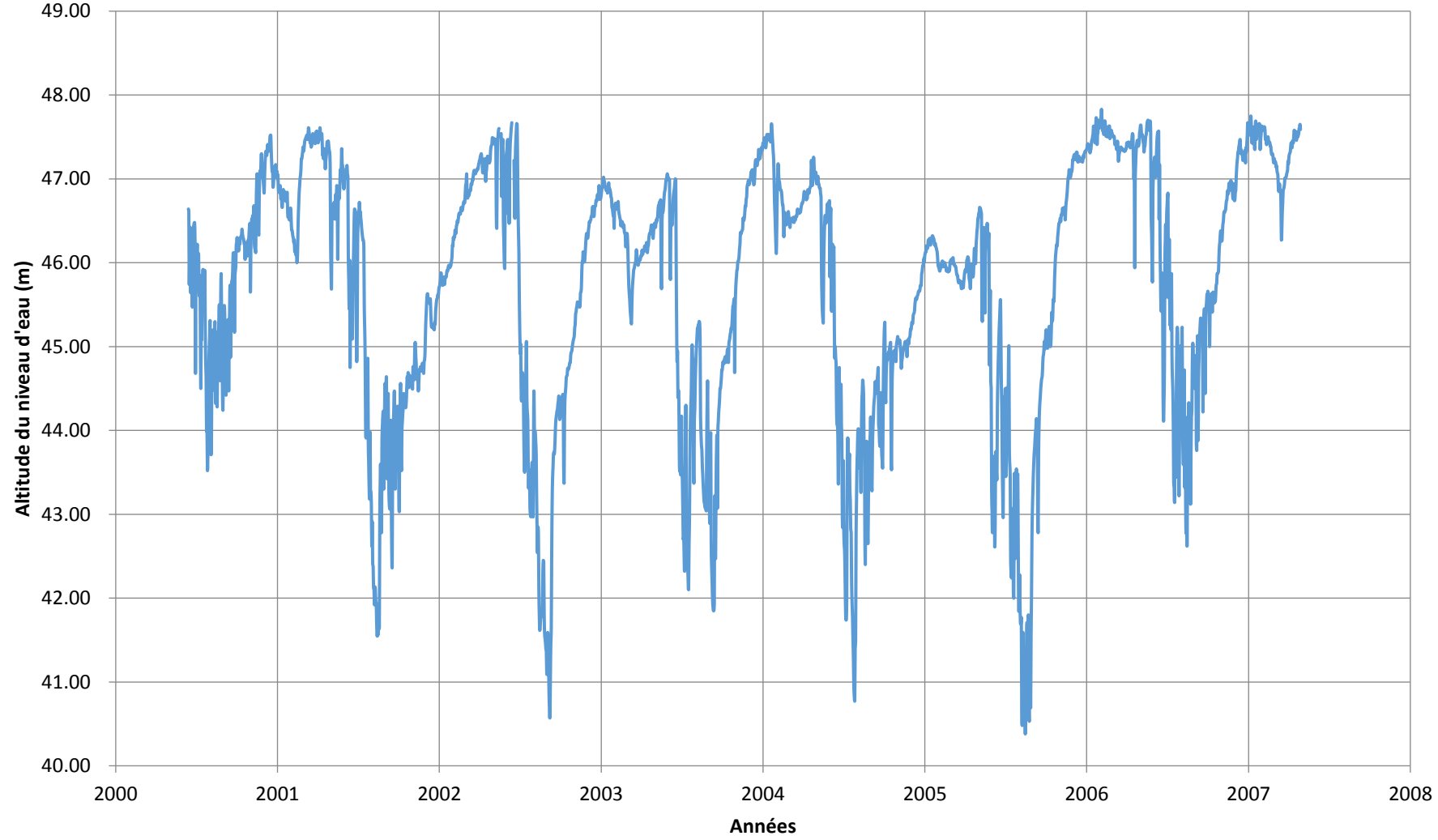


SCHÉMA DIFFUSION RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE.GPJ STANDARD.GDT 19-3-4

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

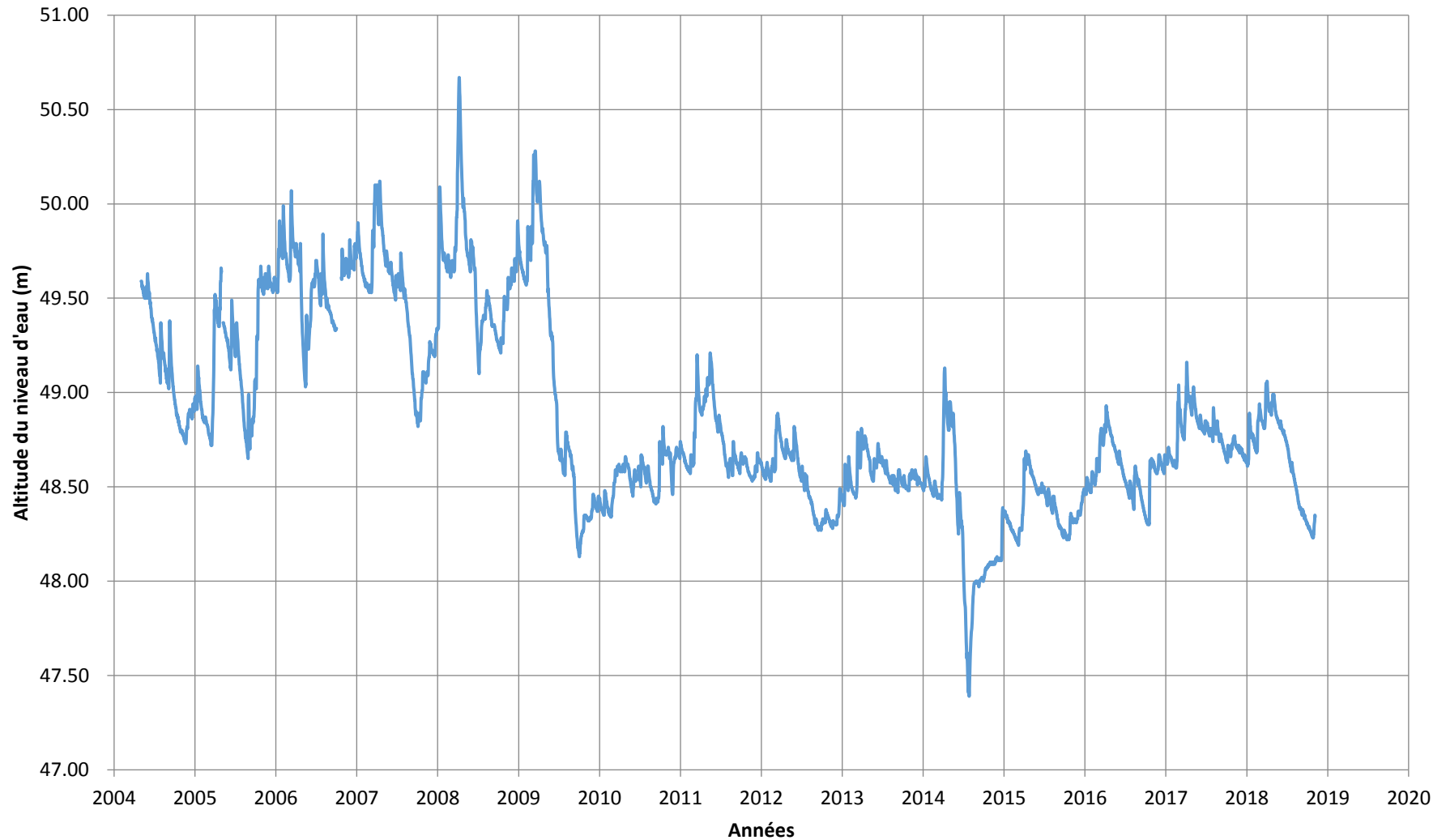
Québec

Municipalité : Saint-Rémi
Piézomètre : 03000003



Altitude du sol de 52.15 (Géodésique)

Municipalité : Mercier
Piézomètre : 03090001

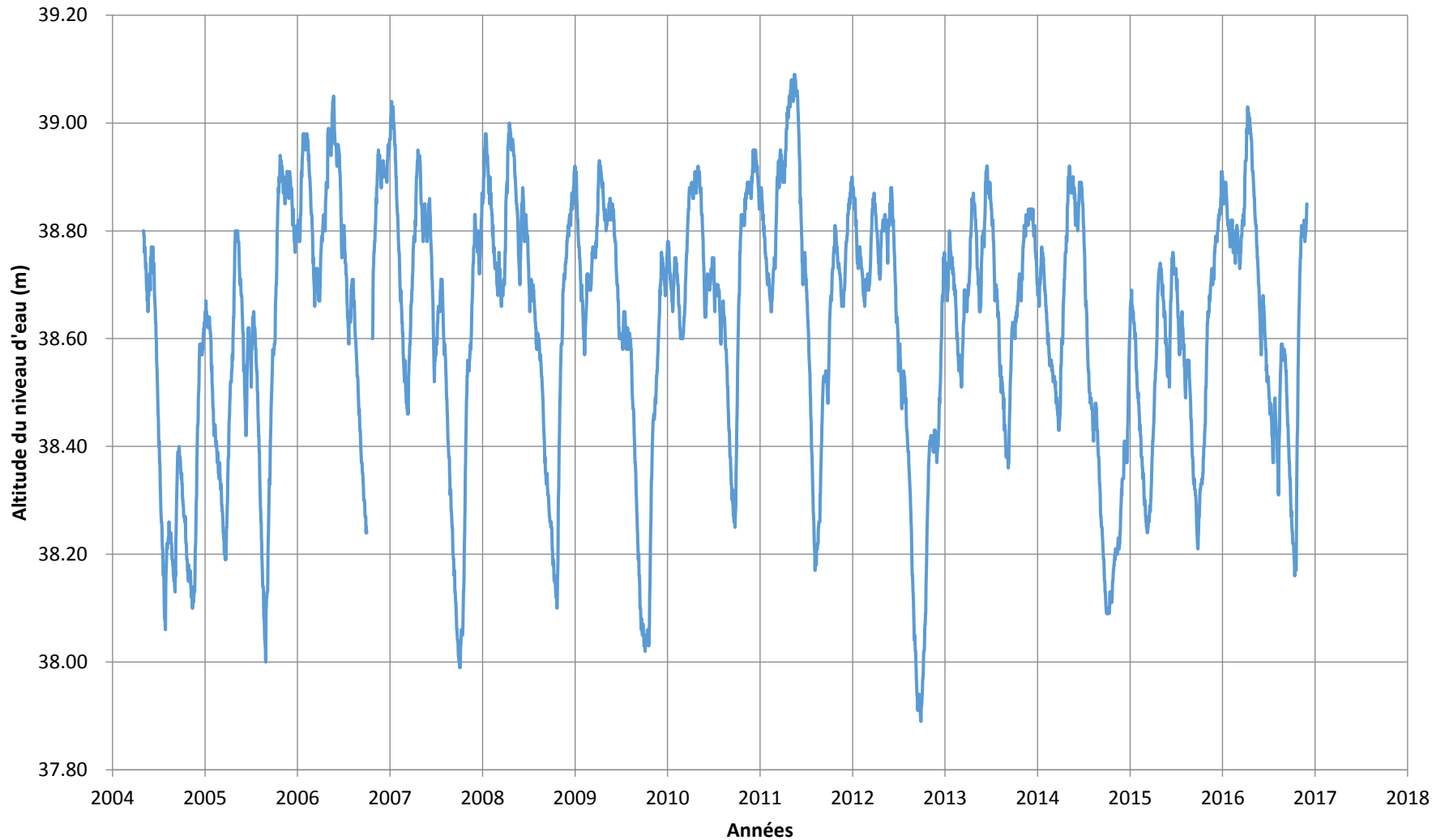


Altitude du sol de 50.72 (Approximative)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Mercier
Piézomètre : 03090002

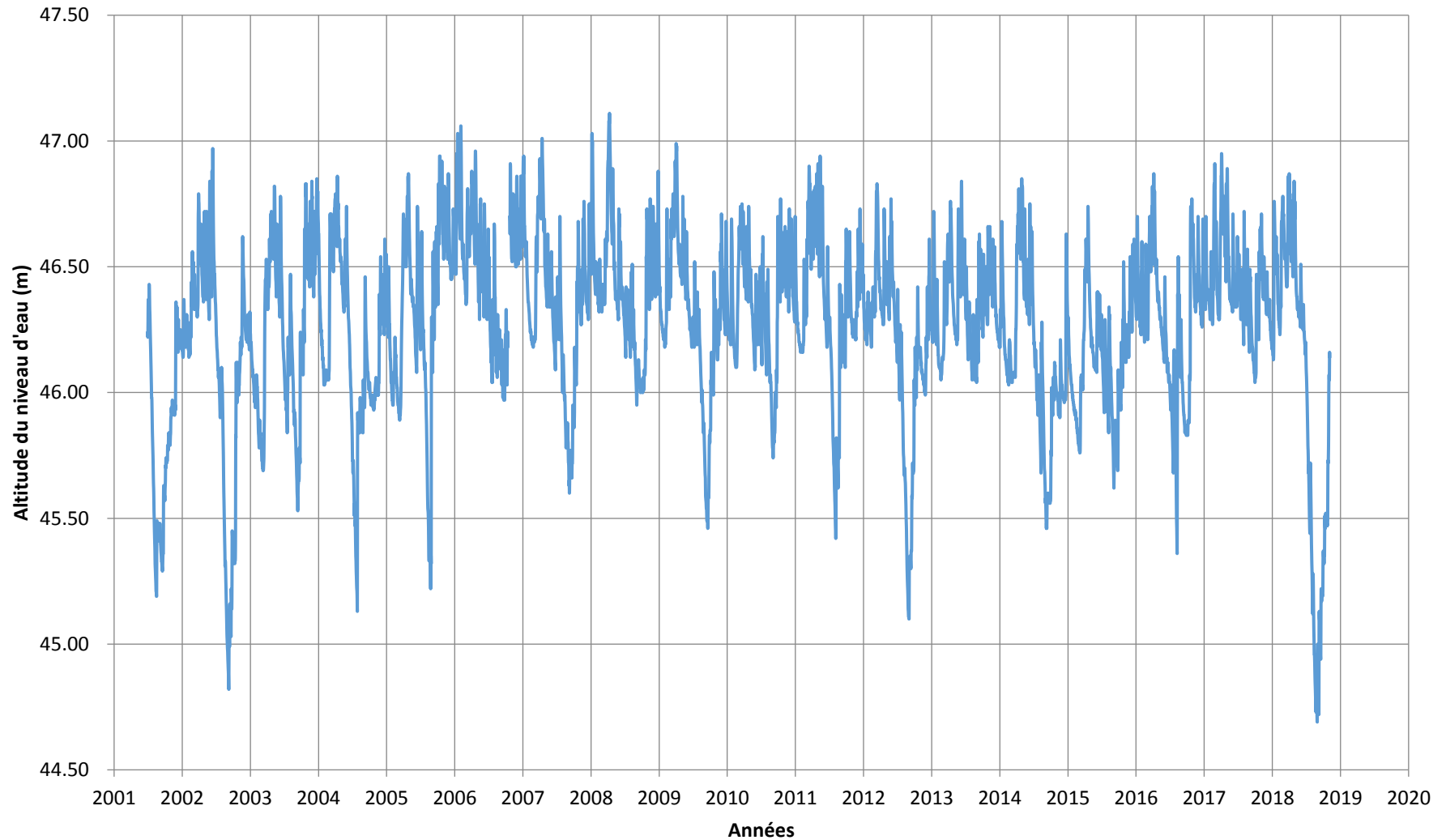


Altitude du sol de 40.48 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Mercier
Piézomètre : 03090021



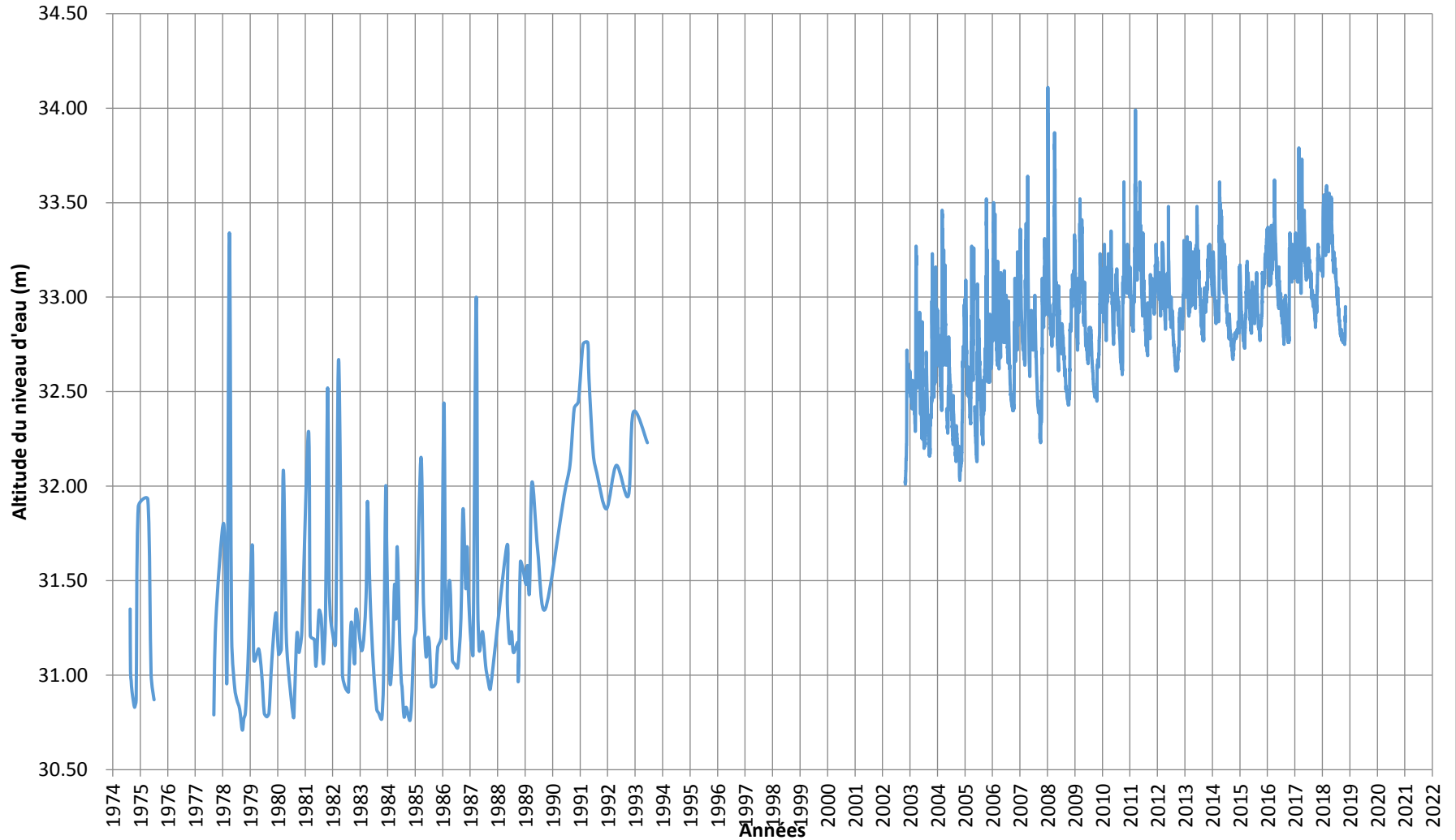
Altitude du sol de 47.56 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Sainte-Martine

Piézomètre : 03097062



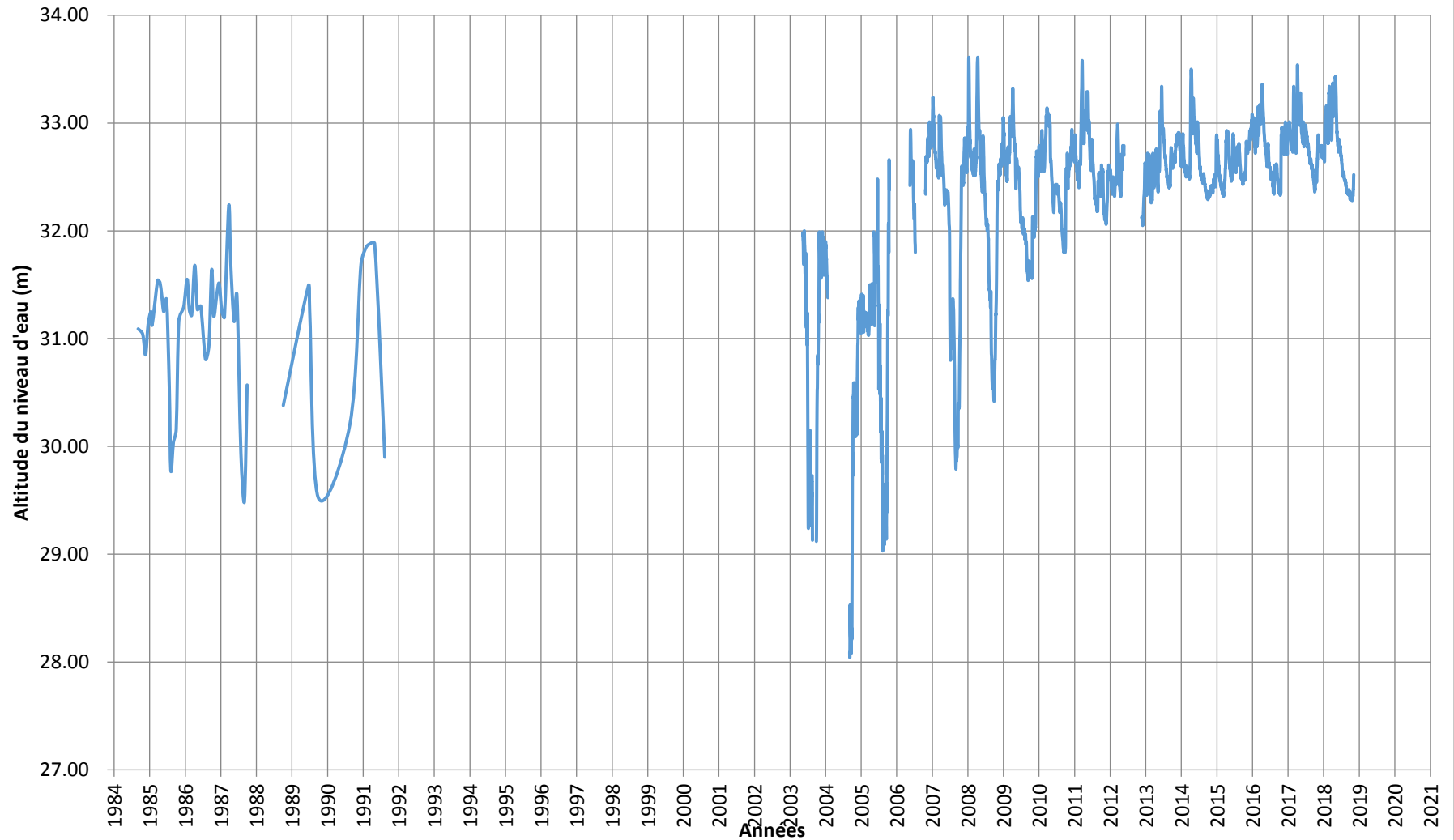
Altitude du sol de 38.32 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Sainte-Martine

Piézomètre : 03097082



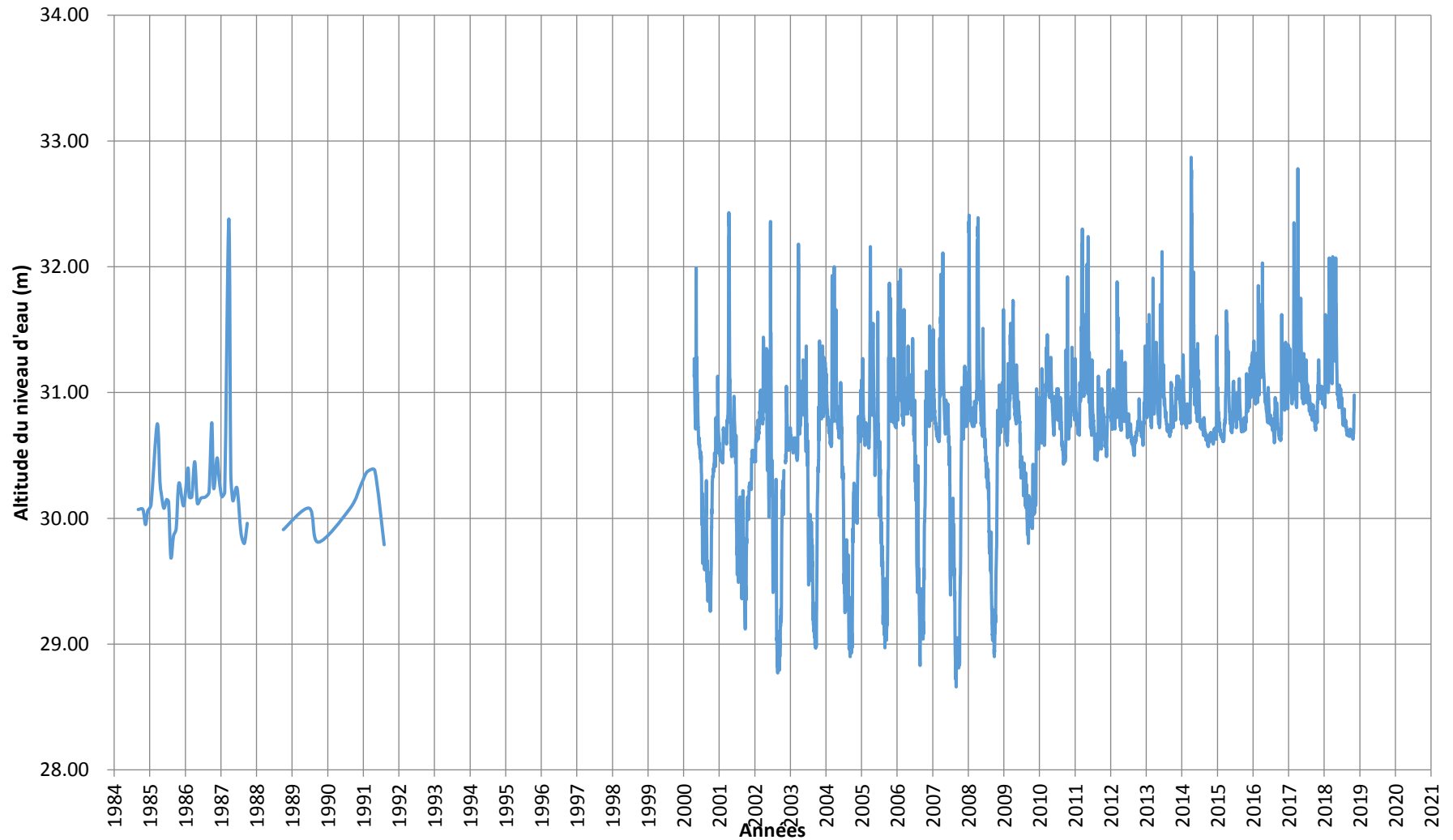
Altitude du sol de 39.3 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Sainte-Martine

Piézomètre : 03097094

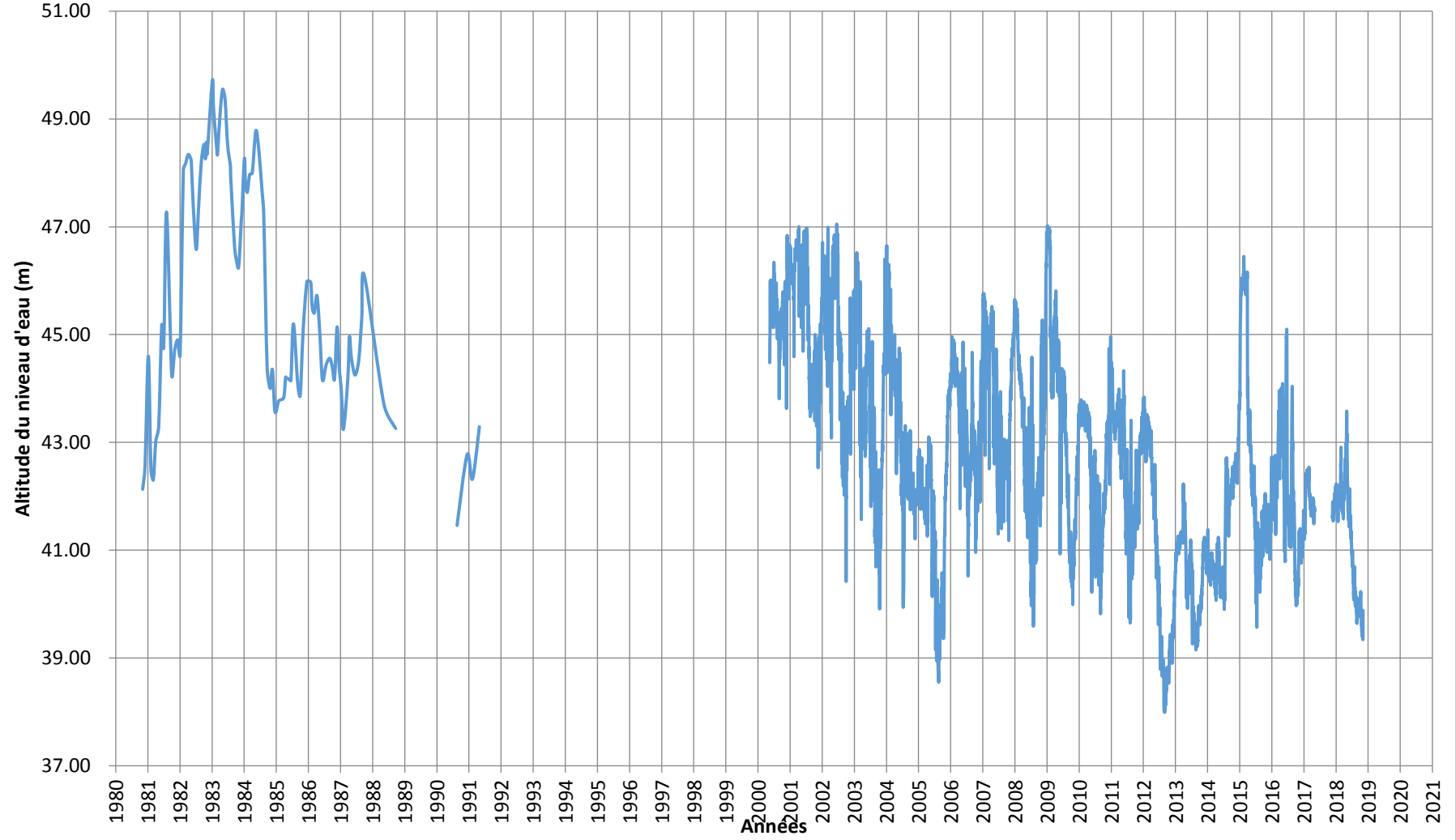


Altitude du sol de 37.31 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



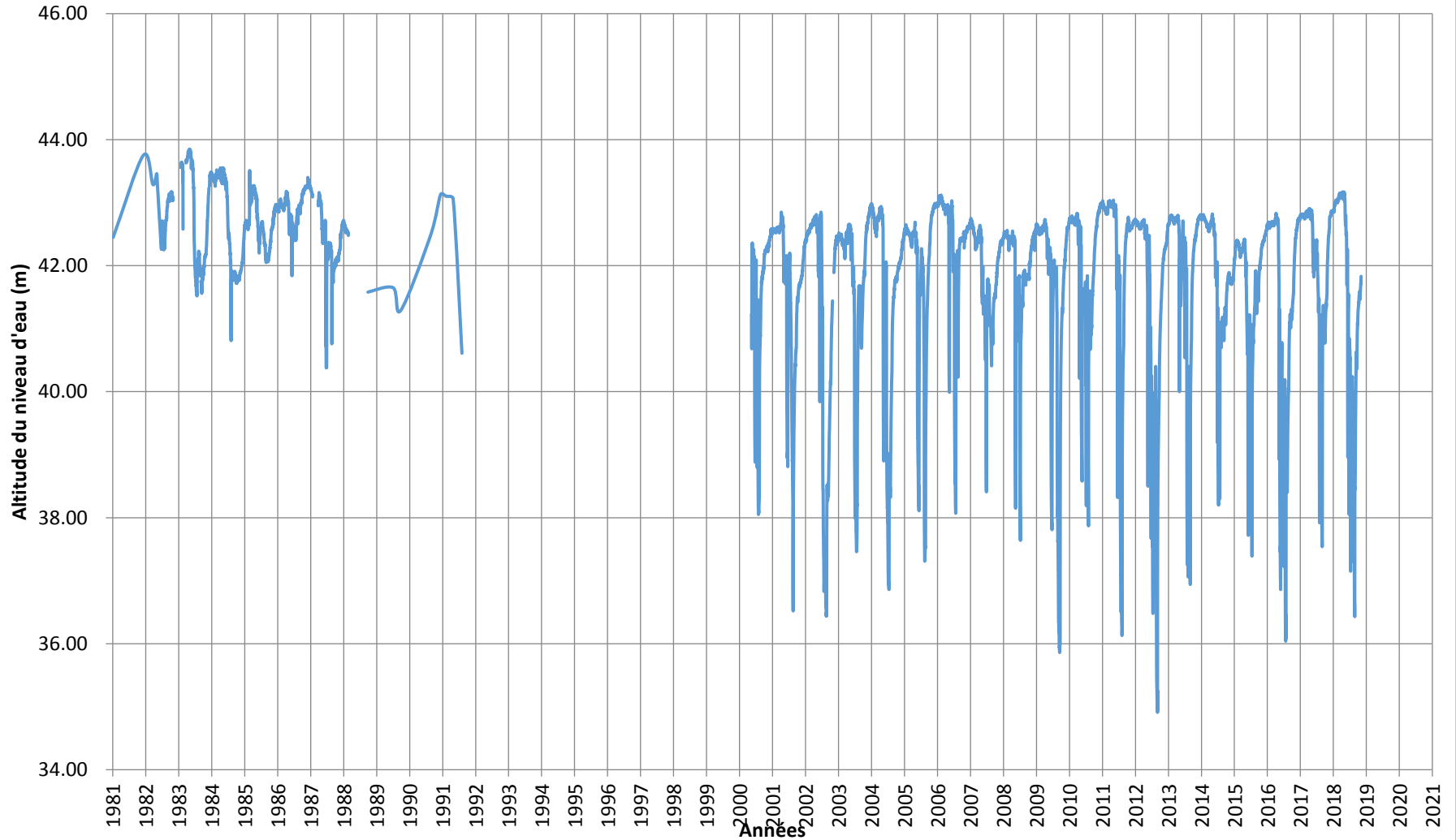
Municipalité : Saint-Rémi
Piézomètre : 03097102



Altitude du sol de 53.47 (Géodésique)

Municipalité : Saint-Isidore

Piézomètre : 03097131



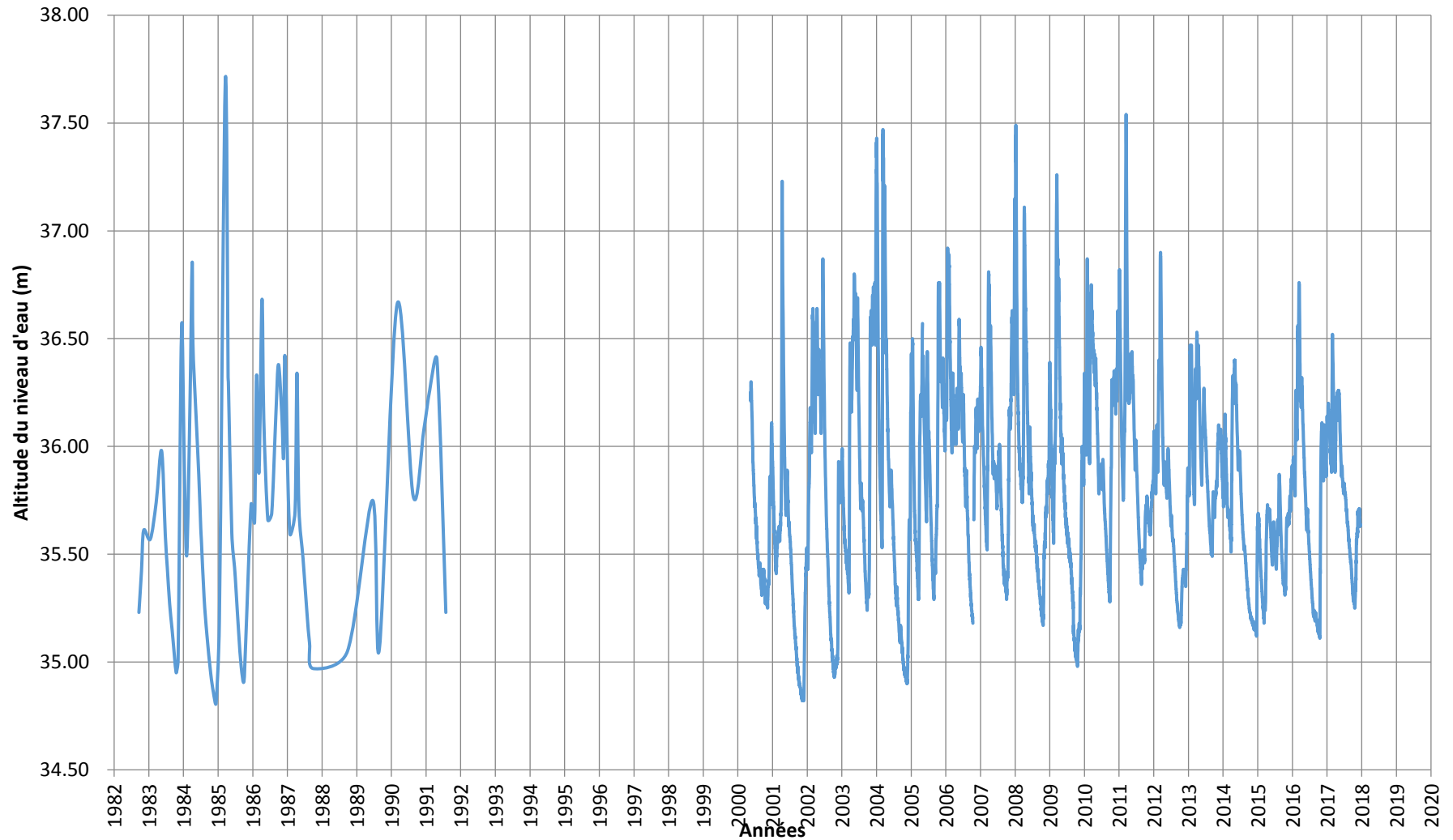
Altitude du sol de 44.04 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Saint-Urbain-Premier

Piézomètre : 03097182



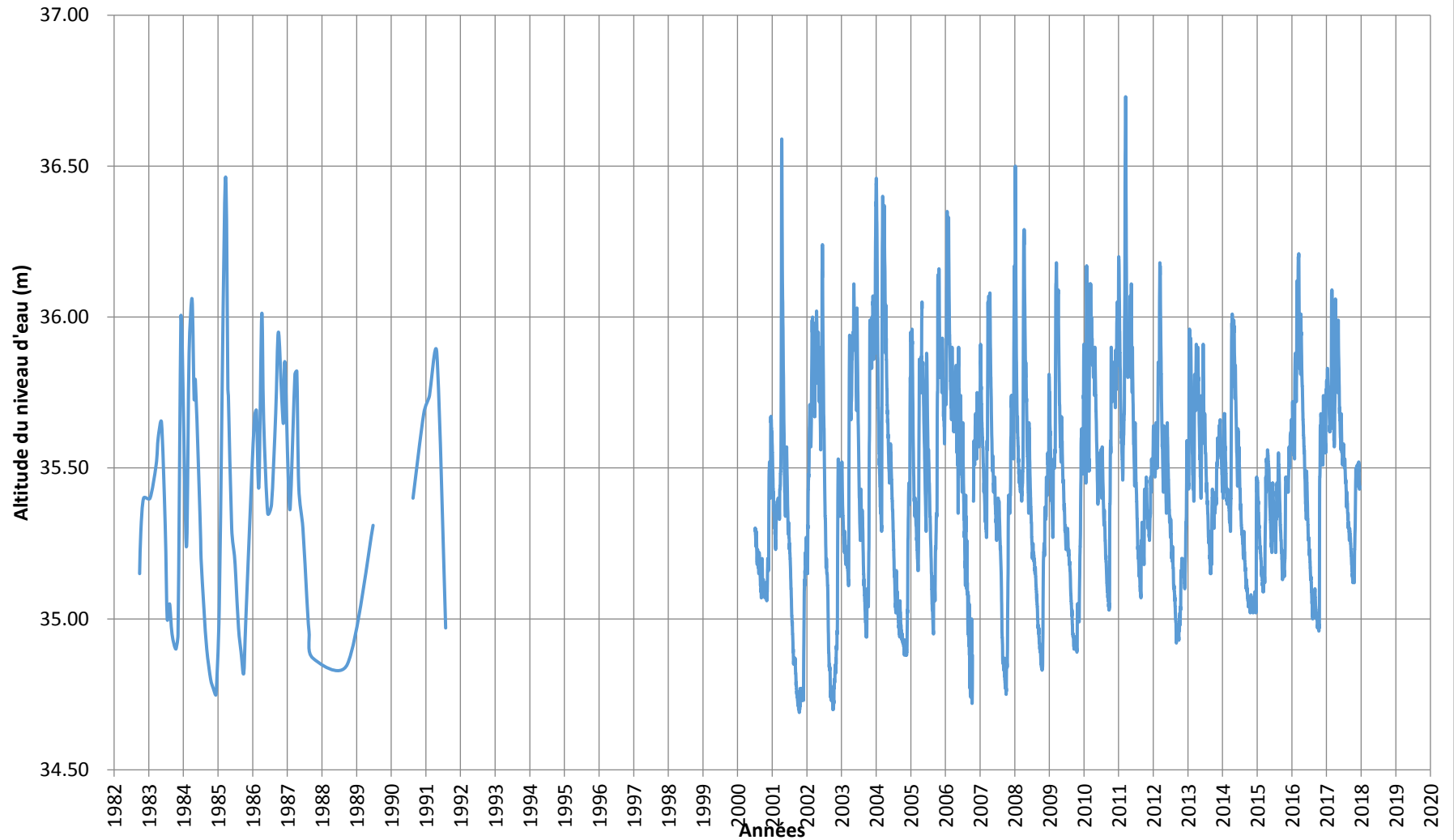
Altitude du sol de 39.85 (Géodésique)

Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques



Municipalité : Sainte-Martine

Piézomètre : 03097191

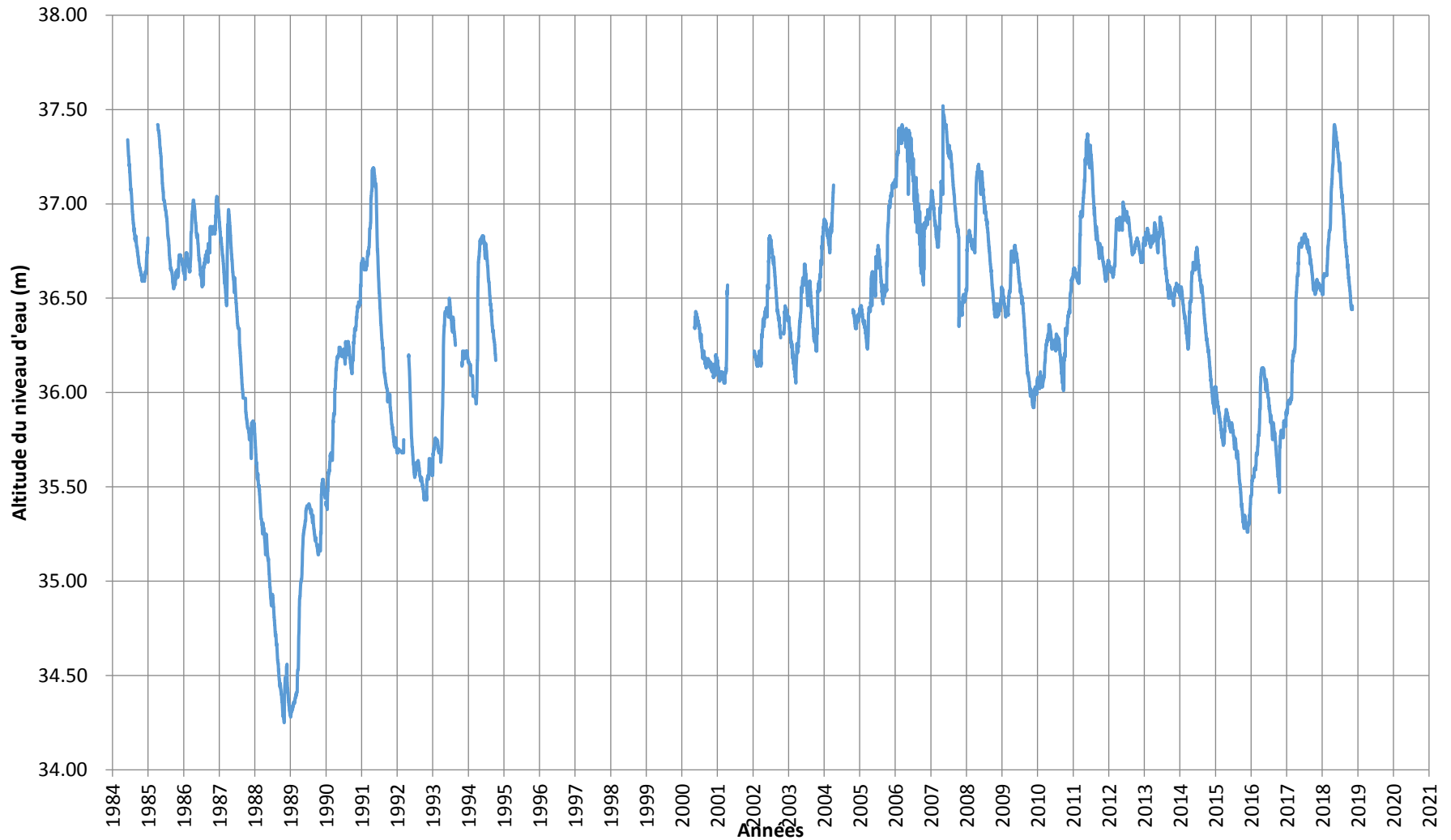


Altitude du sol de 38.59 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Municipalité : Mercier
Piézomètre : 03097201



Altitude du sol de 39.83 (Géodésique)

**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**



Annexe 4. Site de prélèvement d'eau souterraine et d'eau de surface dans la région
d'étude

ID	Clé	Latitude	Longitude	Nom du site	Type	Volume d'eau (m³/j)	Usage
5	X0010018-6	45.27725	-73.62220	Système d'appr. Saint-Rémi	Eau souterraine	V >= 379	prod. eau potable
6	X0010018-4	45.26615	-73.63215	Système d'appr. Saint-Rémi	Eau souterraine	75 <= V < 379	prod. eau potable
7	X0010018-3	45.26032	-73.61302	Système d'appr. Saint-Rémi	Eau souterraine	75 <= V < 379	prod. eau potable
8	X0010018-2	45.25798	-73.61378	Système d'appr. Saint-Rémi	Eau souterraine	75 <= V < 379	prod. eau potable
9	X0010018-1	45.26130	-73.62271	Système d'appr. Saint-Rémi	Eau souterraine	75 <= V < 379	prod. eau potable
10	X0010018-5	45.27336	-73.61980	Système d'appr. Saint-Rémi	Eau souterraine	75 <= V < 379	prod. eau potable
39	X2031079-1	45.24758	-73.59320	Système d'appr. d'eau potable Club de golf Triangle D'Or	Eau souterraine	75 <= V < 379	prod. eau potable
53	X2054450-1	45.24491	-73.57676	Système d'appr. en eau potable Garderie Saint-Michel	Eau souterraine	V < 75	prod. eau potable
67	X2118068-1	45.30011	-73.66169	Système d'appr. sans traitement Cabane sucre La Branche	Eau souterraine	V < 75	prod. eau potable
78	X2157458-1	45.27725	-73.62220	Système d'appr. avec traitement Saint-Rémi (puits P-13)	Eau souterraine	V >= 379	prod. eau potable
93	X0009089-1	45.30082	-73.68298	Station de purification Paroisse de Saint-Isidore	Eau souterraine	V >= 379	prod. eau potable
94	X0009089-2	45.30055	-73.68310	Station de purification Paroisse de Saint-Isidore	Eau souterraine	Inconnu	prod. eau potable
95	X0009089-3	45.30226	-73.68294	Station de purification Paroisse de Saint-Isidore	Eau souterraine	V >= 379	prod. eau potable
97	X2011796-1	45.25453	-73.80442	Les Aliments Dare limitée	Eau de surface	V < 75	industrie
146	53287769-1	45.34168	-73.63717	Sintra inc. (Usine de béton bitumineux)	Eau de surface	V >= 379	industrie
149	13545736-1	45.29249	-73.72753	Sablières Mercier inc. P-248, P249	Eau de surface	75 <= V < 379	sablière
162	X1606630-1	45.24307	-73.65458	Les Fermes Lefort inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
163	X1606630-5	45.24536	-73.65886	Les Fermes Lefort inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
164	X1606630-2	45.23863	-73.66219	Les Fermes Lefort inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
165	X1606630-3	45.24145	-73.66994	Les Fermes Lefort inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
166	X1606630-4	45.24617	-73.67811	Les Fermes Lefort inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
168	16252454-1	45.25503	-73.60375	Saladexpress inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	industrie
172	X2077252-3	45.27623	-73.59167	Daniel St-Pierre	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
173	X2077252-2	45.26128	-73.60173	Daniel St-Pierre	Eau souterraine	V < 75	lieu d'épandage
174	90227208-2	45.28394	-73.73350	UTES de Ville Mercier	Eau souterraine	V >= 379	industrie
175	90227208-1	45.28400	-73.73392	UTES de Ville Mercier	Eau souterraine	V >= 379	industrie
176	90227208-3	45.28403	-73.73444	UTES de Ville Mercier	Eau souterraine	V >= 379	industrie
181	12646352-7	45.23105	-73.69036	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
182	12646352-8	45.24809	-73.68736	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
183	12646352-3	45.24294	-73.69356	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	V >= 379	lac artificiel
184	12646352-6	45.23674	-73.70136	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
185	12646352-10	45.23958	-73.70093	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
186	12646352-5	45.23863	-73.70123	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
187	12646352-11	45.23921	-73.70163	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
188	12646352-4	45.24159	-73.70103	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	V >= 379	lac artificiel
189	12646352-9	45.24316	-73.70620	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	75 <= V < 379	lac artificiel
190	12646352-2	45.25348	-73.69930	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	V >= 379	lac artificiel
191	12646352-12	45.25359	-73.70009	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	V >= 379	lac artificiel
192	12646352-1	45.25362	-73.70280	Guinois & Frères Ltée	Eau souterraine	V >= 379	lac artificiel
194	X2075614-1	45.24611	-73.59389	Club de Golf Triangle d'or inc.	Eau de surface	V >= 379	golf
210	X1604595-5	45.29279	-73.63956	Ferme L.M. Bourdeau inc.	Eau souterraine	V >= 379	lieu d'élevage
216	X2046064-1	45.28677	-73.63467	Marian Vinet	Eau souterraine	V < 75	lieu d'épandage
221	X2160692-8	45.27680	-73.64240	Les Jardins Vinet (Entrepôt)	Eau souterraine	Inconnu	commerce
222	X2160692-4	45.27660	-73.64260	Les Jardins Vinet (Entrepôt)	Eau souterraine	V < 75	commerce
235	X2029126-1	45.20435	-73.63959	Le Maraîcher A. Barbeau & Fils inc.	Eau de surface	Inconnu	lieu d'épandage
236	X2175799-4	45.29325	-73.73683	Lot 143-Ville de Mercier	Eau souterraine	V < 75	sans usage précis
237	X2175799-3	45.29414	-73.73706	Lot 143-Ville de Mercier	Eau souterraine	V < 75	sans usage précis
238	X2175799-2	45.29306	-73.73806	Lot 143-Ville de Mercier	Eau souterraine	V < 75	sans usage précis
239	X2175799-5	45.29324	-73.73858	Lot 143-Ville de Mercier	Eau souterraine	V < 75	sans usage précis
240	X2175799-1	45.29383	-73.74075	Lot 143-Ville de Mercier	Eau souterraine	V < 75	sans usage précis
243	X1604628-18	45.30023	-73.66209	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
244	X1604628-17	45.30396	-73.67547	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
245	X1604628-16	45.30400	-73.67668	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
246	X1604628-15	45.30396	-73.67715	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
248	X1604628-14	45.32816	-73.66482	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
249	X1604628-12	45.31390	-73.66925	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
250	X1604628-11	45.31643	-73.67046	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
251	X1604628-9	45.30588	-73.67936	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
252	X1604628-10	45.30460	-73.68059	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
253	X1604628-8	45.30731	-73.68428	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage

ID	Clé	Latitude	Longitude	Nom du site	Type	Volume d'eau (m³/j)	Usage
254	X1604628-7	45.30834	-73.69162	Les Maraîchers Bec Sucré inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'élevage
260	X2019683-6	45.24830	-73.67561	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
261	X2019683-7	45.24513	-73.69344	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
262	X2019683-9	45.25422	-73.68765	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
263	X2019683-8	45.25380	-73.68945	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
264	X2019683-3	45.25586	-73.66810	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
265	X2019683-4	45.25555	-73.66959	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
266	X2019683-5	45.25591	-73.67065	Les Terre Jolytom inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
267	90430190-1	45.25720	-73.79620	Bonduelle Canada inc. (Sainte-Martine)	Eau souterraine	V < 75	industrie
288	X2142298-1	45.34168	-73.63717	Sintra inc (Carrière Saint-Isidore-de-la-Prairie)	Eau de surface	V < 75	carrière
292	X2005944-1	45.24764	-73.80919	Forage MSE inc.	Eau souterraine	V < 75	commerce
293	52584463-1	45.25720	-73.79620	Bonduelle Amerique du Nord	Eau souterraine	V < 75	exp. forestière
297	21514252-28	45.29753	-73.62572	Les jardins Paul Cousineau & Fils inc.	Eau souterraine	Inconnu	lieu d'épandage
336	90541194-1	45.34835	-73.69645	Béton Mercier	Eau souterraine	75 <= V < 379	industrie
337	X2010361-2	45.26289	-73.58525	Camping du Domaine Ensoleillé	Eau souterraine	Inconnu	terrain camping
338	X2010361-1	45.26392	-73.58992	Camping du Domaine Ensoleillé	Eau souterraine	Inconnu	terrain camping
339	X2065889-6	45.22592	-73.60634	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
340	X2065889-8	45.23789	-73.60550	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
341	X2065889-7	45.23868	-73.61029	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
342	X2065889-5	45.23146	-73.62163	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
343	X2065889-10	45.24345	-73.62888	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
344	X2065889-12	45.25100	-73.63361	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
345	X2065889-9	45.24804	-73.64110	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
346	X2065889-11	45.25541	-73.65870	Simon Martin et Guylaine Trudeau	Eau de surface	V >= 379	lieu d'élevage
356	X1600729-4	45.27302	-73.62308	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
357	X1600729-3	45.27290	-73.62332	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
358	X1600729-5	45.27728	-73.63015	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
359	X1600729-10	45.28685	-73.63467	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
360	X1600729-9	45.29080	-73.64733	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
361	X1600729-8	45.29065	-73.64885	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
362	X1600729-7	45.28845	-73.65218	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
363	X1600729-6	45.28808	-73.65320	Ferme Guy Lefrançois et Fils inc.	Eau souterraine	75 <= V < 379	lieu d'épandage
365	53711719-3	45.28700	-73.73012	Clean Harbors Mercier inc.	Eau souterraine	V >= 379	incinérateur
366	53711719-2	45.28746	-73.73164	Clean Harbors Mercier inc.	Eau souterraine	V < 75	incinérateur

Annexe 2

Rapport d'avancement 2020 du Projet UTES-
II de Ville Mercier, juin 2020

Rapport d'avancement 2020 du Projet UTES-II de Ville Mercier

Soumis par

Maxime Claprood, ing., Ph.D., Associé de recherche
Thomas Béraud, Doctorant
Erwan Gloaguen, Ph.D., Professeur
Richard Martel, Ph.D., Professeur

30 juin 2020



Institut national
de la recherche
scientifique

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des Figures	II
1. Introduction.....	1
1.1. Mandat.....	2
1.2. Chronologie du projet.....	2
2. Base de données	4
3. Modélisation des horizons sismiques.....	4
4. Modèle conceptuel hydrostratigraphique final	8
4.1. Définition de modèle conceptuel.....	8
4.2. Contexte général et limites du domaine d'études.....	9
4.3. Contexte géologique.....	10
4.4. Contexte hydrogéologique	12
4.5. Définition des unités hydrostratigraphiques au site des anciennes lagunes	13
4.6. Données utilisées dans le modèle hydrostratigraphique conceptuel	14
4.7. Mise en carte des unités dans la zone d'étude.....	15
4.8. Représentation 3D des unités dans le modèle régional	24
5. Maquette numérique 3D du site.....	26
5.1. Simulations géostatistiques des unités hydrostratigraphiques	26
5.2. Simulations géostatistiques d'hydrofaciès	30
5.3. Simulations géostatistiques des propriétés hydrauliques	31
6. Conclusion	33
6.1. Compilation et structuration des données	33
6.2. Mise à jour du modèle conceptuel hydrostratigraphique	33
6.3. Élaboration d'une maquette numérique 3D du site.....	34
6.4. Échéancier et prochaines étapes.....	34
7. Références.....	37

Liste des Figures

Figure 1. Coupe schématique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).	1
Figure 2. Étendue des travaux de sismique 2D par MBMS Solutions 2018-2019. Lignes vertes : toutes les lignes sismiques ; polygone blanc : étendue des surfaces 2D interpolées à partir des horizons sismiques. Les Ligne 4 (rouge), Ligne 8 (rose), Ligne 70 (cyan) sont présentées à la Figure 4 et Figure 5. Les carrés jaunes sont les puits de l'UTES-I. Les carrés rouges sont les puits forés lors des travaux de terrain complémentaires par Technorem en 2020.....	5
Figure 3. Horizons sismiques (Sismique_S3 (cyan), Sismique_S2 (jaune), Sismique_S1 (orange) et Sismique_S0_P (rouge) pointés sur toutes les lignes sismiques au site de Ville Mercier.	6
Figure 4. Ligne 4 et Ligne 8 du levé sismique en ondes S avec les 4 horizons pointés : Sismique_S3 (cyan), Sismique_S2 (jaune), Sismique_S1 (orange) et Sismique_S0 (rouge).	6
Figure 5. Ligne 70 du levé sismique en ondes S et Ligne 8 du levé sismique en ondes P avec les horizons associés au roc : Sismique_S0 sur Ligne 70 et Sismique_P sur Ligne 8.	7
Figure 6. Surface interpolée de l'épaisseur-temps (gauche) et krigée de l'épaisseur (droite) de l'unité géologique Argile_2. Les lignes vertes, rouge, et rose sont les lignes sismiques. Les sphères sont les points de contrôle des épaisseurs estimées aux puits.	8
Figure 7. Surface interpolée de l'épaisseur-temps (gauche) et krigée de l'épaisseur (droite) de l'unité géologique EskerSG_3. Les lignes vertes, rouge, et rose sont les lignes sismiques. Les sphères sont les points de contrôle des épaisseurs estimées aux puits.	8
Figure 8. Surface topographique de la zone d'étude avec données disponibles et les limites du modèle conceptuel. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limite et lignes sismiques de MBMS (traits blancs) ; réseau hydrographique (traits bleus) ; site lagunes de Ville Mercier (trait rose) ; puits MELCC et privés utilisés pour la modélisation (étoiles noires) ; puits SIH (points jaunes) ; puits de surveillance de l'UTES (carrés roses) ; puits du réseau de suivi MELCC (carrés oranges).....	10
Figure 9. Carte géologique de la région d'étude (modifié de Tremblay, 2008).	11
Figure 10. Schéma du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier (Lefebvre, 2007).	12
Figure 11. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier représentant les unités géologiques et l'écoulement de l'eau souterraine (Lefebvre, 2007).	12
Figure 12. Carte topographique krigée de l'élévation régionale du roc. Limites modèle hydro-stratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (carrés rouges) ; puits SIH (points jaunes) ; limites du modèle de Pontlevoy (polygone bleu) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).	17

Figure 13. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Till_4. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés verts) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).....	19
Figure 14. Carte des épaisseurs krigées de l'unité EskerSG_3. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites du modèle sismique (polygone blanc) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés jaunes) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où le Till_4 affleure à la surface (points verts).....	21
Figure 15. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Argile_2. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites du modèle sismique (polygone blanc) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés rouges) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où l'unité EskerSG_3 (points jaunes) et l'unité Till_4 (points verts) affleurent à la surface.....	23
Figure 16. Carte des épaisseurs de l'unité Remblai_Organique_1. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).	24
Figure 17. Vue en perspective de la distribution 3D des unités hydrostratigraphiques dans le modèle conceptuel régional. Vue régionale est bâtie avec une exagération verticale de 50, tandis que la vue locale est bâtie avec une exagération verticale de 20. La carte de fond est la géologie de surface, avec le réseau hydrographique. Le modèle géologique local du MELCC sur le site des lagunes de Ville Mercier, modèle local provenant du MELCC.....	25
Figure 18. Vue en perspective de la distribution 3D des unités hydrostratigraphiques au niveau de l'UTES, avec une exagération verticale de 5. La carte de fond est la géologie de surface, le réseau hydrographique est en bleu, et le réseau routier est en rouge. Les puits de l'UTES PW-113, PW-112, et PW-111 sont présentés en blanc et noir de gauche à droite, respectivement.	25
Figure 19. Courbe de proportions de faciès verticale globale pour l'ensemble des puits du modèle de Mercier. L'échelle des profondeurs en ordonnée est une échelle relative au modèle numérique.....	27
Figure 20. Courbes de Proportions Verticales (VPC) calculées à partir des puits dans la région de Mercier.....	28
Figure 21. Courbes de proportions 3D dans l'ensemble du modèle.....	29
Figure 22. Règles de lithologie appliquées entre les différentes géologies utilisée pour les simulations plurigaussiennes à Mercier.	30
Figure 23. Données de conductivité hydraulique au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Sphères jaunes : données de K dans l'esker ; sphères rouges : données de K dans le roc ; points roses : données de K dans une autre unité ; carrés jaunes : puits de pompage de l'UTES ; carrés rouges : puits de Technorem 2020.	32

Figure 24. Estimation de la conductivité hydraulique dans l'esker. a) Interpolation par krigeage, b à d) Trois réalisations équiprobables par simulations gaussiennes séquentielles.....	33
--	----

1. Introduction

Le 19 mars 2018, le gouvernement du Québec a annoncé la construction d'une nouvelle usine en vue d'optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier. Dans le cadre de cet engagement gouvernemental, le ministère de l'Environnement et Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) désire établir une base de données apte à produire une définition détaillée du contexte géologique et hydrogéologique du secteur de Mercier, tout particulièrement du site des anciennes lagunes. Cette base de données doit être suffisamment précise pour l'élaboration d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale, c'est-à-dire couvrant le site des anciennes lagunes de Mercier et ses environs immédiats, et à l'échelle régionale, c'est-à-dire couvrant partiellement le territoire des municipalités de Mercier, de Saint-Isidore et de Sainte-Martine.

Le site des anciennes lagunes de Mercier est affecté par un mélange de nombreux contaminants constitué de liquides immiscibles légers (LIL) et denses (LID) à la suite de l'utilisation d'une ancienne sablière se trouvant dans un esker comme lieu d'entreposage d'huiles usées. Au site, une partie des LID s'est écoulée dans les sables et graviers de l'esker (aquifère granulaire local) d'une profondeur allant jusqu'à 30 m et au moins jusqu'à 15 m plus bas dans le roc fracturé sous-jacent à l'esker (aquifère rocheux régional). Afin de limiter l'écoulement des contaminants plus en aval, un système de pompage et une usine de traitement des eaux souterraines (UTES) sont en fonction au site depuis 1984. Le rôle de ce système de pompage est de contenir de façon hydraulique l'eau souterraine contaminée (panache) s'écoulant au travers des zones sources de LIL et de LID qui se situent en amont hydraulique des puits de pompage, à l'intérieur de l'esker et du till au droit du site, et plus en aval dans le roc fracturé. La Figure 1 présente en coupe un modèle conceptuel schématisé du contexte hydrogéologique et de l'état de la contamination au site.

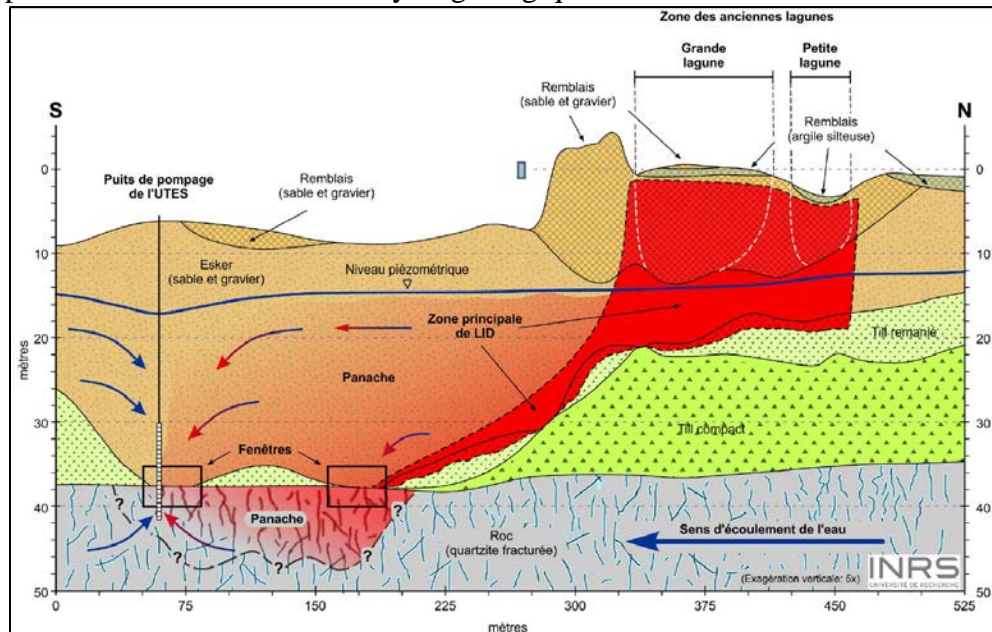


Figure 1. Coupe schématisique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).

1.1. Mandat

Le présent mandat du projet est décrit comme suit :

Site des anciennes lagunes de Ville Mercier : soutien technique pour l'élaboration du plan de caractérisation complémentaire du site et conception d'un modèle d'écoulement pour soutenir la conception d'un nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES-2).

Plus spécifiquement, le mandat couvre les tâches suivantes :

- 1. Compiler et structurer les données existantes ;**
- 2. Élaborer un modèle conceptuel du contexte hydrogéologique du site des anciennes lagunes ;**
3. Conseiller le MELCC sur l'élaboration d'un plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et de la région, puis sur sa mise en œuvre ;
- 4. Ajouter les données recueillies lors de la caractérisation complémentaire à la base de données et mettre à jour le modèle conceptuel ;**
- 5. Élaborer des scénarios équiprobables (maquette numérique 3D du site) représentant la variabilité et l'incertitude des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique, porosité...) en dehors des points de mesures, mais semblables au modèle conceptuel ;**
6. Concevoir un modèle d'écoulement hydrogéologique à l'échelle locale et régionale apte à répondre aux besoins décrits précédemment ;
7. Appliquer le modèle d'écoulement à trois scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier.

L'objectif du présent rapport est de résumer l'avancement du projet depuis le rapport d'avancement précédent (Béraud et coll., 2019) qui discutait du modèle hydrogéologique conceptuel de Ville Mercier. Spécifiquement, le présent rapport apportera une mise à jour sur les tâches 1, 2, 4, et 5 surlignées en gras ci-dessus.

1.2. Chronologie du projet

- 19 mars 2018 :
Le gouvernement du Québec annonce la construction d'une nouvelle usine pour optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier.
- 26 juillet 2018 :
L'INRS présente la proposition de recherche : *Conception du modèle d'écoulement pour la mise en place du nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES 2) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier.*
- 7 janvier 2019 :
Signature du contrat entre le MELCC et l'INRS, dont le mandat est décrit à la Section 1.1.

- 21 janvier 2019 :
Réunion de démarrage entre les représentants du MELCC et de l'INRS-ETE.
- 26 février 2019 :
Réunion pour discuter du plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et commencer la planification de la campagne de terrain 2019 (tâche 3 du mandat décrit à la Section 1.1).
- 30 mai 2019 :
Réunion pour préciser les besoins de caractérisation complémentaire, afin de finaliser l'appel d'offre pour la supervision des travaux de terrain. Il a été conclu que les travaux de terrain consisteront en :
 - La réalisation de 7 forages roto-sonique dans les dépôts meubles avec prélèvement d'échantillons.
 - La réalisation de 7 forages dans les dépôts meubles avec l'aménagement de 7 puits d'observation sans massif-filtrant sur 30 mètres.
 - La réalisation de 3 forages verticaux au roc avec l'aménagement de puits d'observation ouvert au roc sur 50 mètres.
 - La réalisation de 2 forages au roc inclinés de 25° par rapport à la verticale avec l'aménagement de puits d'observation ouvert au roc sur 30 mètres.
- 24 juillet 2019 :
Soumission de la version finale du Rapport d'avancement du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier
- 15 novembre 2019 :
Visite sur le site de Ville Mercier pour répondre aux questions des soumissionnaires pour les travaux de terrain de caractérisation complémentaire
- 12 février 2020 :
Réception du plan de travail final de Technorem pour la réalisation des travaux de terrain de caractérisation complémentaire
- Février 2020 :
Début des travaux de terrain (forages et aménagement de puits) pour la caractérisation complémentaire par Technorem
- 13 mars 2020 :
Pandémie, le Québec sur pause !
- Mars 2020 :
Mise sur pause des travaux de terrain complémentaires par Technorem pour le printemps 2020. Données disponibles pour l'INRS :
 - position souhaitée par l'INRS, l'arpentage final des puits devrait être complété en juin ou juillet 2020 ;
 - descriptions de forage quotidiennes préliminaires, le rapport final de Technorem n'est pas disponible en date du rapport.
- Mai 2020 :
Réunion de démarrage pour la campagne de diagraphies par l'Université Laval. Les travaux de terrain doivent commencer en juillet 2020.

2. Base de données

Toutes les données de puits sont intégrées dans un format de base de données qui a initialement été mise en place pour les projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Québec. L'intégration des données propres au site des anciennes lagunes de Ville Mercier dans cette base de données permet de faire une assurance-qualité et un contrôle-qualité (Qa/Qc) sur les données selon les standards normalisés préalablement établis. La base de données en format PostgreSQL, fournie au MELCC et mise à jour en date de ce rapport, est basée sur le modèle de base de données de l'Open Geospatial Consortium (OGC).

Deux étapes ont été effectuées jusqu'à présent. La première étape fut la création du schéma logique (expliqué dans le rapport précédent) et la construction physique de la base de données. Ce dernier point implique la création des schémas, le tablespaces, des tables, des clés primaires et secondaires ainsi que les vues. Ici l'utilisation du logiciel « Enterprise Architect » est très intéressante, car il permet de créer le schéma logique de la base de données et d'exporter le tout en schéma physique. Les fonctions et déclencheurs (trigger) sont quant à eux créés dans un contexte plus spécifique pour rendre la base de données plus dynamique et flexible. Ce dernier point est un travail en continu qui vient enrichir la base de données pour la maintenance et la sécurité en plus de répondre au besoin spécifique des utilisateurs, comme mentionné plus haut. Le processus de création d'une base de données n'est jamais final, il y a toujours des modifications à y apporter afin qu'elle puisse répondre le mieux possible aux attentes des utilisateurs, cela entre dans le domaine de l'entretien.

La deuxième étape fut la recherche et mise en forme des données que nous avons reçues du ministère. Un programme java a été créé afin d'accélérer la recherche des données et est en développement continu. La localisation des différents puits a été entrée dans la base de données et une première mise en forme des données stratigraphiques a été complétée. Les bibliothèques ont été constituées et les tables ont été remplies avec les vocables spécifiques au domaine. Il est important de noter que cette base de données est continuellement mise à jour afin de permettre l'intégration des nouvelles données.

3. Modélisation des horizons sismiques

Une campagne d'acquisition de données de sismique réflexion 2D a été effectuée à l'automne 2018 et l'hiver 2019 sur le site des anciennes lagunes de Ville Mercier (Figure 2).



Figure 2. Étendue des travaux de sismique 2D par MBMS Solutions 2018-2019. Lignes vertes : toutes les lignes sismiques ; polygone blanc : étendue des surfaces 2D interpolées à partir des horizons sismiques. Les Ligne 4 (rouge), Ligne 8 (rose), Ligne 70 (cyan) sont présentées à la Figure 4 et Figure 5. Les carrés jaunes sont les puits de l'UTES-I. Les carrés rouges sont les puits forés lors des travaux de terrain complémentaires par Technorem en 2020.

Les objectifs de cette campagne sismique était de :

- améliorer la connaissance de la topographie du roc sur la zone d'intérêt ;
- améliorer la connaissance de la stratigraphie sur la zone d'intérêt ;
- mieux définir la géométrie des sédiments contrôlant les processus hydrodynamiques et ;
- acquérir des nouvelles connaissances sur la topographie du roc à l'échelle régionale.

Les données ont été traitées, interprétées et sont utilisées pour interpoler la continuité des horizons hydrostratigraphiques entre les données de forage. La séquence de traitement pour convertir les données brutes en données traitées utilisables pour l'interprétation inclut :

- l'assignation à la géométrie ;
- le rehaussement du signal par une série de filtres (passe-bande avant et après sommation) et de gains (AGC), et ;
- sommation avec une vitesse de sommation vitesse simple (entre 160 m/s et 200 m/s) pour la conversion temps-profondeur.

Les levés ont été conduits avec une source à impacts et des géophones omnidirectionnels. Cette géométrie d'acquisition permet de faire le traitement et l'interprétation des ondes de cisaillement (ondes S) et des ondes de compression (ondes P). Les ondes S ont une vitesse de propagation sismique plus lente et permettent de faire une meilleure caractérisation des différentes unités présentes au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les ondes P, ont une vitesse de propagation plus élevée et sont plus énergétiques que les ondes S. Elles sont donc moins sensibles à la géologie de proche surface et de résolution plus faible mais permettent cependant de d'imager des structures plus profondes, comme l'interface entre les unités granulaires et l'unité de roc.

La Figure 3 montre les horizons sismiques pointés sur toutes les lignes sismiques qui serviront de points de contrôle pour l'interpolation des cartes des épaisseurs des horizons en deux dimensions (2D).

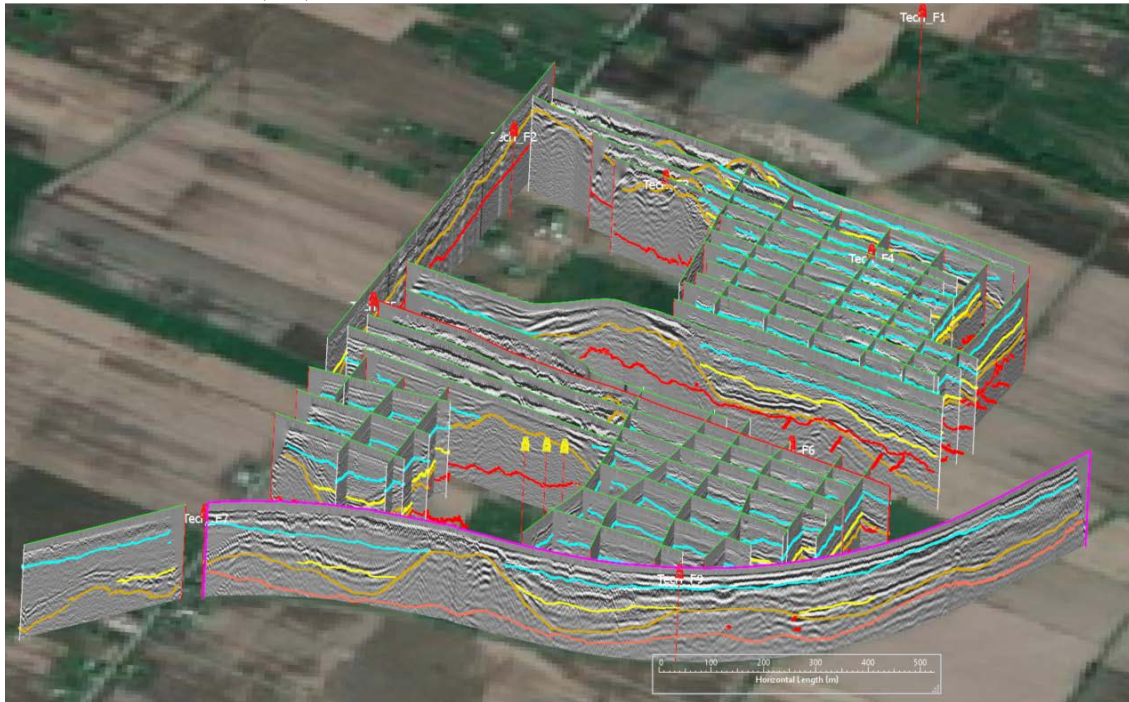


Figure 3. Horizons sismiques (Sismique_S3 (cyan), Sismique_S2 (jaune), Sismique_S1 (orange) et Sismique_SO_P (rouge) pointés sur toutes les lignes sismiques au site de Ville Mercier.

La Figure 4 et la Figure 5 montrent les horizons sismiques pointés sur les levés en ondes S et en ondes P sur quelques lignes sismiques.

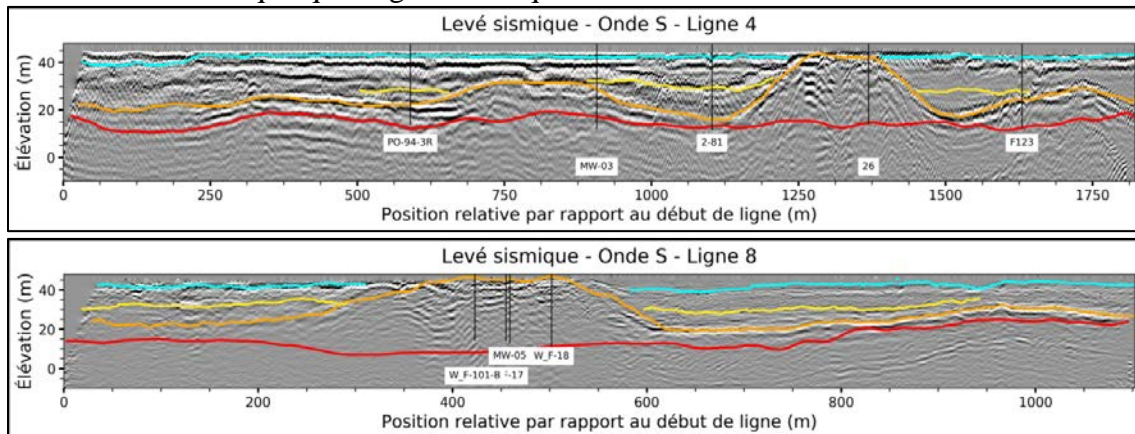


Figure 4. Ligne 4 et Ligne 8 du levé sismique en ondes S avec les 4 horizons pointés : Sismique_S3 (cyan), Sismique_S2 (jaune), Sismique_S1 (orange) et Sismique_SO_P (rouge).

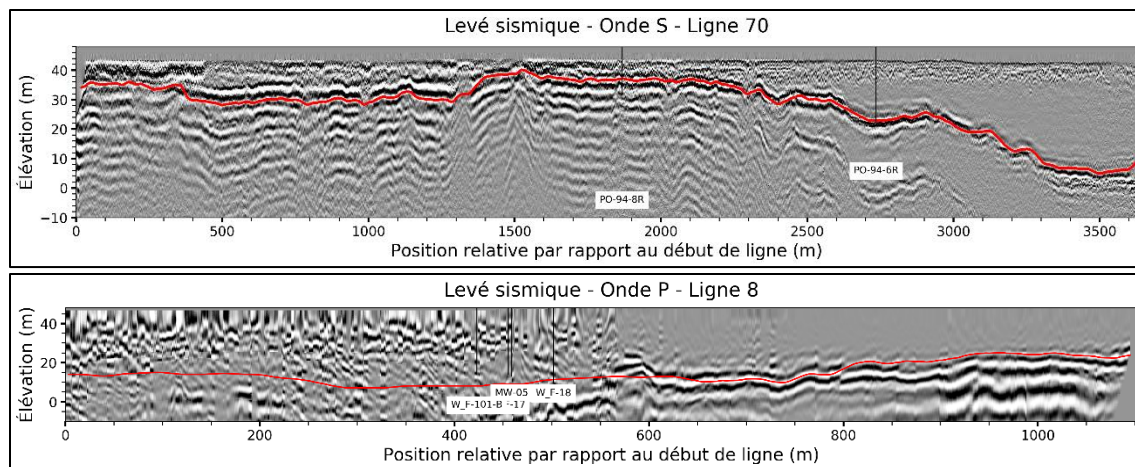


Figure 5. Ligne 70 du levé sismique en ondes S et Ligne 8 du levé sismique en ondes P avec les horizons associés au roc : Sismique_S0 sur Ligne 70 et Sismique_P sur Ligne 8.

De façon similaire à la méthodologie utilisée par Claprod et coll. (2012), les horizons sismiques pointés dans le domaine du temps sur les levés sismiques ont été utilisés pour guider les interpolations des épaisseurs des différentes unités stratigraphiques par krigeage avec dérive externe. Les étapes suivantes ont été suivies pour cartographier les épaisseurs des unités à partir des levés sismiques :

1. Mise en carte 2D des horizons sismiques en temps-double, par interpolation des horizons sismiques par DSI (discrete smooth interpolator de Gocad) pour avoir des surfaces 2D des horizons sismiques sur une grille régulière de 10m d'espacement.
2. Calcul des épaisseurs-temps entre tous les horizons sismiques.
3. Évaluation des épaisseurs-temps pour les horizons hydrostratigraphiques Argile_2 et EskerSG_3, en faisant correspondre les horizons sismiques aux unités hydrostratigraphiques. L'unité Argile_2 correspond à l'épaisseur-temps entre l'horizon sismique S3 et le plus haut horizon sismique entre S1 et S2. De façon similaire, l'unité EskerSG_3 correspond à l'épaisseur-temps entre le plus haut horizon entre S1 et S2 et l'horizon sismique S0_P.
4. Krigeage avec dérive externe pour estimer les épaisseurs (m) des horizons Argile_2 (Figure 6) et EskerSG_3 (Figure 7) à partir des marqueurs aux puits et des épaisseurs-temps sismiques.

Les épaisseurs krigées pour les unités Argile_2 et EskerSG_3 serviront de points de contrôle pour établir les tendances régionales des épaisseurs des unités hydrostratigraphiques pendant la construction du modèle conceptuel final (Section 4).

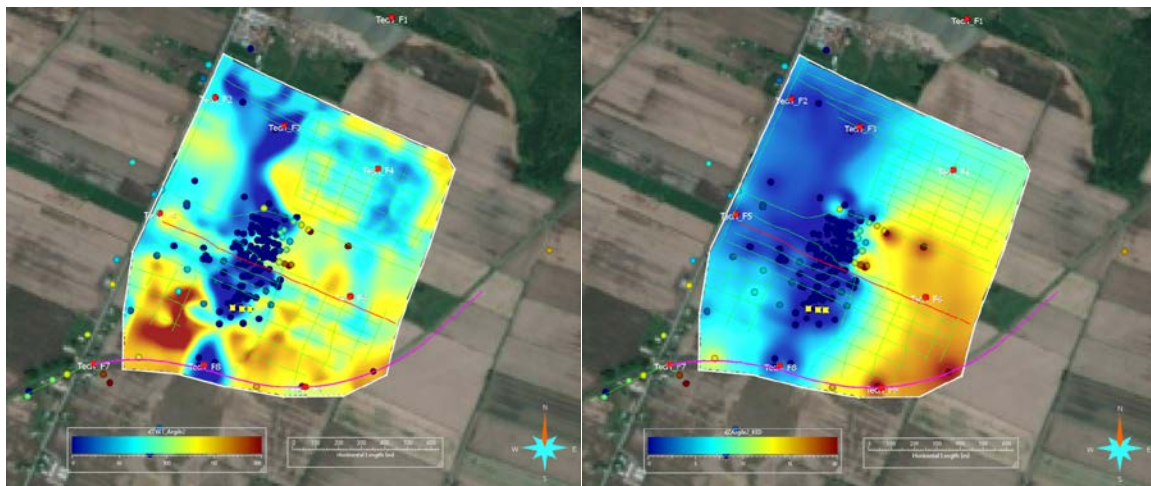


Figure 6. Surface interpolée de l'épaisseur-temps (gauche) et krigée de l'épaisseur (droite) de l'unité géologique Argile_2. Les lignes vertes, rouge, et rose sont les lignes sismiques. Les sphères sont les points de contrôle des épaisseurs estimées aux puits.

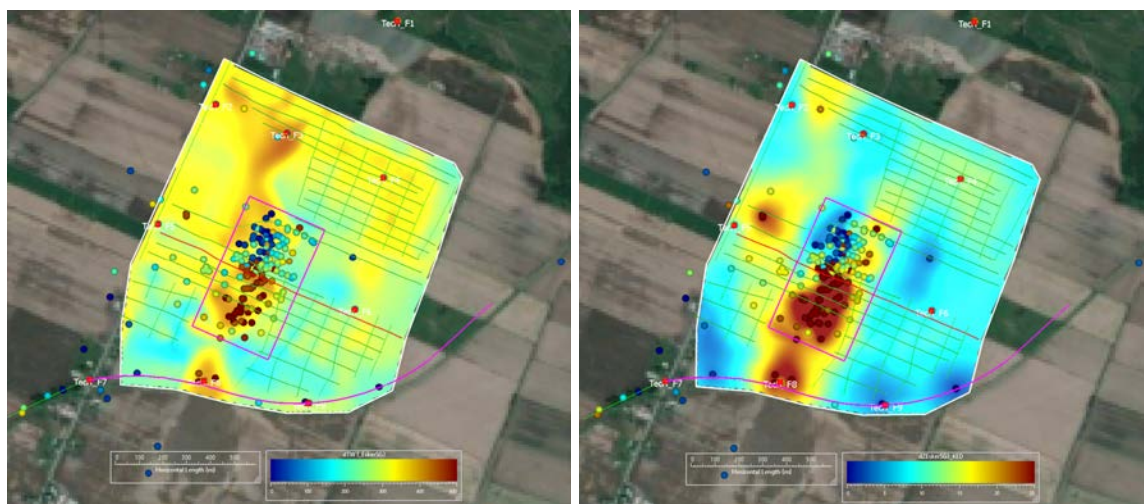


Figure 7. Surface interpolée de l'épaisseur-temps (gauche) et krigée de l'épaisseur (droite) de l'unité géologique EskerSG_3. Les lignes vertes, rouge, et rose sont les lignes sismiques. Les sphères sont les points de contrôle des épaisseurs estimées aux puits.

4. Modèle conceptuel hydrostratigraphique final

4.1. Définition de modèle conceptuel

L'INRS-ETE définit un modèle conceptuel hydrostratigraphique comme étant la représentation numérique des éléments physiographiques, hydrologiques, géologiques et hydrogéologiques de la région à l'étude. La construction de ce modèle conceptuel permet de mettre en format numérique notre connaissance du site afin de faciliter l'intégration des données provenant de sources diverses. Le modèle conceptuel est principalement construit dans le logiciel SKUA-GOCAD™ (Paradigm, faisant maintenant partie d'Emerson), avec l'aide du logiciel Q-GIS et de scripts python afin d'aider au positionnement spatial et la mise en carte des différentes données. Le modèle conceptuel numérique sera ensuite transféré dans le logiciel FEFLOW (Mike Powered by DHI), qui sera utilisé pour la

modélisation de l'écoulement des eaux souterraines autour des anciennes lagunes de Ville Mercier.

4.2. Contexte général et limites du domaine d'études

Les anciennes lagunes de Ville Mercier (encadré rose de la Figure 8) reposent sur un système aquifère constitué de roc fracturé recouvert par deux unités successives de till. Des sables et graviers d'origine fluvioglaciaire déposés par-dessus les tills constituent un deuxième aquifère superficiel de type esker, faisant quelques centaines de mètres de largeur et quelques kilomètres de longueur.

Bien que le site des anciennes lagunes de Ville Mercier ne fasse que quelques centaines de mètres de longueur, il faut penser intégrer tous les éléments régionaux pouvant influencer l'écoulement des eaux souterraines. Il est préférable de bâtir un modèle hydrostratigraphique englobant les limites du modèle hydrogéologique afin d'éviter des effets de bord lors du transfert de données de SKUA-GOCAD à FEFLOW.

La limite Ouest du modèle hydrogéologique est la Rivière Châteauguay qui draine la majorité des eaux de surface de la région, et qui est en contact hydraulique avec l'aquifère du roc fracturé au coin sud-ouest du modèle. La limite Nord du modèle est la limite du bassin versant de la Rivière Châteauguay, tandis que la limite Sud est la Rivière des Fèves. La limite Est du modèle est la ligne approximative de partage des eaux selon les élévations du roc. La limite supérieure du modèle est la surface topographique, tandis que la limite inférieure du modèle est fixée à 25 mètres sous le niveau moyen des mers (-25 masl), afin de pouvoir représenter une certaine épaisseur de roc fracturé. Les limites du modèle hydrostratigraphique incluent toutes les limites du modèle hydrogéologique.

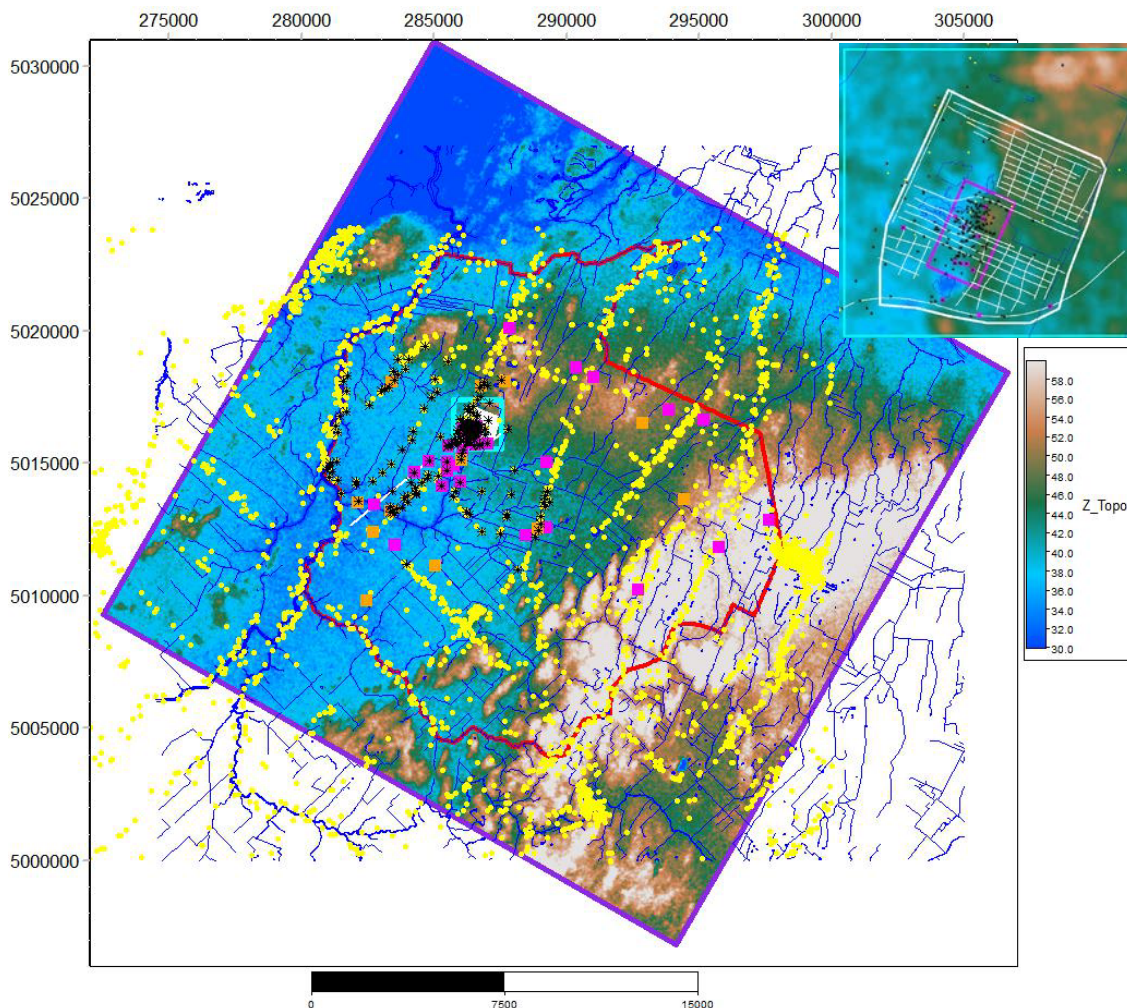


Figure 8. Surface topographique de la zone d'étude avec données disponibles et les limites du modèle conceptuel. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve); limite modèle hydrogéologique (polygone rouge); limite et lignes sismiques de MBMS (traits blancs); réseau hydrographique (traits bleus); site lagunes de Ville Mercier (trait rose); puits MELCC et privés utilisés pour la modélisation (étoiles noires); puits SIH (points jaunes); puits de surveillance de l'UTES (carrés roses); puits du réseau de suivi MELCC (carrés oranges).

4.3. Contexte géologique

Reprenant le contexte géologique décrit dans Lefebvre (2007), on retrouve dans la région de ville Mercier un socle rocheux fracturé recouvert par des dépôts meubles provenant du dernier épisode glaciaire ayant touché l'ensemble du Québec. Le socle rocheux est ainsi recouvert par une couche de till formé par l'abrasion des glaciers sur le socle rocheux. Ce till est un matériel peu perméable constitué de sédiments fins, mais contenant aussi des blocs. Lors du retrait des glaces, de grands volumes d'eau de fonte se sont écoulés à la base des glaciers et ont laissé par endroits de longs cordons de sable et gravier qui constituent des eskers. La mise en place des eskers a érodé le till par endroits, mettant ainsi directement en contact le sable et le gravier de l'esker avec le socle rocheux sous-jacent. Le retrait des glaces a été suivi par l'envahissement du territoire par la mer de Champlain. Les sédiments fins amenés dans cette mer par les cours d'eau ont recouvert le fond de la mer. On retrouve

donc maintenant une couche d'argile marine recouvrant la surface des régions basses. Cette argile recouvre partiellement l'esker de Mercier, mais elle est absente des collines à l'est de la région et sur le site des lagunes (Figure 9).

La géologie de surface sur le domaine de modélisation comprend surtout les argiles marines de la Mer de Champlain (Ma et Mb sur la Figure 9), et les tills (T) provenant de l'érosion du socle rocheux par les glaciers. On y remarque également la présence de l'esker (Gs et Gx), affleurant au droit du site UTES de Mercier.

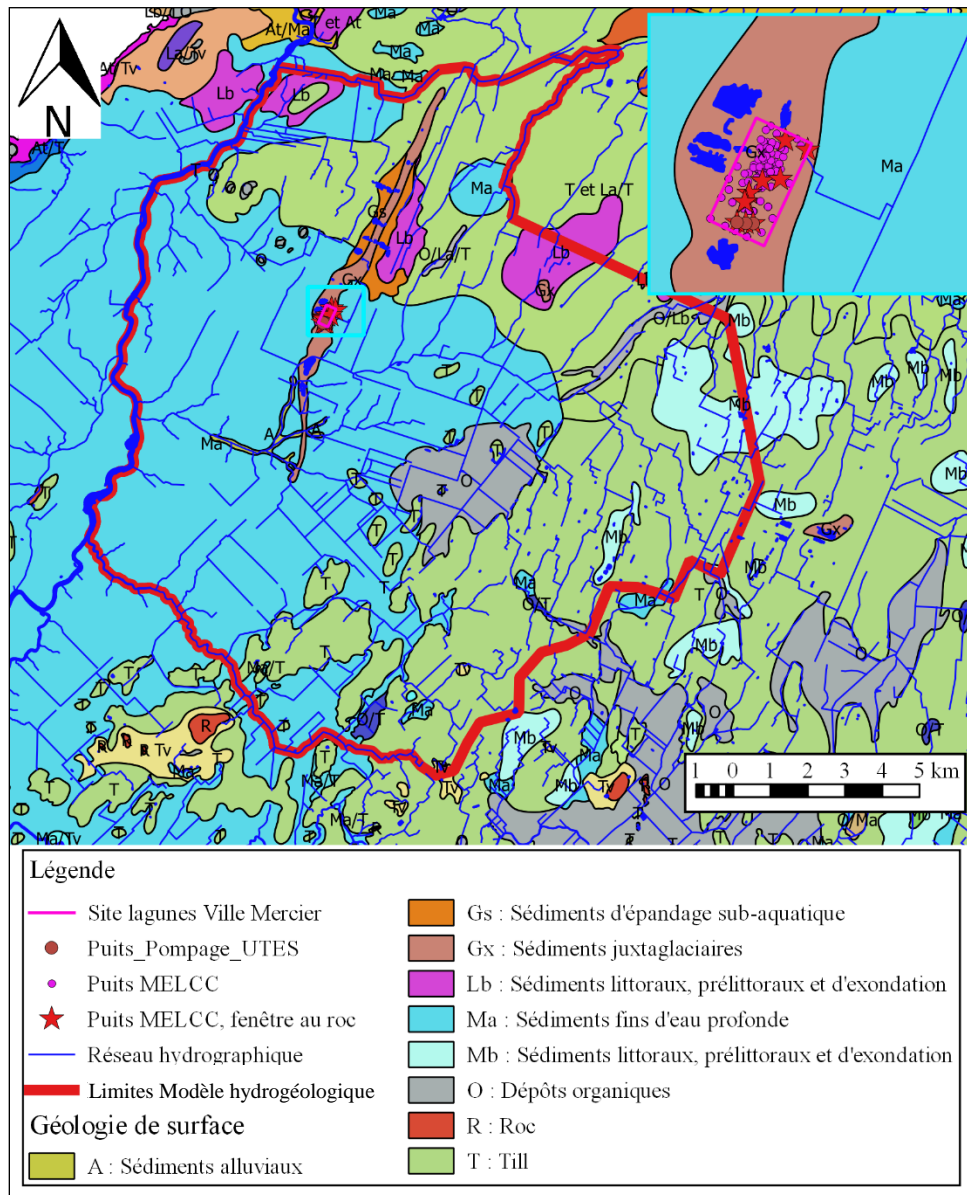


Figure 9. Carte géologique de la région d'étude (modifié de Tremblay, 2008).

4.4. Contexte hydrogéologique

Les deux schémas des Figure 10 et Figure 11 résument le contexte hydrogéologique aux alentours du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, expliquant le contexte régional géologique et son impact pour l'écoulement des eaux souterraines.

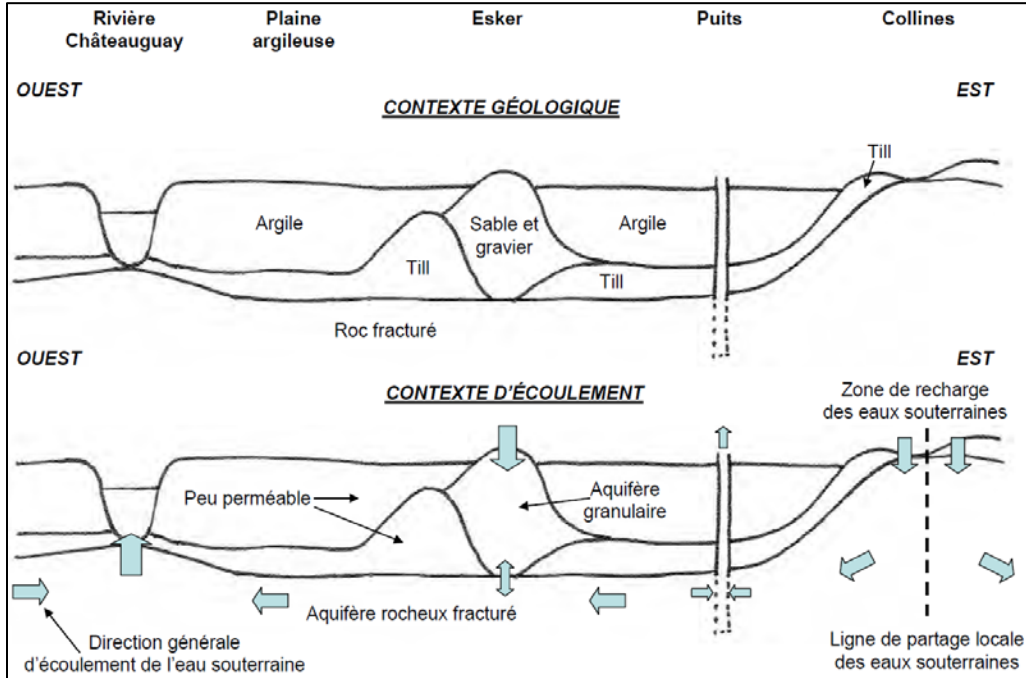


Figure 10. Schéma du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier (Lefebvre, 2007).

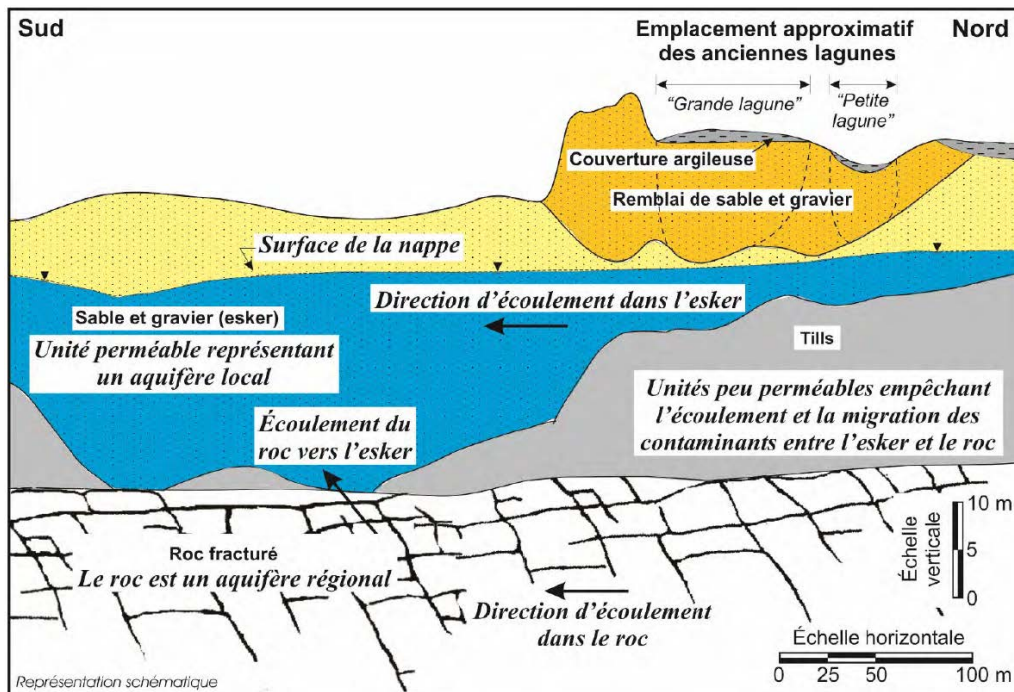


Figure 11. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier représentant les unités géologiques et l'écoulement de l'eau souterraine (Lefebvre, 2007).

4.5. Définition des unités hydrostratigraphiques au site des anciennes lagunes

La description des formations géologiques est un résumé du rapport d'avancement précédent (Béraud et coll. 2019). Les données de puits fournies par le MELCC utilisent une nomenclature locale basée sur des considérations sédimentologiques (M. Parent, comm. pers.) dont les codes ont été définis spécifiquement au site des anciennes lagunes. Des données provenant de plusieurs sources ayant été compilées, des correspondances appropriées ont dû être établies afin de permettre l'intégration des données décrites avec la nomenclature locale avec des données de modèles préalablement construits et décrits avec la nomenclature provinciale provenant de la Commission Géologique du Canada (CGC). Cinq unités hydrostratigraphiques majeures sont incluses dans ce modèle, soit du bas vers le haut :

- Unité Roc_5
- Unité Till_4
- Unité EskerSG_3
- Unité Argile_2
- Unité Remblai_Organique_1

Unité Roc_5

L'unité « Roc_5 » représente le socle rocheux en place sous les dépôts meubles, constitué de roches sédimentaires d'âge Cambrien à Ordovicien (Globensky, 1986). Elle est désignée par l'unité 5 à la nomenclature locale et par l'unité R au code CGC.

Unité Till_4

L'unité « Till_4 » représente toute l'épaisseur de till présent au site de Ville Mercier. L'unité Till_4 est généralement composée d'un till inférieur ou basal (code 4B ou T) et d'un till supérieur ou remanié (code 4A ou D1). Le modèle hydrostratigraphique conceptuel ne considère qu'une seule couche, à l'intérieur de laquelle des hydrofaciès seront simulés par méthodes géostatistiques lors de la création de la maquette numérique. On appelle hydrofaciès une unité géologique ou un ensemble d'unités géologiques qui ont des propriétés hydrauliques stationnaires à l'ordre 2.

Unité EskerSG_3

De façon similaire à l'unité Till_4, toutes descriptions de sable (code S), sable et gravier (code SG) et esker (code 3) forment l'unité « EskerSG_3 ». Tous ces faciès géologiques semblables sont représentés dans une seule unité afin de pouvoir utiliser le plus grand nombre de données possibles pour compléter la modélisation de l'épaisseur de cette unité. Cette unité contient du gravier sablonneux à du sable graveleux avec des traces de silt et des quantités variables de cailloux et blocs. Une fois l'épaisseur totale de l'unité EskerSG_3 modélisée, il sera alors possible de représenter les différents hydrofaciès contenus dans l'unité EskerSG_3 en complétant plusieurs simulations stochastiques.

Unité Argile_2

L'unité « Argile_2 » est composée de l'argile silteuse (code 2B), de silt et sable argileux (2A) et de l'unité décrite par le code régional F1.

Unité Remblai_Organique_1

Tout matériel présent entre l'unité géologique la plus élevée modélisée et la surface topographique sera assigné à l'unité « Remblai_Organique_1 ». Localement, au site des anciennes lagunes de Ville Mercier, cette unité est constituée de tous les matériaux ayant servis de remblai sur le site (codes 1A et 1B). Cette unité est constituée de matériaux naturels mais contient aussi des corps étrangers non naturels indiquant que ces matériaux ont été remaniés. Régionalement, cette unité sera associée à des horizons de matériaux organiques retrouvés près de la surface à proximité d'étendues d'eau (code O).

4.6. Données utilisées dans le modèle hydrostratigraphique conceptuel

Des données provenant de plusieurs sources ont été intégrées selon le niveau de confiance dans la source de données. La source principale de données est l'élévation des marqueurs géologiques identifiés aux différents puits de forage. Les données de puits sont des données fournies par le MELCC ou extraites de travaux antérieurs (Martel et coll., 1998 ; Pontlevoy, 2004 ; Lavigne, 2006 ; Tremblay, 2008). Un contrôle de qualité a été effectué afin d'enlever les puits doublons et afin de ne garder que les puits dont les marqueurs étaient consistants avec les puits environnants. Les marqueurs géologiques identifiés à 282 puits furent ainsi conservés pour construire le modèle conceptuel, à partir desquels il était possible de calculer les épaisseurs des différentes unités hydrostratigraphiques présentes au site.

Lorsqu'un marqueur géologique était identifié comme étant « érodé », une épaisseur de 0m a été assignée pour l'unité correspondante. Cependant, plusieurs marqueurs géologiques ont été identifiés comme étant manquants; c'est-à-dire que le toit de la formation n'a pas été identifié à un puits spécifique alors que l'unité hydrostratigraphique devrait être présente à cet endroit selon les informations provenant des puits situés à proximité ou des autres sources de données. Afin d'utiliser le plus de contraintes réalistes dans le modèle, l'épaisseur calculée entre le marqueur géologique sus-jacent et sous-jacent au marqueur manquant a été calculée et divisée de façon égale entre le nombre d'unités présentes entre les marqueurs. Bien que l'épaisseur ainsi évaluée puisse ne pas correspondre à l'épaisseur réelle des unités, les avantages découlant de l'ajout de ces contraintes pour l'interpolation des unités surpassaient largement le biais qui aurait été généré si ces marqueurs n'avaient pas été considérés.

En plus des marqueurs aux puits, les données suivantes ont aussi été utilisées afin de contraindre les interpolations :

- les données extraites de modèles géologiques complétés lors d'études précédentes sur le site de lagunes de Ville Mercier :
 - un modèle géologique local de Martel et coll. (1998) représentant les principales unités stratigraphiques au site des anciennes lagunes ;
 - un modèle géologique intermédiaire (Pontlevoy, 2004) ;
 - différentes cartes d'épaisseurs des principales unités géologiques au niveau du bassin versant de la rivière Châteauguay (Lavigne, 2006; Tremblay, 2008).
- des données SIH à 2702 puits, accédées en mai 2019, afin de contraindre les profondeurs au roc.

- des données de sismique réflexion 2D complétée à l'automne 2018 et hiver 2019 par MBMS Solutions. Les données traitées, interprétées et interpolées sont utilisées pour représenter les variations d'épaisseurs des unités hydrostratigraphiques entre les données de forage.
- des données de sismique réflexion haute résolution ont été acquises par la Commission Géologique du Canada (CGC) en 2006 avec pour objectif d'identifier et de cartographier la présence d'esker enfouis (Hunter et coll., 2006 ; Tremblay et coll., 2013). Les images des lignes sismiques traitées leur interprétation permettent d'orienter la modélisation afin de respecter les conclusions obtenues.

4.7. Mise en carte des unités dans la zone d'étude

Toutes les unités hydrostratigraphiques ont été interpolées sur une grille cartésienne de dimensions 25 km x 25 km, sur des cellules de 10 m de largeur, alignées dans la direction préférentielle de l'esker principal (30° azimuth), pour un total de 6,250,000 cellules. Les limites horizontales du modèle hydrostratigraphique dépassent les limites du modèle hydrogéologique afin limiter les effets de bord lors du transfert des élévations des unités stratigraphiques au modèle hydrogéologique numérique.

Comme indiqué à la Section 4.5, cinq unités sont modélisés de façon séquentielle :

- Roc_5
- Till_4
- EskerSG_3
- Argile_2
- Remblai_Organique_1

Roc_5

Une représentation préliminaire des élévations du roc avait été présentée dans le rapport d'avancement précédent (Béraud et coll. 2019), obtenue en utilisant seulement les puits du Système d'Information Hydrogéologique (SIH) existants dans la région (2702 puits). Cette représentation préliminaire du roc a été mise à jour dans ce rapport, afin de considérer des sources de données supplémentaires pouvant contraindre la mise en carte des élévations du roc. L'interpolation des élévations du roc a été calculée par deux krigeages successifs, afin de considérer les différents niveaux d'incertitude vis-à-vis chaque source de données.

La première carte des élévations du roc considérait les puits SIH, les élévations du roc affleurant à la surface, ainsi que la surface interpolée du roc dans le modèle géologique de Pontlevoy (2004). Le variogramme permet d'exprimer la corrélation spatiale entre l'élévation du roc au niveau des points de contrôle. Il est recommandé de ne pas utiliser des données déjà interpolées dans la construction du variogramme, afin de ne pas biaiser sa structure. Le variogramme de cette première surface au roc fut donc construit à partir des puits SIH seulement. Le variogramme modélisé est composée de 3 structures permettant de représenter les variations d'élévation à plusieurs échelles, possédant une variance totale de 301.5 m² :

- Effet pépite de contribution (variance) 11.5 m². Cette contribution relativement élevée par rapport à la variance totale permet de représenter l'incertitude existant

sur les données SIH. Ce fort effet pépité démontre qu'il existe toujours une structure à plus petite échelle dans les données qui n'est pas représentée dans cette première surface krigée.

- Modèle sphérique isotrope de portée 4000 m et de contribution de 65 m² afin de représenter les variations spatiales à moyenne échelle.
- Modèle gaussien anisotrope, de portée 75 000 m dans la direction principale de 30° azimut et de portée 25 000 m dans la direction perpendiculaire, avec une contribution de 225 m².

Ce modèle de variogramme est similaire à celui déterminé à partir des données de sismique réflexion pour le projet PACES de la Montérégie-Est (Blouin et Gloaguen, 2015).

Cette surface préliminaire des élévations du roc est lissée et utilisée comme tendance régionale qui sera déformée localement pour honorer les marqueurs géologiques au roc identifiés aux données de puits les plus fiables répertoriées au droit des anciennes lagunes de Mercier, incluant les puits du MELCC (239 puits). Le krigeage bayésien, une variante du krigeage avec dérive externe où la dérive doit représenter la même variable que les données principales, est utilisée pour honorer les données d'élévation du roc aux puits en utilisant la surface préliminaire krigée comme tendance régionale. Un second variogramme a été modélisé à partir des tous ces puits, afin de représenter les variations spatiales de courtes distances, de variance totale 77 m² :

- Effet pépité de contribution (variance) 1 m². Cette contribution faible par rapport à la variance totale démontre un niveau d'ajustement très élevé à courte distance, indicatif d'un bon niveau de confiance dans les données.
- Modèle sphérique isotrope de portée 400 m et de contribution de 11 m² afin de représenter les variations spatiales à courte échelle.
- Modèle gaussien isotrope, de portée 4 000 m et de contribution 65 m², représentant les variations spatiales à moyenne échelle.

La grille finale des élévations du roc est présentée à la Figure 12 et représente la base du modèle conceptuel hydrostratigraphique.

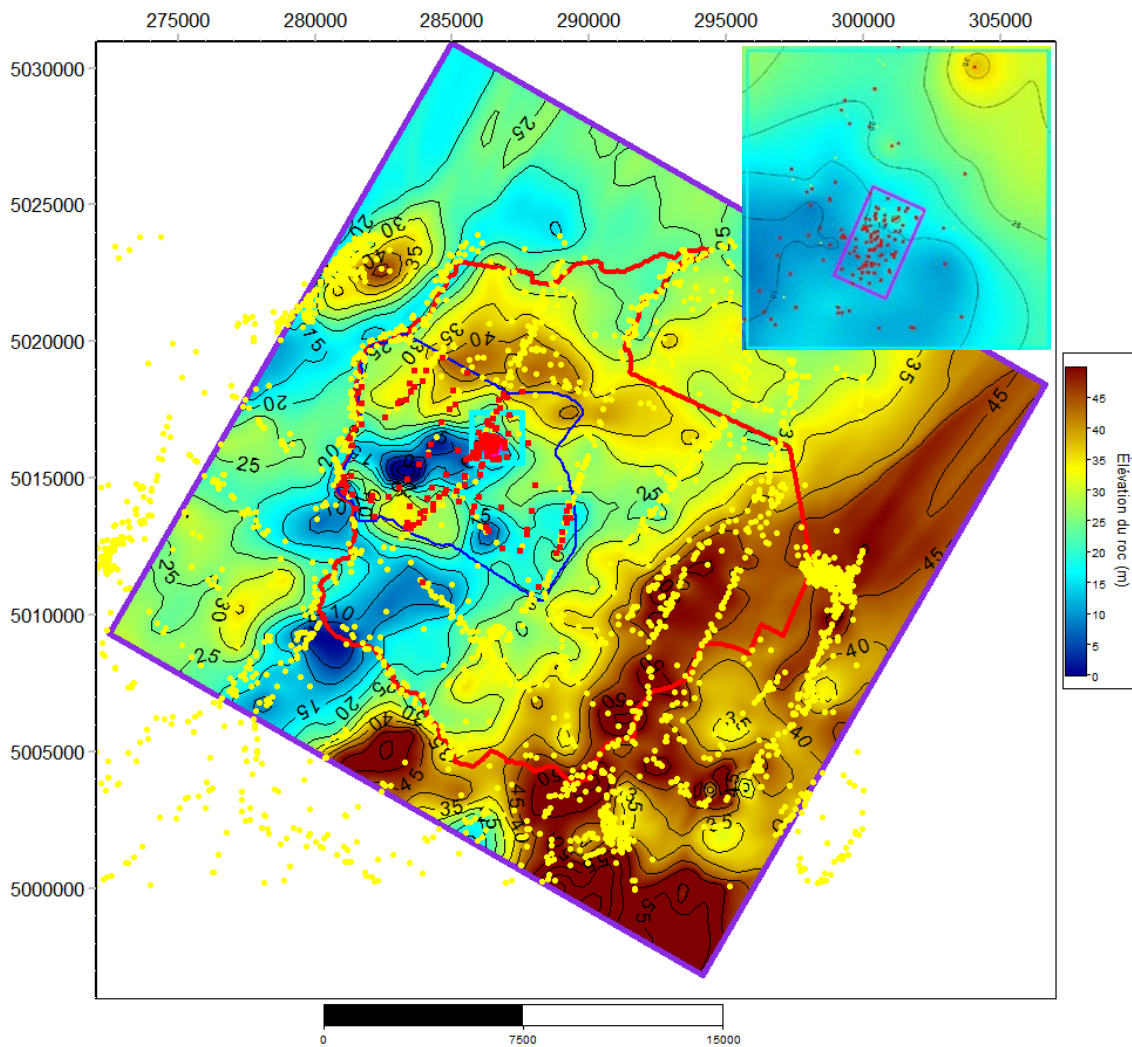


Figure 12. Carte topographique krigée de l'élévation régionale du roc. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve); limite modèle hydrogéologique (polygone rouge); marqueurs au roc des puits MELCC et privés (carrés rouges); puits SIH (points jaunes); limites du modèle de Pontlevoy (polygone bleu); limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

La Figure 12 montre que l'élévation du roc se situe entre 10 et 20 m au-dessus du niveau moyen des mers au droit du site UTES de Mercier. L'anticlinal d'Aubrey visible sur la structure du roc au nord du domaine pourrait former une ligne de partage des eaux souterraines. L'élévation maximale du roc est de plus de 50 m au-dessus du niveau moyen des mers sur une ligne de crête près de la limite est du modèle. L'élévation minimale du roc est de moins de 10 m au sud-ouest du modèle et semble coïncider avec la présence de l'esker de Mercier, qui s'est formé dans les creux du roc.

Till_4

L'unité Till_4 est l'unité possédant le moins de points de contrôle dans le modèle hydrostratigraphique régional. Son épaisseur est estimée à partir de 191 points de contrôle (marqueurs du Till_4 et du Roc_5 présents) aux puits, ainsi qu'un échantillonnage de la

carte régionale de géologie de surface, où les épaisseurs sont calculées entre les élévations du till affleurant à la surface et l'élévation du roc estimée préalablement.

L'épaisseur de l'unité Till_4 fut initialement évaluée par krigeage simple à partir de toutes les données disponibles. Le variogramme modélisé pour cette première étape est composée de 2 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 37.0 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 3.6 m^2 ;
- Modèle exponentiel isotrope de portée 9100 m et de contribution de 33.4 m^2 représentant les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface de l'épaisseur de l'unité Till_4 est lissée pour enlever certaines discontinuités et est ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité Till_4 par krigeage bayésien. Les épaisseurs de Till_4 évaluées aux puits sont utilisées pour bâtir le modèle de variogramme local et comme données dures du krigeage. Le modèle de variogramme local est composé de 2 structures, avec une variance totale de 71.9 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 0.7 m^2 .
- Modèle sphérique isotrope de portée 190 m et de contribution de 71.2 m^2 représentant les variations spatiales à l'échelle locale.

La grille finale des épaisseurs du Till_4 est présentée à la Figure 13.

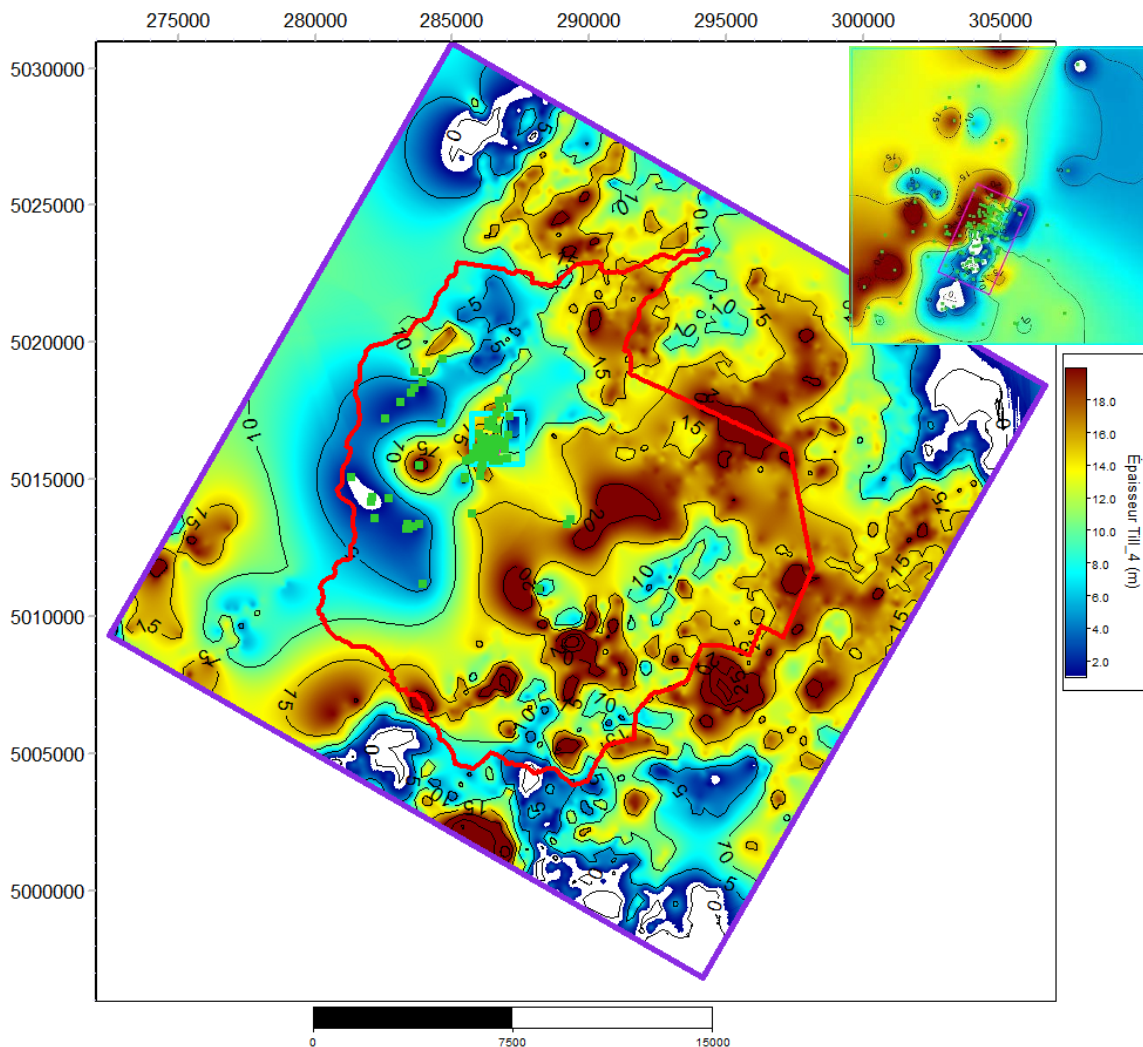


Figure 13. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Till_4. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés verts) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

La carte des épaisseurs de l'unité Till_4 (Figure 13) démontre une épaisseur variant de 0 m à 25 m, régionalement et localement au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les zones blanches démontrent les endroits où le till possède une épaisseur plus petite que 1 m, pouvant ainsi agir comme fenêtre au roc entre l'aquifère de sable et gravier de l'unité EskerSG_3 et l'aquifère du roc fracturée (Roc_5).

EskerSG_3

Comme mentionné précédemment, l'unité EskerSG_3 inclut tous les marqueurs aux puits de code « S » (sable), « SG » (sable et gravier) et « esker » (code local 3). En plus des 230 points de contrôle aux puits agissant comme données les plus fiables, l'épaisseur de l'unité EskerSG_3 est aussi estimée à partir de la carte régionale de géologie de surface (où l'esker est affleurant à la surface), et à partir des épaisseurs provenant du modèle sismique local (Figure 7). Des points de contrôle additionnels d'épaisseur EskerSG_3 nulle sont rajoutés

aux endroits où l'unité Till_4 est affleurant à la surface afin de forcer l'absence de l'unité EskerSG_3.

Comme pour l'unité Till_4, l'épaisseur de l'unité EskerSG_3 est initialement évaluée par krigeage ordinaire à partir de toutes les données disponibles, afin d'en déduire les tendances régionales. Le variogramme modélisé pour cette première étape est composée de 3 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 78.2 m^2 :

- Effet pépité de contribution (variance) 0.7 m^2 ;
- Modèle sphérique légèrement anisotrope de portée 640 m dans la direction principale des eskers (30° azimuth) et 440 m perpendiculairement, et de contribution de 33.5 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.
- Modèle gaussien très anisotrope de portée 7000 m dans la direction principale des eskers (30° azimuth) et 1250 m perpendiculairement, et de contribution de 44 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle régionalement.

Cette première surface a une apparence lisse pour enlever certaines discontinuités et afin d'être ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité EskerSG_3 par krigeage bayésien. Les épaisseurs de l'unité EskerSG_3 évaluées aux puits sont utilisées pour bâtir le modèle de variogramme local et comme données dures du krigeage final. Le modèle de variogramme local est composé de 3 structures, avec une variance totale de 123 m^2 :

- Effet pépité de contribution (variance) 1.0 m^2 ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 30 m et de contribution de 18 m^2 pour représenter les variations spatiales à très petite échelle.
- Modèle sphérique isotrope de portée 285 m et de contribution de 104 m^2 pour représenter les variations spatiales à moyenne échelle.

La carte du krigeage final des épaisseurs de l'unité EskerSG_3 est présentée à la Figure 14.

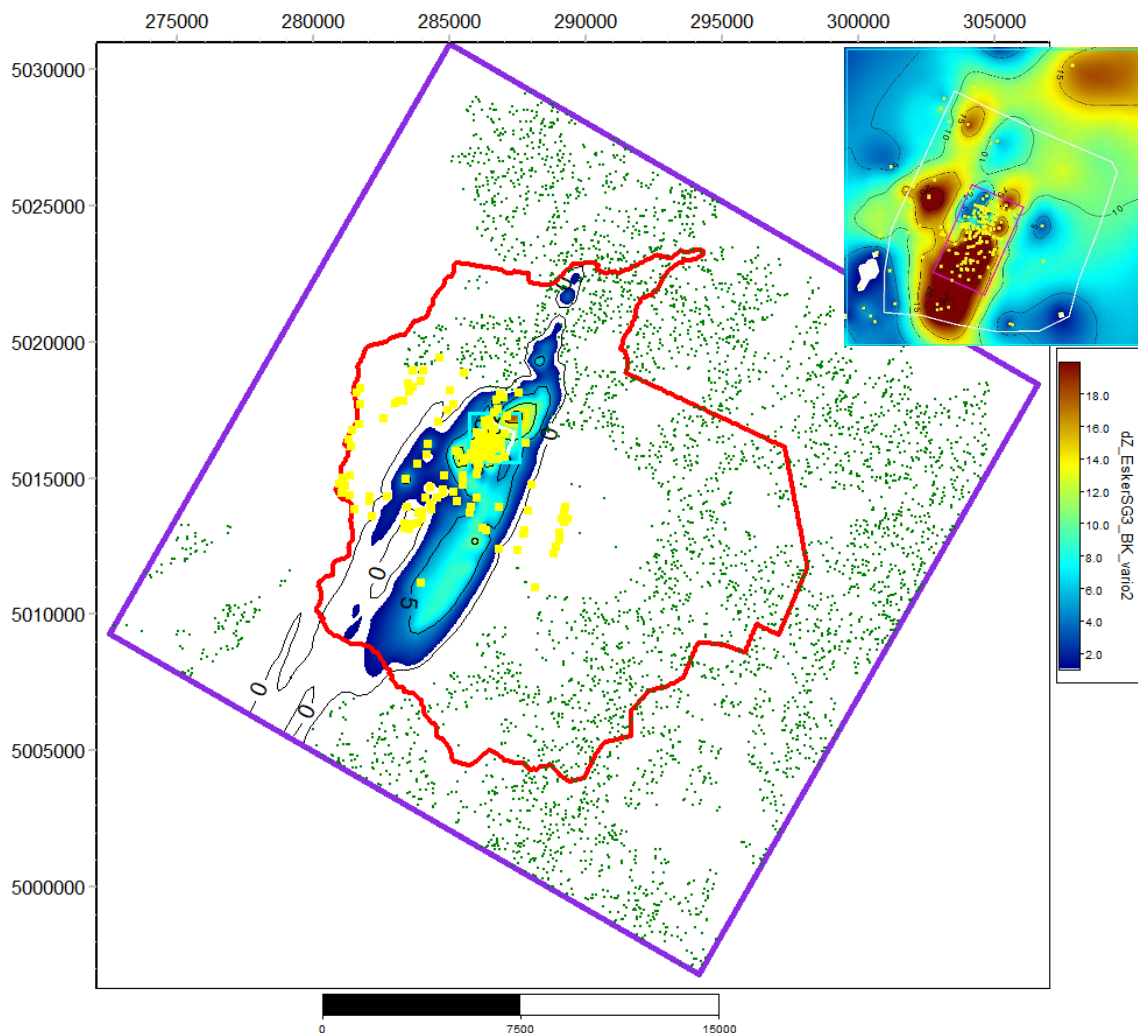


Figure 14. Carte des épaisseurs krigées de l'unité EskerSG_3. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites du modèle sismique (polygone blanc) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés jaunes) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où le Till_4 affleure à la surface (points verts).

La carte des épaisseurs de l'EsgerSG_3 de la Figure 14 démontre bien l'étendue des sables et graviers au site des anciennes lagunes de Ville Mercier, et régionalement. L'épaisseur maximale de l'unité de sable et gravier de l'EsgerSG_3 est de 25 m, à la limite sud du site des anciennes lagunes.

Argile2

En plus des 230 points de contrôle aux puits agissant comme données les plus fiables, l'épaisseur de l'unité Argile_2 est estimée à partir de la carte régionale de géologie de surface (où l'argile est affleurant à la surface), et à partir des épaisseurs provenant du modèle sismique local (Figure 6). Des points de contrôle additionnels d'épaisseur Argile_2 nulle sont rajoutés aux endroits où les unités EskerSG_3 et Till_4 sont affleurant à la surface.

L'épaisseur de l'unité Argile_2 est initialement évaluée par krigeage ordinaire à partir de toutes les données disponibles, afin d'en déduire les tendances régionales. Le variogramme modélisé pour cette première étape est composée de 3 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 44 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 4 m^2 ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 390 m et de contribution de 8 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.
- Modèle gaussien isotrope de portée 3300 m et de contribution de 32 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle régionalement.

Cette première surface est lisse pour enlever certaines discontinuités et est ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité Argile_2 par krigeage bayésien. Les épaisseurs de l'unité Argile_2 évaluées aux puits sont utilisées pour bâtir le modèle de variogramme local et comme données dures du krigeage. Le modèle de variogramme local est composé de 3 structures, avec une variance totale de 74 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 1.0 m^2 ;
- Modèle gaussien isotrope de portée 225 m et de contribution de 16 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle locale.
- Modèle gaussien isotrope de portée 1100 m et de contribution de 57 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.

La carte du krigeage final des épaisseurs de l'unité Argile_2 est présentée à la Figure 15.

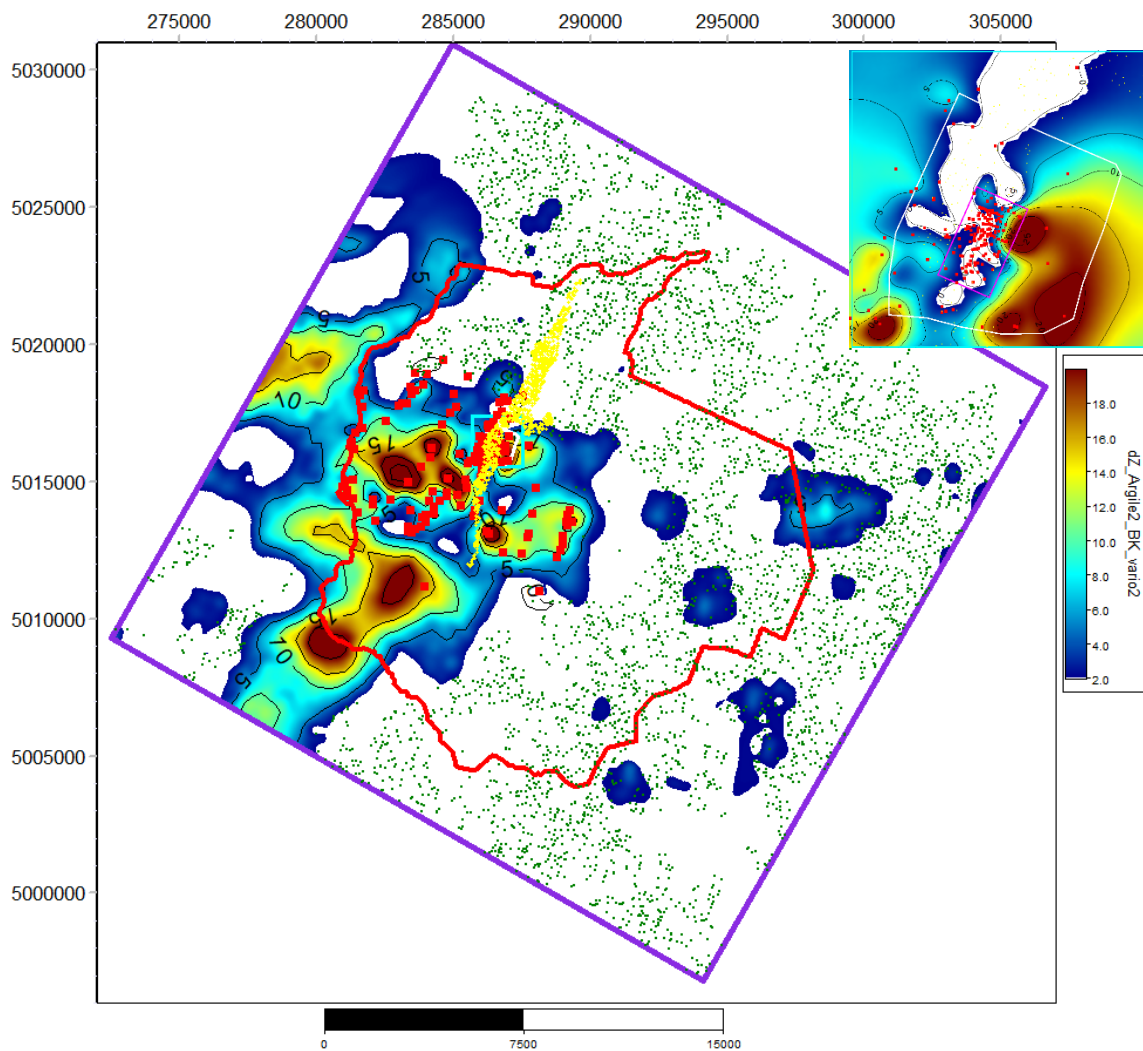


Figure 15. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Argile_2. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve); limite modèle hydrogéologique (polygone rouge); limites du modèle sismique (polygone blanc); limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose); épaisseurs évaluées aux puits (carrés rouges); points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où l'unité EskerSG_3 (points jaunes) et l'unité Till_4 (points verts) affleurent à la surface.

Bien que l'unité Argile_2 soit d'extension régionale, on voit que les argiles ne sont pas présentes en tous points du modèle. Son épaisseur maximale est de 25 m régionalement, et de 20 m sur le côté est du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. L'argile est absente sur une portion importante du site, localement, où l'esker est visible en surface.

Remblai_Organique_1

Les épaisseurs des unités hydrostratigraphiques modélisées sont ensuite additionnées à partir du roc pour être recoupés par le modèle numérique de terrain (modèle de la NASA avec une résolution de 15 ou 20m) de la région pour correspondre aux altitudes de surfaces observées sur le terrain. Les épaisseurs des dépôts de remblai ou organiques meubles (Figure 16) a été obtenue en réalisant la différence entre l'épaisseur totale (élévation du sol moins élévation du roc) et la somme des épaisseurs calculées pour les 3 unités (Argile_2,

EskerSG_3 et Till_4). La distribution de cette unité est très parcellaire et correspond bien aux zones de remblai indiquées au site des lagunes de Ville Mercier (Figure 16).

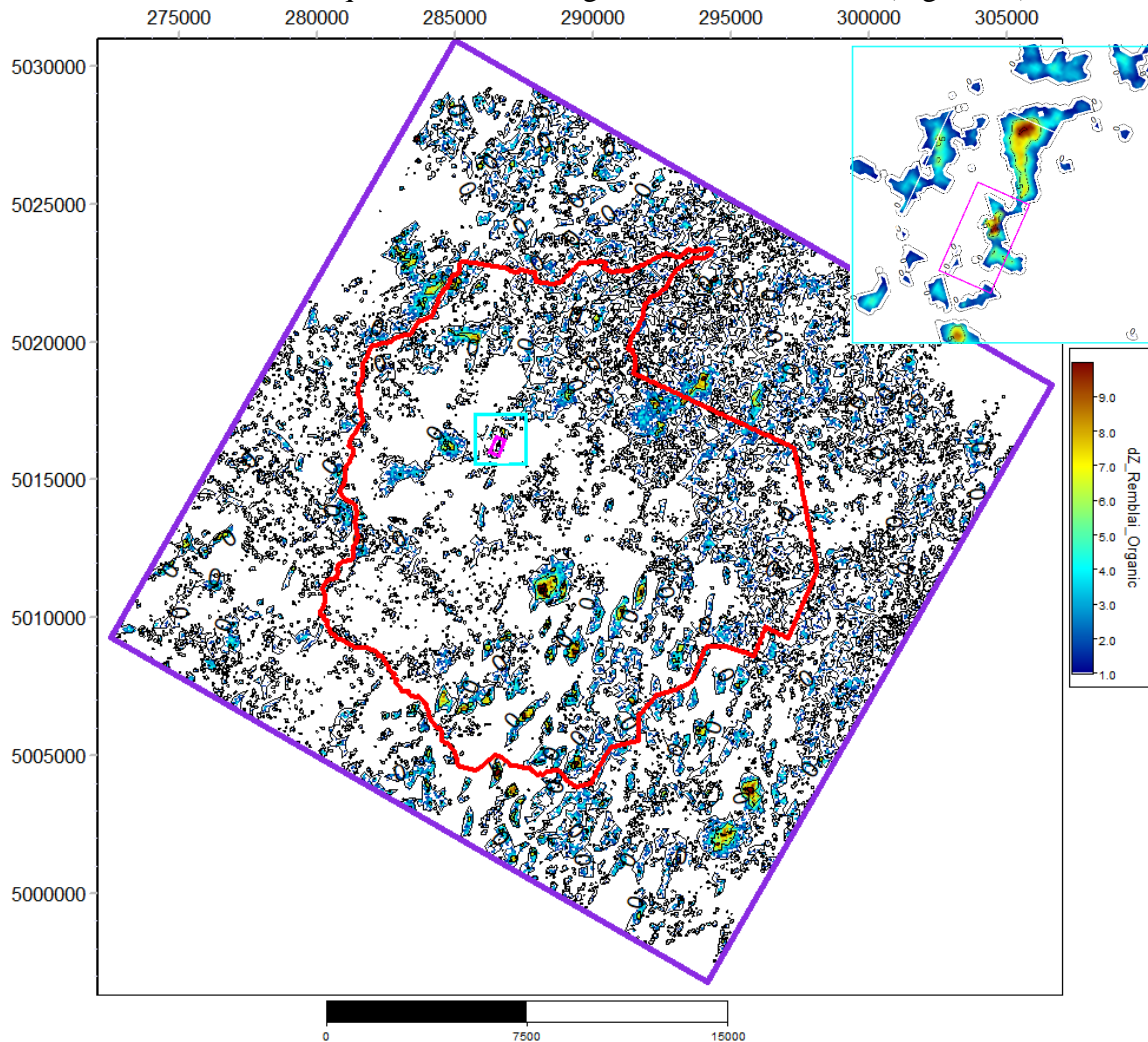


Figure 16. Carte des épaisseurs de l'unité Remblai_Organique_1. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

4.8. Représentation 3D des unités dans le modèle régional

Les cartes d'épaisseurs et des élévations krigées pour les unités hydrostratigraphiques sont combinées ensemble pour construire le modèle conceptuel régional déterministe (Figure 17 et Figure 18). Le modèle est bâti sur une grille régulière avec des cellules de taille 25m x 25m x 1m, pour un total de 85 millions de cellules. Un modèle géologique 3D fourni par le MELCC a été construit au droit du site local des anciennes lagunes de Ville Mercier, et est également présenté sur la Figure 17. On voit que le modèle régional s'accorde bien avec le modèle local fourni par le MELCC. La Figure 18 présente les variations très locales du modèle géologique 3D au niveau des puits de l'UTES.

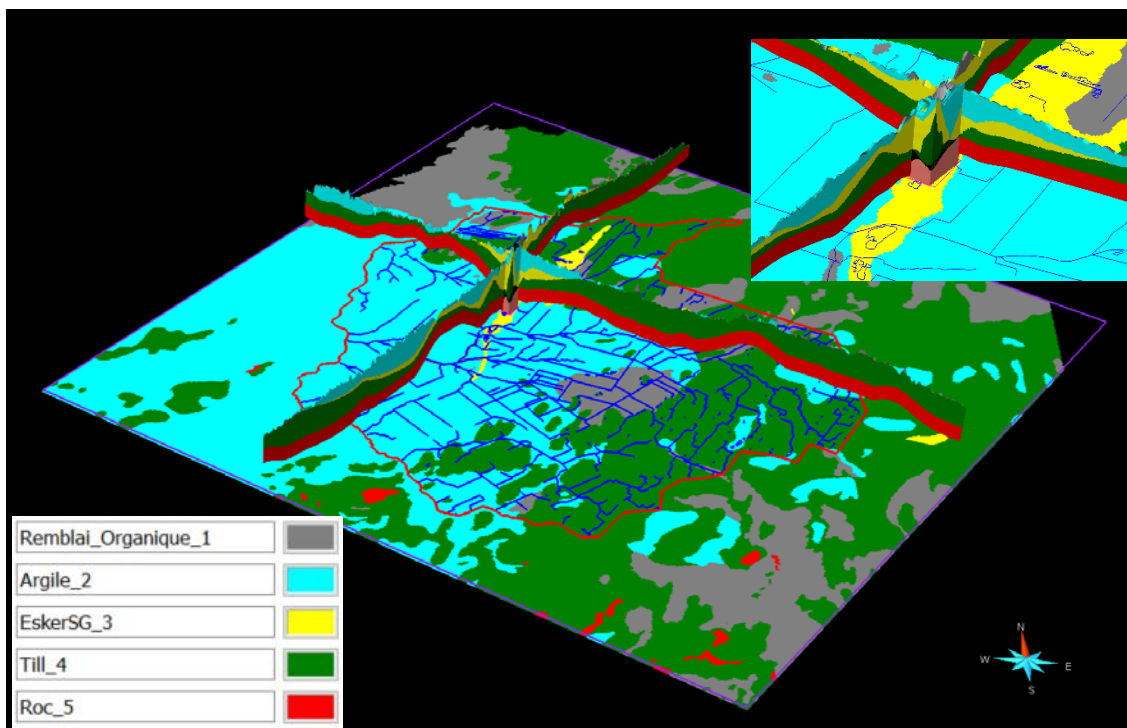


Figure 17. Vue en perspective de la distribution 3D des unités hydrostratigraphiques dans le modèle conceptuel régional. Vue régionale est bâtie avec une exagération verticale de 50, tandis que la vue locale est bâtie avec une exagération verticale de 20. La carte de fond est la géologie de surface, avec le réseau hydrographique. Le modèle géologique local du MELCC sur le site des lagunes de Ville Mercier, modèle local provenant du MELCC.

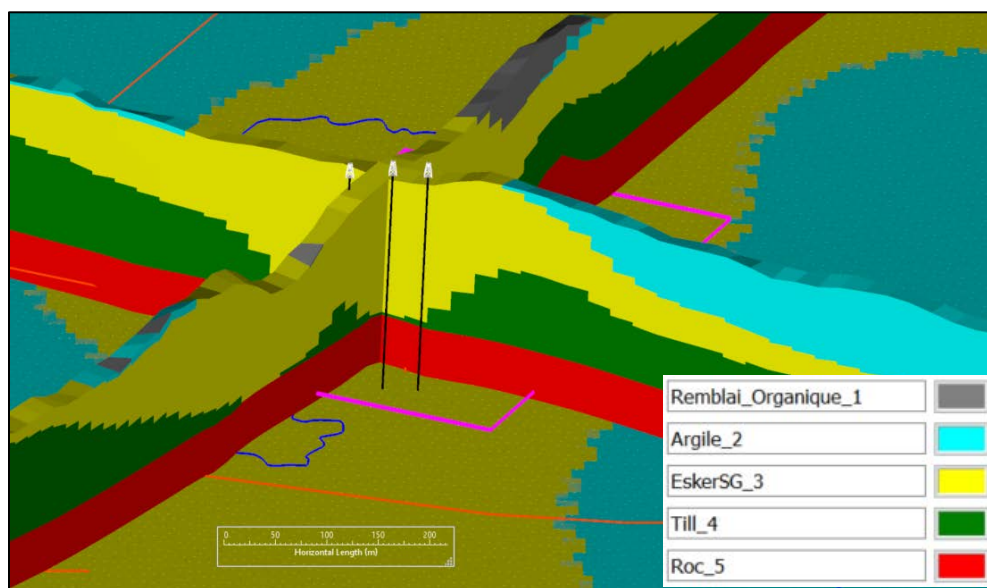


Figure 18. Vue en perspective de la distribution 3D des unités hydrostratigraphiques au niveau de l'UTES, avec une exagération verticale de 5. La carte de fond est la géologie de surface, le réseau hydrographique est en bleu, et le réseau routier est en rouge. Les puits de l'UTES PW-113, PW-112, et PW-111 sont présentés en blanc et noir de gauche à droite, respectivement.

Le modèle conceptuel régional 3D est la structure de base pour bâtir la maquette numérique 3D du site de Ville Mercier, définie comme l'ensemble des scénarios équiprobables des hydrofaciès et des propriétés hydrauliques permettant de représenter la variabilité et l'incertitude entre les points de mesure.

5. Maquette numérique 3D du site

Le modèle hydrostratigraphique présenté à la Section 4.8 et plus spécifiquement aux Figures 17 et 18, est le scénario de base qui permet de représenter autant les données de faciès (puits, sismique, géologie de surface) que les hypothèses conceptuelles émises pour la représenter les variations horizontales et verticales des principales unités hydrostratigraphiques à l'intérieur des limites de modélisation. Cependant, il ne permet pas de représenter la variabilité et l'incertitude sur la géologie loin des points de mesure. La construction d'une maquette numérique 3D du site permet de palier à ce manque, en représentant plusieurs scénarios équiprobables des :

- limites des unités hydrostratigraphiques ;
- hydrofaciès reconnus à l'intérieur de l'unité hydrostratigraphique EskerSG_3 ;
- propriétés hydrauliques dans les hydrofaciès de l'unité EskerSG_3.

La construction d'une maquette numérique est un travail itératif, qu'il faudra revisiter lorsque seront disponibles les nouvelles données provenant de la campagne de caractérisation complémentaire (marqueurs géologiques, diagraphies, essais de perméabilité multi-niveaux). La maquette numérique présentée dans ce rapport est une version préliminaire montrant le potentiel et l'importance de compléter des scénarios équiprobables pour tenir compte de l'incertitude et de la variabilité de la géologie et des paramètres hydrauliques. Le flux de travail permettant de générer les scénarios équiprobables sera prêt à intégrer les nouvelles données lorsqu'elles seront disponibles.

5.1. Simulations géostatistiques des unités hydrostratigraphiques

Les limites entre les différentes unités hydrostratigraphiques sont bien contraintes par les marqueurs géologiques aux puits et, avec une résolution moindre, par les données de sismiques réflexion. Cependant, les valeurs interpolées à distance des puits sont obtenues en fonction de contraintes « molles » donnant une valeur estimée la plus probable mais qui ne représente pas la variabilité spatiale telle que modélisée par le variogramme. Plusieurs scénarios différents peuvent être générés par méthodes de simulations géostatistiques de données catégoriques afin de préserver la vraie structure spatiale des différentes interfaces. La méthode de simulations dites des plurigaussiennes tronquées est utilisée au site des anciennes lagunes car elle est la mieux adaptée pour représenter le type de structure géologique que forme l'esker.

L'intérêt des simulations basées sur les plurigaussiennes est de reproduire la proportion dans les unités hydrostratigraphiques observées aux puits, tout en imposant une continuité entre les horizons géologiques. Les unités modélisées sont :

- Roc_5 en rouge;

- Till_4 en marron ;
- EskerSG_3 en jaune ;
- Argile_2 en vert ;
- Remblai_Organique_1 (MO_1) en bleu.

La courbe de proportion globale de la Figure 19 montre une surreprésentation du faciès de l'Esker en jaune sur la courbe, à cause du sur-échantillonnage de puits dans cette zone. La lecture de la courbe donne la proportion de rencontrer un faciès à une profondeur donnée.

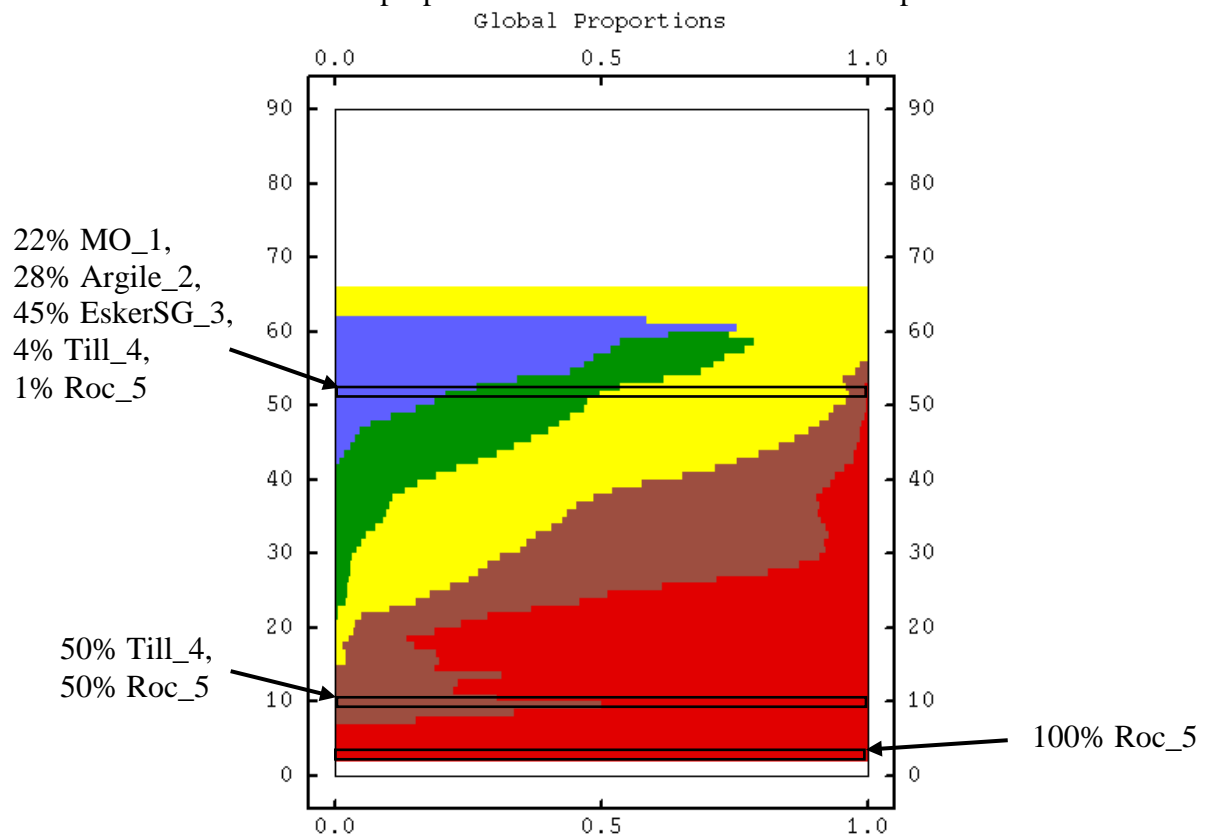


Figure 19. Courbe de proportions de faciès verticale globale pour l'ensemble des puits du modèle de Mercier. L'échelle des profondeurs en ordonnée est une échelle relative au modèle numérique.

Les proportions sont déduites et imposées à travers des Courbes de Proportions Verticales (VPC). Pour la région de Mercier qui représente des variations spatiales importantes dans la structure géologique, notamment en raison de l'esker, plusieurs courbes de VPC ont été construites. Les courbes de proportions de faciès sont déterminées de manière régulière autour des puits, l'emprise d'influence des puits et des VPC associées est indiquée en pointillé noir sur la Figure 20. Pour contraindre le modèle loin des points d'observation, des VPC ont été imposées avec uniquement des faciès géologique continu du roc à l'argile.

L'intérêt de produire plusieurs VPC est de mieux représenter les variations latérales des proportions dans le cas des cas très hétérogènes comme à Mercier.

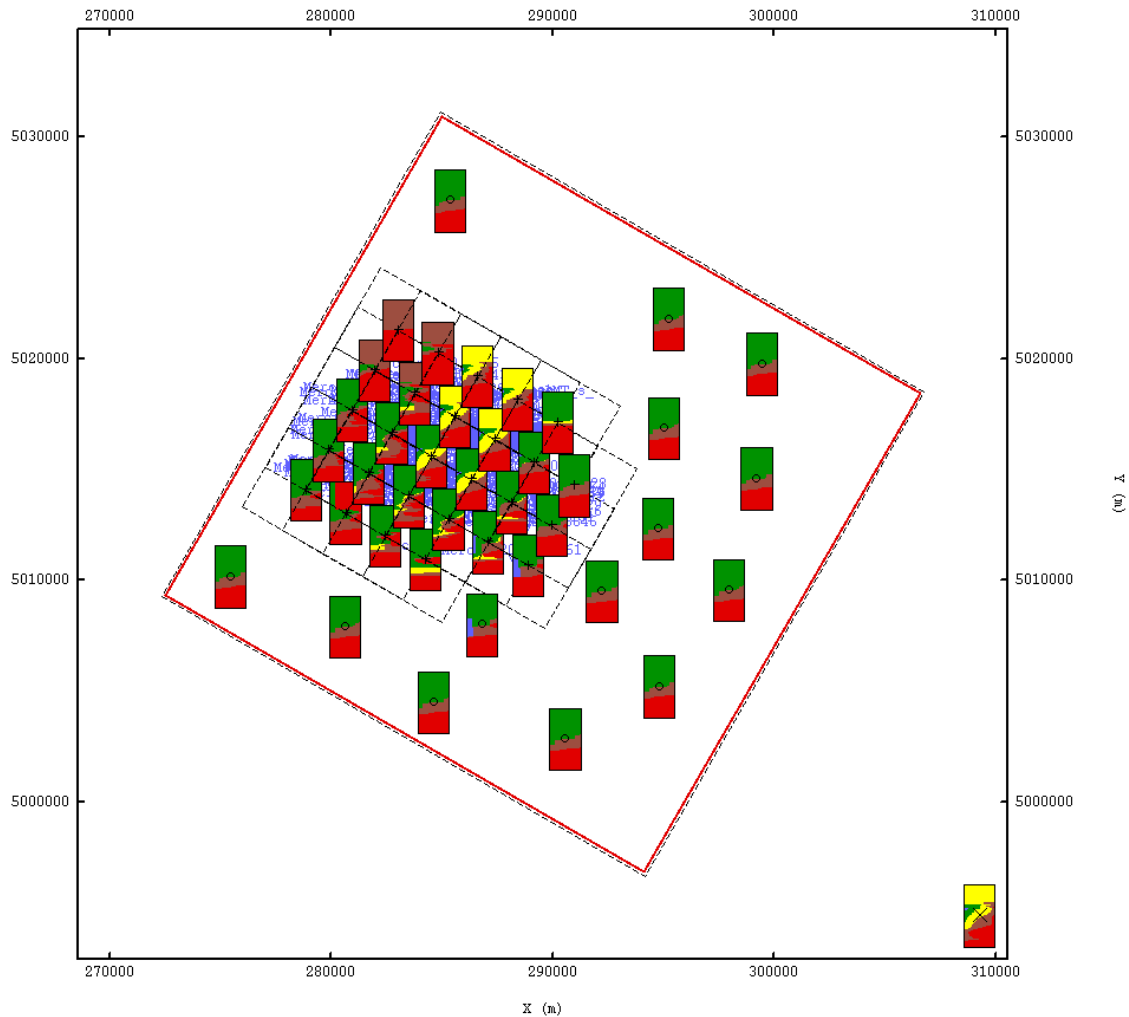


Figure 20. Courbes de Proportions Verticales (VPC) calculées à partir des puits dans la région de Mercier.

Une interpolation 3D des courbes de proportions par krigeage a été réalisée pour définir un bloc 3D de proportions dans tout l'espace du modèle. La Figure 21 présente les courbes obtenues dans l'ensemble de l'espace. La grille est orientée sur le nord uniquement pour l'affichage, le modèle est toujours orienté N30 comme sur la Figure 20.

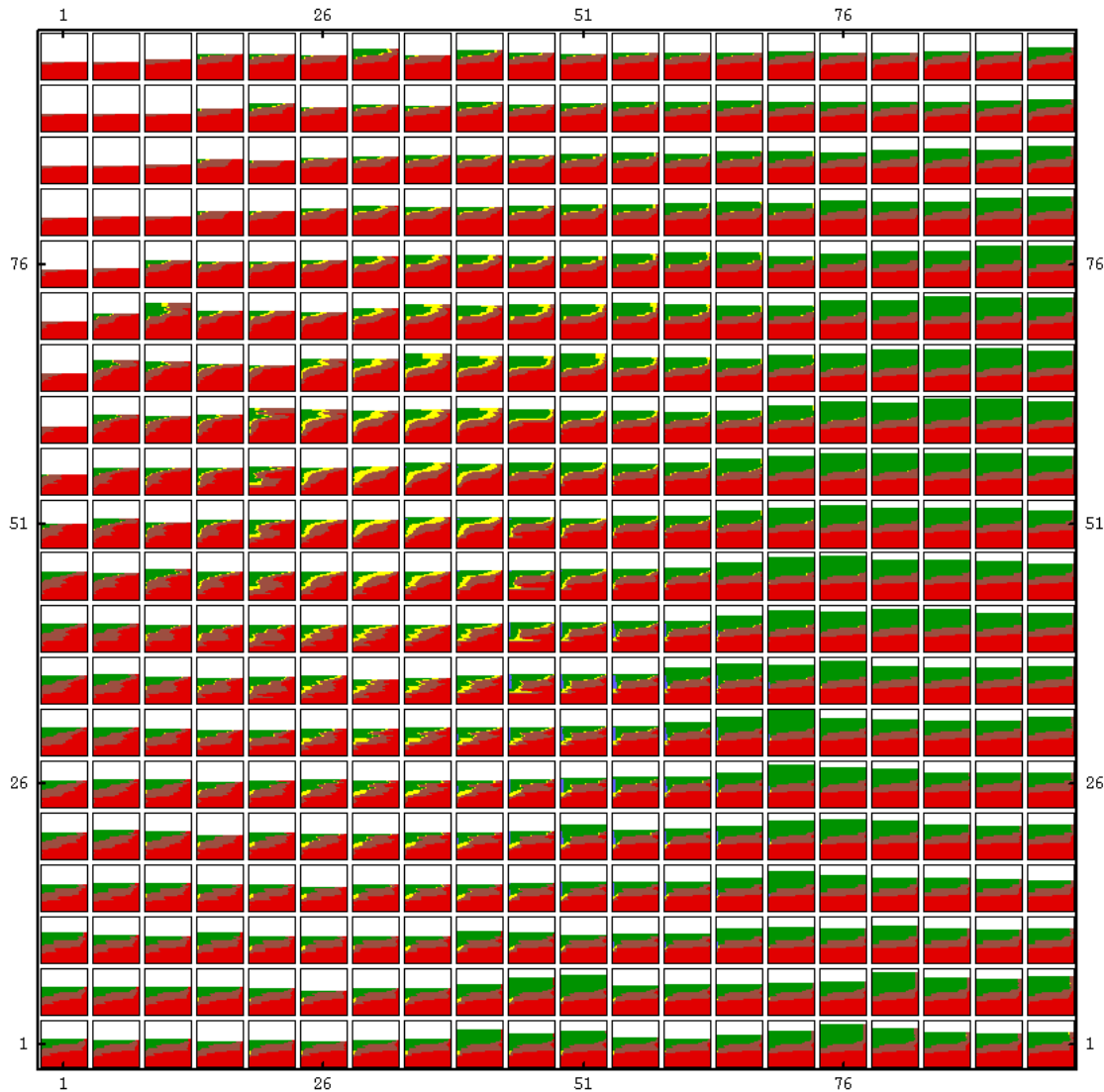


Figure 21. Courbes de proportions 3D dans l'ensemble du modèle.

Les simulations plurigaussiennes reposent également sur des règles lithologiques permettant d'imposer les règles de déposition sédimentaires en général comme des contacts géologiques, des discordances... La Figure 22 montre les contacts imposés correspondant à notre modèle conceptuel. Le roc en rouge est en contact avec le till en marron et l'esker en jaune. L'argile en vert est en contact avec le till, l'esker et les matières organiques en bleu. Deux fonctions gaussiennes régissent la distribution spatiale de la géologie. Les

distances de corrélations sont basées sur les variogrammes définis plus tôt dans ce rapport et utilisés pour définir les surfaces du modèle déterministe.



Figure 22. Règles de lithologie appliquées entre les différentes géologies utilisées pour les simulations plurigaussiennes à Mercier.

La dernière étape des simulations plurigaussienne est de contraindre le modèle aux données observées dans les puits, tout en conservant ces relations d'adjacences dans les formations. Cette étape est en cours de processus et devra être revue une fois les dernières données de terrain incluses dans le modèle conceptuel 3D.

5.2. Simulations géostatistiques d'hydrofaciès

En raison du retard dans l'acquisition des nouvelles données, l'unité hydrostratigraphique EskerSG_3 est modélisée en tenant compte de toutes les mentions de codes géologiques reliées à l'esker (code local de 3), sable (code CGC de S) et de sable-gravier (code CGC de SG). Plusieurs hydrofaciès sont donc présents à l'intérieur de cette unité, possédant chacun leur structure spatiale unique ainsi qu'une distribution distincte de ses propriétés hydrauliques. Tremblay (2004) décrit une partie sous-glaciaire de l'esker comment étant plutôt graveleuse et reposant sous une partie sableuse disposée en éventail subaquatique. Il indique également la présence de cailloux sub-arrondis à arrondis dans l'esker, mais sans précision sur la taille de ces derniers. L'unité EskerSG_3 est donc constituée de cordons d'esker, allongés selon un azimut de 30°, et d'un hydrofaciès sableux reposant sur les flancs des eskers ou entre les cordons d'esker.

Les marqueurs géologiques aux puits ne permettent pas de bien différencier les différents hydrofaciès présents dans l'unité de l'EskerSG_3, car les codes (3, S ou SG) ont été utilisés de façon interchangeable pour toute l'unité. Cependant, la différenciation entre les hydrofaciès de l'esker et sableux pourra s'effectuer à l'aide des données sismiques présentées à la Section 3. Les horizons Sismique_S2 et Sismique_S1 dont les pointés sont affichés sur la Figure 3 permettent de bien distinguer la présence des deux hydrofaciès.

Il s'agit d'un travail en cours, qu'il faudra compléter lorsque des données de diagraphies, qui seront acquises par l'Université Laval aux puits forés lors des travaux complémentaires par Technorem, seront disponibles. Les données de diagraphies et le rapport final des forages permettront de fixer en profondeur les interfaces entre les hydrofaciès et permettront de mieux contraindre la base du modèle sismique 3D permettant de calculer des proportions réalistes d'hydrofaciès.

5.3. Simulations géostatistiques des propriétés hydrauliques

La compréhension de l'écoulement de l'eau souterraine passe par notre capacité à comprendre et à modéliser en trois dimensions la distribution spatiale de la conductivité hydraulique (K) et de son anisotropie. L'analyse statistique des conductivités hydrauliques au site des anciennes lagunes de Ville Mercier a permis de démontrer la variabilité de K à l'intérieur et entre les unités hydrostratigraphiques (Béraud et coll., 2019).

Deux aquifères majeurs sont reconnus au site des anciennes lagunes ; l'hydrofaciès principal de l'esker et le roc fracturé. L'hydrofaciès de l'esker est un aquifère très perméable, hétérogène et local, avec une conductivité hydraulique moyenne de 7×10^{-5} m/s et des valeurs pouvant varier entre 10^{-6} et 10^{-3} m/s.

Le roc fracturé est reconnu comme un aquifère régional dont la conductivité hydraulique varie en fonction de son niveau de fracturation. Les tests sur l'unité du roc indiquent également une très grande variabilité sur les conductivités hydrauliques, variant entre 5×10^{-10} m/s et 3×10^{-5} m/s. Le roc pourra donc se comporter comme un horizon imperméable et perméable en fonction de sa localisation et de son réseau de fractures.

Bien qu'il soit reconnu que l'esker est composé de matériel très hétérogène, peu d'information hydraulique est disponible pour caractériser adéquatement cette variabilité spatiale. Les données de conductivité hydraulique historiques sont très peu nombreuses et

localisées à quelques puits dans les alentours immédiats du site des anciennes lagunes de Ville Mercier (Figure 23).

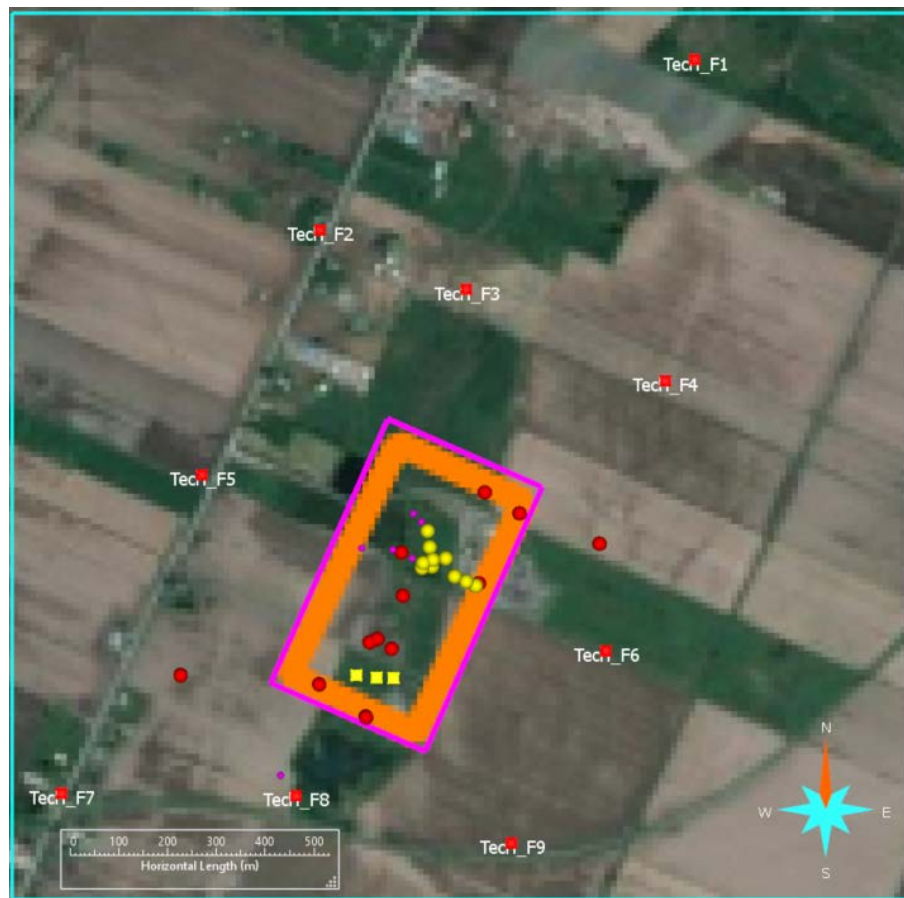


Figure 23. Données de conductivité hydraulique au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Sphères jaunes : données de K dans l'esker ; sphères rouges : données de K dans le roc ; points roses : données de K dans une autre unité ; carrés jaunes : puits de pompage de l'UTES ; carrés rouges : puits de Technorem 2020.

Une représentation de la conductivité hydraulique de l'esker avec une valeur moyenne ou interpolée ne pourra représenter réalistement la variabilité spatiale de ce paramètre. Seules les simulations géostatistiques de la conductivité hydraulique pourront représenter les données de contrôle, leur structure spatiale ainsi que leur variabilité loin des points de contrôle. Des simulations gaussiennes séquentielles (SGS) sont ainsi générées afin de représenter plusieurs réalisations équiprobables de la conductivité hydraulique dans l'esker (Figure 24). Les variogrammes, nécessaires pour effectuer la première étape des simulations, sont difficilement estimables à partir des quelques points de mesure et sont calibrés sur les paramètres de krigeage obtenus pour l'estimation de l'épaisseur de l'esker.

Les réalisations honorent toutes parfaitement les valeurs de conductivité hydraulique mesurées aux puits, mais présentent toutes des distributions spatiales différentes démontrant le faible niveau de contraintes au niveau régional. Les réalisations obtenues par SGS (Figure 24b,c,d) montrent une variabilité de K plus réaliste que la réalisation obtenue

par krigeage simple (Figure 24a) qui montre une valeur de K uniforme égale à la moyenne à distance des points de contrôle.

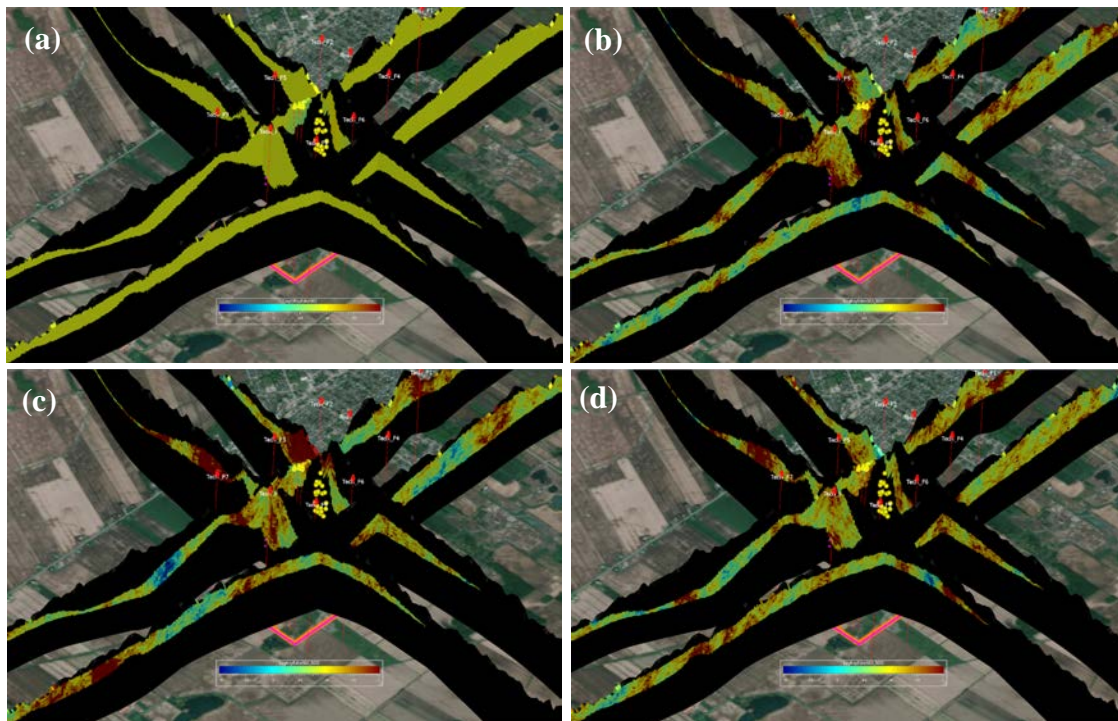


Figure 24. Estimation de la conductivité hydraulique dans l'esker. a) Interpolation par krigeage, b à d) Trois réalisations équiprobables par simulations gaussiennes séquentielles.

Les données provenant des essais hydrauliques prévus pour la fin de l'été 2020 et le printemps 2021 aux puits forés par Technorem pendant les travaux de terrains complémentaires seront cruciales pour contrôler la représentation de la conductivité hydraulique, son anisotropie et sa variabilité spatiale. Les simulations géostatistiques de la conductivité hydraulique présentées dans ce rapport devront être reconduites afin d'inclure les nouvelles données attendues.

6. Conclusion

6.1. Compilation et structuration des données

Les données des anciennes lagunes de Ville Mercier fournies par le MELCC sont intégrées dans un format de base de données mise en place pour les projets PACES du Québec. Deux étapes majeures ont été franchies à ce point ; soit la création du schéma logique et la construction physique de la base de données. La création d'une base de données est un travail dynamique et flexible permettant d'y apporter les modifications nécessaires lorsque de nouvelles données sont accessibles.

6.2. Mise à jour du modèle conceptuel hydrostratigraphique

Le modèle hydrostratigraphique régional englobant le site des anciennes lagunes de Ville Mercier a été mis à jour afin d'intégrer de façon optimale toutes les données accessibles et

interprétations préalablement effectuées sur le site; soit les élévations du roc provenant des données SIH, les données de marqueurs géologiques aux puits fournies par le MELCC ainsi que les autres puits utilisés pour les modèles précédents, des surfaces interpolées pour les modèles précédents, et les interprétations des levés sismiques 2D acquis à l'hiver 2018-2019. Le modèle conceptuel 3D présenté dans ce rapport est le modèle honorant le mieux les données et le niveau de connaissance actuel du site, et devra être mis à jour lorsque de nouvelles données seront disponibles.

Le modèle conceptuel est bâti selon des interpolations successives des épaisseurs des différentes unités du modèle par krigeage. Comme toute variable interpolée, les épaisseurs estimées sont assujetties d'une incertitude qui croît avec la distance aux points de mesure. Les valeurs krigées sont les valeurs les plus probables tendant vers la moyenne ou la tendance régionale loin des points de mesure. Cette tendance des méthodes d'interpolation à tirer les estimations vers les valeurs moyennes engendre un lissage des variables, donnant ainsi un aspect peu réaliste aux résultats loin des points de contrôle. Pour contrer ce défaut, plusieurs réalisations équiprobables peuvent être générées par méthodes géostatistiques afin de générer plusieurs scénarios réalistes du modèle conceptuel hydrostratigraphique et de ses propriétés hydrauliques.

6.3. Élaboration d'une maquette numérique 3D du site

Trois niveaux d'incertitude sont intégrés dans la maquette numérique afin de modéliser la variabilité spatiale telle que calculée sur les données et le modèle conceptuel :

- les interfaces entre les unités hydrostratigraphiques,
- les hydrofaciès à l'intérieur de l'unité EskerSG_3,
- les propriétés hydrauliques à l'intérieur des hydrofaciès de l'EskerSG_3 et dans l'unité du Roc_5.

La maquette numérique complétée en date du rapport est préliminaire et sera modifiée et finalisée lorsque les données provenant de la caractérisation complémentaire seront disponibles :

- marqueurs géologiques pour mieux définir les épaisseurs d'unités ;
- diagraphies pour définir les hydrofaciès, et ;
- essais de perméabilité multi-niveaux pour caractériser l'hétérogénéité de la conductivité hydraulique).

6.4. Échéancier et prochaines étapes

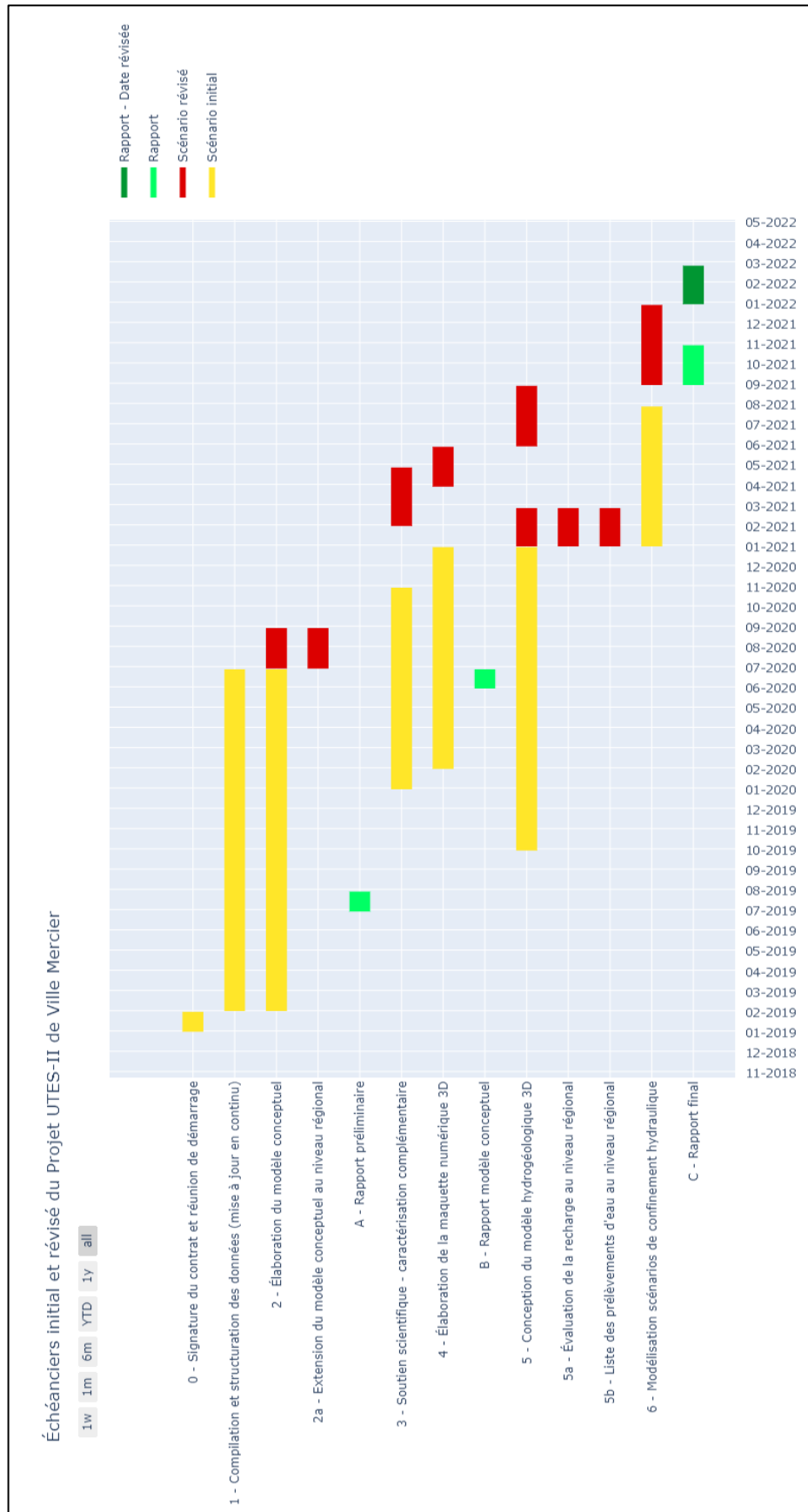
Les prochaines actions du projet de modélisation hydrogéologique au site des anciennes lagunes de Ville Mercier concernent la construction du modèle d'écoulement et l'assignation des paramètres hydrauliques afin de « peupler » le modèle. Ces étapes consistent en :

- la construction de la grille de modélisation en fonction :
 - des distributions horizontale et verticale des unités provenant du modèle hydrostratigraphique conceptuel ;
 - du réseau hydrographique ;

- du positionnement des puits de pompage et de surveillance, et ;
- de tout autre élément pouvant impacter l'écoulement des eaux souterraines, localement et régionalement.
- l'assignation des paramètres hydrauliques aux différentes unités ;
- l'évaluation de la recharge au niveau régional ;
- l'identification de tous les sites de prélèvements d'eau dans le modèle régional ;
- l'évaluation de la stratégie de calibration du modèle numérique, soit :
 - calibrer un modèle déterministe de façon approximative pour servir de base pour l'assimilation des modèles stochastiques provenant de la maquette numérique
 - calibrer le modèle en mode permanent à une date et des niveaux d'eau précis en assumant un système d'écoulement à l'équilibre
 - calibrer un ou plusieurs modèles en mode transitoire pour mieux définir les paramètres affectant des variations de niveaux d'eau dans le temps.

Ces prochaines étapes sont importantes avant de commencer l'assimilation de données avec un ensemble de modèles stochastiques, car elles permettent de définir un bon point de départ de l'assimilation, aidant ainsi à faire converger les modèles vers des solutions réalistes de l'écoulement des eaux souterraines, tant au niveau régional dans la région de Mercier qu'au niveau local au site des anciennes lagunes de Ville Mercier.

Les tâches complétées et à accomplir sont détaillées à la page suivante, avec l'échéancier initial et un échéancier révisé. Les retards probables de l'échéancier révisé sont dus à la pandémie de la COVID-19 ainsi que les délais liés aux travaux de terrain qui ne seront complétés qu'à l'hiver/printemps 2021. Il est entendu qu'il existe une large zone d'incertitude concernant l'évaluation du déroulement du projet et des délais potentiels.



7. Références

- Béraud, T., Claprood, M. et E. Gloaguen. 2019. Rapport préliminaire du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier. INRS – Centre ETE. Rapport soumis au Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), juillet 2019.
- Blouin, M. et E. Gloaguen. 2015. *Comprehensive geophysical data integration and stratigraphic contacts delineation in a regional hydrogeological characterization study*. Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 20(2), 183-193, doi: 10.2113/JEG20.2.183.
- Claprood, M., Gloaguen, E., Giroux, B., Duchesne, M.J., Konstantinovskaya, E., et Malo, M., 2012. Workflow using sparse vintage data for building a first geological and reservoir model for CO₂ geological storage in deep saline aquifer. A case study in the St. Lawrence Platform, Canada, *Greenhouse Gases, Science and Technology*, 2, 1-19, doi: 10.1002/ghg.1292.
- DHI, Mike Powered by DHI. 2020. *FEFLOW* (Version 7.3 [3D + 2D]). Interactive Graphics-based Finite Element Simulation System for Subsurface flow and Transport Processes.
- Globensky, Y., 1986. *Géologie de la région de St-Chrysostome et de Lachine*. Rapport MM 84-02, Ministère de l’énergie et des ressources du Québec.
- Lavigne, M.-A., 2006. *Modélisation numérique de l’écoulement régional de l’eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec.
- Lefebvre, R., 2007. *Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Mercier (Québec), Canada*. Rapport R-914, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport d’expertise soumis à la direction des politiques de l’eau, Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs, mars 2007.
- Martel, R., Lepage, N. et R. Lefebvre, 1998. *Distribution des contaminants organiques dans les sols du secteur des anciennes lagunes de Mercier, propriété des services environnementaux Laidlaw (Mercier) Ltée*. Rapport 1998-04, INRS – Géoressources, Rapport soumis à la Direction des enquêtes du Ministère de l’Environnement et de la Faune, avril 1998.
- Martel, R., Robert, T., Batailler, É., Boutin, M., Deschênes-Rancourt, C. et L. Trépanier, 2018. *Revue de littérature sur les technologies de réhabilitation des sols et des eaux souterraines et réévaluation du potentiel de réhabilitation du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier*. Rapport R1783, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport final présenté au Ministère de l’Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 17 octobre 2007.
- Paradigm SKUA-GOCAD, Logiciel de modélisation géologique.
<http://www.pdgm.com/products/gocad/>.
- Pontlevoy, O., 2004. *Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec.
- QGIS, disponible Open-Source à : <https://www.qgis.org/fr/site/about/index.html>
- Tremblay, T., 2008. *Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la Rivière Châteauguay, Québec*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal.

Annexe 3

Rapport du modèle d'écoulement
déterministe, Projet UTES-II Ville Mercier,
août 2021

Rapport du modèle d'écoulement déterministe

Projet UTES-II Ville Mercier

Soumis par

Maxime Claprood, ing., Ph.D., Associé de recherche
Thomas Béraud, Doctorant
Erwan Gloaguen, Ph.D., Professeur
Richard Martel, Ph.D., Professeur

31 août 2021



Institut national
de la recherche
scientifique

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des Figures	III
1. Introduction.....	1
1.1. Mandat.....	2
1.2. Objectif.....	2
1.3. Chronologie du projet.....	2
2. Compilation des acquisitions de données	4
2.1. Sismique réflexion 2019.....	4
2.2. Sismique réflexion 2021.....	6
2.3. Diagraphies en forage.....	7
2.4. Essais de perméabilité multi-niveaux.....	10
3. Mise à jour du modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques	10
3.1. Définition des unités hydrostratigraphiques au site des anciennes lagunes	10
3.2. Mise à jour de la surface topographique	11
3.3. Mise à jour de la surface du Roc_5	13
3.4. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité Till_4.....	14
3.5. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité EskerSG_3	16
3.6. Modélisation des hydrofaciès F1_Esker et F2_SG de l'unité EskerSG_3.....	18
3.7. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité Argile_2	20
3.8. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité Remblai_Organique_1	22
3.9. Mise à jour de la représentation 3D des unités dans le modèle régional	23
4. Contexte hydrogéologique	25
5. Construction du modèle hydrogéologique déterministe	26
5.1. Construction du maillage 2D.....	26
5.2. Construction de la grille d'écoulement 3D	27
5.3. Propriétés hydrauliques	29
5.4. Conditions aux frontières	29
5.5. Recharge.....	30
6. Calibration du modèle déterministe	31
6.1. Niveaux d'eau à calibrer	31
7. Prochaines étapes et recommandations.....	33
7.1. Compilation et acquisition de données.....	33
7.2. Modèle conceptuel hydrostratigraphique.....	33

7.3.	Élaboration d'une maquette numérique 3D du site	33
7.3.1.	Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans le roc	34
7.3.2.	Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans l'unité Till_4.....	34
7.3.3.	Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans l'unité EskerSG_3	34
7.4.	Calibration stochastiques.....	34
7.5.	Tests de scénarios de pompage de l'UTES-II	34
7.6.	Échéancier	35
8.	Références.....	36

Liste des Figures

Figure 1. Coupe schématique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).	1
Figure 2. Étendue des travaux de sismique 2D par MBMS Solutions lors des campagnes de terrain de 2019 (lignes vertes pâles) et 2021 (lignes blanches). La Ligne 4 (rouge) et la Ligne 8 (rose) de la campagne 2019 sont présentées à la Figure 4, tandis que la Ligne 4 (cyan) et la Ligne 6 (bleue) de la campagne 2021 sont présentées à la Figure 5. Les carrés jaunes sont les puits de l'UTES-I. Les carrés rouges sont les puits forés lors des travaux de terrain de Technorem en 2020.....	5
Figure 3. Horizons sismiques S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge) pointés sur toutes les lignes sismiques de la campagne 2019 au site de Ville Mercier.....	6
Figure 4. Ligne 4 et Ligne 8 de la campagne sismique 2019 en ondes S avec les 4 horizons pointés : S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge).	6
Figure 5. Ligne 6 de la campagne sismique 2021, de l'est (gauche) vers l'ouest (droite) en ondes S avec les 4 horizons pointés : S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge).7	7
Figure 6. Information lithostratigraphique obtenue à partir des diagraphies de rayonnement Gamma dans les puits au roc.....	8
Figure 7. Distribution des températures dans les puits au roc.	9
Figure 8. Résultats des essais de perméabilité multi-niveaux de l'automne 2020.....	10
Figure 9. Carte topographique krigée de la surface. Limites modèle hydro-stratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (jaunes) ; limites du modèle de Pontlevoy (polygone bleu) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).	13
Figure 10. Carte topographique krigée de l'élévation régionale du roc. Limites modèle hydro-stratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; marqueurs au roc des puits MELCC et privés (carrés rouges) ; puits SIH (points jaunes) ; limites du modèle de Pontlevoy (polygone bleu) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).	14
Figure 11. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Till_4. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés verts) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).....	15
Figure 12. Diagramme croisé entre l'épaisseur de l'EskerSG_3 et l'élévation de Till_4, montrant un coefficient de corrélation $r^2 = -0.84$	16
Figure 13. Carte des épaisseurs krigées de l'unité EskerSG_3. Limites du modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés jaunes) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où le Till_4 affleure à la surface (points verts).	17

- Figure 14. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F1_Esker. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). 19
- Figure 15. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F2_SG. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). 20
- Figure 16. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Argile_2. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés rouges) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où l'unité EskerSG_3 (points jaunes) et l'unité Till_4 (points verts) affleurent à la surface..... 21
- Figure 17. Carte des épaisseurs de l'unité Remblai_Organique_1. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose). 23
- Figure 18. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques dans le modèle conceptuel régional. Exagération verticale de la vue régionale est de 40x, exagération verticale de la vue locale est de 20x. La carte de fond est la géologie de surface, avec le réseau hydrologique. Le modèle géologique local provenant du MELCC sur le site des lagunes de Ville Mercier est aussi présenté. 24
- Figure 19. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques au niveau du site de l'UTES, avec une exagération verticale de 5. La carte de fond est la géologie de surface. Les puits de l'UTES PW-113, PW-112, et PW-111 sont présentés en blanc et noir de gauche à droite, respectivement. 24
- Figure 20. Schéma du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier (Lefebvre, 2007). 25
- Figure 21. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier représentant les unités géologiques et l'écoulement de l'eau souterraine (Lefebvre, 2007). 25
- Figure 22. Représentation 2D de la grille de modélisation. Les ronds bleus représentent les nœuds des cours d'eau où sont assignées des conditions aux frontières à la surface. Les croix jaunes présentent les points de contrôle utilisés pour bâtir la grille 2D. Les lignes vertes sont les sections verticales EW_3 et SN_3 présentée à la figure suivante. . 27
- Figure 23. Section verticale (EW_3 sur la Figure 22) d'ouest (gauche) vers l'est (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments. 28
- Figure 24. Section verticale (SN_3 sur la Figure 22) du sud (gauche) ou nord (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments. 29
- Figure 25. Distribution spatiale de la recharge efficace assignée à la première couche du modèle hydrogéologique..... 30

Figure 26. Distribution régionale des observations de niveaux d'eau à calibrer sur le modèle hydrogéologique régional de Ville Mercier. 32

Figure 27. Distribution locale des observations de niveaux d'eau à calibrer sur le modèle hydrogéologique régional de Ville Mercier. 33

1. Introduction

Le 19 mars 2018, le gouvernement du Québec a annoncé la construction d'une nouvelle usine en vue d'optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier. Dans le cadre de cet engagement gouvernemental, le ministère de l'Environnement et Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) désire élaborer un modèle d'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale, c'est-à-dire couvrant le site des anciennes lagunes de Mercier et ses environs immédiats, et à l'échelle régionale, c'est-à-dire couvrant partiellement le territoire des municipalités de Mercier, de Saint-Isidore et de Sainte-Martine.

Le site des anciennes lagunes de Mercier est affecté par un mélange de nombreux contaminants constitué de liquides immiscibles légers (LIL) et denses (LID) à la suite de l'utilisation d'une ancienne sablière se trouvant dans un esker comme lieu d'entreposage d'huiles usées. Au site, une partie des LID s'est écoulee dans les sables et graviers de l'esker (aquifère granulaire local) d'une profondeur allant jusqu'à 30 m et au moins jusqu'à 15 m plus bas dans le roc fracturé sous-jacent à l'esker (aquifère rocheux régional). Afin de limiter l'écoulement des contaminants plus en aval, un système de pompage et une usine de traitement des eaux souterraines (UTES) sont en fonction au site depuis 1984. Le rôle de ce système de pompage est de contenir de façon hydraulique l'eau souterraine contaminée (panache) s'écoulant au travers des zones sources de LIL et de LID qui se situent en amont hydraulique des puits de pompage, à l'intérieur de l'esker et du till au droit du site, et plus en aval dans le roc fracturé.

La Figure 1 présente en coupe un modèle conceptuel schématisé du contexte hydrogéologique et de l'état de la contamination au site.

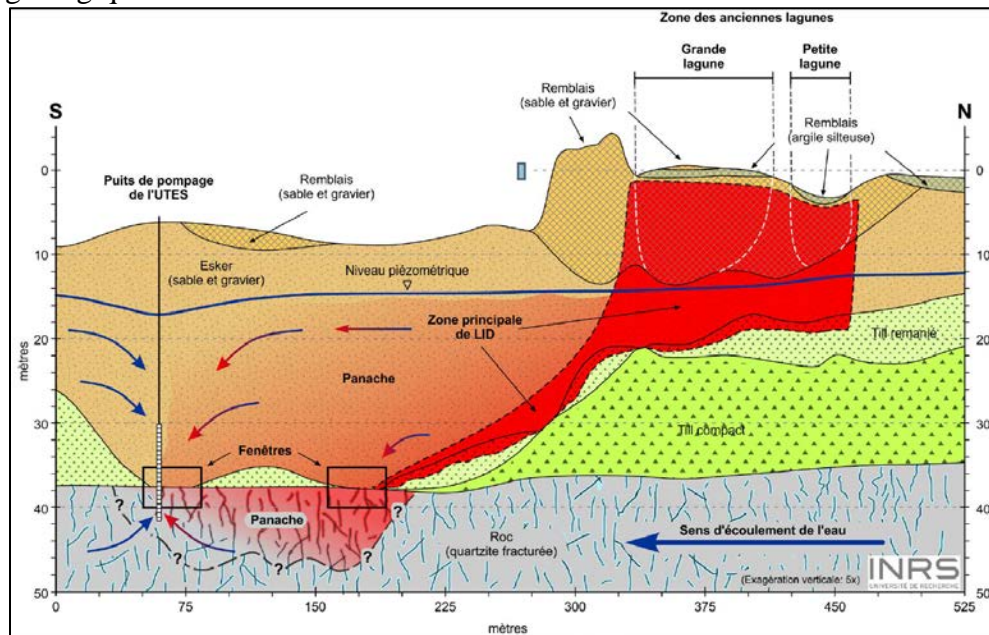


Figure 1. Coupe schématique du site des anciennes lagunes de Mercier (de Martel et coll. 2018, elle-même adaptée du rapport du BAPE, 1994).

1.1. Mandat

Le présent mandat du projet est décrit comme suit :

Site des anciennes lagunes de Ville Mercier : soutien technique pour l'élaboration du plan de caractérisation complémentaire du site et conception d'un modèle d'écoulement pour soutenir la conception d'un nouveau système de confinement hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES-2).

Plus spécifiquement, le mandat couvre les tâches suivantes :

1. Compiler et structurer les données existantes ;
2. **Élaborer un modèle conceptuel du contexte hydrogéologique du site des anciennes lagunes ;**
3. Conseiller le MELCC sur l'élaboration d'un plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et de la région, puis sur sa mise en œuvre ;
4. **Ajouter les données recueillies lors de la caractérisation complémentaire à la base de données et mettre à jour le modèle conceptuel ;**
5. Élaborer des scénarios équiprobables (maquette numérique 3D du site) représentant la variabilité et l'incertitude des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique, porosité...) en dehors des points de mesures, mais semblables au modèle conceptuel ;
6. **Concevoir un modèle d'écoulement hydrogéologique à l'échelle locale et régionale apte à répondre aux besoins décrits précédemment ;**
7. Appliquer le modèle d'écoulement à trois scénarios de confinement hydraulique du site des anciennes lagunes de Mercier.

1.2. Objectif

L'objectif du présent rapport est de décrire les étapes menant à la construction du modèle d'écoulement déterministe de Ville Mercier. Ce modèle déterministe servira de base pour l'assimilation de données et la mise à jour des paramètres hydrauliques sur des modèles d'écoulement stochastiques sur lesquels seront joués les trois scénarios de confinement hydraulique au site des anciennes lagunes de Mercier. Ce rapport vient également synthétiser l'avancement du projet depuis le rapport d'avancement précédent (Claprod et coll., 2020). Spécifiquement, le présent rapport apportera une mise à jour sur les tâches 2, 4, et 6 surlignées en gras ci-dessus.

1.3. Chronologie du projet

- 19 mars 2018 :
Le gouvernement du Québec annonce la construction d'une nouvelle usine pour optimiser le confinement des contaminants présents sur le site des anciennes lagunes de Mercier.
- 26 juillet 2018 :
L'INRS présente la proposition de recherche : *Conception du modèle d'écoulement pour la mise en place du nouveau système de confinement*

hydraulique de l'unité de traitement des eaux souterraines (UTES 2) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier.

- 7 janvier 2019 :
Signature du contrat entre le MELCC et l'INRS, dont le mandat est décrit à la Section 1.1.
- 21 janvier 2019 :
Réunion de démarrage entre les représentants du MELCC et de l'INRS-ETE.
- 26 février 2019 :
Réunion pour discuter du plan de caractérisation complémentaire du site des anciennes lagunes de Mercier et commencer la planification de la campagne de terrain 2019 (tâche 3 du mandat décrit à la Section 1.1).
- 30 mai 2019 :
Réunion pour préciser les besoins de caractérisation complémentaire, afin de finaliser l'appel d'offre pour la supervision des travaux de terrain.
- 24 juillet 2019 :
Soumission du Rapport d'avancement du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier.
- Octobre 2019 :
1^{ère} campagne d'acquisition de levés sismique réflexion.
- 15 novembre 2019 :
Visite sur le site de Ville Mercier pour répondre aux questions des soumissionnaires pour les travaux de terrain de caractérisation complémentaire.
- 12 février 2020 :
Réception du plan de travail final de Technorem pour la réalisation des travaux de terrain de caractérisation complémentaire.
- Février 2020 :
Début des travaux de terrain (forages et aménagement de puits) pour la caractérisation complémentaire par Technorem.
- 13 mars 2020 :
Pandémie, le Québec sur pause !
- Mars 2020 :
Mise sur pause des travaux de terrain complémentaires par Technorem pour le printemps 2020.
- Mai 2020 :
Réunion de démarrage pour la campagne de diagraphies par l'Université Laval. Les travaux de terrain doivent commencer en juillet 2020.
- 30 juin 2020 :
Remise du Rapport d'avancement 2020 du Projet UTES-II de Ville Mercier.
- Juillet 2020
1^{ère} campagne d'acquisition de diagraphies.
- Octobre 2020
1^{ère} campagne d'essais de perméabilité multi-niveaux.

- Janvier 2021
2^e campagne d'acquisition de levés sismique réflexion.
- Février 2021
Complétion de la campagne de forage de Technorem.
- Mars 2021
2^e campagne d'acquisition de diagraphies.
Remise du rapport le 15 mars 2021.
- Mai – Juin 2021
Remise des interprétations des levés sismiques réflexion 2021.
- Juin 2021
Complétion des essais de perméabilité multi-niveaux.
Toujours en attente des interprétations en date de complétion de ce rapport.

2. Compilation des acquisitions de données

2.1. Sismique réflexion 2019

Une campagne d'acquisition de données de sismique réflexion 2D a été effectuée à l'automne 2019 sur le site des anciennes lagunes de Ville Mercier (Figure 2). Les objectifs de cette campagne sismique étaient :

- améliorer la connaissance de la topographie du toit du roc sur la zone d'intérêt ;
- améliorer la connaissance de la stratigraphie sur la zone d'intérêt ;
- mieux définir la géométrie des sédiments contrôlant les processus hydrodynamiques et ;
- acquérir des nouvelles connaissances sur la topographie du toit du roc à l'échelle régionale.

Les données sur les interfaces des différents horizons ont été traitées, interprétées par une compagnie de service et sont utilisées pour interpoler ces horizons hydrostratigraphiques entre les données de forage. La séquence de traitement pour convertir les données brutes en données traitées utilisables pour l'interprétation inclut :

- l'assignation à la géométrie ;
- le rehaussement du signal par une série de filtres (passe-bande avant et après sommation) et de gains (AGC), et ;
- sommation avec une vitesse de sommation vitesse simple (entre 160 m/s et 200 m/s) pour la conversion temps-profondeur.

Les levés ont été effectués avec une source à impacts et des géophones omnidirectionnels. Cette géométrie d'acquisition permet de faire le traitement et l'interprétation des ondes de cisaillement (ondes S) et des ondes de compression (ondes P). Les ondes S ont une vitesse de propagation sismique plus lente et permettent de faire une meilleure caractérisation des différentes unités présentes au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les ondes P, ont une vitesse de propagation plus élevée et sont plus énergétiques que les ondes S. Elles sont donc moins sensibles à la géologie de proche surface et de résolution plus faible mais

permettent cependant de d’imager des structures plus profondes, comme l’interface entre les unités granulaires et l’unité de roc.



Figure 2. Étendue des travaux de sismique 2D par MBMS Solutions lors des campagnes de terrain de 2019 (lignes vertes pâles) et 2021 (lignes blanches). La Ligne 4 (rouge) et la Ligne 8 (rose) de la campagne 2019 sont présentées à la Figure 4, tandis que la Ligne 4 (cyan) et la Ligne 6 (bleue) de la campagne 2021 sont présentées à la Figure 5. Les carrés jaunes sont les puits de l’UTES-I. Les carrés rouges sont les puits forés lors des travaux de terrain de Technorem en 2020.

La Figure 3 montre les horizons sismiques pointés sur toutes les lignes sismiques qui serviront de points de contrôle pour l’interpolation des cartes des épaisseurs des horizons en deux dimensions (2D).

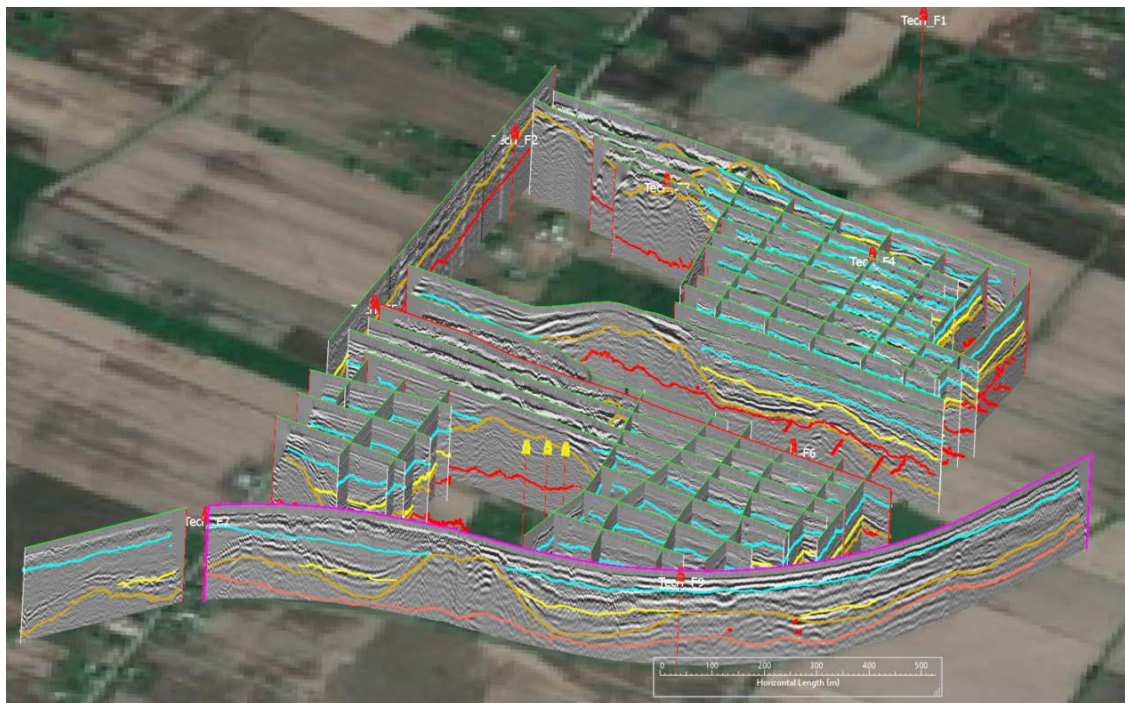


Figure 3. Horizons sismiques S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge) pointés sur toutes les lignes sismiques de la campagne 2019 au site de Ville Mercier.

La Figure 4 montre les horizons sismiques pointés sur les levés en ondes S sur les lignes sismiques 4 et 8 du levé 2019.

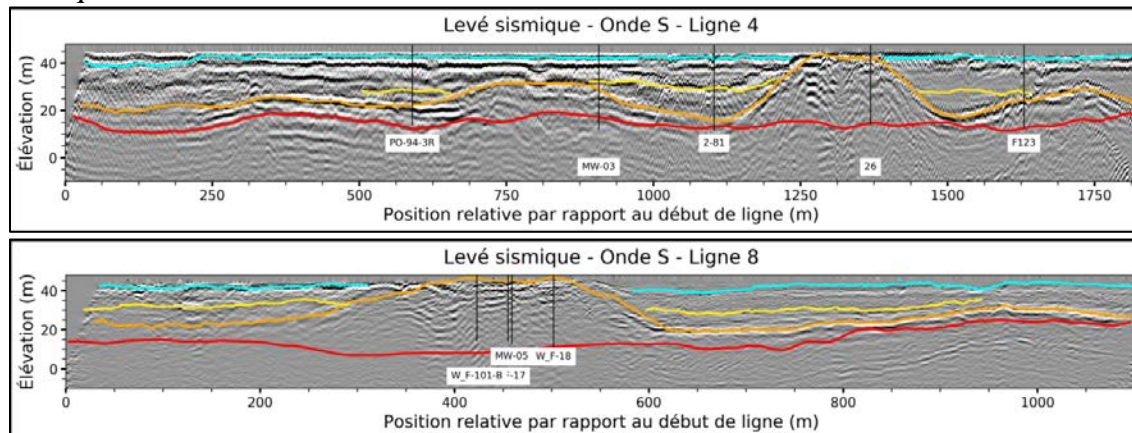


Figure 4. Ligne 4 et Ligne 8 de la campagne sismique 2019 en ondes S avec les 4 horizons pointés : S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge).

2.2. Sismique réflexion 2021

Une seconde campagne d'acquisition de données de sismique réflexion 2D a été effectuée à l'hiver 2021 afin de caractériser les extensions latérales de l'unité d'esker et de sable et graviers (Figure 2). Sept lignes sismiques ont été acquises, totalisant 10 km. Les données ont été traitées selon la même séquence de traitement que les données sismiques provenant de la campagne 2019. Les interprétations sont utilisées afin de mettre à jour le modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques des anciennes lagunes de Ville Mercier.

La Figure 5 montre les horizons sismiques pointés sur les levés en ondes S sur la ligne sismique 6.

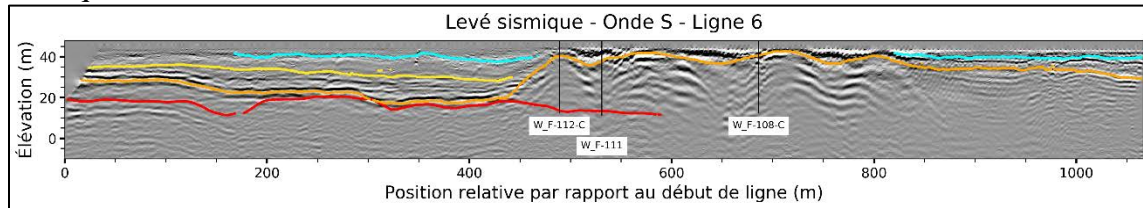


Figure 5. Ligne 6 de la campagne sismique 2021, de l'est (gauche) vers l'ouest (droite) en ondes S avec les 4 horizons pointés : S3 (cyan), S2 (jaune), S1 (orange) et S0_P (rouge).

2.3. Diagraphies en forage

Le Groupe d'Instrumentation Géophysique de l'Université Laval (GIGul) a réalisé des travaux de diagraphies dans 14 forages à l'été 2020 et l'hiver 2021 (Tableau 1).

Tableau 1. Liste des diagraphies acquises dans les puits de Ville Mercier dans les sédiments et/ou le roc.

Sonde	Paramètre associé
IND	Résistivité électrique et susceptibilité magnétique
FWS	Vitesse des ondes de compression et de cisaillement
ELOG	Résistivité galvanique
IP	Chargeabilité
CAL	Diamètre du forage (roc)
SGR	Rayonnement Gamma (Potassium K, Uranium U et Thorium Th)
FTC	Caractéristiques du fluide
OBI	Images orientées des structures dans le forage

Les résultats des diagraphies démontrent que la nature des dépôts sédimentaires peut être identifiée à l'aide du rayonnement gamma naturel et de la température de l'eau qui se retrouve dans les puits. Le rayonnement gamma permet également d'identifier trois unités distinctes dans le roc ainsi qu'un marqueur de transition net entre l'unité 1 et l'unité 2 (Figure 6). Les diagraphies de température et de la conductivité de l'eau ont permis d'identifier des zones d'écoulement préférentiel ainsi que des échanges entre différents niveaux interceptés par les puits (Figure 7). La fracturation subverticale présente dans les puits à l'est (1R, 3R, 5R et 2R) semble promouvoir certains échanges alors que les puits qui se retrouvent à l'ouest (6R et 9R) sous un couvert de sédiments plus riche en argile démontrent moins d'interaction avec l'eau de surface.

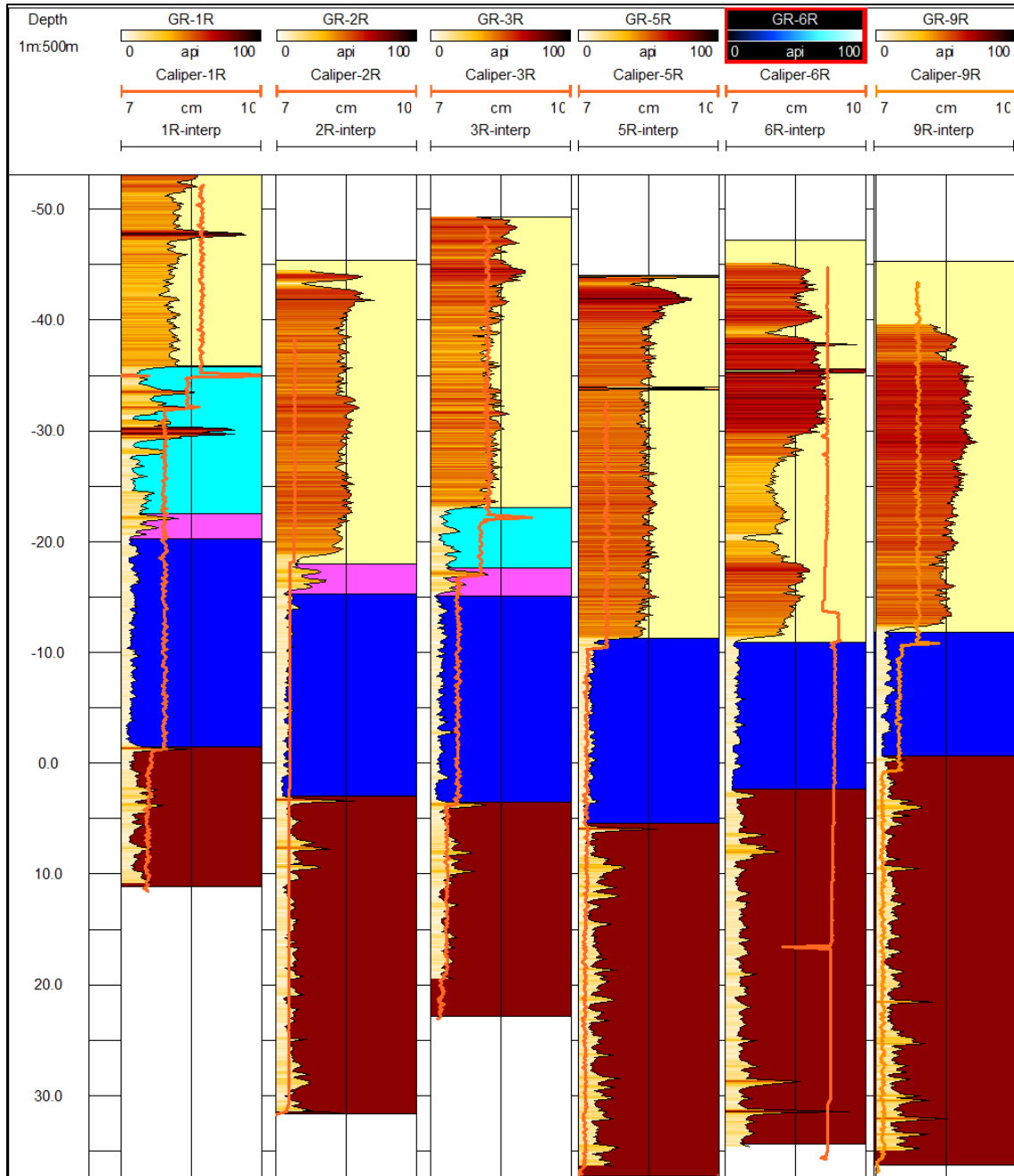


Figure 6. Information lithostratigraphique obtenue à partir des diagraphies de rayonnement Gamma dans les puits au roc.

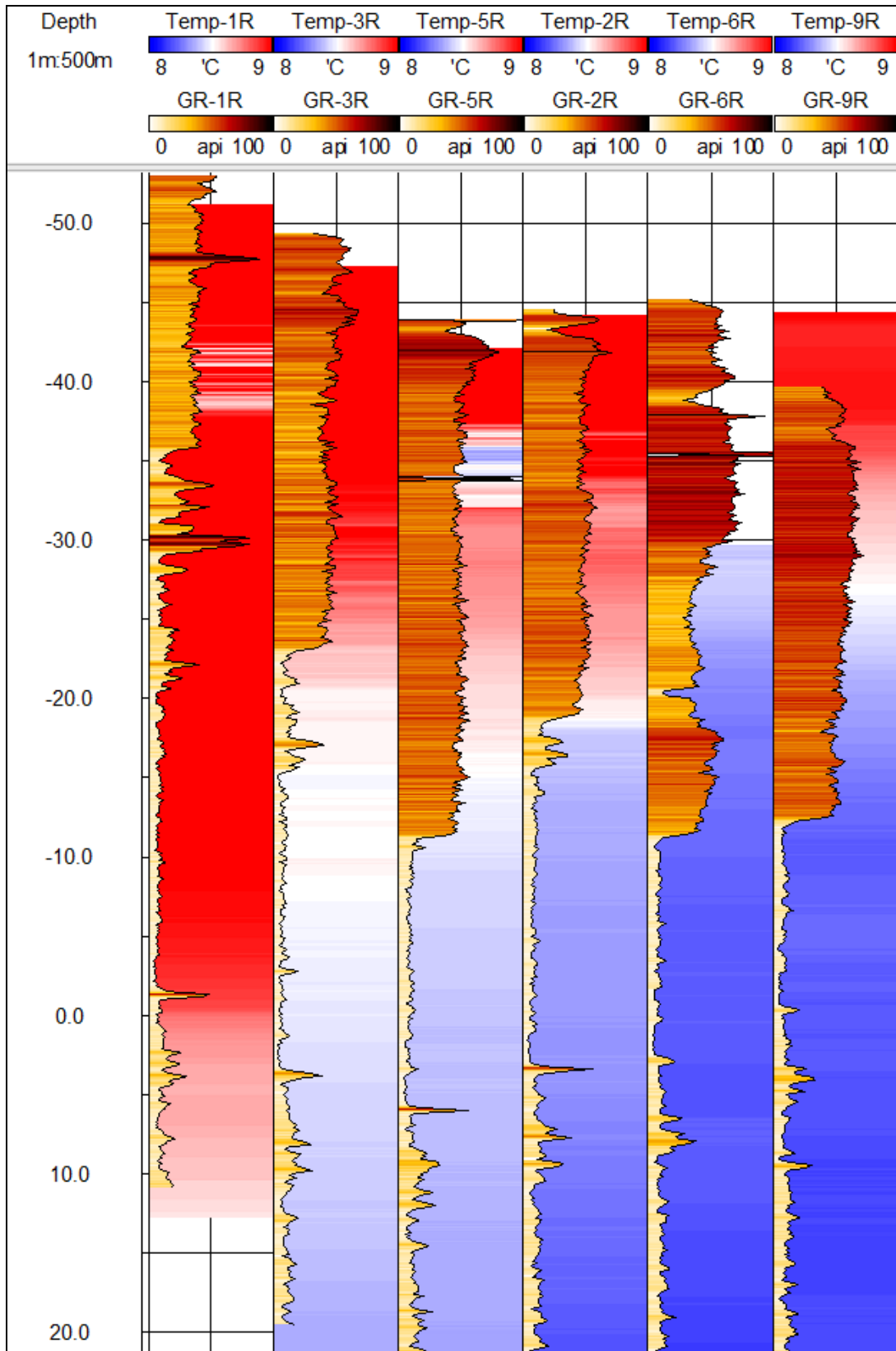


Figure 7. Distribution des températures dans les puits au roc.

2.4. Essais de perméabilité multi-niveaux

Des essais de perméabilités multi-niveaux servent à obtenir un profil vertical détaillé des propriétés hydrauliques des sédiments et du socle rocheux. Des essais ont été effectués et analysés à l'automne 2020 aux 7 puits de la Figure 8 dans les dépôts meubles.

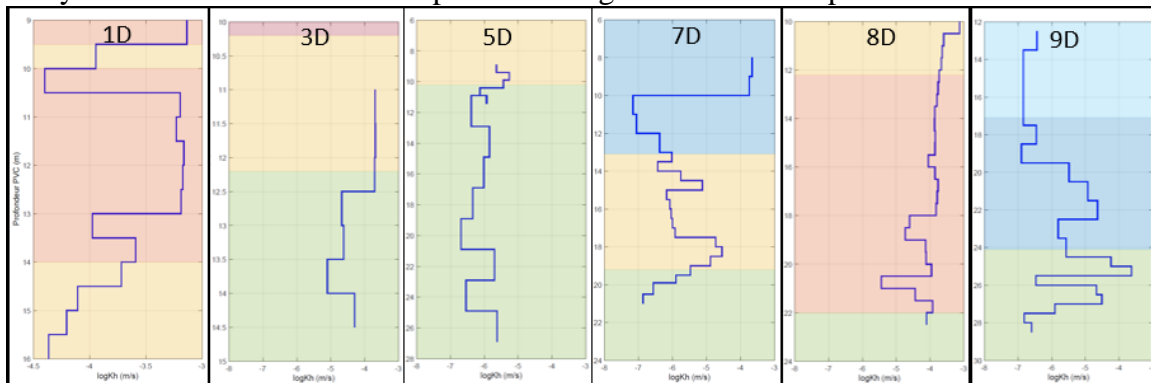


Figure 8. Résultats des essais de perméabilité multi-niveaux de l'automne 2020.

D'autres essais ont été effectués à 10 puits restants au site des anciennes lagunes de Ville Mercier (sédiments meubles et roc) à l'été 2021. Les essais sont toujours en cours d'interprétation au moment de la rédaction de ce rapport. Les interprétations des essais de perméabilités multi-niveaux serviront de base de données pour simuler plusieurs réalisations de la distribution spatiale de conductivité hydraulique dans les sédiments et dans le roc.

3. Mise à jour du modèle conceptuel des unités hydrostratigraphiques

La construction du modèle conceptuel de Ville Mercier est décrite en détails dans les rapports d'avancement de Béraud et coll. (2019) et Claprood et coll. (2020). Ces rapports discutent du contexte géologique, des données utilisées ainsi que la méthodologie employée pour la construction du modèle conceptuel 3D des unités hydrostratigraphiques au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Ce modèle conceptuel initial décrit dans les rapports de Béraud et coll. (2019) et Claprood et coll. (2020) est modifié pour tenir compte des données provenant de la campagne de forage et des données de sismique réflexion acquises lors de la campagne 2021. Après un rappel sur la définition des différentes unités stratigraphiques, cette section présente les mises à jour faites au modèle conceptuel en fonction des nouvelles données acquises en 2020 et 2021.

3.1. Définition des unités hydrostratigraphiques au site des anciennes lagunes

Cinq unités hydrostratigraphiques majeures sont incluses dans ce modèle, soit du bas vers le haut :

- Unité Roc_5
- Unité Till_4
- Unité EskerSG_3
- Unité Argile_2
- Unité Remblai_Organique_1

Unité Roc_5

L'unité « Roc_5 » représente le socle rocheux en place sous les dépôts meubles, constitué de roches sédimentaires d'âge Cambrien à Ordovicien (Globensky, 1986).

Unité Till_4

L'unité « Till_4 » est généralement composée d'un till inférieur ou basal et d'un till supérieur ou remanié. Le modèle hydrostratigraphique conceptuel ne considère qu'une seule couche représentant toute l'épaisseur de till présent au site de Ville Mercier.

Unité EskerSG_3

De façon similaire à l'unité Till_4, toute description de sable, sable et gravier et esker est représentée dans l'unité « EskerSG_3 » afin de pouvoir utiliser le plus grand nombre de données possibles pour compléter la modélisation numérique de l'épaisseur de cette unité. Cette unité contient du gravier sablonneux à du sable graveleux avec des traces de silt et des quantités variables de cailloux et blocs.

Cette unité est ensuite divisée en deux hydrofaciès à l'aide des données de sismique réflexion interprétées; soit le faciès « F1_Esker » représentant les matériaux contenus dans le lobe central des eskers, et le faciès « F2_SG » représentant les sables et graviers d'épandage se trouvant sur les flancs de l'esker. Le faciès F1_Esker est composé de sédiments glaciaires grossiers et propres, dont la conductivité hydraulique est généralement très élevée, bien que fortement hétérogène. Le faciès F2_SG comprend des matériaux dont la conductivité hydraulique est généralement moins forte que dans le faciès F1_Esker.

Unité Argile_2

L'unité « Argile_2 » est composée de l'argile silteuse, et de silt et sable argileux provenant des sédiments marins de la Mer de Champlain. L'unité d'Argile_2 se retrouve au-dessus du Till_4 ou de l'unité EskerSG_3 lorsque celui-ci est présent.

Unité Remblai_Organique_1

Tout matériel présent entre l'unité géologique la plus élevée modélisée et la surface topographique sera assigné à l'unité « Remblai_Organique_1 ». Localement, au site des anciennes lagunes de Ville Mercier, cette unité est constituée de tous les matériaux ayant servis de remblai. Cette unité est constituée de matériaux naturels mais contient aussi des corps étrangers non naturels indiquant que ces matériaux ont été remaniés. Régionalement, cette unité sera associée à des horizons de matériaux organiques retrouvés près de la surface à proximité d'étendues d'eau.

3.2. Mise à jour de la surface topographique

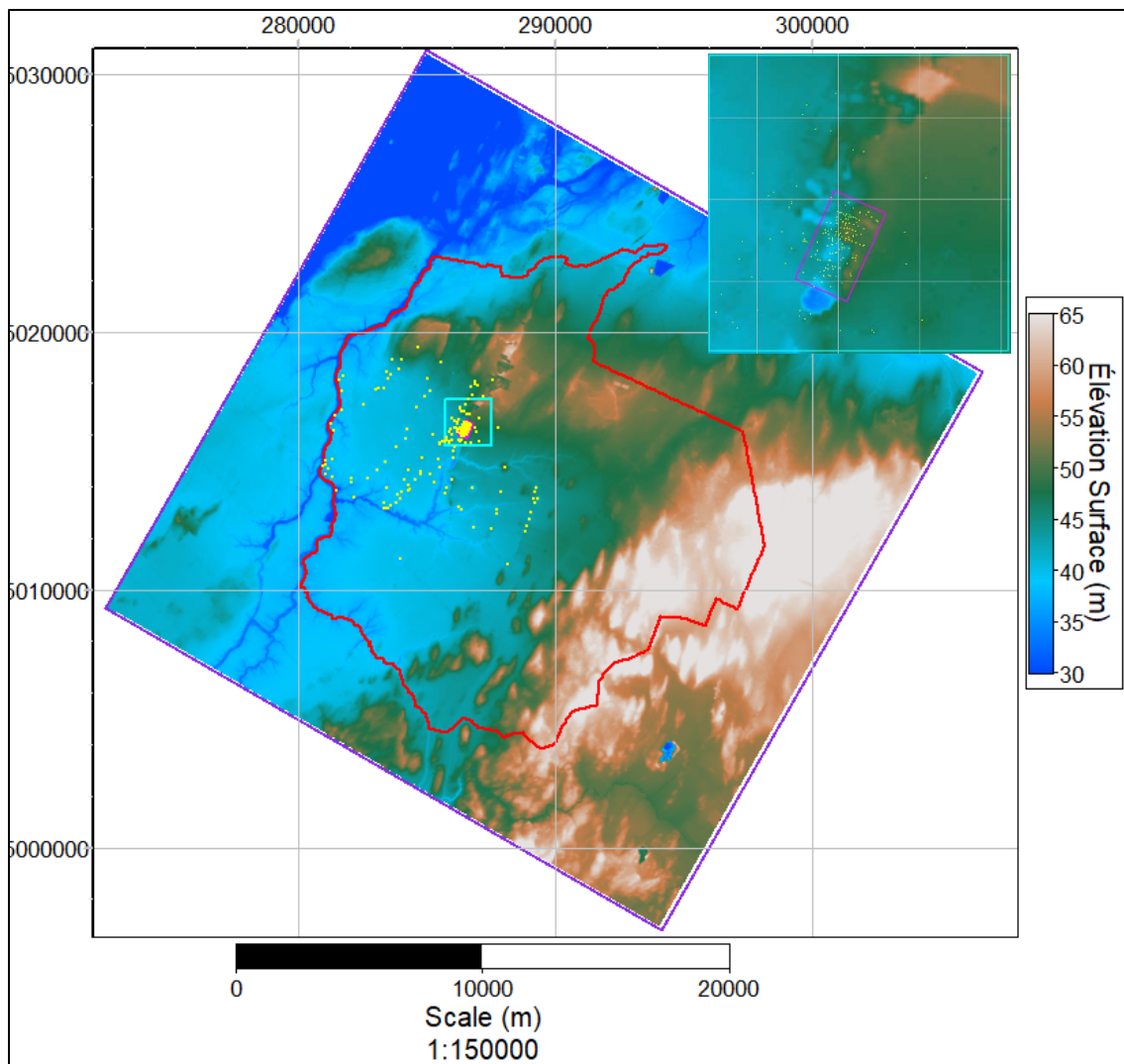
La surface topographique est modifiée par rapport au modèle initial, alors que les données LIDAR sont maintenant utilisées à la place des données NASA jugées moins précises. Les mêmes structures sont représentées, mais il y a une meilleure corrélation avec les valeurs de topographie arpentées aux 287 puits de contrôle dans le modèle. Tous les forages complétés par Technorem sont également arpentés et leurs niveaux du sol sont maintenant

inclus dans le modèle. Les données LIDAR sont échantillonnées aux 25m et ont été intégrées aux puits de contrôle par krigeage bayésien.

Le krigeage bayésien, une variante du krigeage avec dérive externe où la dérive représente la même variable que les données principales, est utilisé pour honorer les élévations de la surface arpentées aux puits en utilisant la surface LIDAR comme tendance régionale. Le variogramme permet d'exprimer la corrélation spatiale entre l'élévation de la surface topographique aux points de contrôle. Le variogramme modélisé de l'élévation de la surface est composé de deux structures pour représenter les variations à petites échelles seulement. La variance totale du variogramme est de 16.8 m^2 :

- effet pépite de contribution (variance) 0.8 m^2 . Cette contribution faible par rapport à la variance totale démontre un niveau d'ajustement très élevé à courte distance, indicatif d'un bon niveau de confiance dans les données.
- modèle sphérique isotrope de portée 300 m et de contribution de 16 m^2 afin de représenter les variations spatiales à courte échelle.

La grille mise à jour de la surface topographique (Figure 9) représente la limite supérieure du modèle conceptuel hydrostratigraphique.



3.3. Mise à jour de la surface du Roc_5

La modélisation de la carte d'élévation du roc est détaillée dans le rapport Claprod et coll. (2020) et n'a pas nécessité de mise à jour. Le variogramme modélisé a une variance totale 77 m^2 , et comprend trois structures :

- effet pépite de contribution (variance) 1 m^2 .
- modèle sphérique isotrope de portée 400 m et de contribution de 11 m^2 afin de représenter les variations spatiales à courte échelle.
- modèle gaussien isotrope, de portée 4 000 m et de contribution 65 m^2 , représentant les variations spatiales à moyenne échelle.

La grille finale des élévations du roc (Figure 10) représente la base du modèle conceptuel hydrostratigraphique.

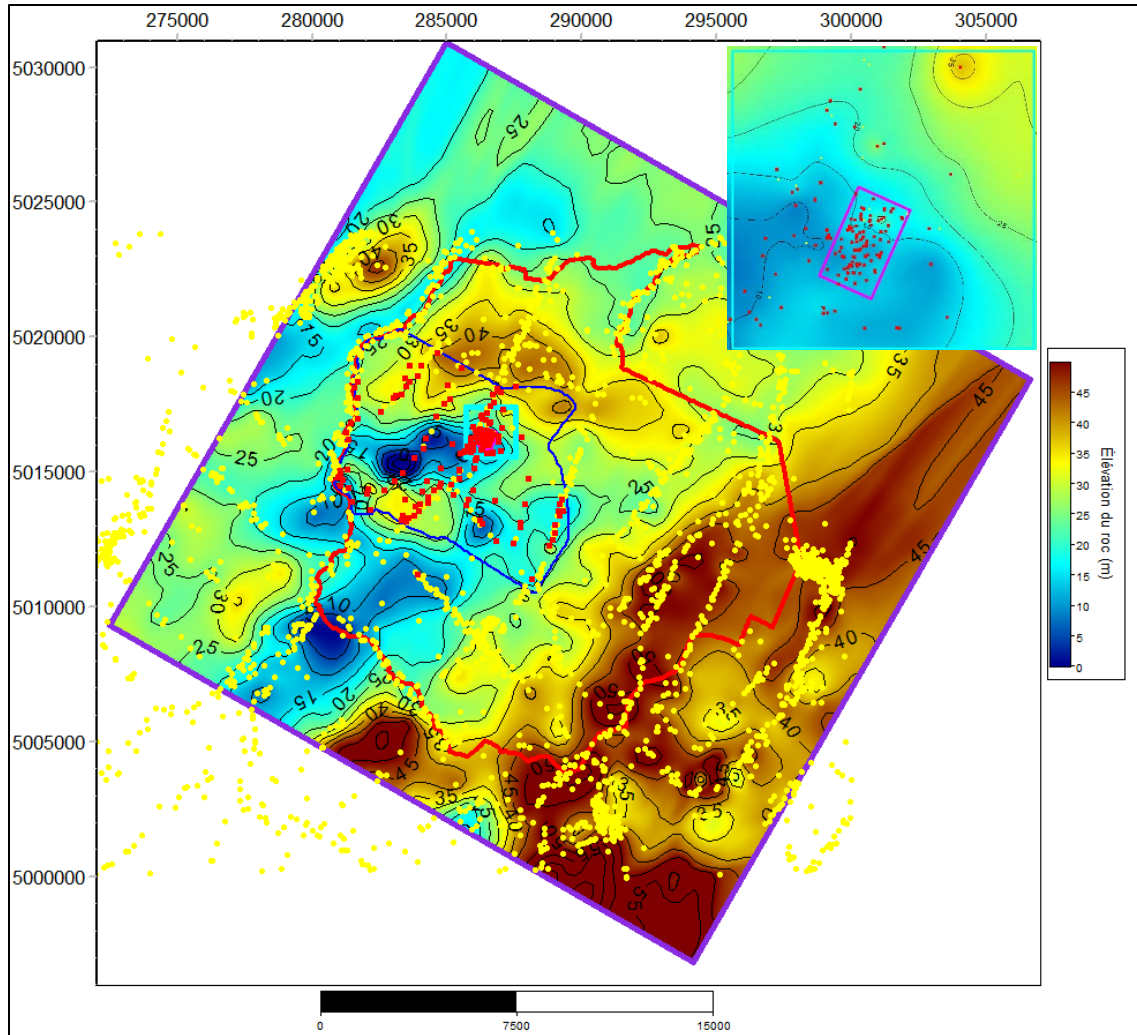


Figure 10. Carte topographique krigée de l'élévation régionale du roc. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve); limite modèle hydrogéologique (polygone rouge); marqueurs au roc des puits MELCC et privés (carrés rouges); puits SIH (points jaunes); limites du modèle de Pontlevoy (polygone bleu); limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

3.4. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité Till_4

La modélisation de l'épaisseur de l'unité Till_4 a été mise à jour pour tenir compte des nouvelles données disponibles :

- l'épaisseur de Till_4 a été modifiée localement aux puits où le Till_4 est affleurant à la surface, pour tenir compte des élévations mises à jour de la surface du sol ;
- ré-assignation d'une zone géologique à l'unité Till_4 d'une zone initialement interprétés comme de l'Argile_2, dans le coin Nord-Ouest du modèle régional.

L'épaisseur de l'unité Till_4 est initialement évaluée par krigeage simple à partir de toutes les données disponibles. Le variogramme modélisé pour cette première étape est composée de 2 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 37.0 m² :

- effet pépite de contribution (variance) 4.0 m^2 .
- modèle exponentiel isotrope de portée 9100 m et de contribution de 33.0 m^2 représentant les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface de l'épaisseur de l'unité Till_4 est lissée pour enlever certaines discontinuités et est ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité Till_4 par krigeage bayésien (Figure 11).

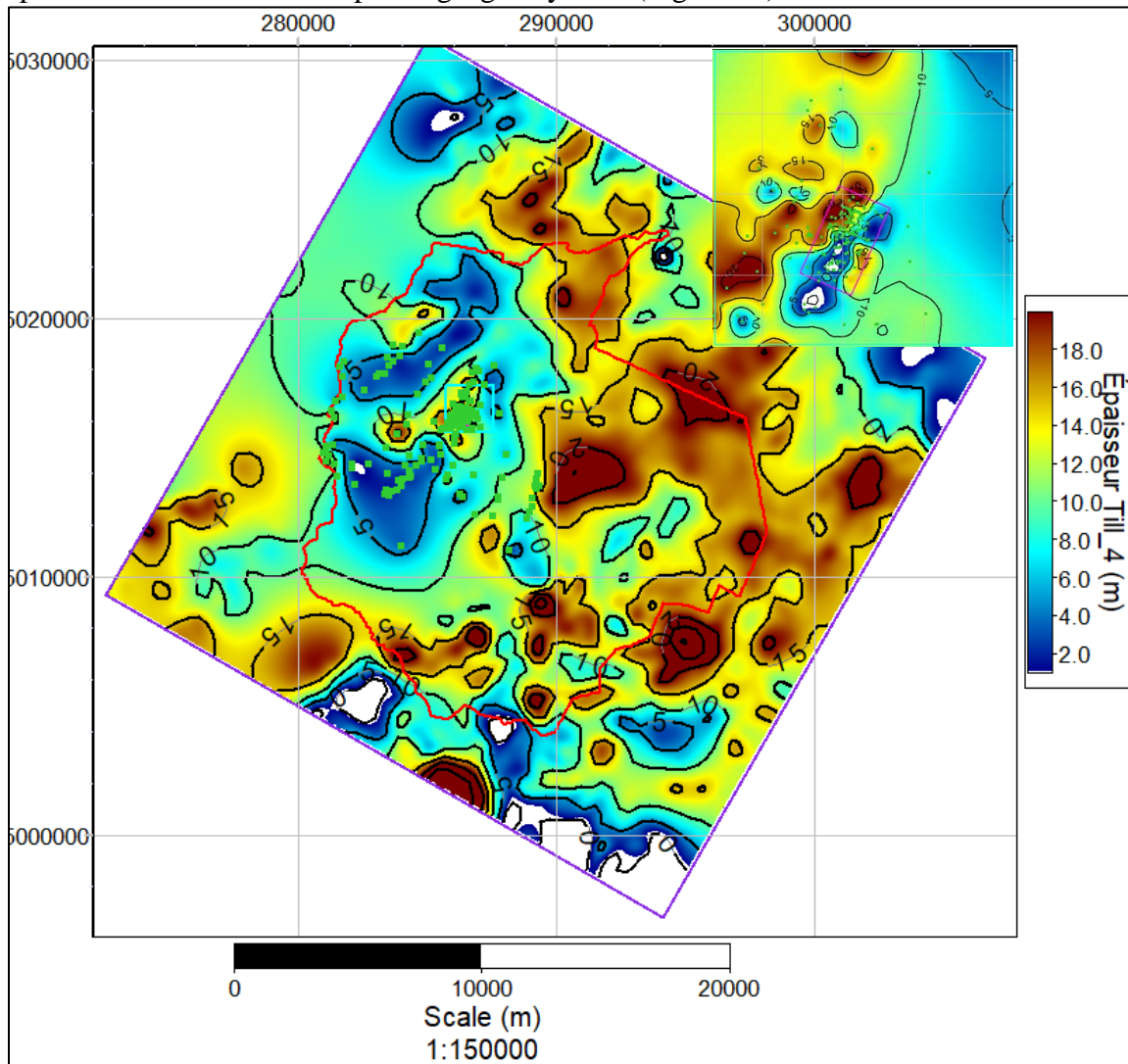


Figure 11. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Till_4. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés verts) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

Les épaisseurs de Till_4 évaluées aux puits sont utilisées pour bâtir le modèle de variogramme local, composé de 2 structures, avec une variance totale de 28.01 m^2 :

- effet pépite de contribution (variance) 0.01 m^2 .
- modèle sphérique isotrope de portée 200 m et de contribution de 7.0 m^2 représentant les variations spatiales à l'échelle locale.

- modèle sphérique isotrope de portée 4700 m et de contribution de 21.0 m² représentant les variations spatiales à l'échelle intermédiaire.

La carte des épaisseurs de l'unité Till_4 (Figure 11) montre une épaisseur variant de 0 m à 25 m, régionalement et localement au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les zones blanches mettent en évidence les endroits où le till possède une épaisseur plus petite que 1 m, pouvant ainsi agir comme fenêtre au roc entre l'aquifère de sable et gravier de l'unité EskerSG_3 et l'aquifère du roc fracturée (Roc_5).

3.5. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité EskerSG_3

La modélisation de l'épaisseur de l'unité EskerSG_3 a été mise à jour considérablement pour tenir compte des nouvelles données et interprétations :

- L'épaisseur de l'unité EskerSG_3 est modifiée aux puits où l'unité est affleurant à la surface, pour tenir compte des élévations mises à jour de la surface du sol.
- Les levés sismiques de la campagne 2021 permettent de mieux contrôler l'extension latérale de l'unité à l'est du site, et ont permis de détecter un nouveau lobe d'esker au sud-ouest du site.
- Une forte corrélation a été calculée avec l'élévation du toit de l'unité Till_4, permettant d'utiliser cette surface comme donnée de dérive (Figure 12).
- Utilisation de l'azimut de l'élévation de l'unité Till_4 pour varier la direction principale du variogramme.

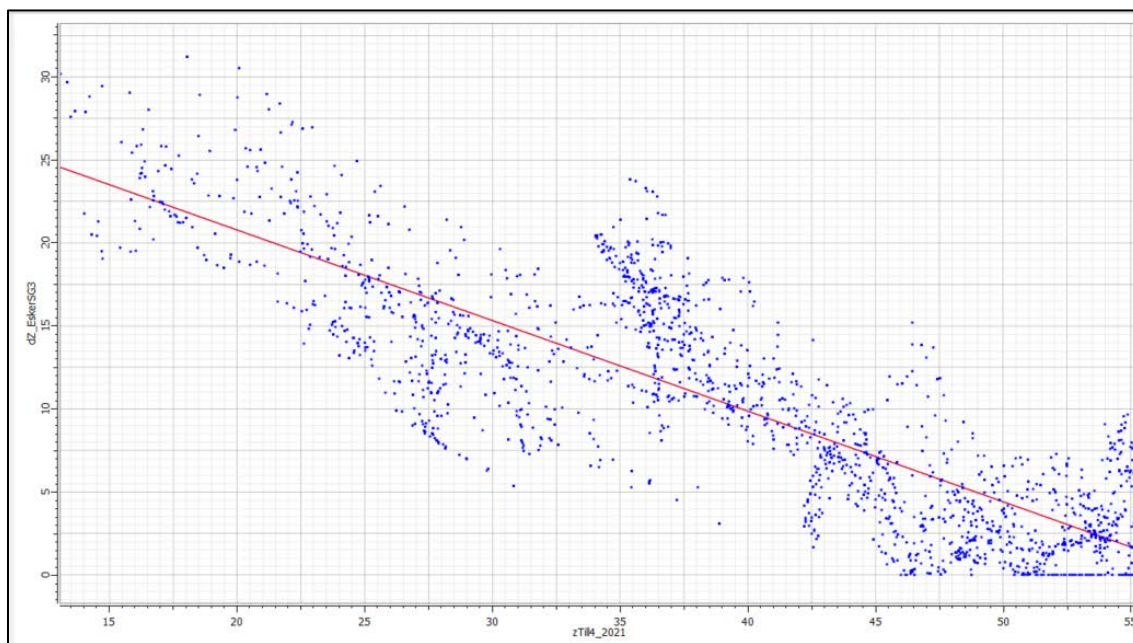


Figure 12. Diagramme croisé entre l'épaisseur de l'EskerSG_3 et l'élévation de Till_4, montrant un coefficient de corrélation $r^2 = -0.84$.

L'épaisseur de l'unité EskerSG_3 est initialement évaluée par krigeage par dérive externe, en utilisant l'élévation du Till_4 comme dérive. L'azimut de l'élévation de la surface de Till_4 est également utilisé pour contrôler la direction principale de krigeage, et ainsi

propager les canaux principaux de l'esker pour suivre les creux de l'unité Till_4. Le variogramme modélisé de cette première étape est composé de 3 structures pour représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 57.7 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 0.7 m^2 ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 550 m et de contribution de 30.0 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.
- Modèle gaussien anisotrope de portée 5750 m dans la direction principale des eskers (30° azimuth) et 1250 m perpendiculairement, de contribution de 27 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface a une apparence lisse pour enlever certaines discontinuités et afin d'être ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité EskerSG_3 par krigeage bayésien (Figure 13).

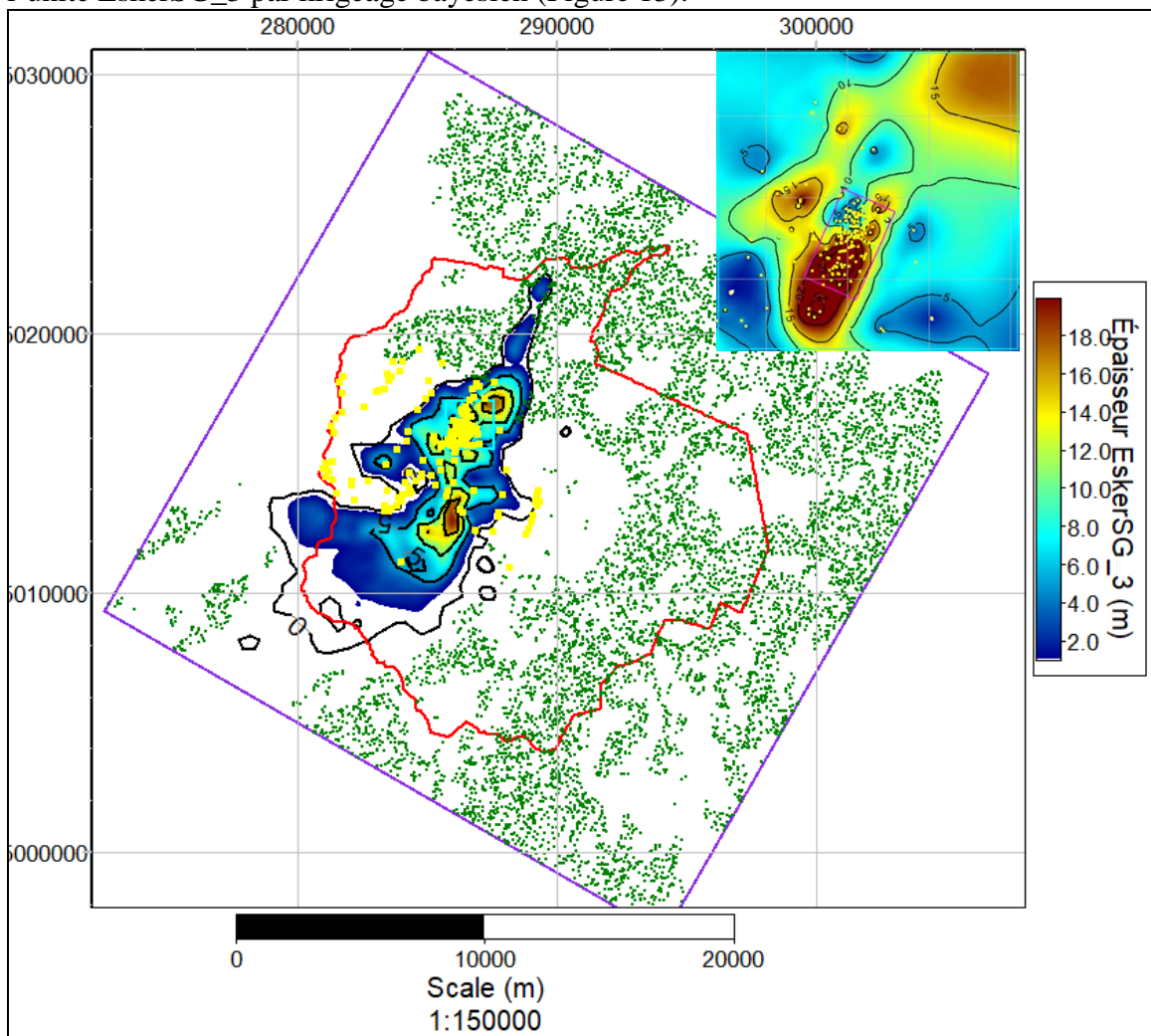


Figure 13. Carte des épaisseurs krigées de l'unité EskerSG_3. Limites du modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés jaunes) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où le Till_4 affleure à la surface (points verts).

Le modèle de variogramme utilisé est composé de 3 structures, avec une variance totale de 109 m² :

- Effet pépite de contribution (variance) 1.0 m² ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 30 m et de contribution de 28.0 m² pour représenter les variations spatiales à très petite échelle.
- Modèle sphérique isotrope de portée 325 m et de contribution de 80.0 m² pour représenter les variations spatiales à moyenne échelle.

L'épaisseur maximale de l'unité de sable et gravier de l'EskeSG_3 est de 25 m, à la limite sud du site des anciennes lagunes.

3.6. Modélisation des hydrofaciès F1_Esker et F2_SG de l'unité EskeSG_3

L'unité EskeSG_3 est composé de deux hydrofaciès ; le faciès nommé « F1_Esker » et le faciès nommé « F2_SG ». Les deux faciès sont définis par les descriptions des carottes de forage faites par Technorem en 2019 et à partir des faciès sismiques identifiés sur les données sismiques de 2019 et 2021.

À partir des descriptions des carottes de forage, on définit le faciès F2_SG par tous les matériaux définis comme sables/graviers silteux ou argileux, donc moins propres que ceux du faciès F1_Esker définis par sables et/ou graviers. On calcule les proportions respectives des faciès F1_Esker et F2_SG selon leur épaisseur par rapport à l'épaisseur totale de l'unité EskeSG_3.

Différents marqueurs sismiques ont été pointés sur les levés sismiques de MBMS 2019 et 2021. Le marqueur S3 (cyan) correspond au toit de l'unité d'Argile2. Le marqueur S2 (jaune) correspond au toit des sables et graviers d'épandage de l'unité EskeSG_3, tandis que le marqueur S1 (orange) correspond au toit de l'unité principale d'EskeSG_3, soit le faciès F1_Esker. Le marqueur S0_P (rouge) marque le toit du Till_4 ou du roc, et marque la base du modèle pour calculer pour calculer les épaisseurs sismiques des différents faciès. On calcule ainsi les proportions des faciès F1_Esker et F2_SG de façon similaire à ce qui est fait avec les descriptions de forage.

Les données de faciès F1_Esker et F2_SG sont concentrées au niveau local autour du site des anciennes lagunes. On utilise la régression multi-linéaire afin de trouver la combinaison de propriétés géologiques pouvant le mieux prédire les proportions de faciès F1_Esker et F2_SG partout dans l'unité de l'EskeSG_3. Cette méthode permet d'entraîner le modèle sur les données connues de faciès (F1_Esker et F2_SG) et a permis de trouver qu'une combinaison des épaisseurs d'Argile_2, d'EskeSG_3, de Till_4, et de l'élévation du toit de l'EskeSG_3 permet de bien estimer les proportions de faciès F1_Esker et F2_SG. La formule finale de régression multi-linéaire utilisée est la suivante :

$$\text{Prop}(F1_Esker) = 0.45343 - 0.00465 * dz(Argile_2) + 0.00498 * dz(EskerSG_3) + 0.00392 * dz(Till_4) + 0.00802 * z(Esker_SG3).$$

De façon similaire à l'interpolation des épaisseurs et des élévations, deux estimations successives ont été calculées pour mieux honorer les proportions mesurées aux forages par rapport aux proportions sismiques lorsque les données étaient contradictoires. La carte de proportion obtenue par régression multi-linéaire a ensuite été utilisée comme dérivée externe par krigeage bayésien avec les proportions mesurées aux forages pour obtenir les cartes finales des épaisseurs (épaisseur du faciès F1_Esker à la Figure 14 et épaisseur du faciès F2_SG à la Figure 15).

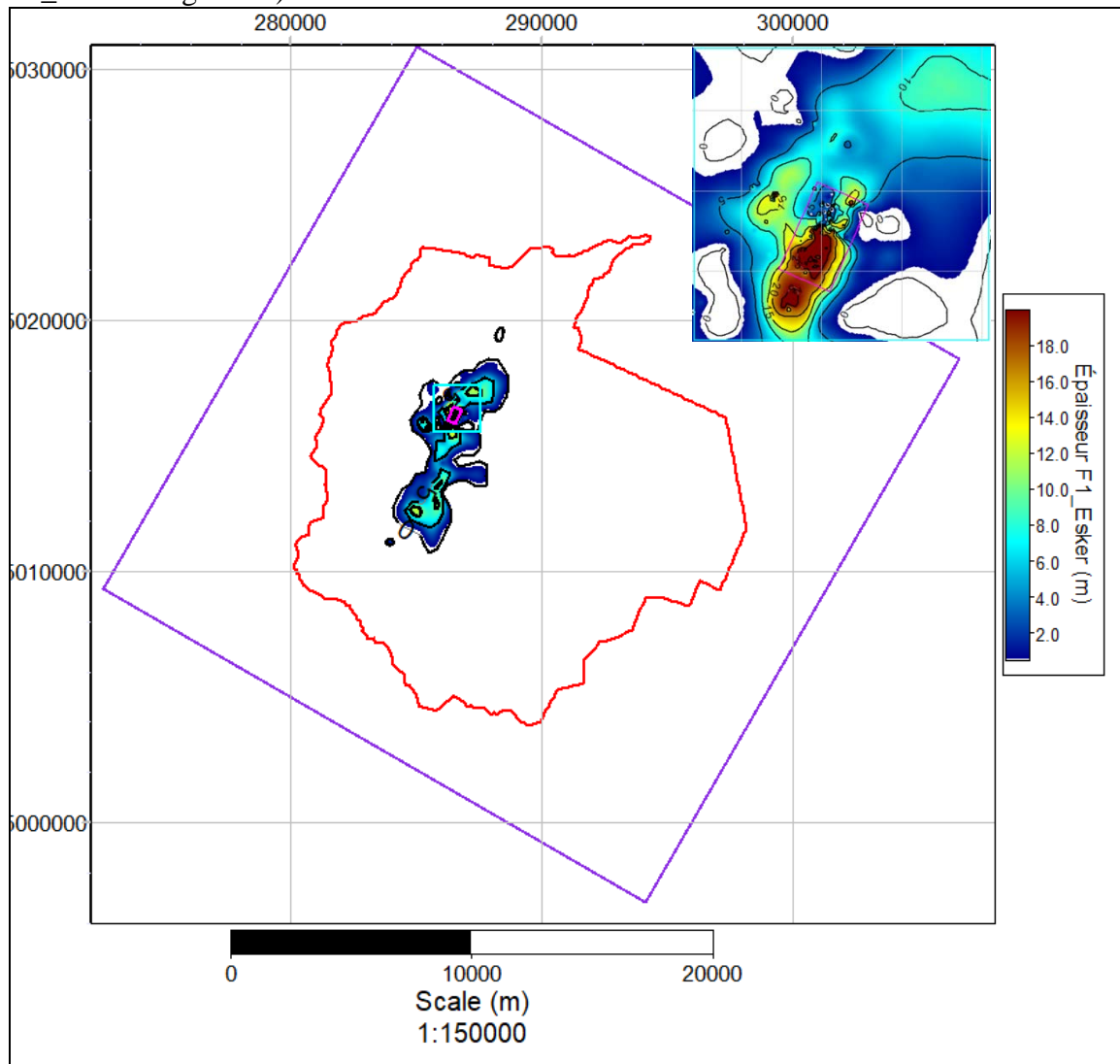


Figure 14. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F1_Esker. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

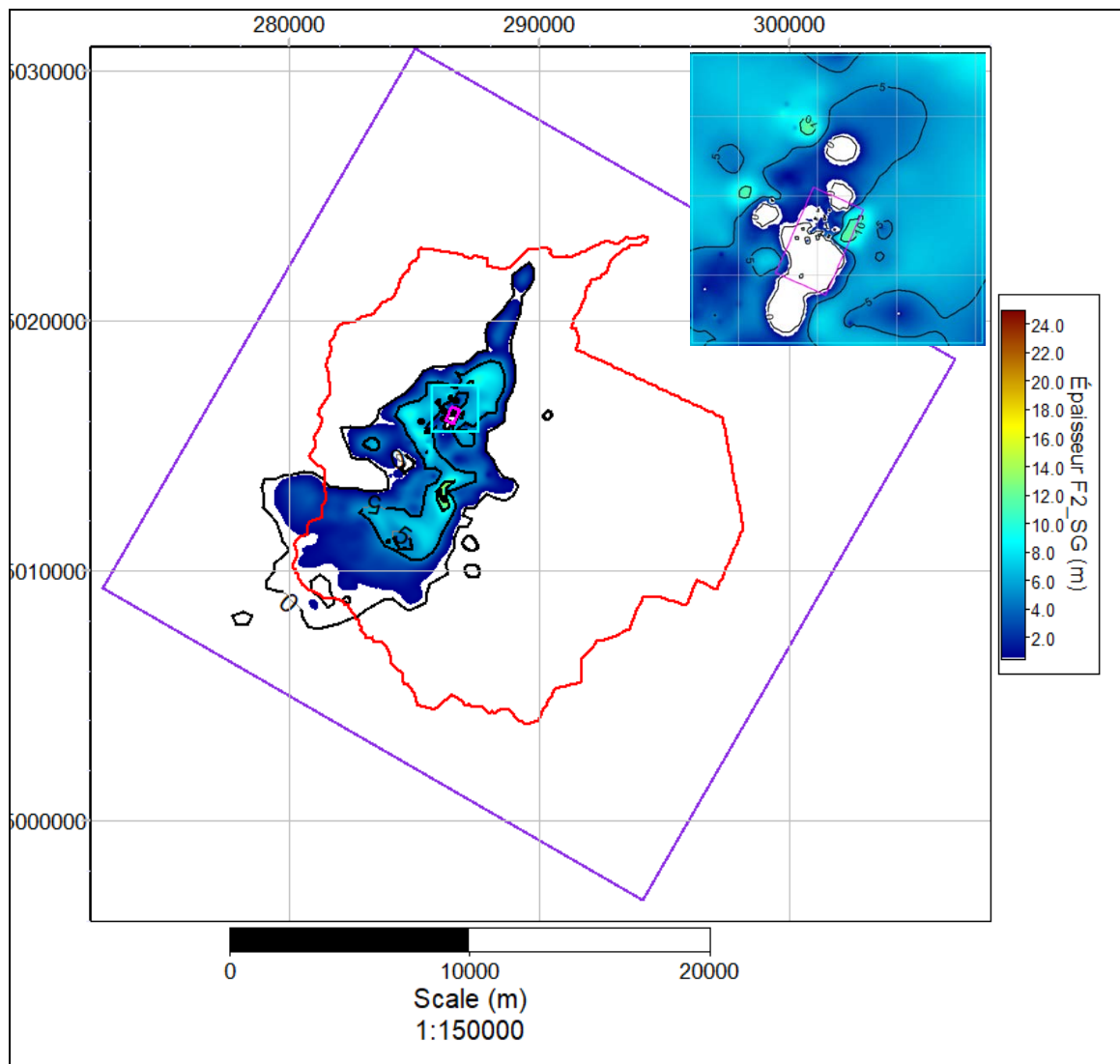


Figure 15. Carte des épaisseurs interpolées du faciès F2_SG. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

3.7. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité Argile_2

La modélisation de l'épaisseur de l'unité Argile_2 a été mise à jour pour tenir compte des nouvelles données disponibles :

- l'épaisseur d'Argile_2 a été modifiée localement aux puits où l'unité est affleurant à la surface, pour tenir compte des élévations mises à jour de la surface du sol ;
- assignation d'une zone géologique à l'unité Till_4 d'une zone initialement interprétée comme de l'Argile_2, dans le coin Nord-Ouest du modèle régional.

L'épaisseur de l'unité Argile_2 est initialement évaluée par krigeage ordinaire, avec un variogramme modélisé à 3 structures permettant de représenter les variations d'élévation à l'échelle régionale, avec une variance totale de 37 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 1 m^2 ;
- Modèle sphérique isotrope de portée 250 m et de contribution de 10 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.
- Modèle gaussien isotrope de portée 2700 m et de contribution de 26 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle régionale.

Cette première surface est lisse pour enlever certaines discontinuités et est ensuite utilisée comme dérive externe pour obtenir la carte finale des épaisseurs de l'unité Argile_2 par krigeage bayésien (Figure 16).

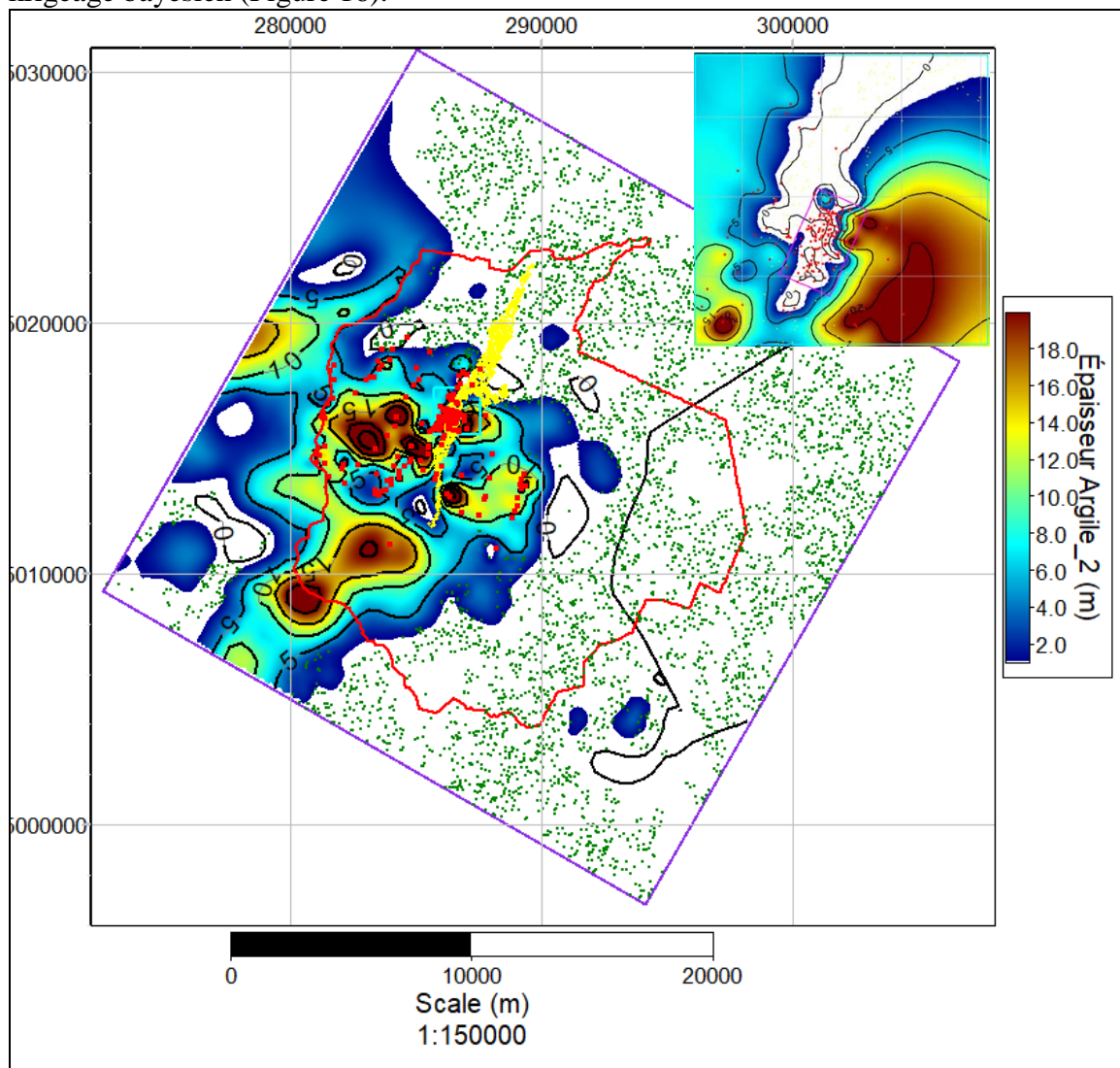


Figure 16. Carte des épaisseurs krigées de l'unité Argile_2. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose) ; épaisseurs évaluées aux puits (carrés rouges) ; points de contrôle à épaisseur 0 m selon la carte géologique de surface, où l'unité EskeSG_3 (points jaunes) et l'unité Till_4 (points verts) affleurent à la surface.

Le modèle de variogramme local est composé de 3 structures, avec une variance totale de 74 m^2 :

- Effet pépite de contribution (variance) 1.0 m^2 ;
- Modèle gaussien isotrope de portée 175 m et de contribution de 13 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle locale.
- Modèle gaussien isotrope de portée 1050 m et de contribution de 60 m^2 pour représenter les variations spatiales à l'échelle moyenne.

Bien que l'unité Argile_2 soit d'extension régionale, on voit que les argiles ne sont pas présentes en tous points du modèle. Son épaisseur maximale est de 25 m régionalement, et de 20 m sur le côté est du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. L'argile est absente sur une portion importante du site, localement, où l'esker est visible en surface.

3.8. Mise à jour de l'épaisseur de l'unité Remblai_Organique_1

L'utilisation du LIDAR par rapport aux données de la NASA a aidé à diminuer les erreurs d'interpolation de l'unité Remblai_Organique_1, alors qu'il y a une meilleure correspondance entre les élévations de la surface arpentées aux puits et les élévations du LIDAR. Les épaisseurs des unités hydrostratigraphiques modélisées sont additionnées à partir du roc pour être recoupées par le LIDAR. La carte des épaisseurs des dépôts de remblai ou organiques meubles (Figure 17) a été obtenue en réalisant la différence entre l'épaisseur totale (élévation du sol moins élévation du roc) et la somme des épaisseurs calculées pour les 3 unités (Argile_2, EskerSG_3 et Till_4). La distribution de cette unité est très parcellaire et correspond bien aux zones de remblai indiquées au site des lagunes de Ville Mercier.

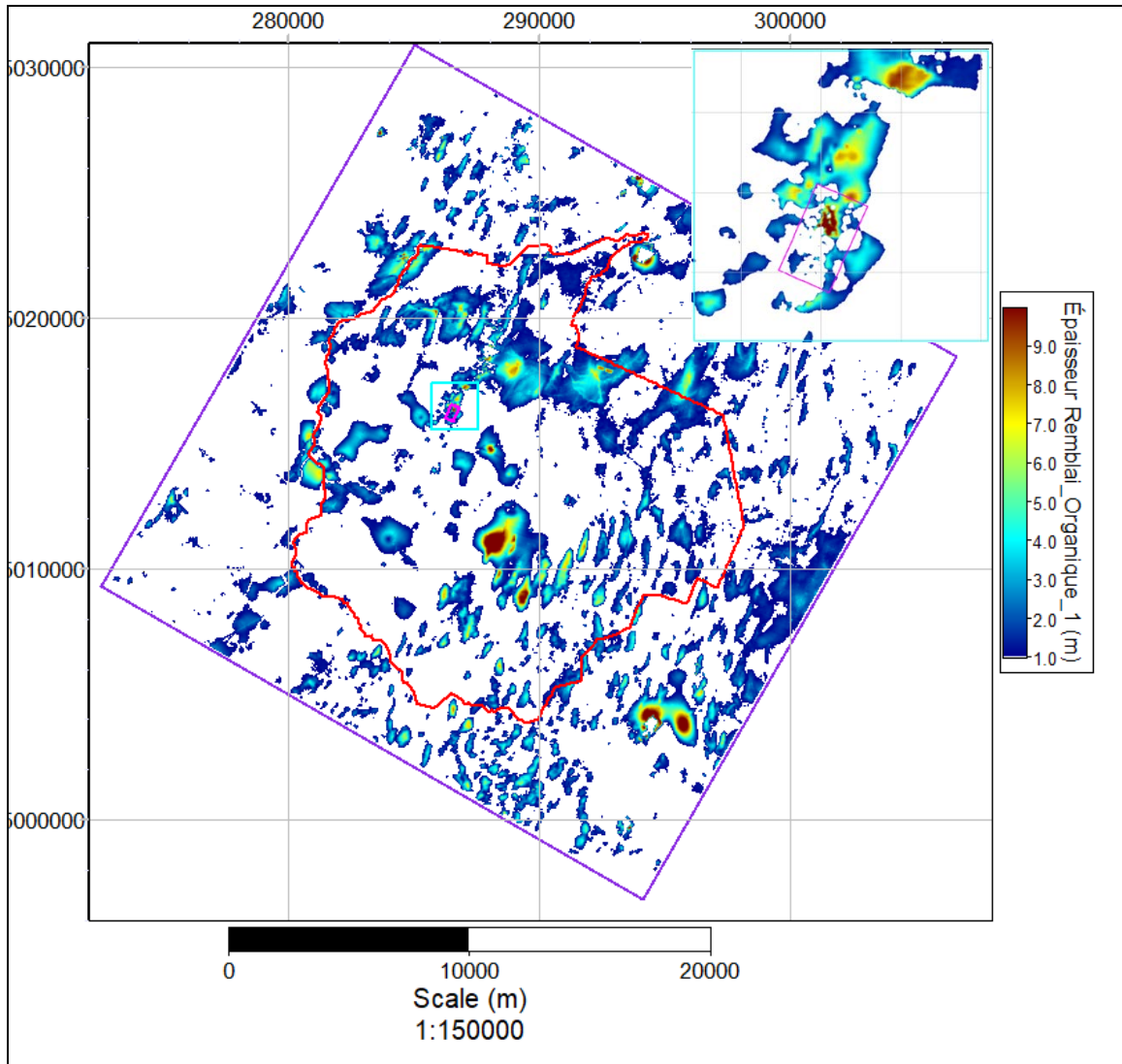


Figure 17. Carte des épaisseurs de l'unité Remblai_Organique_1. Limites modèle hydrostratigraphique 2020 (polygone mauve) ; limite modèle hydrogéologique (polygone rouge) ; limites des anciennes lagunes de Ville Mercier (polygone rose).

3.9. Mise à jour de la représentation 3D des unités dans le modèle régional

Les cartes d'épaisseurs et des élévations mises à jour des unités hydrostratigraphiques sont combinées ensemble pour construire le modèle conceptuel régional mis à jour (vue régionale à la Figure 18 et vue locale centrée sur les puits de l'UTES à la Figure 19). Le modèle est bâti sur une grille régulière avec des cellules de taille 25m x 25m x 1m, pour un total de 85 millions de cellules. On voit que le modèle régional s'accorde bien avec le modèle local fourni par le MELCC qui est aussi présenté sur la Figure 18.

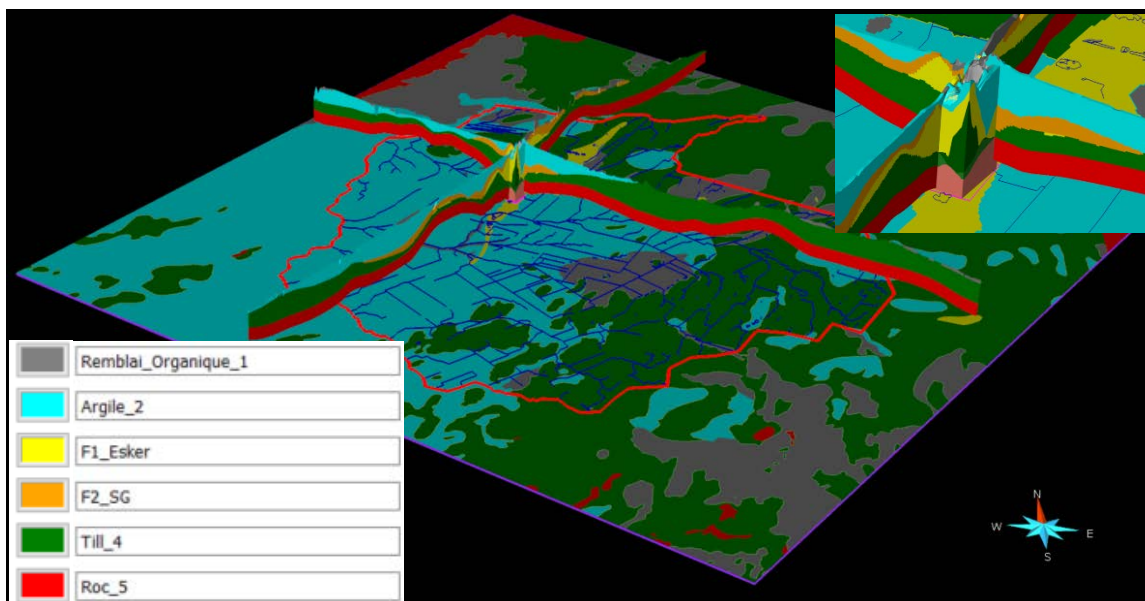


Figure 18. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques dans le modèle conceptuel régional. Exagération verticale de la vue régionale est de 40x, exagération verticale de la vue locale est de 20x. La carte de fond est la géologie de surface, avec le réseau hydrologique. Le modèle géologique local provenant du MELCC sur le site des lagunes de Ville Mercier est aussi présenté.

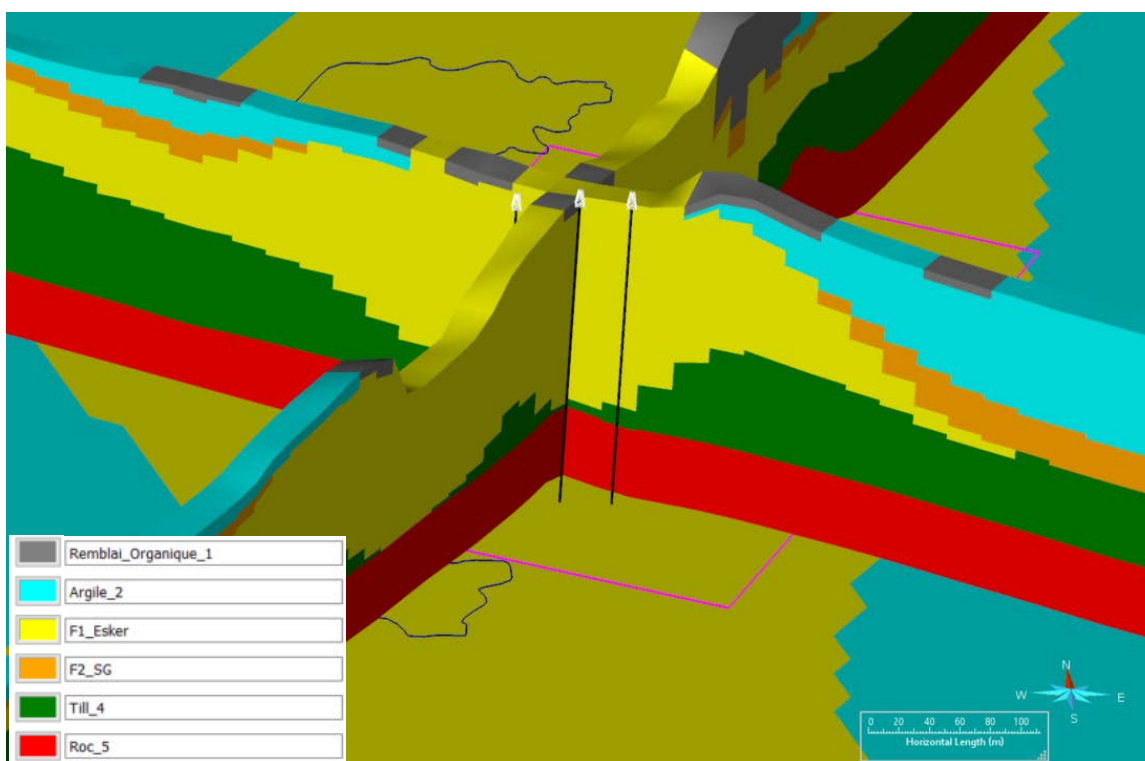


Figure 19. Vue 3D des unités hydrostratigraphiques au niveau du site de l'UTES, avec une exagération verticale de 5. La carte de fond est la géologie de surface. Les puits de l'UTES PW-113, PW-112, et PW-111 sont présentés en blanc et noir de gauche à droite, respectivement.

4. Contexte hydrogéologique

Les deux schémas des Figure 20 et Figure 21 résument le contexte hydrogéologique aux alentours du site des anciennes lagunes de Ville Mercier, expliquant le contexte régional géologique et son impact pour l'écoulement des eaux souterraines.

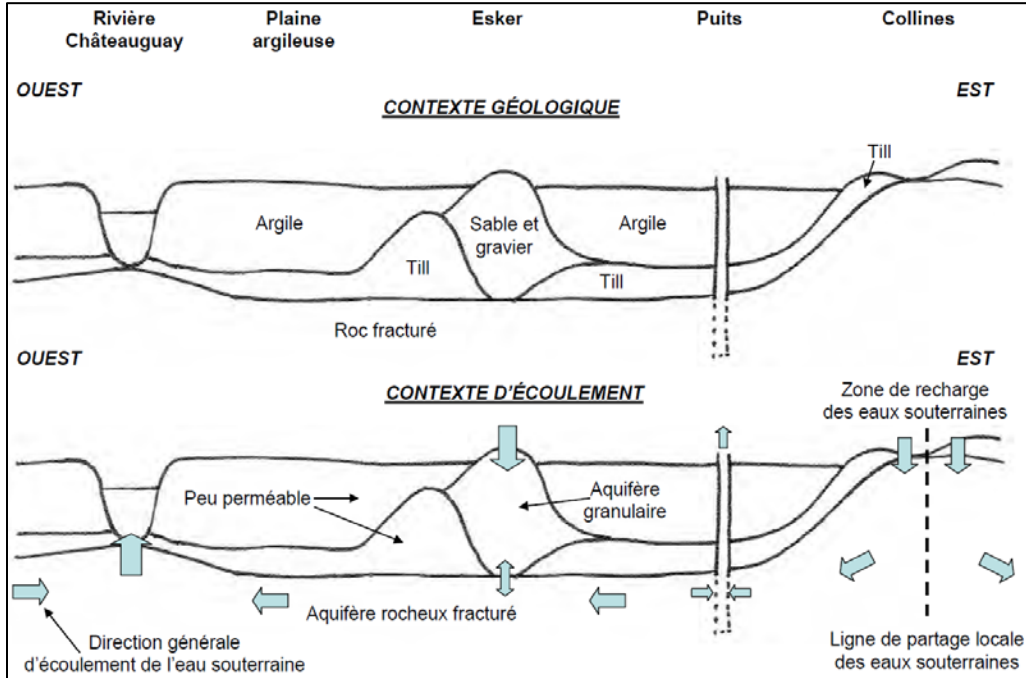


Figure 20. Schéma du contexte régional du site des anciennes lagunes de Mercier (Lefebvre, 2007).

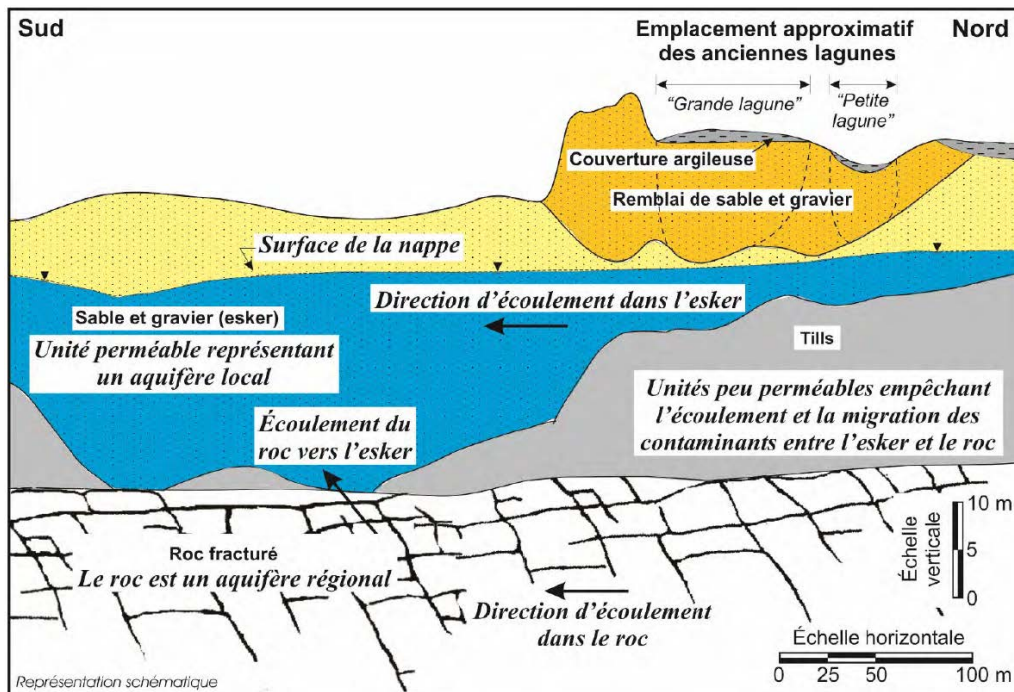


Figure 21. Modèle conceptuel du site des anciennes lagunes de Mercier représentant les unités géologiques et l'écoulement de l'eau souterraine (Lefebvre, 2007).

Les anciennes lagunes de Ville Mercier reposent sur un système aquifère constitué d'un roc fracturé recouvert par deux unités successives de till. Des sables et graviers d'origine fluvioglaciaire déposés par-dessus les tills constituent un deuxième aquifère superficiel de type esker, faisant quelques centaines de mètres de largeur et quelques kilomètres de longueur.

Bien que le site des anciennes lagunes de Ville Mercier ne fasse que quelques centaines de mètres de longueur, il faut intégrer tous les éléments régionaux pouvant influencer l'écoulement des eaux souterraines. La limite Ouest du modèle hydrogéologique est la Rivière Châteauguay qui draine la majorité des eaux de surface de la région, et qui est en contact hydraulique avec l'aquifère du roc fracturé au coin sud-ouest du modèle. La limite Nord du modèle est la limite du bassin versant de la Rivière Châteauguay, tandis que la limite Sud est la Rivière des Fèves. La limite Est du modèle est la ligne approximative de partage des eaux selon les élévations du roc. La limite supérieure du modèle est la surface topographique, tandis que la limite inférieure du modèle est fixée à 40 mètres sous le toit du roc, afin de représenter l'écoulement des eaux souterraines dans le roc fracturé.

5. Construction du modèle hydrogéologique déterministe

5.1. Construction du maillage 2D

La construction de la grille d'écoulement dans Feflow se fait en utilisant l'algorithme « *Triangle* » pour générer des éléments triangulaires en deux dimensions (2D) tout en permettant différents niveaux de raffinement souhaités autour d'éléments à considérer dans le modèle hydrogéologique. La grille a été construite afin de représenter parfaitement les éléments linéaires importants du modèle hydrogéologique tel que les cours d'eau et les limites latérales de certaines unités hydrostratigraphiques. Un niveau de raffinement a été appliqué pour obtenir des cellules d'au maximum 100m autour des limites du modèle et des cours d'eau principaux. Une grille irrégulière de 44 points de contrôles, incluant les 3 puits de pompage de l'UTES, a été utilisée au niveau local afin de permettre une discrétisation fine des éléments (taille des éléments souhaitée de 5m) au site des anciennes lagunes de Ville Mercier. La grille 2D finale (Figure 22) comporte 57 257 nœuds (113 569 éléments) par couche. La taille des éléments varie entre 5m et 150m.

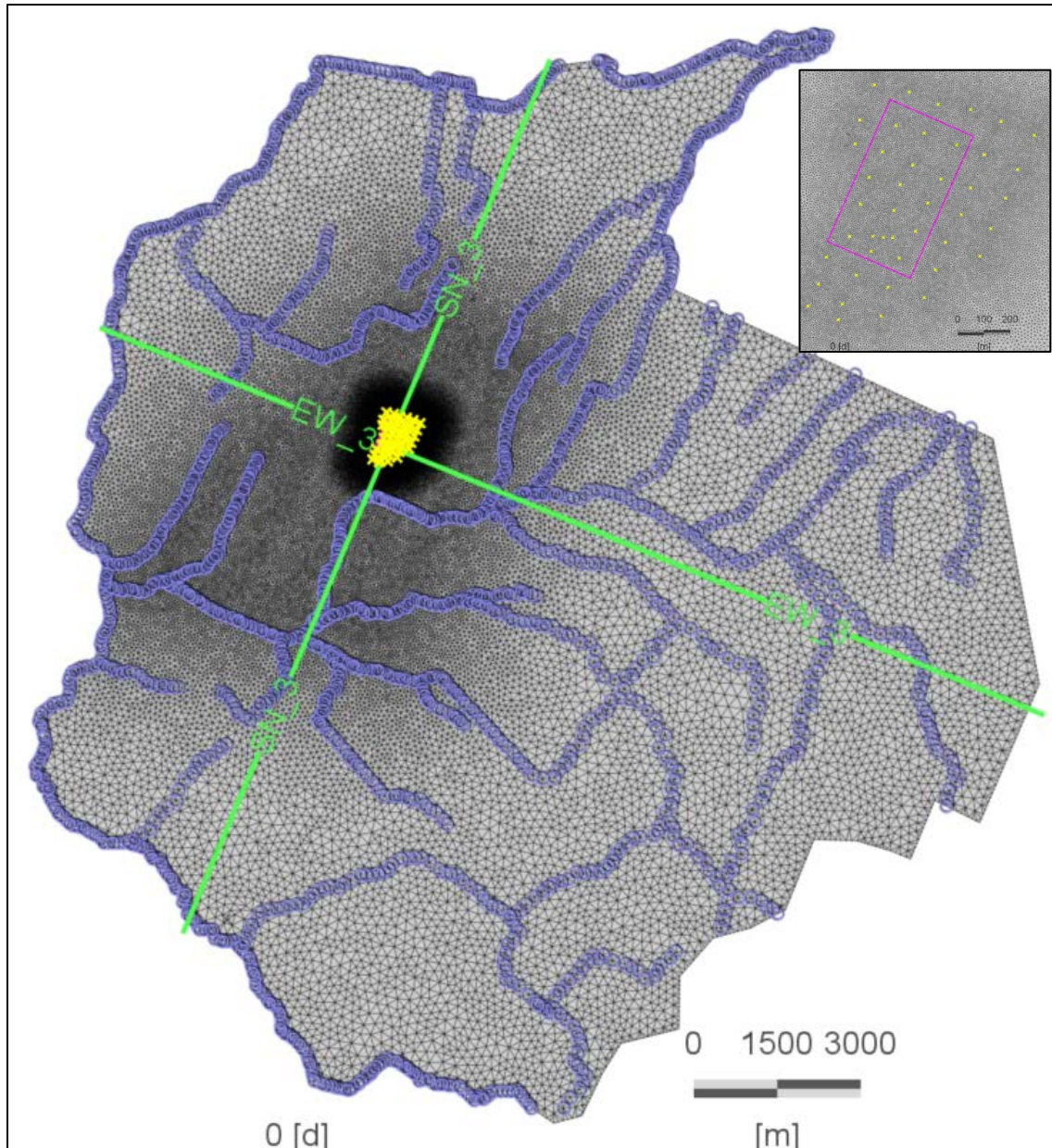


Figure 22. Représentation 2D de la grille de modélisation. Les ronds bleus représentent les nœuds des cours d'eau où sont assignées des conditions aux frontières à la surface. Les croix jaunes présentent les points de contrôle utilisés pour bâtir la grille 2D. Les lignes vertes sont les sections verticales EW_3 et SN_3 présentée à la figure suivante.

5.2. Construction de la grille d'écoulement 3D

La grille 2D est extrudée en trois dimensions (3D) afin de représenter les variations verticales des unités hydrostratigraphiques ainsi que les hétérogénéités verticales des propriétés hydrauliques. Une couche de 0.5 m d'épaisseur est imposée à la surface afin d'avoir un contrôle distinct sur la géologie de surface et assurer une recharge plus efficace au modèle. Deux couches minces sont ajoutées à la base de l'unité d'Argile_2 afin de bien représenter les différences de pressions et de charges entre les sédiments fins et peu

conducteurs de l'argile et les sédiments très conducteurs de l'esker. Une surface est fixée à l'élévation du toit de l'unité EskerSG_3 en tous points du modèle afin de représenter adéquatement cette unité. L'unité EskerSG_3 est subdivisée en 20 couches d'épaisseur proportionnelle afin de représenter, dans une étape ultérieure au projet, toutes les hétérogénéités verticales de la conductivité hydraulique dans cette unité. Afin d'éviter la création de couches très minces pouvant générer des instabilités numériques, la discrétisation se fait également sur l'unité de Till_4 au niveau régional. L'élévation du toit du roc est également fixée afin d'être adéquatement représentée dans le modèle. Le roc est représenté par un total de 9 couches, pour permettre une représentation adéquate de l'hétérogénéité verticale de la conductivité hydraulique dans l'étape ultérieure de modélisation. De haut en bas, les 9 couches du roc ont les épaisseurs suivantes :

- 5 couches avec $dz = 2\text{m}$,
- 2 couches avec $dz = 5\text{m}$ et,
- 2 couches avec $dz = 10\text{m}$.

Le modèle hydrogéologique régional 3D contient 35 couches (36 surfaces), pour un total de 2 061 252 nœuds (3 974 915 éléments). La Figure 23 et la Figure 24 montrent deux sections verticales traversant le modèle régional 3D.

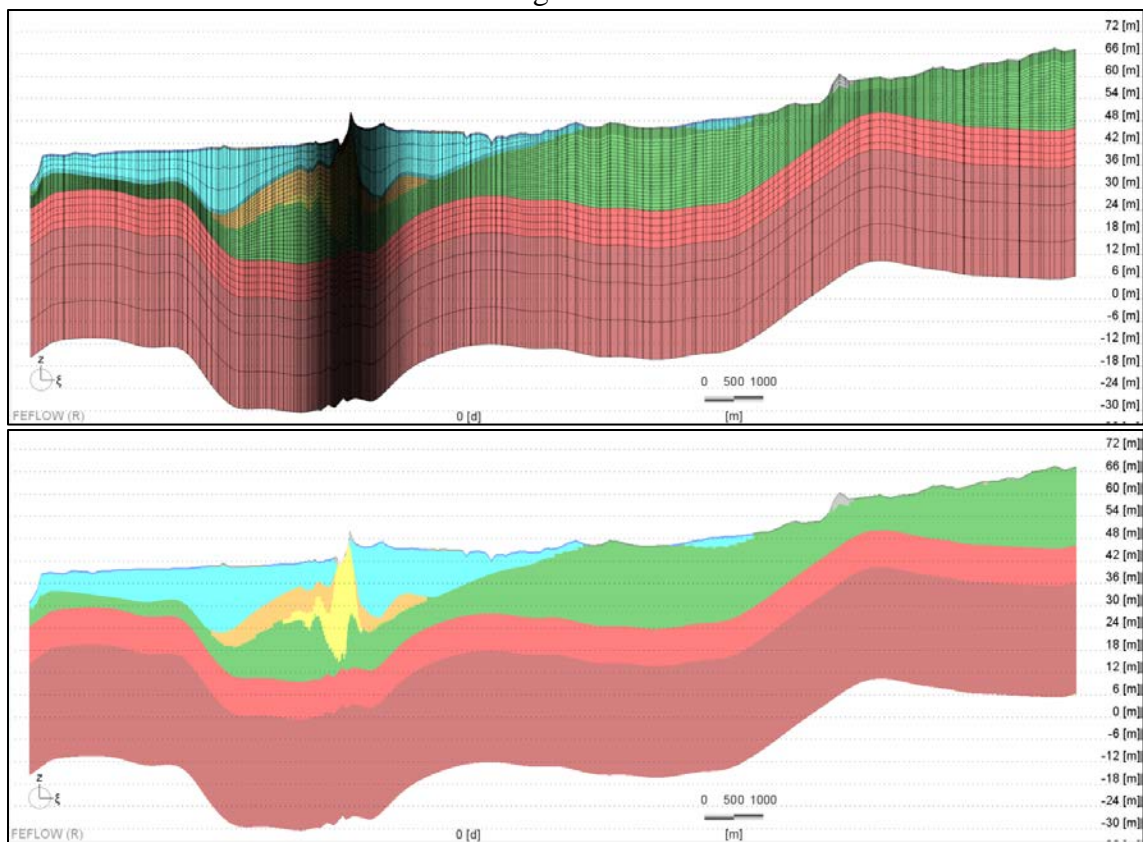


Figure 23. Section verticale (EW_3 sur la Figure 22) d'ouest (gauche) vers l'est (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments.

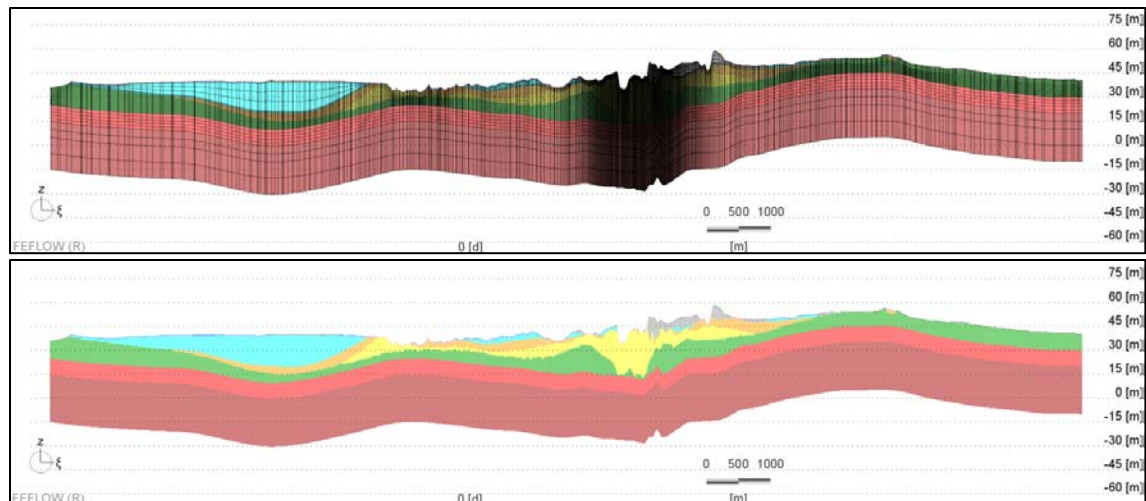


Figure 24. Section verticale (SN_3 sur la Figure 22) du sud (gauche) ou nord (droite) du modèle hydrogéologique 3D, montrant la représentation numérique des unités hydrostratigraphiques avec (haut) et sans (bas) la discrétisation latérale et verticale des éléments.

5.3. Propriétés hydrauliques

Dans le modèle hydrogéologique déterministe, une valeur unique de conductivité hydraulique est assignée par unité hydrostratigraphique (Tableau 2). La valeur initiale correspond à une valeur représentative des valeurs mesurées au site, et sera calibrée afin d'honorer les valeurs de charges hydrauliques lues aux piézomètres, régionalement et localement.

Tableau 2. Valeurs de conductivité hydraulique initialement assignées aux différentes unités hydrostratigraphiques du modèle hydrogéologique.

Unité	Couleur sur les figures	K_{xy} (m/s)	K_z (m/s)
Remblai et Organique	gris	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}
Argile	cyan	6.0×10^{-8}	6.0×10^{-9}
F1_Esker	jaune	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}
F2_SG	orange	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-6}
Till	vert	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-8}
Roc fracturé	rouge	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}
Roc sain	marron	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}

5.4. Conditions aux frontières

La Rivière Châteauguay située à la limite ouest du modèle est le principal élément drainant l'eau de surface de la région. La rivière l'Esturgeon est le principal cours d'eau situé à l'intérieur des limites du modèle, passant au sud du site des anciennes lagunes de Ville Mercier. Les autres cours d'eau situés à l'intérieur des limites du modèle sont pour la plupart des canaux d'irrigation non permanents. Seuls les cours d'eau reconnus et les canaux d'irrigation plus importants sont inclus dans le modèle comme conditions aux frontières.

Une condition aux frontières de type « charge constante » égale à l'élévation de la surface topographique est assignée aux cours d'eau principaux à l'intérieur du domaine de modélisation (Figure 22).

Une charge constante est assignée au roc à la limite sud-est du modèle, variant de 48 masl au sud à 60 masl à l'est dans les environs de St-Rémi. Une charge constante à 30 masl est assignée au roc à la limite sud-ouest du modèle, au niveau de la Rivière Châteauguay. Une charge constante de 34 masl est assignée au sud-ouest du modèle, où l'unité EskerSG_3 est modélisée comme étant en connexion avec la Rivière Châteauguay.

5.5. Recharge

La distribution spatiale de la recharge provient du modèle développé par Croteau et coll. (2010), effectué avec HELP, révisée pour tenir compte de l'utilisation d'eau dans la région par les municipalités et certains grands utilisateurs industriels (Figure 25). Cette recharge fluctue en fonction de la géologie de surface, et varie de 0 mm/an à 120 mm/a régionalement.

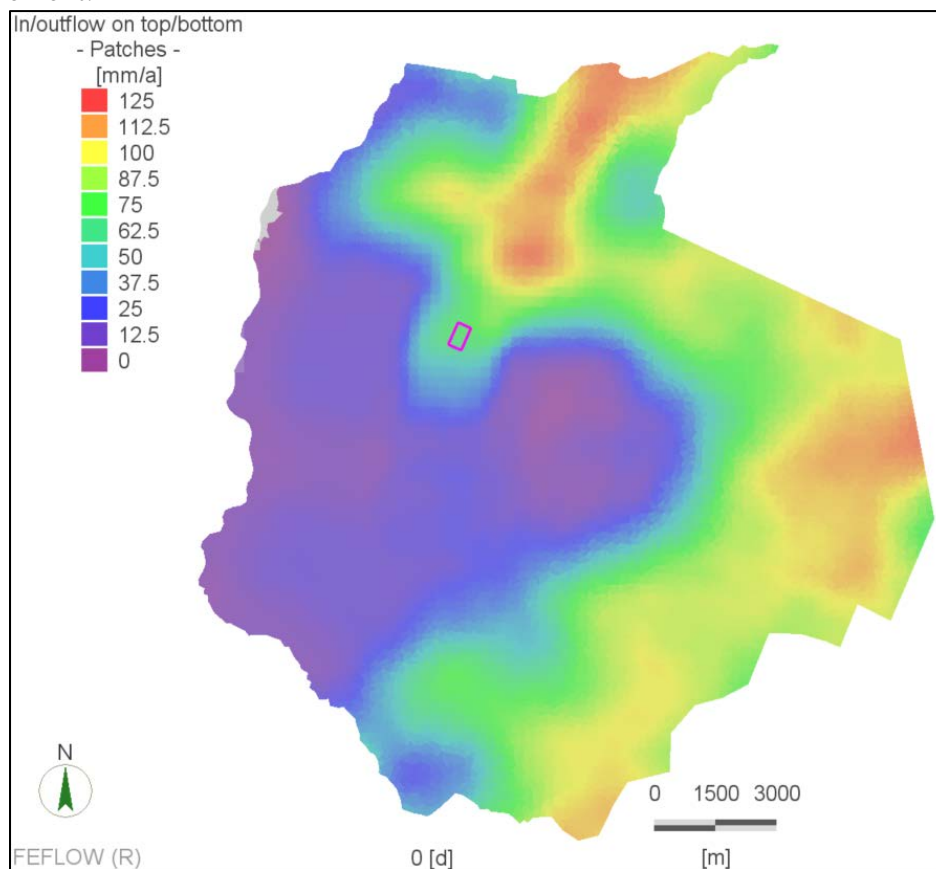


Figure 25. Distribution spatiale de la recharge efficace assignée à la première couche du modèle hydrogéologique.

6. Calibration du modèle déterministe

La calibration du modèle déterministe se fera de façon classique par le logiciel PESTPP en calibrant une valeur de conductivité hydraulique par unité hydrostratigraphique. Cette calibration initiale permettra de déterminer les valeurs de conductivité hydrauliques à assigner au niveau régional. Ces valeurs serviront de points de contrôle pour les simulations géostatistiques de la conductivité hydraulique au niveau local à l'étape suivante du projet.

La calibration du modèle régional déterministe est faite en régime permanent seulement. Le modèle régional est défini en mode confiné avec un niveau de saturation de 100% sur tout le domaine de modélisation. Bien que ces hypothèses ne soient pas représentatives des conditions locales où la présence de l'esker en surface rende le modèle partiellement saturé et non-confiné, ces conditions sont justifiables au niveau régional pour calibrer les valeurs de charges hydrauliques représentant l'écoulement régional en régime permanent.

6.1. Niveaux d'eau à calibrer

Plusieurs sources de niveaux d'eau sont disponibles pour permettre la calibration.

La source d'information la plus fiable est la liste de piézomètres relevés bi-annuellement par le MELCC, comprenant 2 données de niveaux d'eau par année entre 1999 et 2020. La valeur maximale de niveau d'eau lue à chacun des piézomètres pendant cet intervalle de temps est la valeur retenue pour la calibration en régime permanent. Un total de 99 niveaux d'eau provient de cette base de données.

Une deuxième source de données de niveaux d'eau provient du « CD_2000_NL », où des lectures de piézométrie ont été effectuées à 3 reprises en 1996. En gardant les valeurs maximales de niveaux d'eau à chaque piézomètre, 76 niveaux d'eau sont disponibles.

Douze puits provenant du réseau québécois de suivi sont également disponibles au niveau régional. Encore une fois, les valeurs maximales lues à chaque puits de suivi sont gardées pour la calibration du régime permanent.

Les puits du système d'information hydrogéologique (SIH) du MELCC sont également une source importante de niveaux d'eau au niveau régional. Bien que ces données des puisatiers soient entachées d'une plus incertitude, cela reste une importante source d'observations servant à la calibration. Un total de 629 niveaux d'eau sont disponibles à partir des puits SIH à l'échelle régionale, dont 45 valeurs provenant d'une étude régionale de Technorem (2008) qui ont été validées et sont donc jugées plus fiables pour la calibration.

111 points de contrôle représentant l'élévation du niveau du sol sont aussi rajoutés à la calibration afin de mieux contrôler les variations des niveaux d'eau possible.

Une pondération sera utilisée pour réduire le poids de certaines observations jugées moins fiable pendant la calibration. Par exemple, aux doublons sont assignés un poids de 0 pendant la calibration, et aux puits SIH sont assignés un poids plus faible pour tenir compte

de la plus grande incertitude reliée à leur valeur. La pondération finale n'est pas établie et sera adaptée pendant la calibration du modèle. La distribution des observations de niveaux d'eau à calibrer est présentée à la Figure 26 (échelle régionale) et à la Figure 27 (échelle locale).

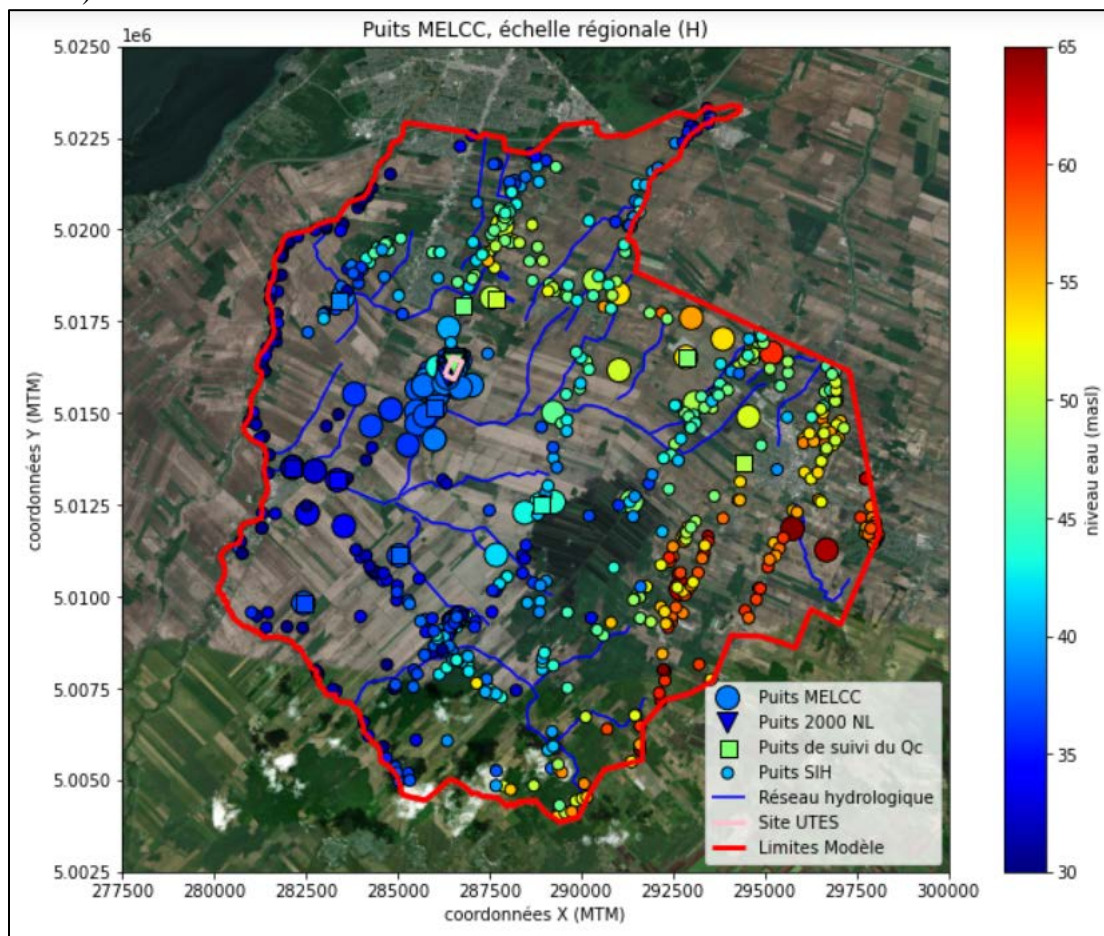


Figure 26. Distribution régionale des observations de niveaux d'eau à calibrer sur le modèle hydrogéologique régional de Ville Mercier.

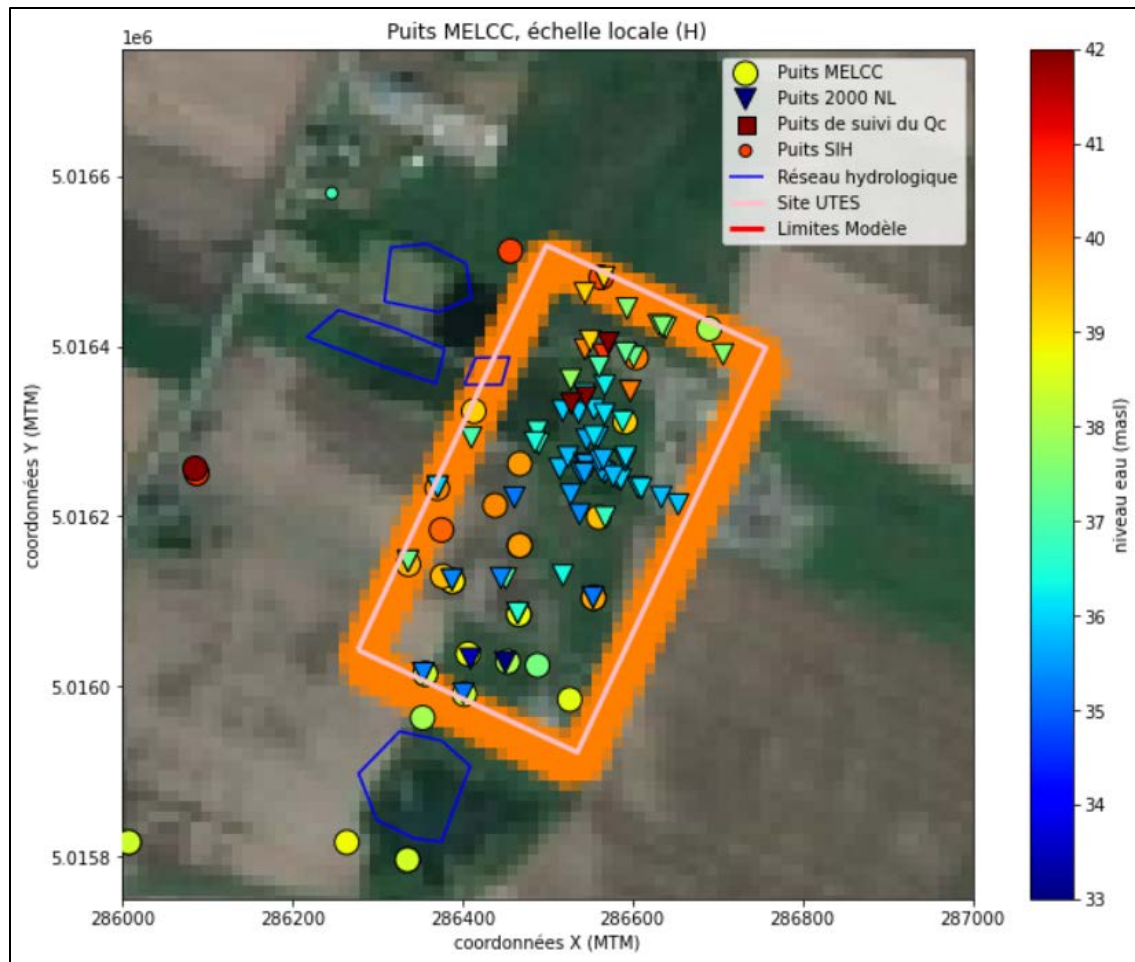


Figure 27. Distribution locale des observations de niveaux d'eau à calibrer sur le modèle hydrogéologique régional de Ville Mercier.

7. Prochaines étapes et recommandations

7.1. Compilation et acquisition de données

Bien que l'ajout de données soit toujours recommandable, suffisamment de données sont disponibles pour assurer le bon déroulement du projet.

7.2. Modèle conceptuel hydrostratigraphique

Le modèle est mis à jour et sera utilisé dans cette version pour les modélisations hydrogéologiques numériques.

7.3. Élaboration d'une maquette numérique 3D du site

Trois niveaux d'incertitude sur les conductivités hydrauliques seront intégrés dans la maquette numérique afin de représenter l'hétérogénéité spatiale telle qu'observée sur les données.

7.3.1. Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans le roc

Des simulations gaussiennes séquentielles (SGS) seront utilisées pour représenter un ensemble de réalisations équiprobables de la distribution de la conductivité hydraulique dans le roc fracturé. Les diagraphies de rayonnement gamma seront utilisées afin de valider l'épaisseur de la couche de roc fracturé au niveau local.

7.3.2. Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans l'unité Till_4

La principale inconnue concerne la présence, la taille et la continuité de fenêtres potentielles permettant une connexion hydraulique entre l'unité EskerSG_3 et le roc à travers l'unité du Till_4. Cette étape s'effectuera par la méthode des points pilotes. La méthode des points pilotes utilise une grille (régulière ou irrégulière) de points de contrôle de conductivité hydraulique (les points pilotes) qui servent de données initiales pour compléter une interpolation de la conductivité en tous points de l'unité. Plutôt que de tenter de calibrer tous les points contenus dans l'unité, seuls les points pilotes sont calibrés et l'interpolation est roulée de nouveau avec les points pilotes mis à jour. Cette méthode permet une réduction du nombre de paramètres à assimiler et permettra de détecter le niveau de communication hydraulique nécessaire entre l'EskerSG_3 et le roc afin de calibrer le modèle.

7.3.3. Hétérogénéité de la conductivité hydraulique dans l'unité EskerSG_3

Utilisant les valeurs de conductivité hydraulique disponible localement et les valeurs acquises et interprétées par les essais de perméabilité multi-niveaux, plusieurs réalisations de conductivité hydraulique seront roulées à l'aide de simulations Gaussiennes séquentielles. Les simulations seront roulées distinctivement pour les deux hydrofaciès de l'unité, soit le faciès F1_Esker et le faciès F2_SG afin de permettre l'utilisation de paramètres de simulations distincts pour représenter les modes de déposition unique de chaque faciès.

7.4. Calibration stochastiques

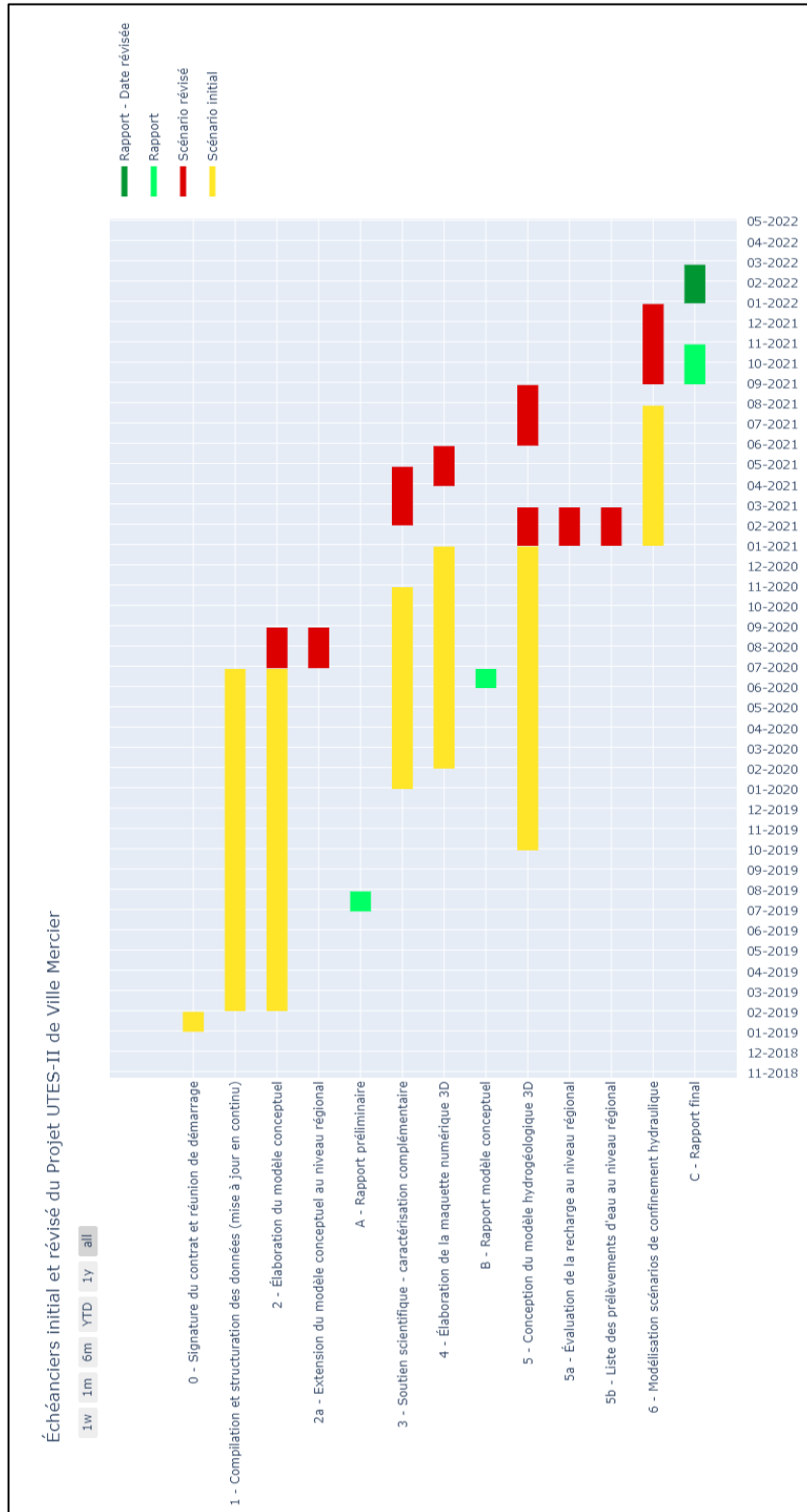
Le processus a déjà été implanté pour un autre projet et sera facilement transférable au projet des anciennes lagunes de Ville Mercier. La calibration stochastique s'effectuera par une méthode d'ensemble itérative (iES) disponible sous PestPP-iES, à partir d'un ensemble de modèles hydrogéologiques représentant la maquette numérique des distributions spatiales de la conductivité hydraulique.

7.5. Tests de scénarios de pompage de l'UTES-II

La modélisation directe des différents scénarios à tester sera effectuée sur l'ensemble des modèles hydrogéologiques mis à jour suite à la calibration stochastique. Ces modélisations directes permettront de juger du meilleur scénario à retenir pour l'implémentation de l'UTES-II.

7.6. Échéancier

Les tâches complétées et à accomplir sont détaillées à la page suivante, avec l'échéancier initial et un échéancier révisé approuvé par un avenant au présent contrat.



8. Références

- Béraud, T., Claprood, M. et E. Gloaguen. 2019. Rapport préliminaire du modèle conceptuel des lagunes de Ville-Mercier. INRS – Centre ETE. Rapport soumis au Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), juillet 2019.
- Claprood, M., Béraud, T., Gloaguen, E. et R. Martel. 2020. Rapport d’avancement 2020 du Projet UTES-II de Ville Mercier. INRS – Centre ETE. Rapport soumis au Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC), juin 2020.
- Croteau, A., Nastev, M. et R. Lefèbre. 2010. *Groundwater recharge assessment in the Châteauguay watershed*. Canadian Water Resources Journal. 35. 451-468. doi: 10.4296/cwrj3504451.
- DHI, Mike Powered by DHI. 2020. *FEFLOW* (Version 7.3 [3D + 2D]). Interactive Graphics-based Finite Element Simulation System for Subsurface flow and Transport Processes.
- Globensky, Y., 1986. *Géologie de la région de St-Chrysostome et de Lachine*. Rapport MM 84-02, Ministère de l’énergie et des ressources du Québec.
- Lefebvre, R., 2007. *Contexte hydrogéologique et potentiel de réhabilitation du site des anciennes lagunes de Mercier (Québec), Canada*. Rapport R-914, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport d’expertise soumis à la direction des politiques de l’eau, Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs, mars 2007.
- Martel, R., Robert, T., Batailler, É., Boutin, M., Deschênes-Rancourt, C. et L. Trépanier, 2018. *Revue de littérature sur les technologies de réhabilitation des sols et des eaux souterraines et réévaluation du potentiel de réhabilitation du site contaminé des anciennes lagunes de Mercier*. Rapport R1783, INRS – Eau, Terre et Environnement, Rapport final présenté au Ministère de l’Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 17 octobre 2007.
- Paradigm SKUA-GOCAD, Logiciel de modélisation géologique. <http://www.pdgm.com/products/gocad/>.
- PESTPP. Tools for non-intrusive and scalable parameter estimation and uncertainty quantification. <https://github.com/usgs/pestpp>.
- Pontlevoy, O., 2004. *Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec.
- Système d’Information Hydrogéologique (SIH). accédé le 11 janvier 2021. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>
- Technorem, 2008. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des bassins versants des rivières Norton, Esturgeons, Saint-Pierre et de la Tortue – Montérégie. Rapport soumis au Syndicat des producteurs maraîchers de Saint-Jean-Valleyfield. No de Projet : 5074, mars 2008.

Annexe 4

Données géologiques et hydrogéologiques
utilisées dans ce projet
(Annexe numérique)

Annexe 5

Document de travail du modèle conceptuel
dans le logiciel SKUA-GOCAD

Ce document de travail détaille les étapes et hypothèses émises afin de construire le modèle conceptuel structural dans GOCAD. On y fait la liste exhaustive des données utilisées afin d'interpoler chacune des surfaces incluses dans le modèle conceptuel, en listant tous les paramètres et algorithmes d'interpolation utilisés afin qu'une tierce personne puisse reconstruire le modèle en son entièreté.

Le modèle conceptuel comporte 5 horizons délimitant des unités géologiques. Le tableau ci-dessous fait la liste des horizons, de haut en bas, avec entre parenthèse, l'appellation des unités dans le rapport.

- A. Surface Topographique (Remblai_Organique_1)
- B. Toit de l'unité d'Argile Marine (Argile2)
- C. Toit de l'unité Esker Sable & Gravier (EskerSG3)
 - a. Proportion d'Esker (Faciès F1)
 - b. Proportion de Sable & Gravier (Faciès F2)
- D. Toit de l'unité Till (Till4)
- E. Toit du Roc (Roc5)

Ce document de travail est structuré pour suivre l'ordre de modélisation des différents horizons géologiques dans le modèle conceptuel, selon la table des matières suivante :

Table des matières

1	Surface Topo	2
2	Roc5.....	3
3	Till4.....	7
4	EskerSG3	12
5	Argile2	17
6	Remblai_Organique_1	23
7	Modèle 3D.....	23
8	Faciès F1 (esker) et F2 (sable et gravier d'épandage) de l'unité EskerSG3.....	25

1 Surface Topo

1.1 Données utilisées

1. Marqueurs_Topo_2021
 - Élévation de la surface mesurée à 287 puits de contrôle et aux 10 puits de Technorem
2. Lidar_25m
 - LIDAR échantillonné au 25m

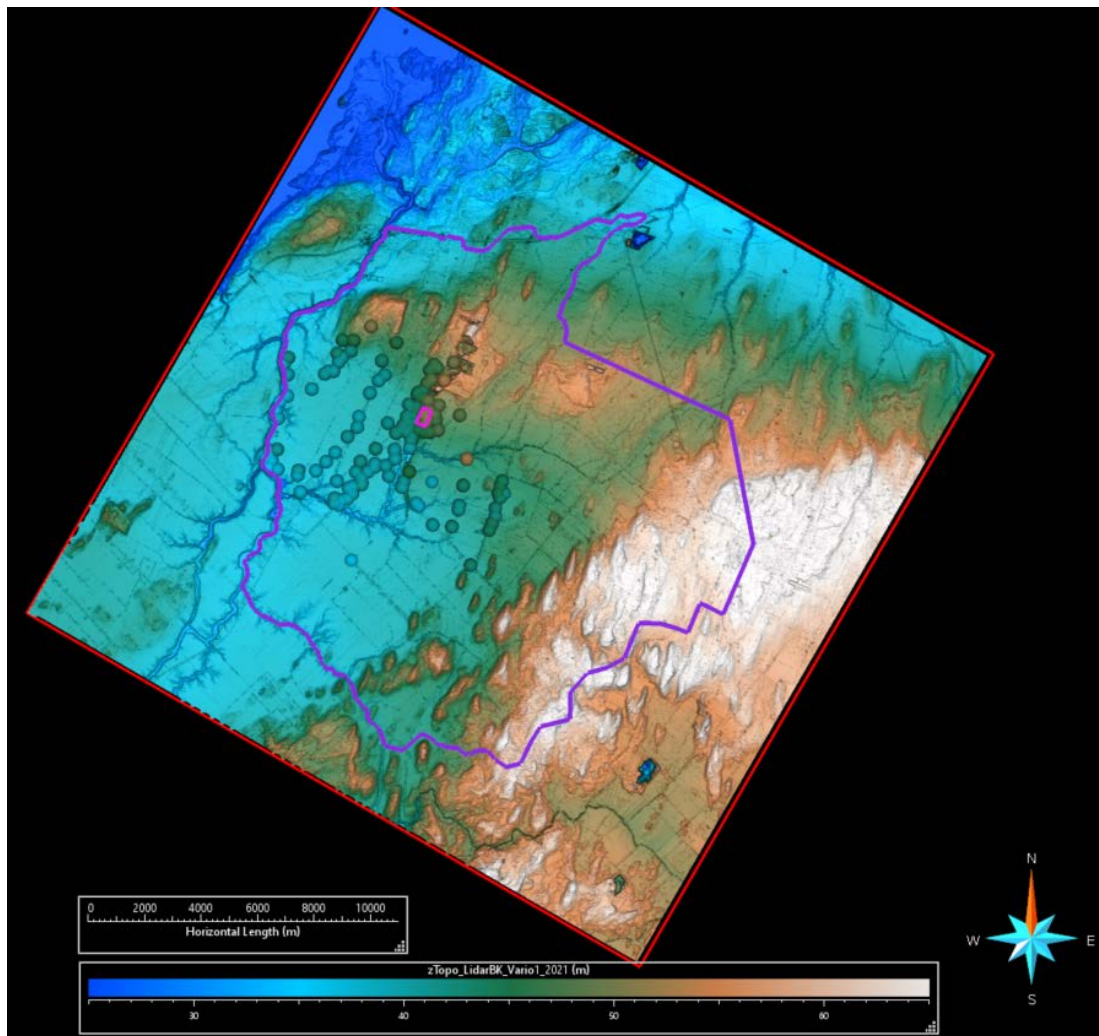
1.2 Méthodologie

Un krigeage avec dérive externe (KED, version bayésienne dans GOCAD) est effectué pour honorer parfaitement les marqueurs topo aux puits et utiliser le LIDAR partout ailleurs. Le krigeage est complété sur une grille régulière fine ($dxy = 10m$), avec un voisinage global incluant tous les points de contrôle, et un modèle sphérique de variogramme modélisé à partir des marqueurs topo. Les paramètres de krigeage sont donnés dans les tableaux suivants.

Paramètres de krigeage et modèle de variogramme de la surface topographique

The image displays two screenshots of the GOCAD software interface. The left screenshot shows the 'Bayesian Kriging' dialog box. The 'Simulation Grid' section is set to 'Geo_Grid_10m'. The 'Conditioning Data' section shows 'Input data objects' as 'Marqueurs_Topo_2021' and 'Input data property' as 'Z'. The 'Statistics' section shows the 'Variogram' as 'Vario1_Topo_SmallScaleOnly'. The 'Interpolation Parameters' section shows 'Drift property' as 'Z_Lidar_25m' and 'Max nb used points' as 290. The right screenshot shows the 'Variogram' dialog box. The 'Variogram' is set to 'Vario1_Topo_SmallScaleOnly'. The 'Type' is 'Depth'. The 'Coordinate System' is 'Lidar_25m'. The 'Sill' is 16.8301 and the 'Nugget' is 0.791082. The 'Contribution' is 16.039 and the 'Type' is 'Spherical'. The 'R1 (Max)' is 300, 'R2 (Min)' is 300, and 'R3 (Vertical)' is 1. The 'Azimuth' is 0, 'Dip' is 0, and 'Plunge' is 0.

1.3 Carte Topo finale

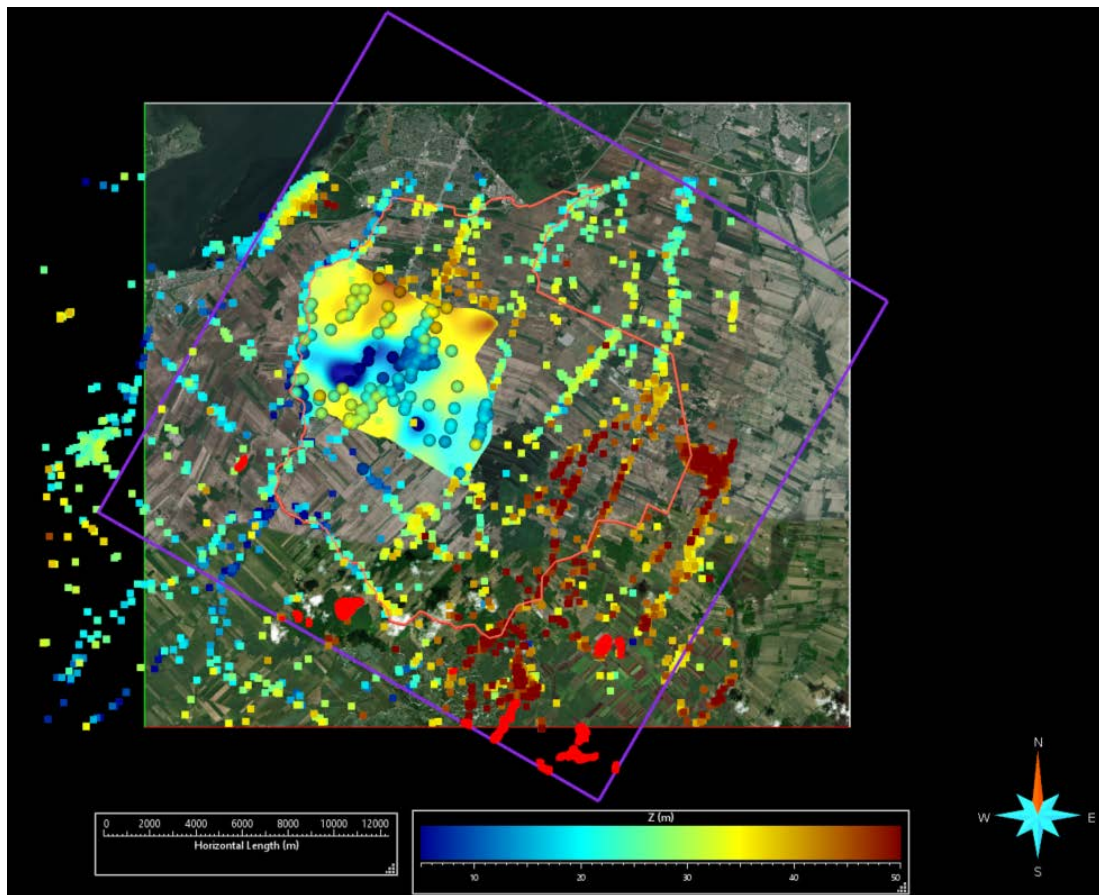


Surface Topographique interpolée

2 Roc5

2.1 Données utilisées

1. SIH_ROC_Z_2021 (carrés)
 - Profondeur au roc sur les puits SIH de la région, filtrés pour ne garder que les données les plus fiables (2702 points de contrôle).
Élévation du roc est la différence entre l'élévation de la surface topo modélisée précédemment et la profondeur au roc listée dans les puits SIH.
2. Roc_Surface (points rouges)
 - Élévation topographique échantillonnée à partir de la carte régionale de géologie de surface.
3. Roc_Test_sans_esker (surface)
 - Élévation du roc modélisée provenant du modèle géologique de Pontlevoy (2004).
4. Marqueurs_Roc5_2021 (sphères)
 - Élévations obtenues à partir des marqueurs aux puits de forage sur la zone d'étude (246 points de contrôle).



Données utilisées pour l'interpolation de l'élévation du roc

2.2 Méthodologie

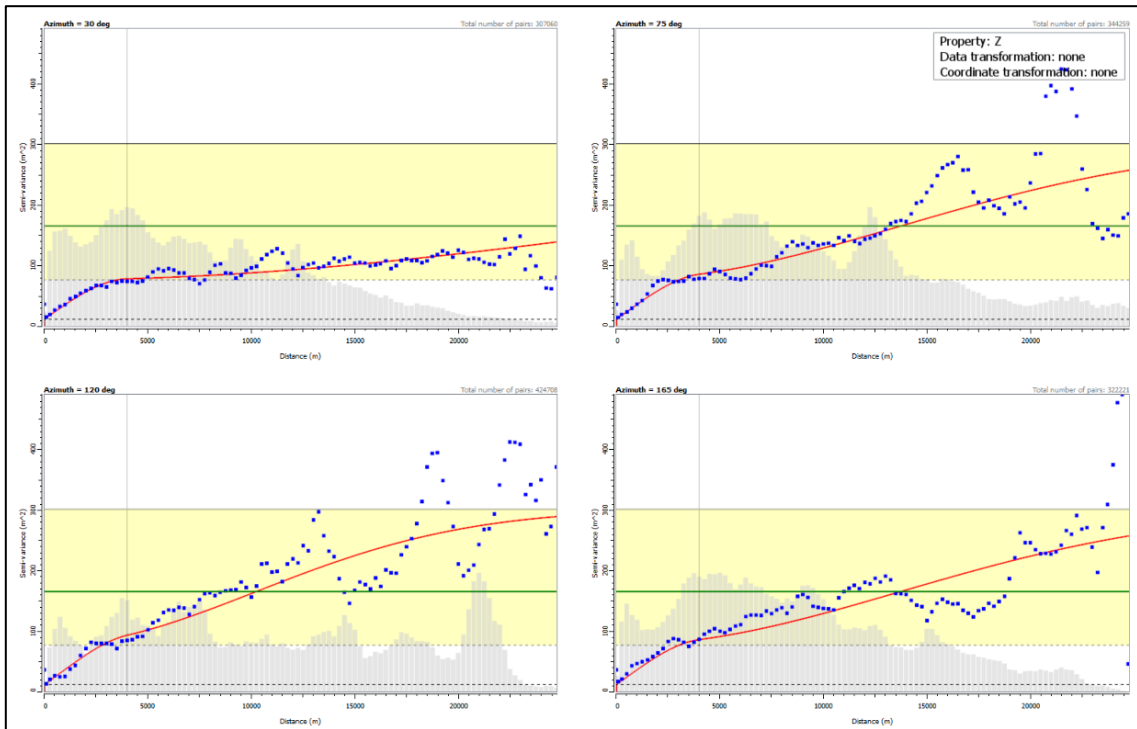
On procède en 2 étapes pour interpoler la carte des élévations du roc; soit un krigeage ordinaire suivi d'un krigeage avec dérive externe.

2.2.1 Krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire permet d'interpoler les élévations du roc en incluant toutes les données de roc disponibles. Cette première interpolation se fait en tenant compte de la grande incertitude existant sur les données, et se fait sur une grille grossière ($dx = dy = 100m$) avec un voisinage de 750 points maximum. Les tendances spatiales sont respectées, mais les données ne sont pas honorées parfaitement. Il y a une grande incertitude sur les données SIH, de la géologie de surface, et il n'est pas nécessaire d'honorer parfaitement toutes ces données, mais au moins en respecter les tendances.

Paramètres de krigeage, variogramme expérimental et modèle de variogramme du roc

Variogram structures						
	Type	Contribution (m ²)	Azimuth (deg)	Rv (m)	R1 (m)	R2 (m)
1	Spherical	65	0	1	4000	4000
2	Gaussian	225	30	1	75000	25000



Variogramme expérimental et modèle de variogramme du roc

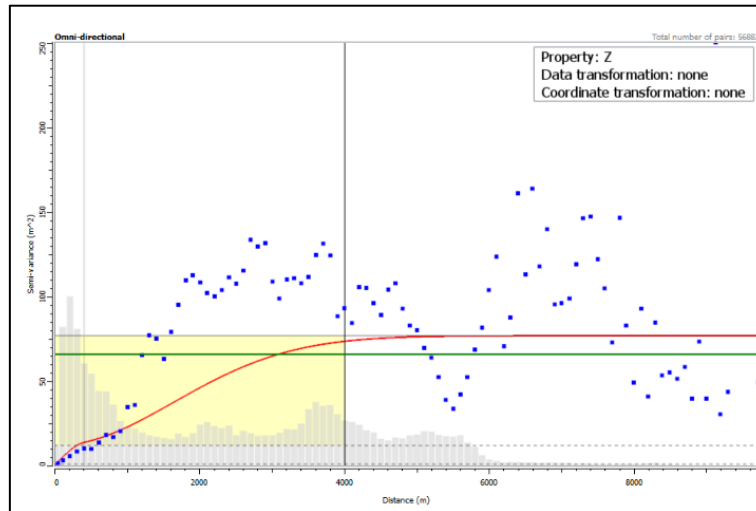
Un lissage est effectué sur la carte des élévations krigées avant de l'utiliser comme dérive externe pour le krigeage bayésien.

2.2.2 Krigeage avec dérive externe

Un krigeage avec dérive externe (KED, ou la version krigeage bayésien dans GOCAD) est ensuite utilisé pour déformer la carte des élévations du roc et honorer parfaitement les marqueurs aux puits, soit les données les plus fiables. Le krigeage bayésien est une variante du KED où la propriété de dérive doit

être dans les mêmes unités et représenter la même variable que la donnée primaire. La donnée primaire est l'élévation de l'unité Roc5 aux puits, tandis que la tendance est la carte des élévations de l'unité Roc5 krigées et lissées à l'étape précédente.

Seules les données des élévations aux puits de forage (« Marqueurs_Roc5 ») sont utilisées pour bâtir le variogramme. Les paramètres de construction du variogramme expérimental sont ajustés afin de mieux représenter les variations à courte échelle représentées par les données de puits.



Variogramme expérimental et modèle de variogramme du roc

Le krigeage bayésien s'effectue sur une grille fine ($dx = 10\text{m}$) avec un voisinage global incluant tous les marqueurs aux puits.

Paramètres de krigeage et modèle de variogramme du roc

Bayesian Kriging

Fill by bayesian kriging

Simulation Grid

Grid: Geol_Grid_10m

Region name: everywhere

New property prefix: ZRoc5_BK_Vario4

Conditioning Data

Input data objects: Marqueurs_Roc5

Input data region: everywhere

Input data property: Z

Use data assignment: Assignment Type: nearest_cell, Power: 0

Statistics

Variogram: Vario4_Roc_SmallMediumScale

Interpolation Parameters

Drift property: DRoc5_OK_Vario3_750_smooth

Search Parameters: Varying Variogram, Sequential Kriging

Use all data:

Use search ellipsoid factor: 10

Use search parameters:

Use restricted vertical search:

Vertical search interval: 1

Use all data inside strata:

Max nb used points: 250

OK Cancel Apply Help

Model Variogram

Interactive modeling and tuning

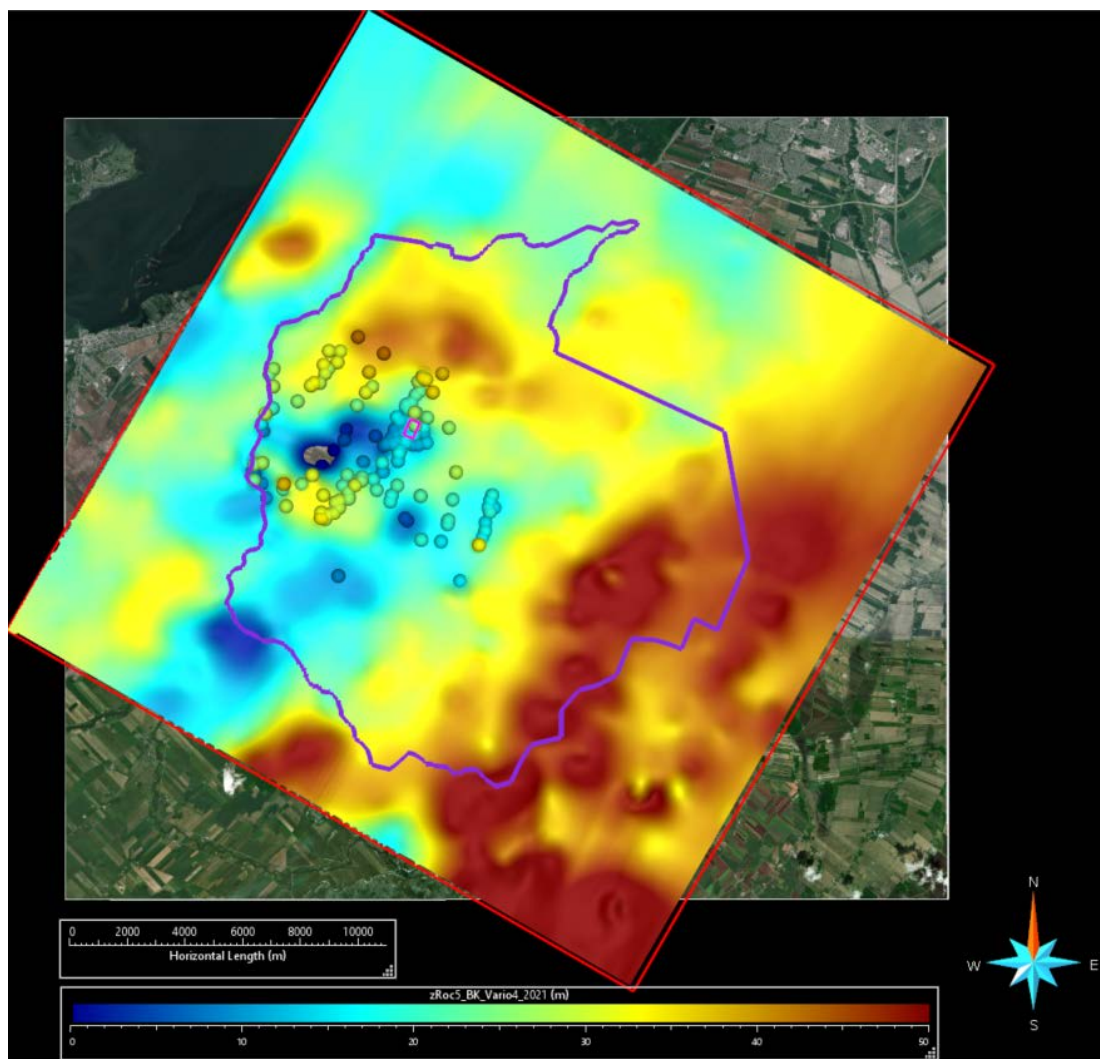
Nugget: 1 m²

Cumulative sill: 77 m² Recommended value: 66.0602 m²

Variogram structures

Type	Contribution (m ²)	Azimuth (deg)	Rv (m)	R1 (m)	R2 (m)
1 * Spherical	11	0	1	400	400
2 * Gaussian	65	0	1	4000	4000

2.3 Mise en carte de l'élévation du roc



Élévation du toit du roc (unité Roc5) interpolée

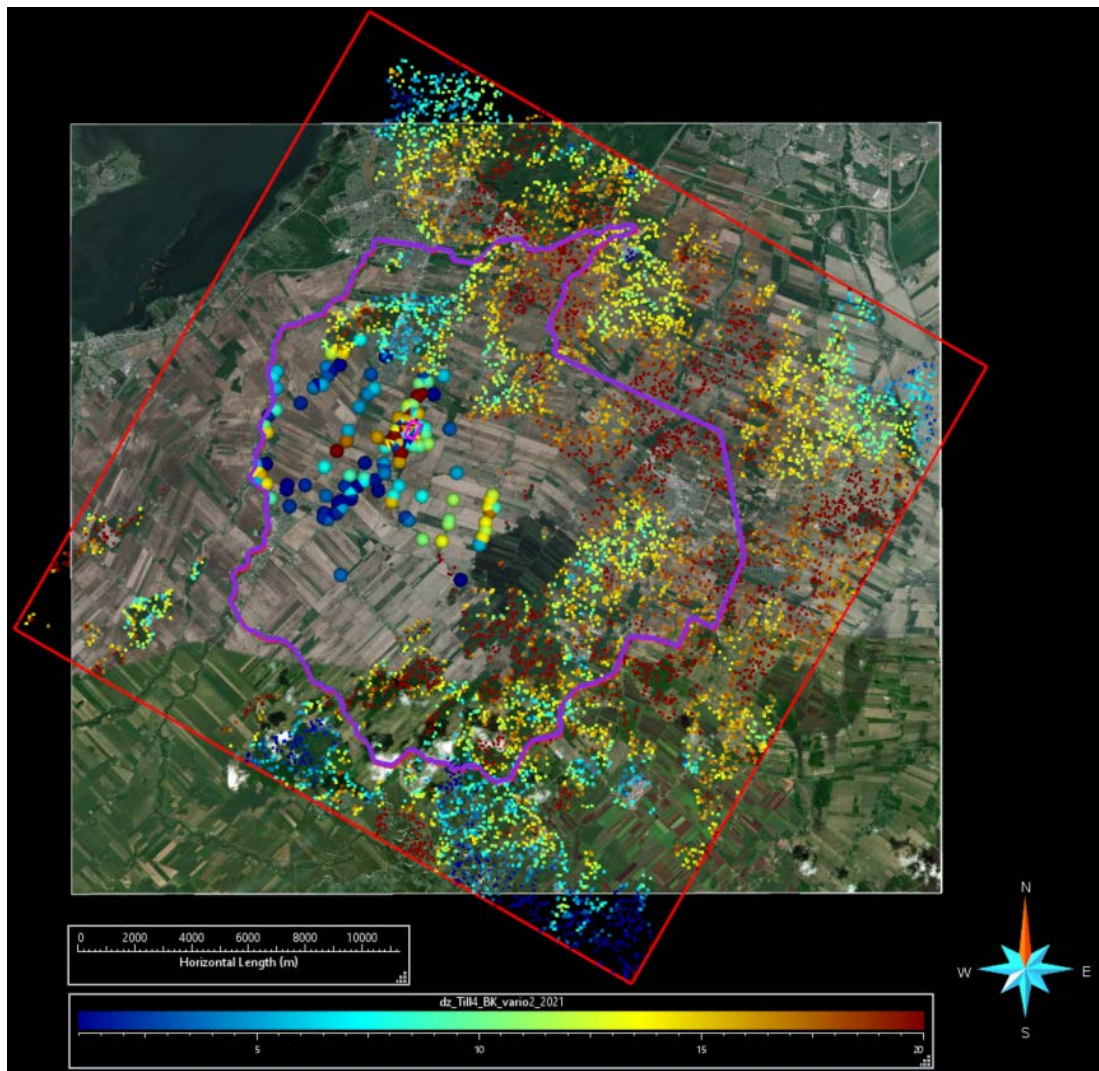
3 Till4

On interpole pour les épaisseurs de till au niveau régional. On calcule ensuite l'élévation du Till en additionnant l'épaisseur à l'élévation du roc précédemment interpolée.

3.1 Données utilisées

1. Till4_dZ_fromMarkers_CorrMissing17032021 (sphères)
 - Épaisseurs estimées sur tous les puits de forage (281 points de contrôle).
 - Épaisseur fixée à 0m si unité n'est pas présente.
 - Si marqueur Till4 est manquant, l'épaisseur du Till est assignée à la moitié de l'épaisseur entre le marqueur sus-jacent et le marqueur du Roc5.
2. Till4_Surface_Random02_2021 (points)
 - Échantillonnage aléatoire de points à partir de la carte régionale de géologie affleurant à la surface.
 - Épaisseur de Till4 est évaluée par la différence entre la surface topo et la surface du roc5 interpolées.

- Puisque les points de la topographie sont aux mêmes coordonnées X,Y que les cellules de la grille d'interpolation, les positions en X et Y sont décalées légèrement pour éviter des erreurs d'interpolation : $X = X + 0.66$; $Y = Y - 0.33$.



Données utilisées pour l'interpolation de l'épaisseur de l'unité Till4

3.2 Méthodologie

On procède en 3 étapes pour interpoler la carte des élévations du toit de l'unité Till4 :

1. Krigeage simple des épaisseurs en utilisant toutes les données d'épaisseurs du Till, sur la grille $dxy=100m$, avec un voisinage de 750 points maximum.
2. Krigeage bayésien des épaisseurs pour déformer la carte initiale d'épaisseur et honorer parfaitement les marqueurs aux puits, sur la grille fine $dxy=10m$, avec un voisinage global incluant tous les points de contrôle (281 puits).
3. Addition de l'épaisseur de Till et de l'élévation du roc pour obtenir l'élévation du till. Si le niveau du till dépasse l'élévation de la surface, on remet l'élévation à la surface topographique et on ajuste l'épaisseur.

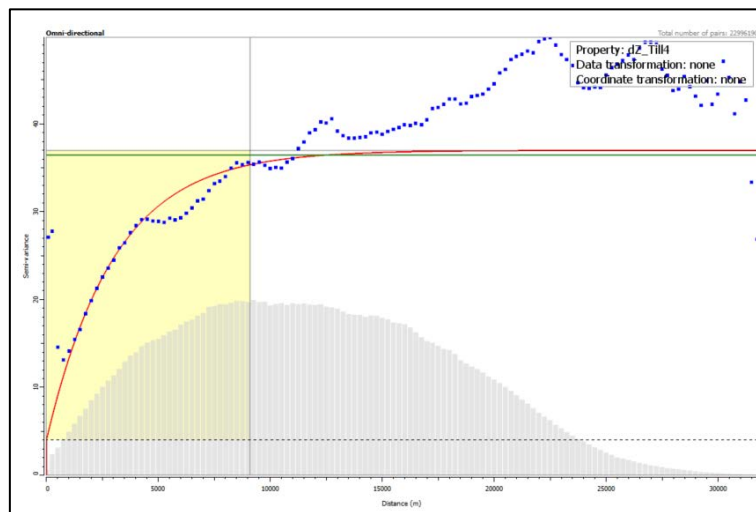
3.2.1 Krigeage Simple

Paramètres de krigeage, variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur du Till

The screenshot shows the Kriging software interface with the following sections:

- Simulation Grid:** Grid: Geol_Grid_100m_Trend; Region name: everywhere; New property prefix: dz_Till4_SK_vario1.
- Conditioning Data:** Input data objects: Till4_HD_for_dz; Input data region: everywhere; Input data property: dz_Till4; Use data assignment: Assignment Type: nearest_cell; Power: 0.
- Statistics:** Variogram: vario1_dzTill4_1structexp.
- Interpolation Parameters:** Kriging method: Simple; Search Parameters: Mean, Varying Variogram, Sequential Kriging; Use search ellipsoid factor: 2; Max nb used points: 750.
- Areal Variogram:** Number of lags: 128; Lag distance: 250; Number of strata: 1; Compute omni-directional: checked; Tolerance: 22.5; Azimuths: 0.0 45.0 90.0 135.0; Bandwidth: 1247.1.
- Model Variogram:** Interactive modeling and tuning; Nugget: 4; Cumulative sill: 37; Recommended value: 36.4678; Variogram structures table below.

Type	Contribution (unitless^2)	Azimuth (deg)	Rv (m)	R1 (m)	R2 (m)
1 Exponential	33	0	0	9100	9100



Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur de Till

Les données d'épaisseurs sont ensuite lissées pour enlever certaines discontinuités avant d'utiliser la carte comme dérive externe pour le krigeage bayésien.

3.2.2 Krigeage bayésien

La donnée primaire est l'épaisseur de l'unité Till4 évaluée aux puits, tandis que la tendance est la carte des épaisseurs de l'unité Till4 krigée et lissée à l'étape précédente.

Les données d'épaisseurs de till aux puits sont utilisées pour bâtir le variogramme, en ajustant les paramètres de construction du variogramme expérimental afin de mieux représenter les variations à courte et moyenne échelles.

Paramètres de krigage, variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur du Till

Bayesian Kriging

Fill by bayesian kriging

Simulation Grid

Grid: Geol_Grid_10m

Region name: everywhere

New property prefix: dZ_Till4_BK_vario2

Conditioning Data

Input data objects: Till4_dZ_fromMarkers_CorrMissing25082020

Input data region: everywhere

Input data property: dZ_Till4

Use data assignment: Assignment Type: nearest_cell, Power: 0

Statistics

Variogram: vario2_dZ_Till4_SmallMedStruct

Interpolation Parameters

Drift property: D dZ_Till4_SK_vario1_smooth

Search Parameters: Varying Variogram, Sequential Kriging

Use all data:

Use search ellipsoid factor: 10

Use search parameters:

Use restricted vertical search:

Vertical search interval: 1

Use all data inside strata:

Max nb used points: 283

Areal Variogram

Number of lags: 1000, Lag distance: 10, Number of strata: 1

Compute omni-directional:

Azimuths: 3.0 45.0 90.0 135.0 deg

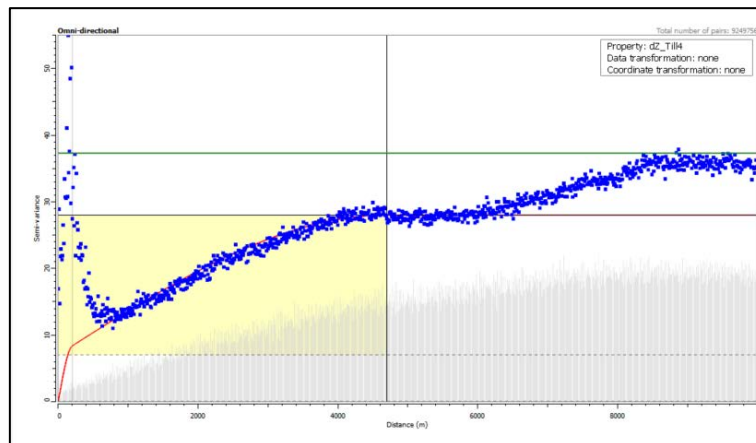
Model Variogram

Interactive modeling and tuning

Nugget: 0.01 unitless^2

Cumulative sill: 28.01 unitless^2, Recommended value: 37.3336 unitless^2

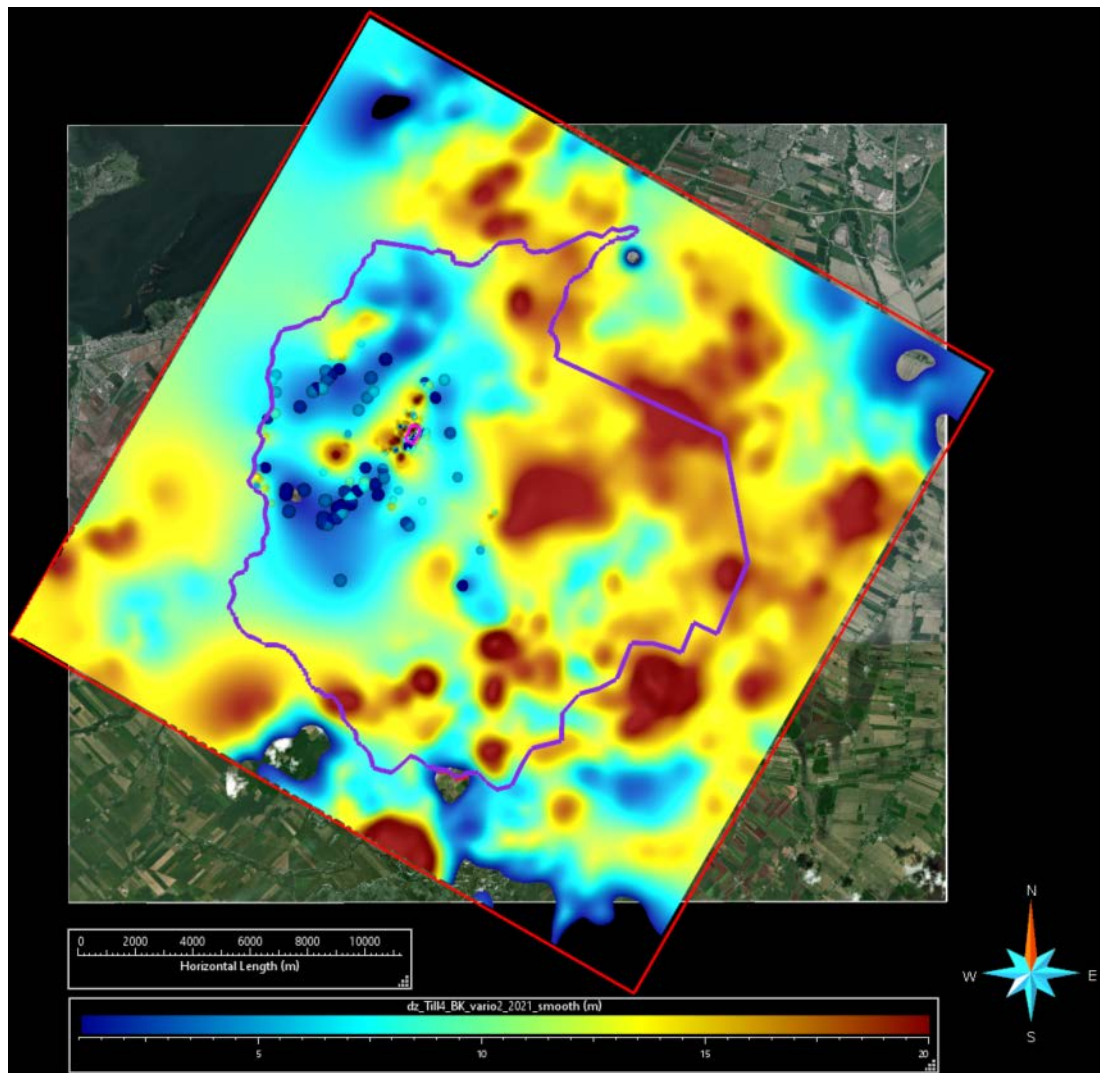
Type	Contribution (unitless^2)	Azimuth (deg)	Rv (m)	R1 (m)	R2 (m)
1 * Spherical	7	0	1	200	200
2 * Spherical	21	0	2	4700	4700



Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur du Till

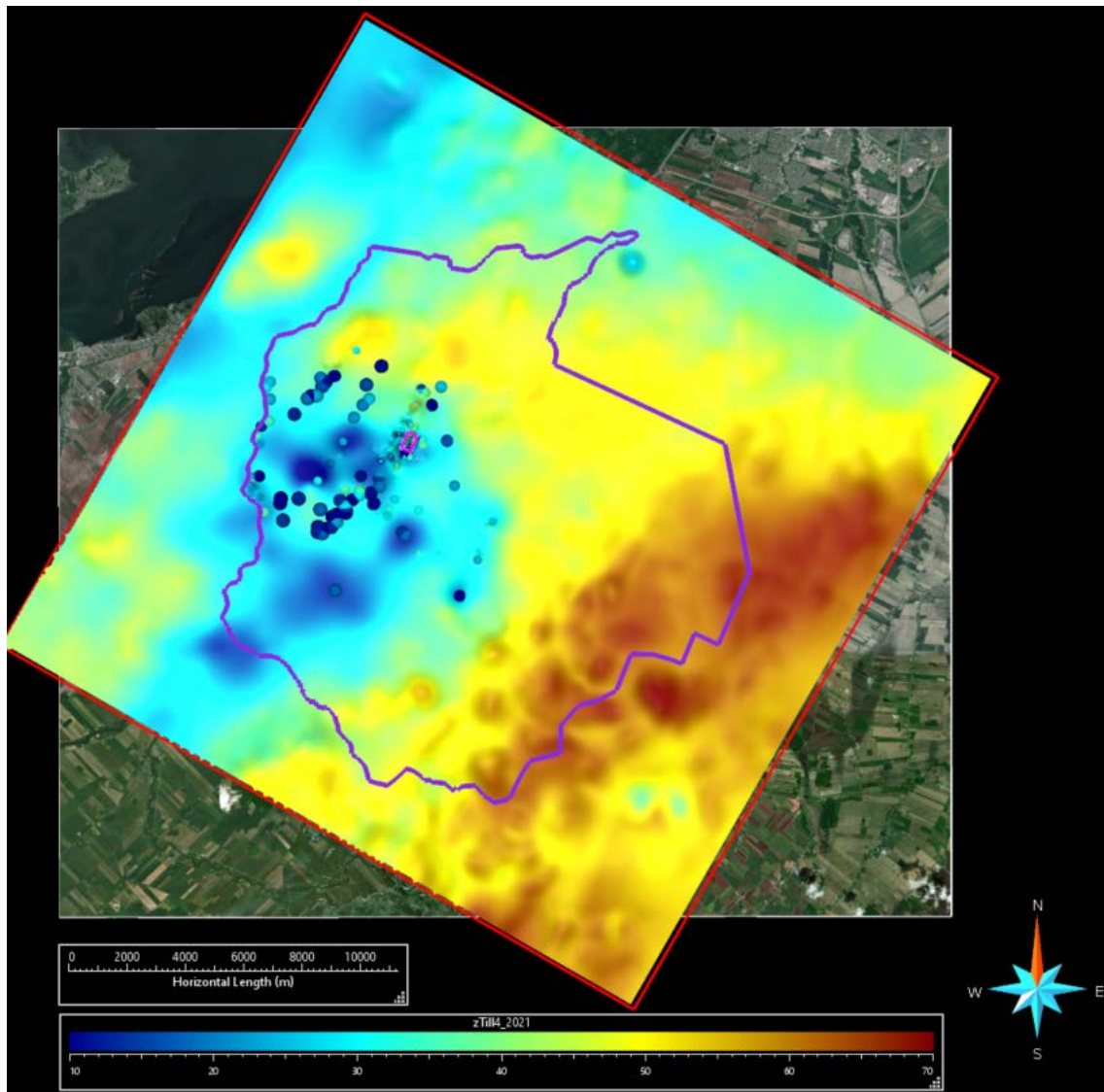
3.3 Mise en carte des épaisseurs et élévations de l'unité Till4

3.3.1 Carte des épaisseurs de l'unité Till4



Épaisseur de l'unité Till4 interpolée

3.3.2 Carte des élévations de l'unité Till4



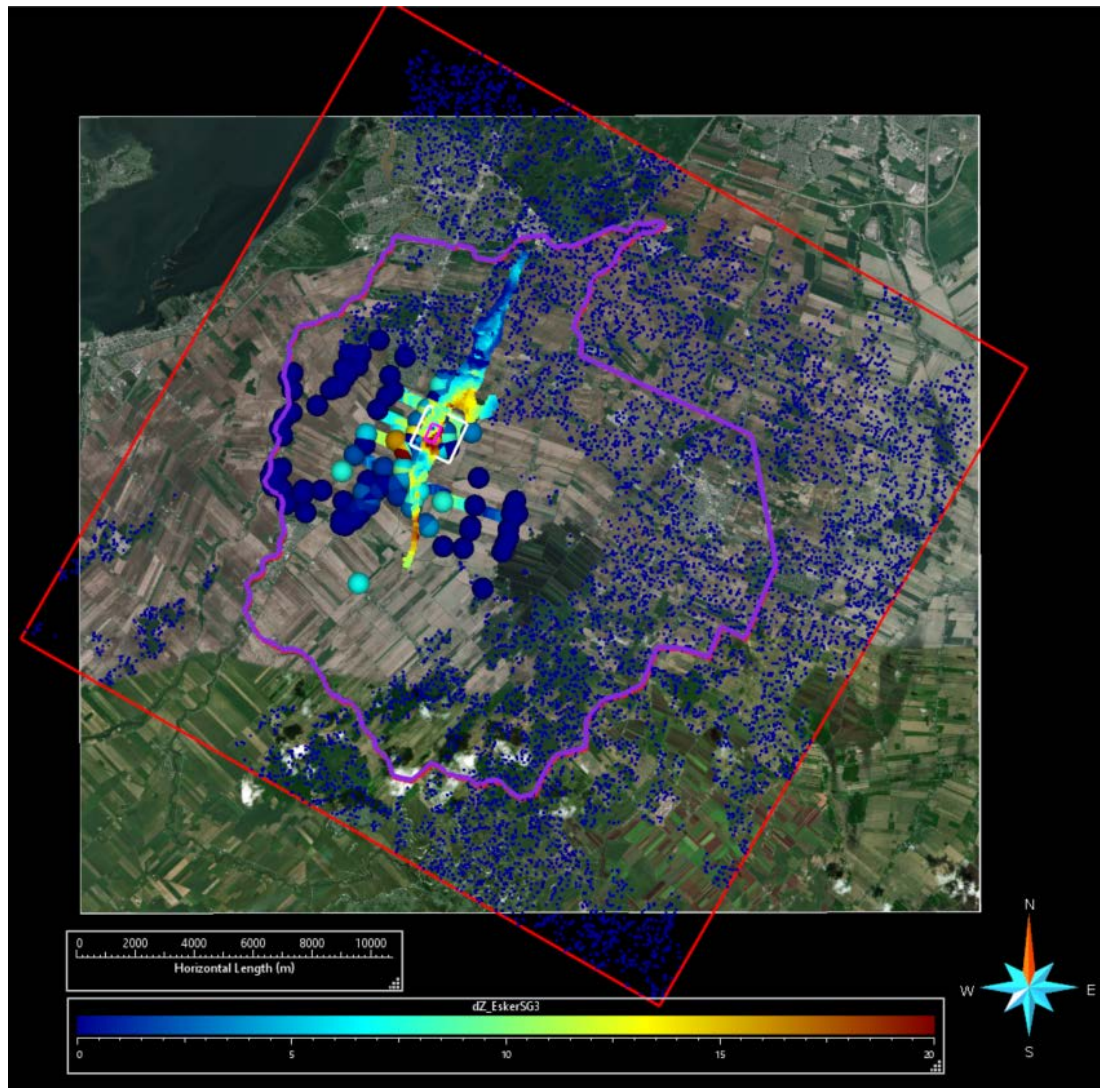
Élévation du toit de l'unité Till4 interpolée

4 EskerSG3

4.1 Données utilisées

1. EskerSG3_dZ_fromMarkers_CorrMissing17032021 (sphères) :
 - Épaisseur estimée sur tous les puits de forage (281 points de contrôle).
 - Épaisseur = 0m si l'unité n'est pas présente.
 - Épaisseur estimée comme $\frac{1}{2}$ de l'épaisseur totale si le toit ou la base de l'unité est manquant au puits.
2. EskerSG3_Surface_Random02 (carrés, médium) :
 - Échantillonnage à partir de la carte régionale de géologie de surface.
 - Si l'esker ou sable et gravier est affleurant à la surface, on calcule l'épaisseur entre la surface topo et l'élévation estimée du Till4 comme épaisseur d'EskerSG3.
3. EskerSG3_dZ0_formTill4Surface (points bleus, petits ; dZ = 0m) :
 - À partir de la carte régionale de géologie de surface.

- Si l'unité Till4 est affleurant en surface, on met des points de contrôle avec une épaisseur d'EskeSG3 = 0m.
4. EskeSG3_dZ_fromSismique_MBMS2019 (encadré blanc) :
 - Épaisseur estimée à partir des données 2019 de sismique 2D de MBMS Solutions.
 - Le traitement des données sismiques 2019 pour obtenir des épaisseurs d'EskeSG3 est expliqué dans un document de travail distinct (*DocumentTravail_Sismique.docx*).
 5. EskeSG3_dZ_fromSeismicPoints_MBMS2021 (carrés, gros) :
 - Épaisseur estimée à partir des données 2021 de sismique 2D de MBMS Solutions.
 - Le traitement des données sismiques 2021 pour obtenir des épaisseurs d'EskeSG3 est expliqué dans un document de travail distinct (*DocumentTravail_Sismique.docx*).



Données utilisées pour l'interpolation de l'épaisseur de l'unité EskeSG3

4.2 Méthodologie

On procède en 2 étapes pour interpoler la carte d'épaisseur de l'unité EskeSG3.

1. On fait une première estimation avec toutes les données disponibles pour établir la carte régionale par krigeage avec dérive externe, utilisant la corrélation élevée entre l'épaisseur de l'unité EskeSG3 et l'élévation du Till4 pour contrôler l'interpolation. On utilise également

l'azimut de l'élévation de Till4 pour contrôler la direction principale de krigeage, et ainsi propager les chenaux principaux de l'esker dans les creux de l'unité de Till4.

- Une fois la carte régionale de l'unité EskerSG3 estimée, on l'utilise comme tendance lors du krigeage avec dérive externe (krigeage bayésien dans GOCAD) et honorer parfaitement les marqueurs aux puits.

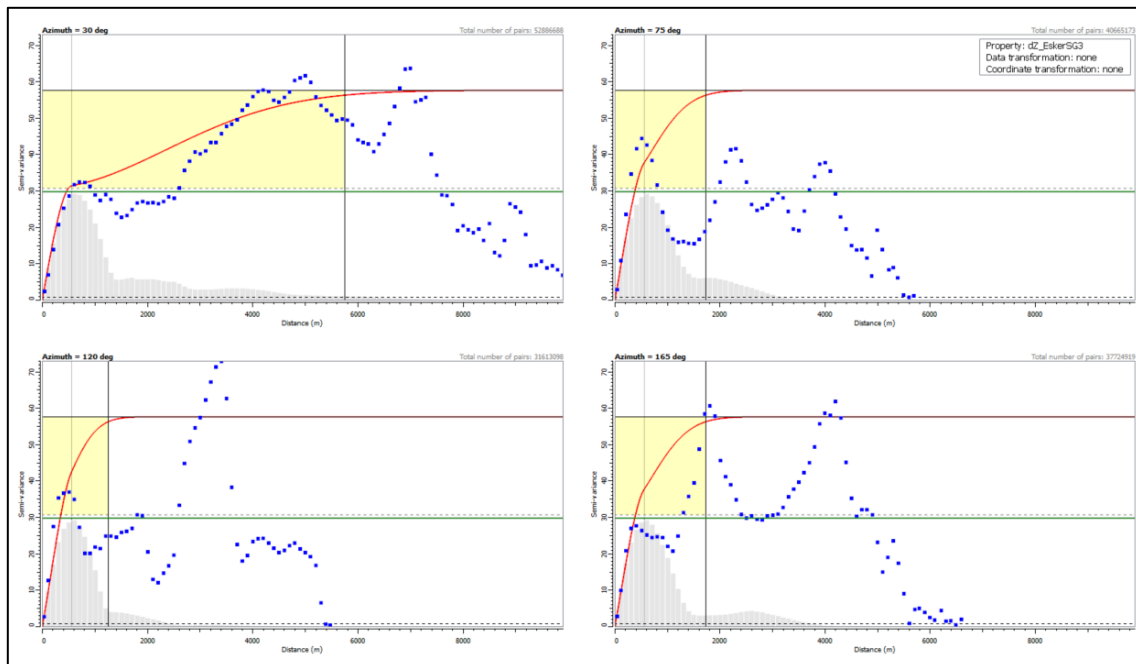
4.2.1 Krigeage avec Dérive Externe (KED)

La donnée primaire du KED est l'épaisseur de l'unité EskerSG3 estimée sur toutes les données disponibles (1 à 5 à la section 4.1). Toutes les données avec une épaisseur plus grande que 0m (0.25m) sont utilisées pour bâtir le variogramme.

Paramètres de construction du variogramme expérimental de l'épaisseur de l'unité EskerSG3

Select data	
Input data	EskerSG3_HD_for_dZ
Property	dZ_EskerSG3
Regions	<input checked="" type="checkbox"/> dZ_It_025

Areal Variogram			
Number of lags	100	Lag distance	100
<input type="checkbox"/> Compute omni-directional		Number of strata	1
Tolerance	22.5	Azimuths	30 75 120 165
		Bandwidth	1000



Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur de l'unité EskerSG3

Il existe un lien géologique et statistique important entre l'épaisseur de l'unité EskerSG3 et l'élévation du Till4, les canaux principaux de l'esker se trouvant principalement là où l'unité de Till4 est profonde.

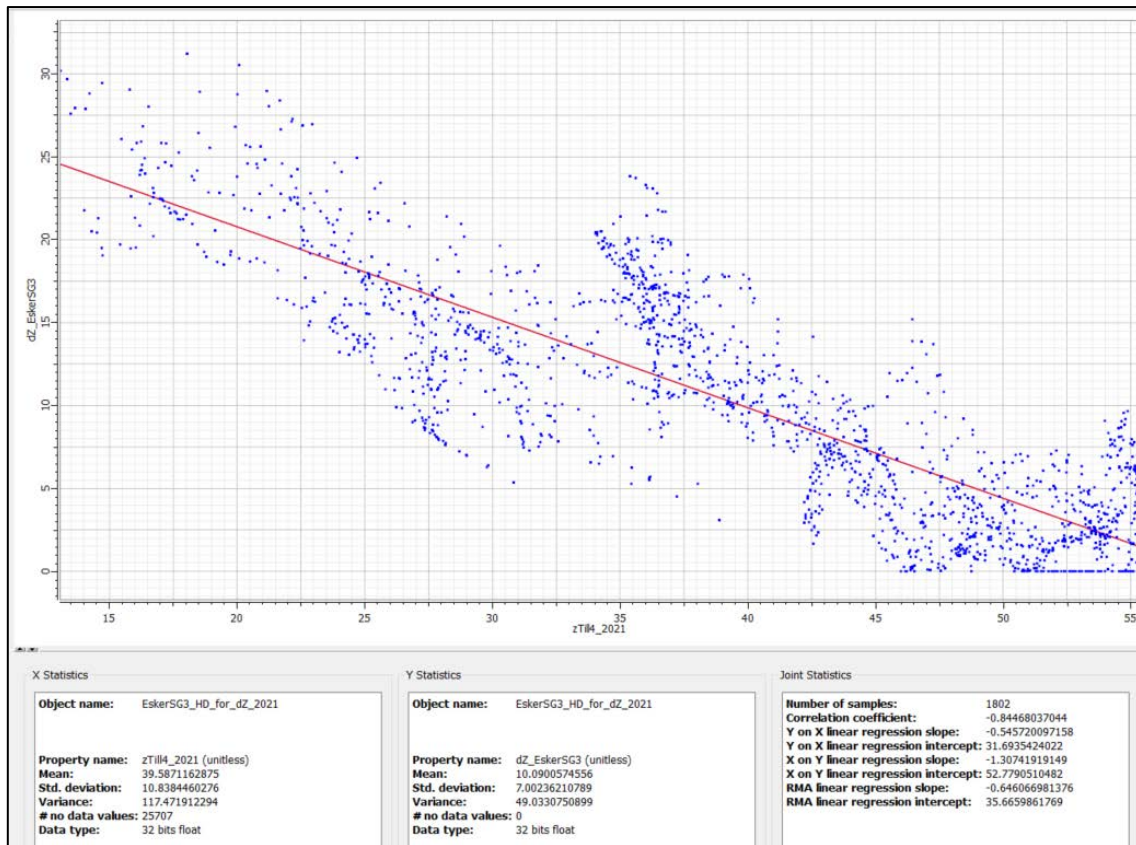
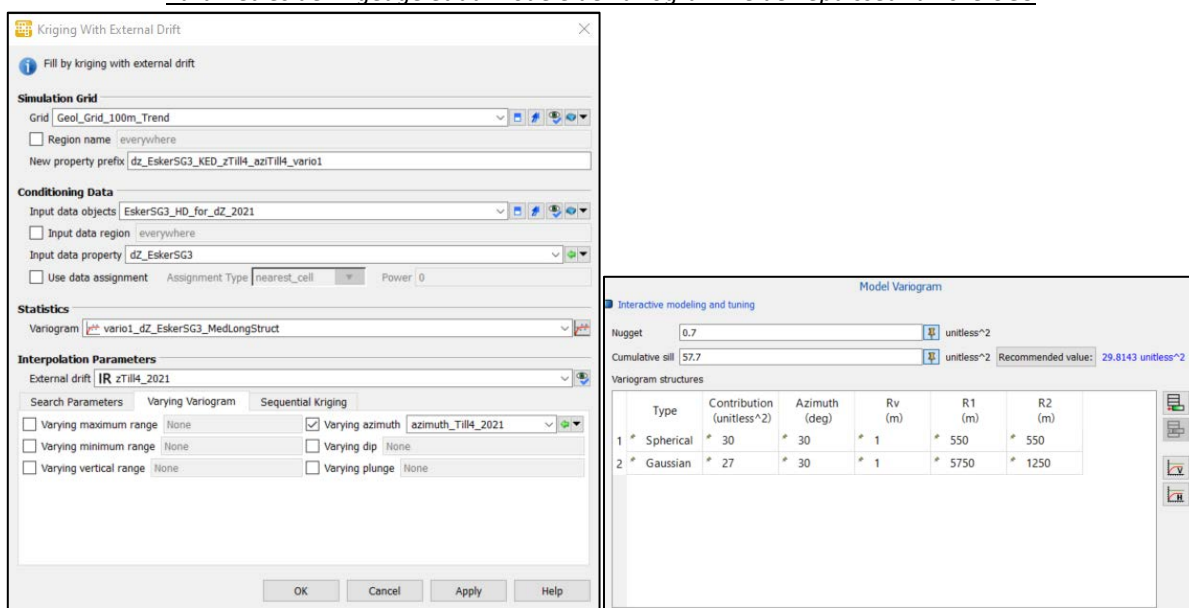


Diagramme croisé entre l'épaisseur de l'EskerSG3 et l'élévation du Till4, montrant un $r^2 = 0.84$.

On prend avantage de ce lien statistique en utilisant l'élévation de l'unité Till4, interpolée à la section 3.3.2, comme dérive externe lors de l'estimation de l'épaisseur de l'unité EskerSG3. On utilise également l'azimut de l'élévation de Till4 pour varier la direction principale du variogramme et ainsi représenter des changements probables dans la direction principale de l'esker en fonction des creux géologiques. On utilise un voisinage global avec un maximum de 750 points de contrôle sur une grille de cellules $dxy = 100m$ pour faire cette première interpolation.

Paramètres de krigeage et du modèle de variogramme de l'épaisseur d'EskerSG3



Les épaisseurs estimées de l'unité EskerSG3 sont ensuite lissées pour enlever certaines discontinuités avant d'utiliser la carte comme dérive externe pour le krigeage bayésien.

4.2.2 Krigeage bayésien

Seules les données d'épaisseurs aux puits de forage (« EskerSG3_dZfromMarqueurs ») sont utilisées pour bâtir le variogramme. Les paramètres de construction du variogramme expérimental sont ajustés afin de mieux représenter les variations à courte échelle représentées par les données de puits. Le krigeage bayésien est effectué sur la grille fine avec $dx = 10m$.

Paramètres du krigeage bayésien, du variogramme expérimental et du modèle de variogramme de l'épaisseur d'EskerSG3

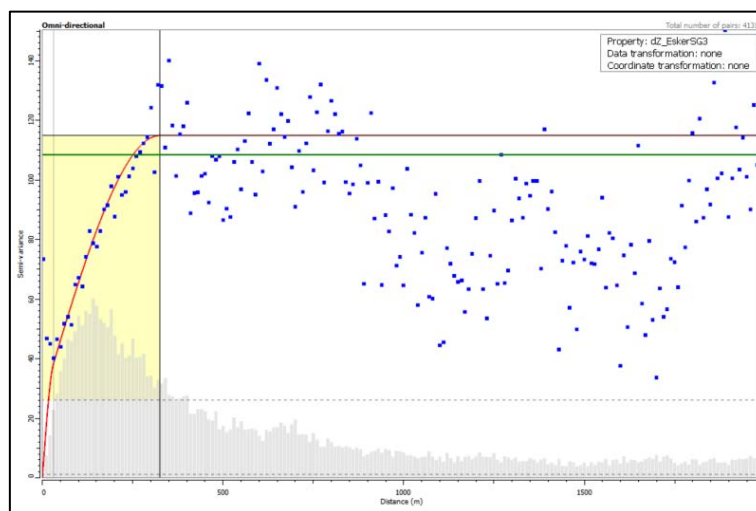
The screenshot shows the 'Bayesian Kriging' dialog box with the following settings:

- Simulation Grid:** Grid: Geol_Grid_10m; Region name: EskerSG3_ToKrige; New property prefix: dZ_EskerSG3_BK_vario2
- Conditioning Data:** Input data objects: EskerSG3_dZ_fromMarkers_CorrMissing25082020; Input data region: everywhere; Input data property: dZ_EskerSG3; Use data assignment: nearest_cell; Power: 0
- Statistics:** Variogram: vario2_dZ_EskerSG3_SmallStruct
- Interpolation Parameters:** Drift property: D_dZ_EskerSG3_OK_vario1_750_smooth; Search Parameters: Varying Variogram; Use search ellipsoid factor: 100; Max nb used points: 283

Additional panels on the right show:

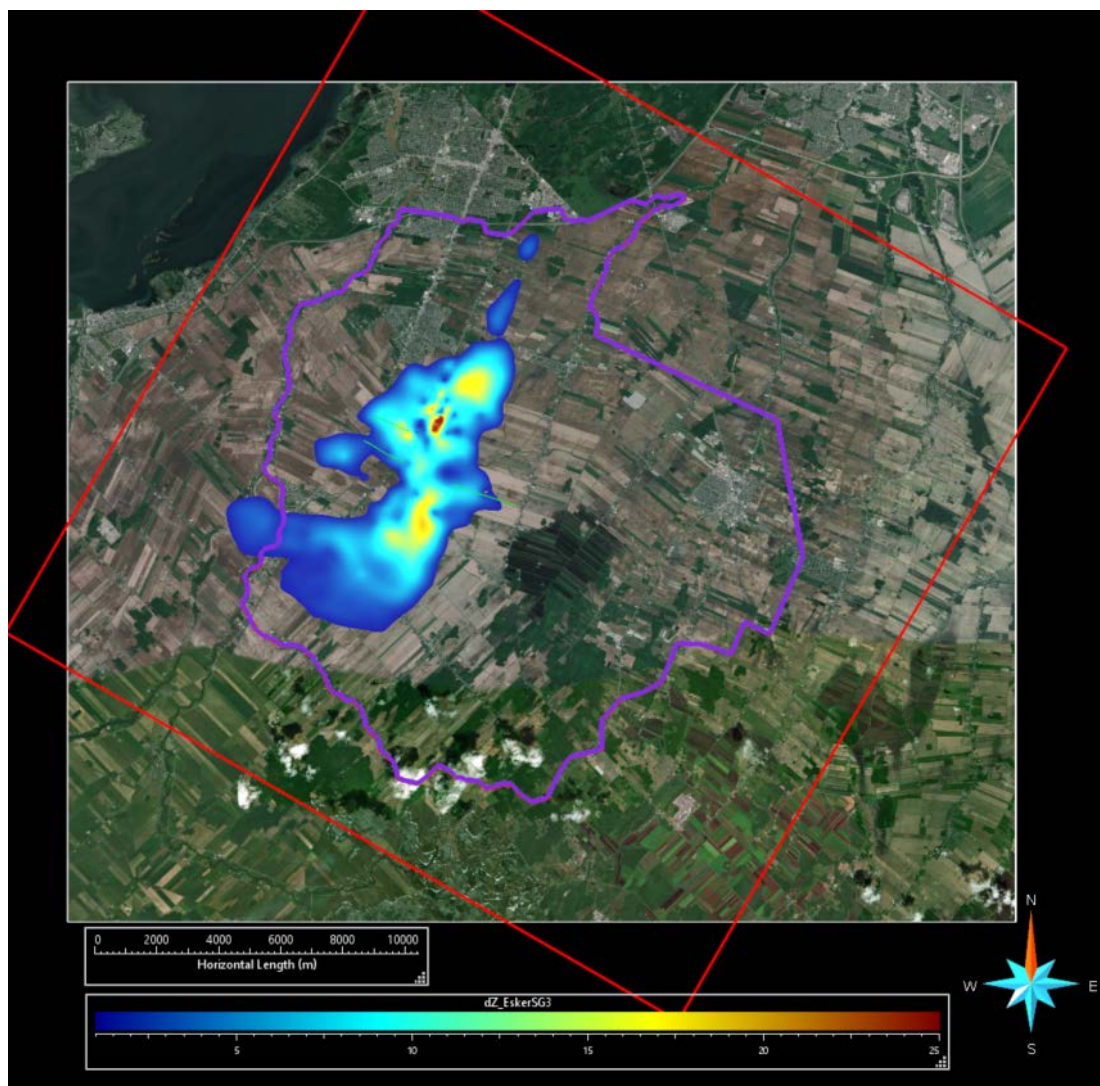
- Areal Variogram:** Number of lags: 100; Lag distance: 10 m; Number of strata: 1; Compute omni-directional: checked; Azimuths: 30 75 120 165 deg
- Model Variogram:** Nugget: 1; Cumulative sill: 109; Recommended value: 92.9651; Variogram structures table below.

Type	Contribution (unitless^2)	Azimuth (deg)	Rv (m)	R1 (m)	R2 (m)
1 Spherical	28	0	1	30	30
2 Spherical	80	0	1	325	325



Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur d'EskerSG3

4.3 Mise en carte des épaisseurs de l'unité EskerSG3



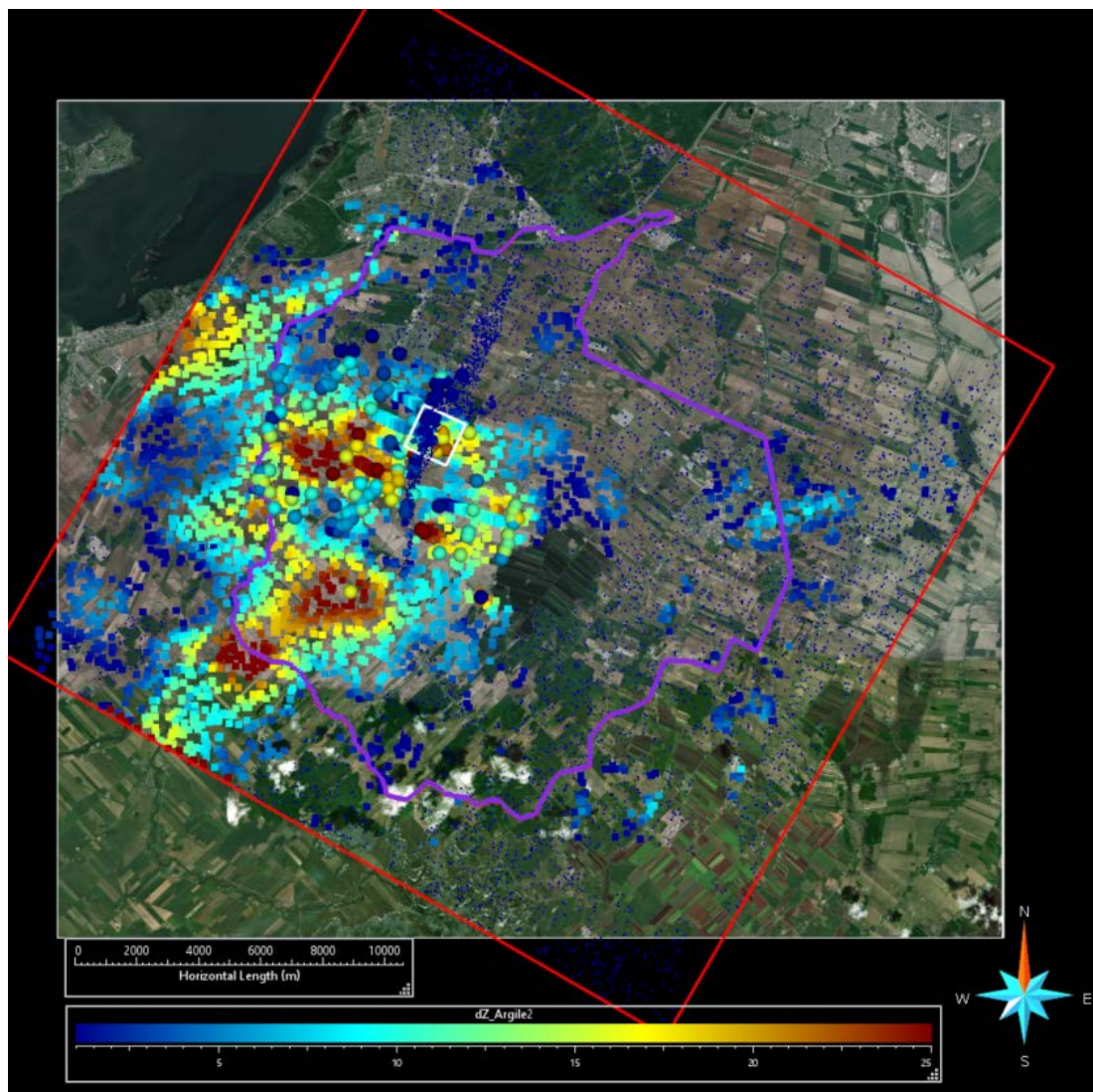
Épaisseur de l'unité EskerSG3 interpolée

5 Argile2

5.1 Données utilisées

1. Argile2_dZ_fromMarkers_CorrMissing17032021 (sphères) :
 - Épaisseur estimée sur tous les puits de forage (281 points de contrôle).
 - Épaisseur = 0m si l'unité n'est pas présente.
 - Épaisseur estimée comme $\frac{1}{2}$ de l'épaisseur totale si le toit ou la base de l'unité est manquant au puits.
2. Argile2_Surface_Random01 (carrés, médium) :
 - Échantillonnage à partir de la carte régionale de géologie de surface.
 - Si l'argile est affleurant à la surface, on calcule l'épaisseur entre la surface topo et l'élévation estimée de l'unité EskerSG3.
3. Argile2_dZ0_fromEskerSG3Surface (petits points bleus ; dZ = 0m) :
 - À partir de la carte régionale de géologie de surface.

- Si l'unité EskerSG3 est affleurant en surface selon la carte de géologie régionale, on met des points de contrôle avec une épaisseur = 0m.
4. Argile2_dZ0_fromTill4Surface (petits points bleus ; dZ = 0m) :
 - À partir de la carte régionale de géologie de surface.
 - Si l'unité Till4 est affleurant en surface selon la carte de géologie régionale, on met des points de contrôle avec une épaisseur = 0m.
 5. Argile2_dZ_fromSismique_MBMS2019 (encadré blanc) :
 - Épaisseur estimée à partir des données 2019 de sismique 2D de MBMS Solutions.
 - Le traitement des données sismiques 2019 pour obtenir les épaisseurs d'Argile2 est expliqué dans un document de travail distinct (*DocumentTravail_Sismique.docx*).
 6. Argile2_dZ_fromSeismicPoints_MBMS2021 (carrés, gros) :
 - Épaisseur estimée à partir des données 2021 de sismique 2D de MBMS Solutions.
 - Le traitement des données sismiques 2021 pour obtenir les épaisseurs d'Argile2 est expliqué dans un document de travail distinct (*DocumentTravail_Sismique.docx*).



Données utilisées pour l'interpolation de l'épaisseur de l'unité Argile2

5.2 Méthodologie

On procède encore selon les 2 mêmes étapes pour interpoler la carte d'épaisseur de l'unité Argile2 :

1. Krigeage ordinaire de la carte régionale en respectant les tendances provenant de toutes les données utilisées, sans honorer parfaitement les données, sur une grille régionale $dxy=100m$, avec 750 points de voisinage.
2. Krigeage avec dérive externe (krigeage bayésien dans GOCAD) pour déformer la carte d'épaisseur et honorer parfaitement les marqueurs aux puits sur une grille fine $dxy=10m$ avec tous les marqueurs comme points de voisinage.

5.2.1 Krigeage Ordinaire

Les données provenant des marqueurs aux puits et les épaisseurs calculées à partir des données d'argile à la surface sont utilisées pour bâtir le variogramme.

Paramètres de construction du variogramme expérimental

Data and Transformations

Select data

Input data: Argile_dZ_forVario1_OK

Property: dZ_Argile2

Regions: everywhere

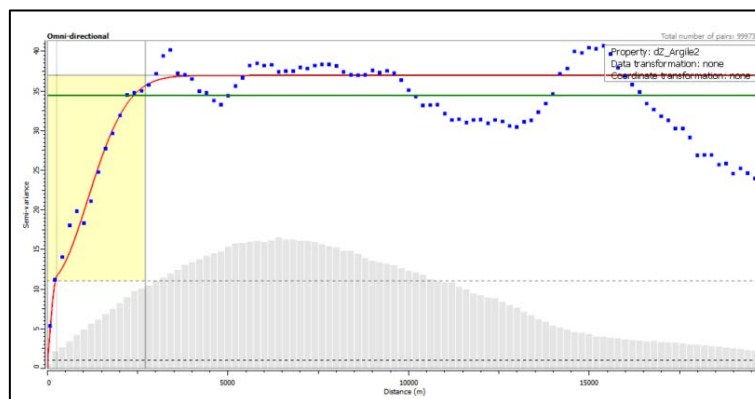
Sampling rate (%): 100

Areal Variogram

Number of lags: 100 Lag distance: 200 m

Number of strata: 1

Compute omni-directional Azimuths: 30 75 120 165 deg

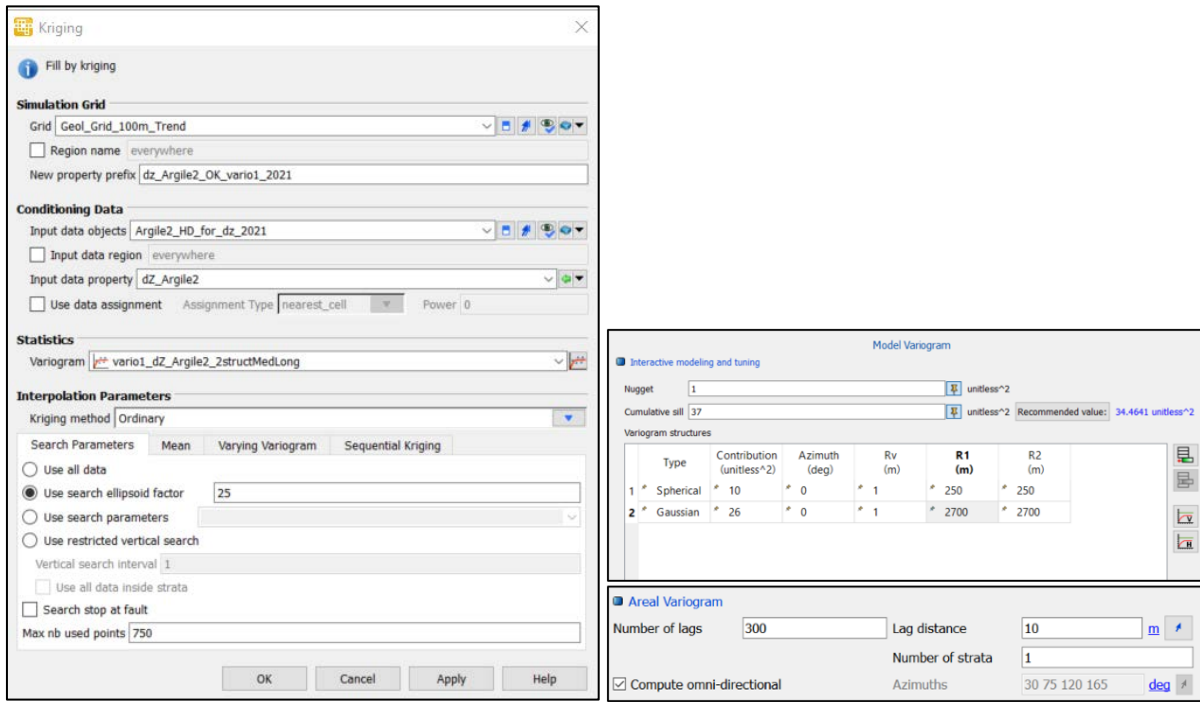


Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur d'Argile2 à grande échelle

Toutes les données (1 à 6) sont utilisées pour cette première étape de krigeage ordinaire. On utilise un voisinage global avec un maximum de 750 points de contrôle sur une grille de cellules $dxy = 100m$ pour faire cette première interpolation.

Les épaisseurs estimées de l'unité Argile2 sont ensuite lissées pour enlever certaines discontinuités avant d'utiliser la carte comme dérive externe pour le krigeage bayésien.

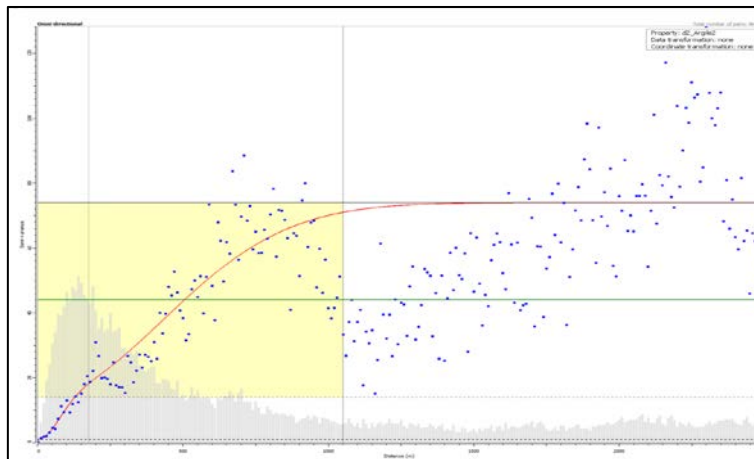
Paramètres de krigeage, variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur d'Argile2



5.2.2 *Krigeage bayésien*

La donnée primaire est l'épaisseur de l'unité Argile2 aux puits, tandis que la tendance est la carte des épaisseurs de l'unité Argile2 krigées et lissées à l'étape précédente.

Seules les données d'épaisseurs aux puits de forage sont utilisées pour bâtir le variogramme. Les paramètres de construction du variogramme expérimental sont ajustés afin de mieux représenter les variations à courte échelle représentées par les données de puits.



Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'épaisseur d'Argile2 à courte échelle

Paramètres de krigeage bayésien et du modèle de variogramme de l'épaisseur d'Argile2
(vario2_dZ_Argile2_SmallScaleStruct)

Bayesian Kriging

Fill by bayesian kriging

Simulation Grid

Grid: Geol_Grid_10m

Region name: everywhere

New property prefix: dz_Argile2_BK_vario2_2021

Conditioning Data

Input data objects: Argile2_dZ_fromMarkers_CorrMissing17032021

Input data region: everywhere

Input data property: dz_Argile2

Use data assignment: Assignment Type: nearest_cell Power: 0

Statistics

Variogram: vario2_dZ_Argile2_SmallScaleStruct

Interpolation Parameters

Drift property: dz_Argile2_OK_vario1_2021_smooth

Search Parameters Varying Variogram Sequential Kriging

Use all data

Use search ellipsoid factor: 50

Use search parameters

Use restricted vertical search

Vertical search interval: 1

Use all data inside strata

Max nb used points: 300

OK Cancel Apply Help

Model Variogram

Interactive modeling and tuning

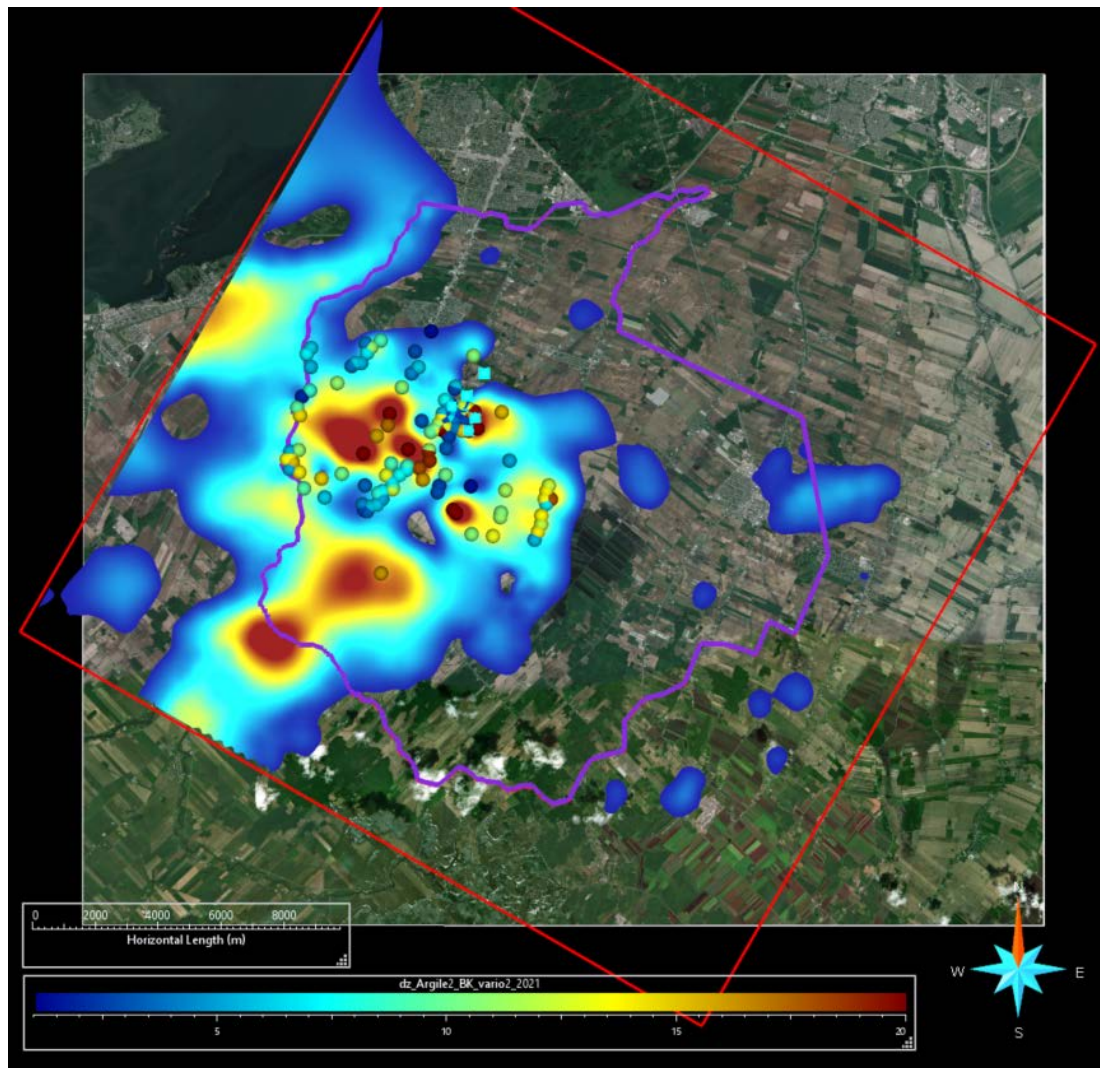
Nugget: 1 unitless^2

Cumulative sill: 74 unitless^2 Recommended value: 44.0739 unitless^2

Variogram structures

	Type	Contribution (unitless^2)	Azimuth (deg)	Rv (m)	R1 (m)	R2 (m)
1	Gaussian	13	0	1	175	175
2	Gaussian	60	0	1	1050	1050

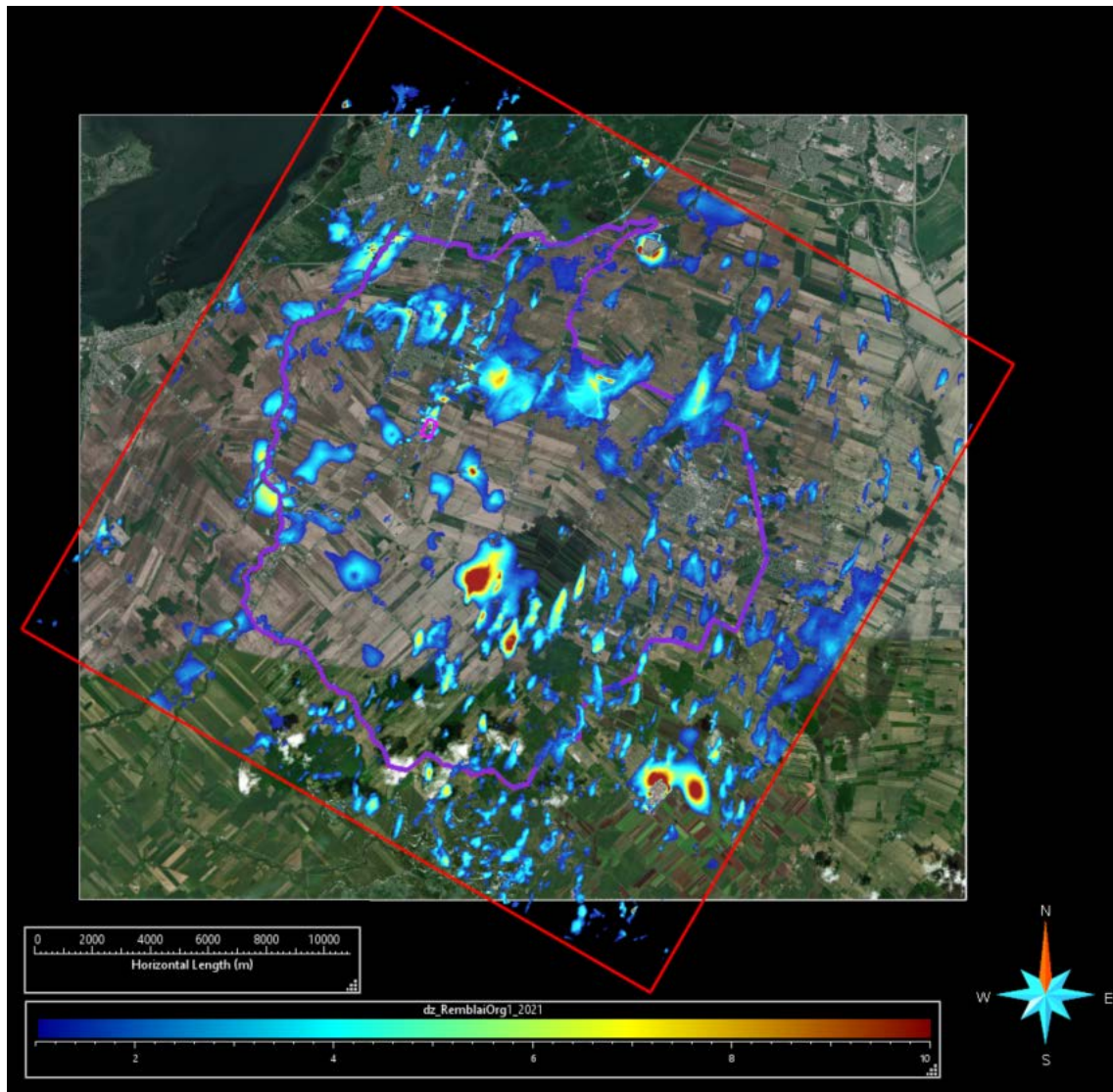
5.3 Mise en carte des épaisseurs de l'unité Argile2



Épaisseur de l'unité Argile2 interpolée

6 Remblai_Organique_1

Le manque à gagner en épaisseur entre le niveau topographique et le toit de l'argile est associé aux remblais et matériel organique.



Épaisseur de l'unité Remblai-Organique_1 interpolée

7 Modèle 3D

Le modèle 3D est un objet Stratigraphic Grid (SGrid) dans Gocad, permettant de représenter la géologie en blocs 3D. Une grille de résolution latérale plus large (25m) est utilisée afin de limiter le nombre total de cellules dans le modèle 3D. Telle que construite, la grille contient 960 x 960 x 85 cellules dans les directions X,Y, et Z, respectivement, pour un total de 78,336,000 cellules.

Paramètres de construction de la grille de modélisation 3D

3D Grid Object from Orientation and Coordinates

Input

Grid Object origin: X 273000 Y 5009500 Z 75

Dir Grid Object extents: X 24000 Y 24000 Z 85

Orientation 30

Dir Cell sizes: X 25 Y 25 Z 1

Output

Grid Object name ModelStratSGrid_25x25x1_2021

Voxet SGrid Cell centered

Classification Lithology Block Model

Feature name ModelReg

Advanced

OK Cancel Apply Help

La SGrid initiale est cartésienne. On la déforme pour que sa première couche suive la surface topographique et qu'une couche suive la surface de l'unité Roc5. On contraint également la grille pour une couche située 10m sous le niveau du roc pour représenter une couche de roc de 10m d'épaisseur dans le modèle.

Initialize MultiProportional SGrid

Deform sgrid geometry proportionally between several surfaces.

Stratigraphic grid ModelStratSGrid_100x100x1

Object surfaces Surface_ZRoc5_GeoGrid_25m Surface_ZRoc5minus10_GeoGrid_25m Surface_ZTopo_GeoGrid_25m

Advanced

Interpolate

Select to interpolate surfaces where either of the surfaces does not exist.

OK Cancel Apply Help

On y transfère ensuite les élévations de toutes les surfaces représentant les unités qu'on souhaite représenter : Topo, Argile2, EskerSG3, Till4 et Roc5.

Transfer Property Vertically

The property will be transferred from an object to another, by propagating it vertically.

Vertical property client ModelStratSGrid_25x25x1

Region everywhere

New property name Z_Topo_BK_Vario1

Vertical property server From Geol_Grid_10m

From region everywhere

Property Z_Topo_BK_Vario1

Advanced

OK Cancel Apply Help

On utilise le script « BuildUnits.gsc » pour assigner le bon code d'unité dépendant des élévations des cellules de la grille.

Properties Script Editor

Objects ModelStratSGrid_25x25x1_2021

Region everywhere

Check no-data values automatically

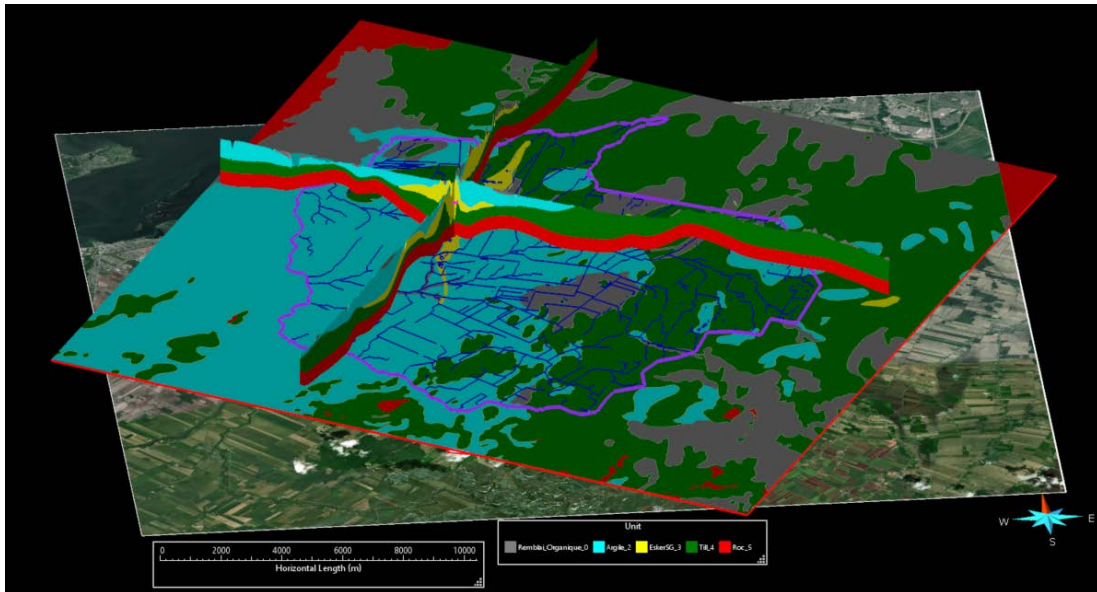
If enabled, expressions containing a no-data value (NDV) are not evaluated. For example, in the expression a = b + c, if either b or c = NDV, then a = NDV.

Use Initializing and Ending Statements

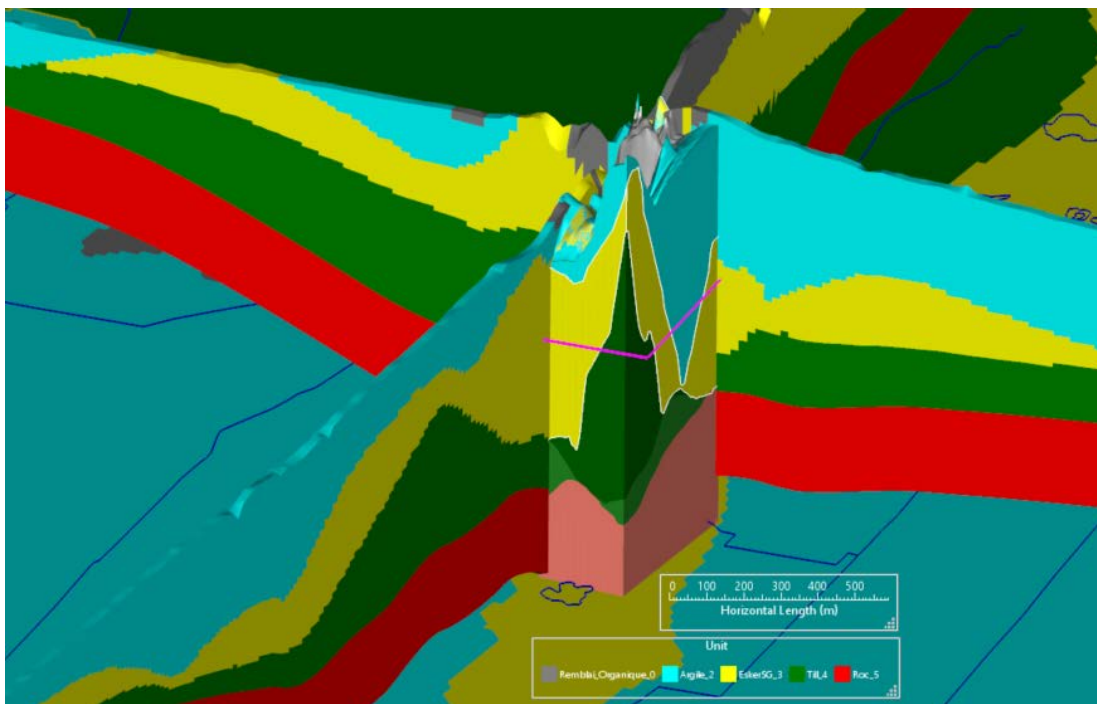
Script

```
Unit = 5;
if (Z > zRoc5_BK_Vario4_2021){Unit = 4;}
if (Z > zTill4_2021) && ((zEskerSG3_2021 - zTill4_2021) > 1){Unit = 3;}
if (Z > zEskerSG3_2021) && ((zArgile2_2021 - zEskerSG3_2021) > 1){Unit = 2;}
if (Z > zArgile2_2021) && ((zTopo_UklarBK_Vario1_2021 - zArgile2_2021) > 1){Unit = 1;}
```

OK Cancel Apply Help



Vue 3D régionale des unités hydrostratigraphiques du modèle conceptuel.



Vue 3D locale des unités hydrostratigraphiques du modèle conceptuel.

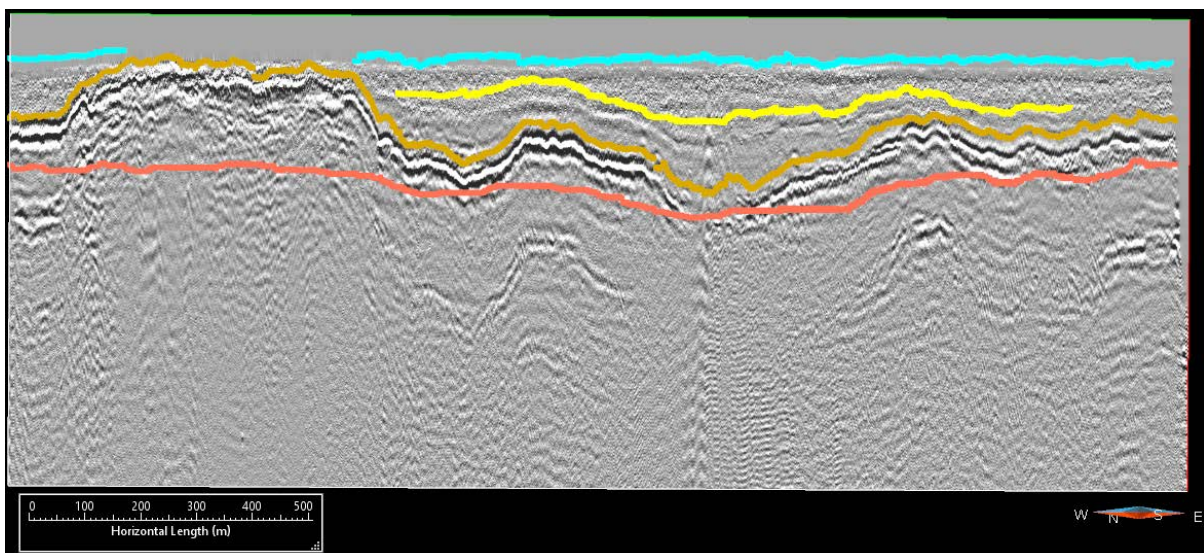
8 Faciès F1 (esker) et F2 (sable et gravier d'épandage) de l'unité EskerSG3

L'unité EskerSG3 est composée de 2 hydrofaciès ; le faciès nommé « F1 : esker » et le faciès nommé « F2 : sable et gravier d'épandage ». Le faciès F1 comprend la partie plus centrale de l'unité, composé de sédiments glaciaires grossiers et très propres, dont la conductivité hydraulique bien qu'hétérogène, est généralement très élevée. Le faciès F2 comprend les sables et graviers d'épandage sur les flancs du faciès F1, et comprend des matériaux dont la conductivité hydraulique est généralement moins forte que dans le faciès F1.

8.1 Données utilisées

On définit les 2 hydrofaciès F1 et F2 par une combinaison des descriptions des carottes de forage par Technorem 2019 et des faciès sismiques identifiés à partir des données sismiques MBMS 2019 et 2021. À partir des descriptions des carottes de forage, on définit le faciès F2 par tous les matériaux définis comme sables/graviers silteux ou argileux, donc moins propres que ceux du faciès F1 définis par sables et/ou graviers. On calcule les proportions respectives des faciès F1 et F2 selon leur épaisseur par rapport à l'épaisseur totale de l'unité EskerSG3.

Différents marqueurs sismiques ont été pointés sur les levés sismiques de MBMS 2019 et 2021. Le marqueur S3 (cyan) correspond au toit de l'unité d'Argile2. Le marqueur S2 (jaune) correspond au toit des sables et graviers d'épandage de l'unité EskerSG3, tandis que le marqueur S1 (orange) correspond au toit de l'unité principale d'EskerSG3, soit le faciès F1. Le marqueur S0-P (rouge) marque le toit du Till4 ou du roc, et marque la base du modèle pour calculer pour calculer les épaisseurs sismiques des différents faciès. On calcule ainsi les proportions des faciès F1 et F2 de façon similaire à ce qui est fait avec les descriptions de forage.



8.2 Méthodologie

Les données de faciès F1 et F2 sont concentrées au niveau local autour du site des anciennes lagunes. Toutes tentatives d'interpolation et de krigeage se sont avérées infructueuses pour obtenir une représentation adéquate des proportions de faciès en tous points de l'EskerSG3 au niveau régional.

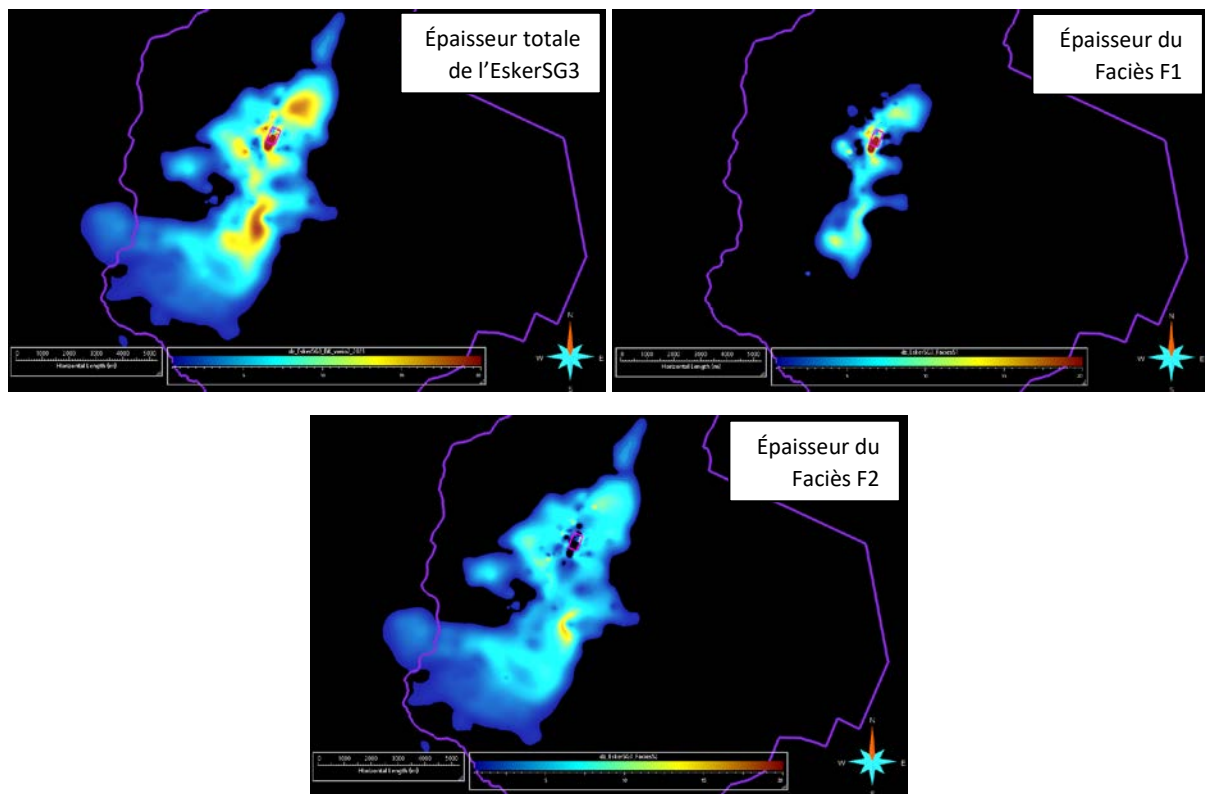
On utilise la régression multi-linéaire afin de trouver la combinaison de propriétés géologiques pouvant le mieux prédire les proportions de faciès F1 et F2 partout dans l'unité de l'EskerSG3. Cette méthode permet d'entraîner le modèle sur les données connues de faciès et a permis de trouver qu'une combinaison des épaisseurs d'Argile2, d'EskerSG3, de Till4, et de l'élévation du toit de l'EskerSG3 permet de bien estimer les proportions de faciès F1 et F2. La formule finale de régression multi-linéaire utilisée est la suivante :

$$\text{Prop_F1} = 0.45343294169403847 - 0.00464928 * dz_Argile2 + 0.00498441 * dz_EskerSG3 + 0.00392417 * dz_Till4 + 0.00802004 * zEskerSG3.$$

De façon similaire à l'interpolation des épaisseurs et des élévations, 2 estimations successives ont été effectuées pour mieux honorer les proportions mesurées aux forages par rapport aux proportions sismiques lorsque les données étaient contradictoires.

La première étape d'interpolation a été effectuée en utilisant la formule de régression multi-linéaire présentée ci-haut. La carte de proportion ainsi obtenue fut ensuite utilisée comme dérive externe par krigeage bayésien avec les proportions mesurées aux forages pour obtenir la carte finale des proportions. Des points de contrôle avec une proportion du faciès F1 = 0 ont été rajoutés lorsque l'épaisseur totale de l'unité EskerSG3 est moins de 2m.

8.3 Mise en carte des épaisseurs des faciès F1 et F2



Annexe 6

Document de travail du modèle
hydrogéologique dans le logiciel FEFLOW

Ce document de travail explique les étapes de construction du modèle hydrogéologique 3D dans le logiciel FEFLOW, soit :

1	Construction de la mesh 2D.....	1
2	Configuration des couches en 3D	2
3	Représentation des unités hydrostratigraphiques	3
4	Conditions aux frontières.....	8
5	Recharge	8

1 Construction de la mesh 2D

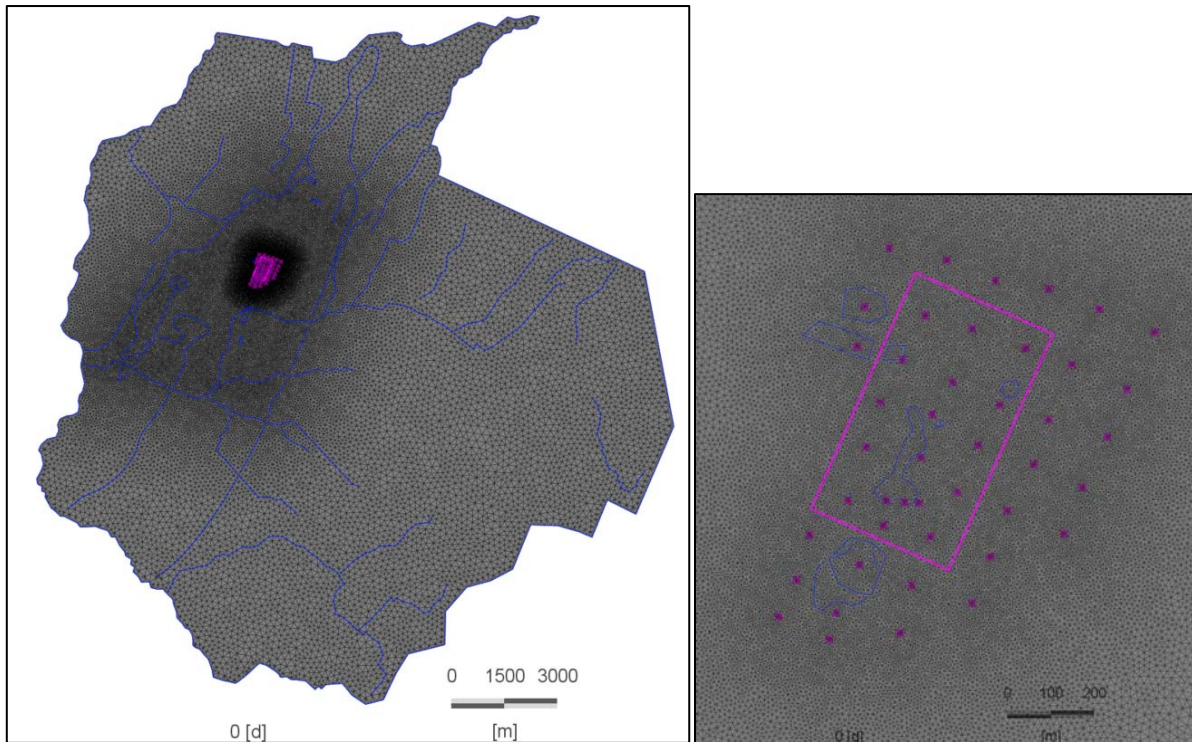
La mesh 2D Feflow est construite en utilisant l’algorithme « Triangle », générant des éléments triangulaires en 2 dimensions. L’algorithme « Triangle » permet différents niveaux de raffinement autour d’éléments de type « Polygones », « Lignes », et « Points », afin de créer une mesh avec des nœuds ou des mailles qui représentent parfaitement certaines contraintes ou éléments critiques au modèle hydrogéologique. Les paramètres suivants ont été utilisés :

Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	20 [DEG]
Forces Delaunay	<input checked="" type="checkbox"/> True
Fill Holes	<input type="checkbox"/> False
Delaunay Algorithms	Divide-and-conquer
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insertion	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/> True
Edge Refine Mode	SELECTED
Polygon Gradation	25
Polygon Target Size	75 [m]
Refine Lines	<input checked="" type="checkbox"/> True
Line Gradation	50
Line Target Size	250 [m]
Refine Points	<input checked="" type="checkbox"/> True
Point Gradation	20
Point Target Size	10 [m]

- Le polygone utilisé est l’étendue du modèle hydrogéologique régional.
- Les lignes utilisées pour le raffinement incluent surtout le réseau hydraulique simplifié, ainsi que les lignes de contour de l’épaisseur de 1m de l’unité EskerSG3 et de Till4. Cela permet de positionner les conditions aux frontières à leur position exacte et de représenter parfaitement les limites géologiques jugées critiques pour simuler adéquatement l’écoulement des eaux souterraines autour du site de l’UTES.
- Les éléments de type points utilisés pour le raffinement sont les 3 puits de pompage de l’UTES, ainsi que 41 points de contrôle pour assurer une discrétisation fine de la grille au niveau local autour du site des anciennes lagunes de Ville Mercier.

La grille 2D finale comporte 57257 nœuds (113569 éléments) par couche. La taille des éléments varie entre 5m et 150m. La mesh 2D a été construite en 2020, avant les modifications importantes du

modèle conceptuel apportées suite à l'interprétation des données sismiques 2021. L'extension latérale de l'unité EskerSG3, telle que définie en 2020 a été utilisée pour construire la mesh. Il ne fut pas jugé nécessaire de reconstruire la mesh 2D en tenant compte de la nouvelle interprétation de l'unité EskerSG3 car la résolution est satisfaisante.



Mesh 2D, vue régionale (gauche) et locale (droite)

2 Configuration des couches en 3D

La stratégie suivante est adoptée pour la configuration 3D des couches :

- Représenter une couche superficielle de 0.5m sur la première couche du modèle pour avoir un contrôle distinct sur la géologie (pédologie) de surface.
- Représenter parfaitement le toit de l'Unité EskerSG3 en fixant son élévation.
- Ajouter 2 couches à la base de l'unité Argile2 pour bien modéliser les différences de pression et de charges entre les sédiments fins et peu conducteurs de l'argile et les sédiments très conducteurs de l'esker.
- Représenter parfaitement le toit de l'Unité de Roc5 en fixant son élévation.
- Discrétiser verticalement l'esker en 20 couches pour permettre la représentation numérique de l'hétérogénéité verticale.
 - Pour éviter la création de plusieurs couches fines lorsque l'unité EskerSG3 n'est pas présent, on discrétise entre le toit de l'unité EskerSG3 et du Roc5, en incluant donc l'unité de Till4.
 - La limite entre l'unité EskerSG3 et l'unité Till4 sera donc discrétisé.
- Représenter le roc par un total de 9 couches, soit :
 - 5 couches avec $dz = 2m$,
 - 2 couches avec $dz = 5m$ et,
 - 2 couches avec $dz = 10m$.

Cela correspond aux étapes suivantes dans le « 3D Layer Configuration » de Feflow :

- Assigner l'élévation de la Topo à la Slice 1
- Ajouter une couche sous la Slice 1 avec dz = 0.5m
- Assigner l'élévation de la couche EskerSG3 à la slice 3
- Ajouter 2 couches au-dessus de la slice 3 avec dz = 0.5m
- Ajouter 2 couches entre les slices 2 et 3 (Top d'EskerSG3 est maintenant la slice 7)
- Assigner l'élévation du Roc5 à la slice 8
- Ajouter 19 slices entre slices 7 et 8 (top du Roc5 est maintenant la slice 27)
- Ajouter 5 couches avec dz = 2m sous la slice 27
- Ajouter 2 couches avec dz = 5m sous la dernière slice
- Ajouter 2 couches avec dz = 10m sous la dernière slice

Le modèle Feflow final contient 35 couches (36 slices), 2,061,252 nœuds et 3,974,915 éléments. L'unité du Till_4 est finalement divisée en deux sous-unités; le till remanié représenté par les quatre couches supérieures et le till intact sous-jacent.

3 Représentation des unités hydrostratigraphiques

Les unités hydrostratigraphiques sont représentées en créant « l'Elemental Distribution » *kZones* dans Feflow. Afin d'assigner la bonne unité à chacun des éléments de la grille 3D, on exporte les *kZones* de tous les éléments de la grille 3D Feflow selon le centre des éléments en format « .csv ». Le fichier ainsi créé est importé dans Gocad pour assigner les unités appropriées selon le modèle conceptuel 3D créé précédemment. En important les *kZones* dans Gocad, on prend soin de garder la variable « Element » afin de permettre un ré-import dans le modèle Feflow selon le numéro d'élément. Chaque élément de la grille 3D Feflow est donc assignée une valeur de *kZones* correspondant à l'unité hydrostratigraphique définie à l'étape de modélisation conceptuelle 3D dans Gocad. Pour chacune des *kZones*, on peut donc assigner les valeurs de propriétés hydrauliques selon le type d'unité. La conductivité hydraulique est représentée de 3 façons différentes dans Feflow, selon l'hétérogénéité spatiale attendue et mesurée dans chacune des unités hydrostratigraphiques :

1. 1 valeur unique par unité;
2. Interpolation spatiale (krigeage) à partir de points de mesure fixes et points pilotes à calibrer;
3. Ensemble de réalisations équiprobables simulées par simulations géostatistiques.

3.1 Valeur unique par unité

Une valeur unique de conductivité hydraulique est assignée pour les unités hydrostratigraphiques suivantes : *Remblais_Organique_1*, *Argile_2*, *Till_4*, et le roc non-fracturé. Ces valeurs uniques de conductivité hydraulique sont ajustées pendant la calibration du modèle régional en mode permanent. Un ratio unique de conductivité hydraulique horizontale (Kxy) sur la conductivité hydraulique verticale (Kz) est également calibré pour chacune de ces unités.

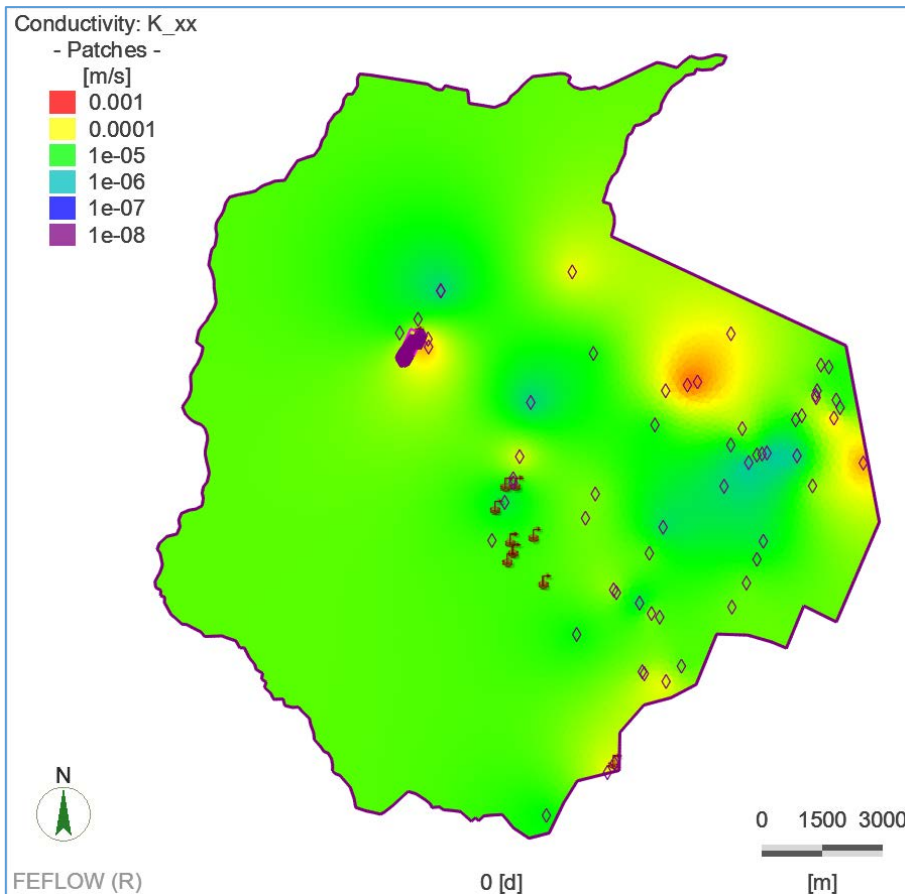
3.2 Distribution spatiale par krigeage et calibration par points-pilotes

L'interpolation par krigeage permet de générer une distribution spatiale réaliste de Kxy, en propageant les valeurs de Kxy à partir de points de contrôle connus et selon des paramètres de krigeage déterminés à partir des données mesurées. Le krigeage peut se faire en 2D ou en 3D selon les besoins. Il permet une meilleure représentation de l'hétérogénéité que l'utilisation d'une valeur unique de Kxy, tout en limitant le nombre de paramètres à calibrer. L'utilisation de points-pilotes permet de calibrer les valeurs de Kxy à certains points de contrôle pré-déterminés (les points-pilotes)

et de régénérer une distribution spatiale par krigeage à partir des nouvelles valeurs de k_{xy} calibrées aux points-pilotes. Cela permet d'avoir un plus grand contrôle sur les valeurs de k_{xy} , permettant de mieux calibrer les observations tout en générant une distribution spatiale de K_{xy} plus réaliste. Cette combinaison de krigeage et de points-pilote est utilisée dans la calibration du modèle régional déterministe de Ville Mercier dans l'unité *Roc_5*, localement dans l'unité de *Till_4*, et dans les faciès *F1_Esker* et *F2_SG* de l'unité *EskerSG_3*.

3.2.1 Krigeage 2D dans l'unité *Roc_5*

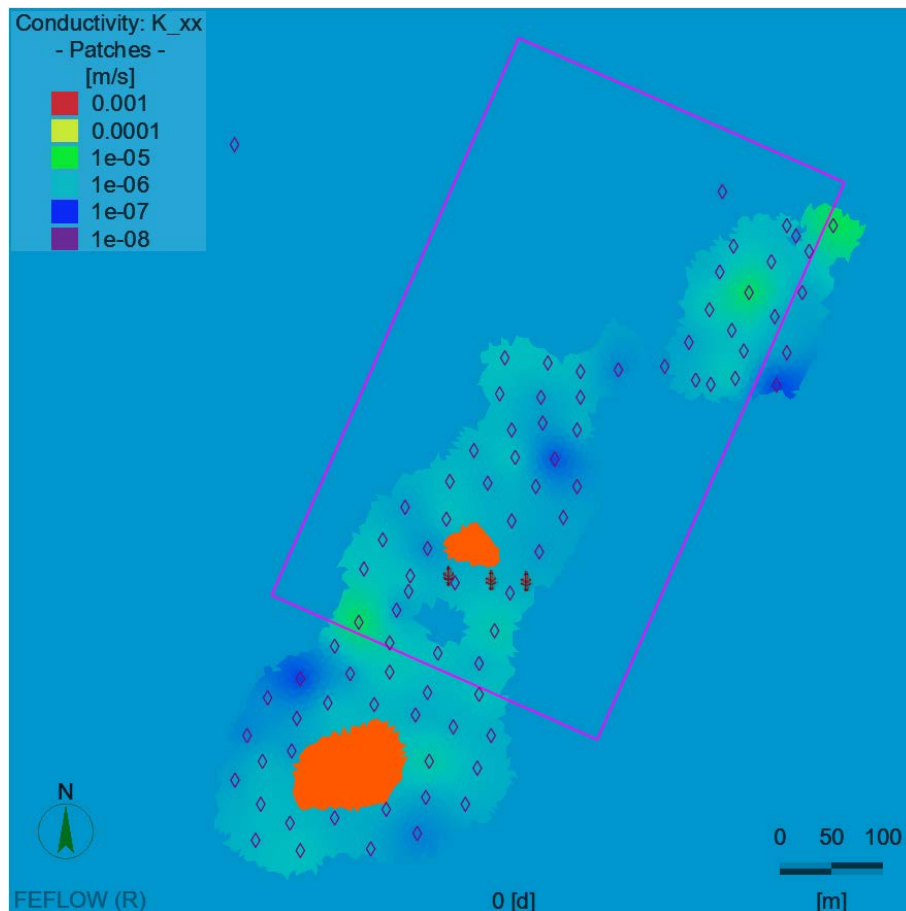
La conductivité hydraulique dans l'unité hydrostratigraphique *Roc_5* est très hétérogène selon les essais de perméabilité effectués et les valeurs extraites de la littérature dans le domaine de modélisation. Bien que cette hétérogénéité soit aussi verticale, les valeurs de K_{xy} sont généralement mesurées sur tout l'intervalle crépiné du forage utilisé, masquant l'hétérogénéité verticale. Tous les points de mesures (62 valeurs de K_{xy}) sont utilisés comme points de contrôle pour effectuer le krigeage de K_{xy} sur l'ensemble du modèle en 2D. Un variogramme modélisé exponentiel, avec un plateau (variance) de 0.41, un effet pépite de 0.04, et une portée omnidirectionnelle de 5000 mètres fut utilisé pour le krigeage du logarithme à base 10 (\log_{10}) de K_{xy} . Pour considérer l'incertitude liée aux valeurs de K_{xy} mesurées sur de grands intervalles crépinés, ou par les essais plus anciens, les valeurs mesurées de K_{xy} étaient utilisées comme points-pilotes pendant la calibration, en leur permettant de varier sur un intervalle de plus ou moins un ordre de grandeur de leur valeur initiale de K_{xy} . Le champ de K_{xy} ainsi calibré est représentatif des variations générales de la conductivité hydraulique dans l'aquifère régional de roc fracturé, mais ne permet pas de représenter toutes les variations locales et verticales de K_{xy} au niveau du site de l'UTES. Un ensemble de réalisations stochastiques 3D de K_{xy} au niveau local sera utilisé dans une seconde phase de calibration de K_{xy} dans le roc par méthode d'ensemble.



Distribution spatiale de K_{xy} calibrée régionalement dans le roc, avec la position des points-pilote.

3.2.2 Krigeage 2D de la fenêtre potentielle au roc à travers de l'unité Till_4

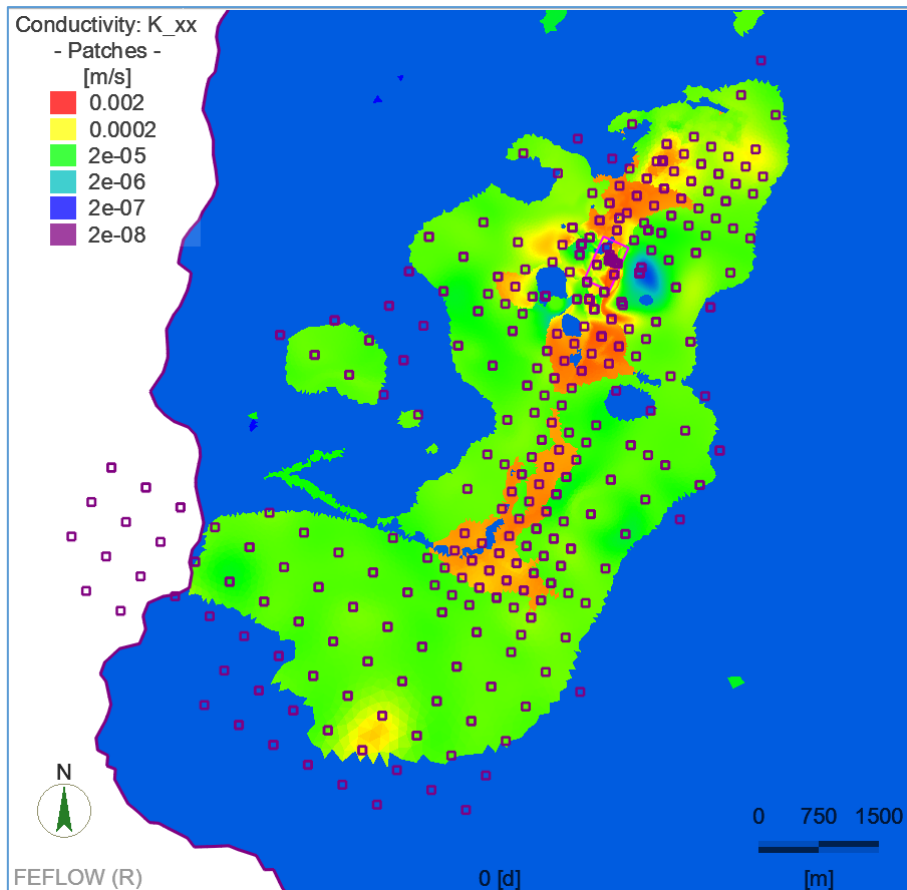
Une valeur unique de K_{xy} a été calibrée dans l'unité de Till_4. Cependant, la présence potentielle d'une fenêtre au roc entre l'aquifère local de l'EskeSG_3 et l'aquifère régional de Roc_5 ne peut être représentée par la calibration d'une valeur unique. Une distribution spatiale de 81 points-pilotes positionnés de façon aléatoire localement est implémentée afin de fournir à la calibration un degré de flexibilité nécessaire à la calibration. Les valeurs de K_{xy} des points-pilotes sont libres de bouger entre deux extrêmes (1×10^{-9} m/s et 5×10^{-4} m/s) localement, tout en produisant un champ de K_{xy} krigé dont la distribution spatiale respecte les paramètres du variogramme suivant : variogramme de type exponentiel, une variance de 2.0 et un effet pépité de 0.1, et une portée omnidirectionnelle de 500 mètres.



Distribution spatiale de Kxy calibrée dans la fenêtre potentielle au roc dans l'unité de Till 4, avec la position des points-pilote.

3.2.3 Krigeage 3D dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3

L'hétérogénéité spatiale de Kxy est extrêmement forte dans les 2 faciès F1 et F2 de l'unité *EskerSG_3*. Afin de calibrer le modèle régional en régime permanent, une calibration par points-pilotes 3D a été effectuée afin de tenir compte de la variabilité horizontale et verticale de Kxy. Plusieurs points de contrôle étaient disponibles et provenaient de valeurs de Kxy mesurées par essai de perméabilité multi-niveaux. Au total, 79 points de mesure sont disponibles dans le faciès F1, tandis que 37 points de mesure sont disponibles dans le faciès F2. Ces points de mesure sont fixes dans le système de krigeage, afin d'honorer parfaitement ces valeurs fiables. Afin de permettre une certaine latitude à la calibration, 183 points-pilotes dans le faciès F1 et 222 points-pilote dans le faciès F2 sont ajoutés au système de calibration afin de permettre une représentation spatiale 3D adéquate de Kxy pour calibrer le modèle régional en régime permanent. Tous ces points de contrôle peuvent fluctuer entre deux extrêmes (1×10^{-7} m/s et 1×10^{-3} m/s) pendant la calibration, tout en produisant deux champs de Kxy krigés dont les distributions spatiales respectent les paramètres des variogrammes suivants : pour le faciès F1, un variogramme exponentiel de variance 1.7, effet pépité de 0.5, une portée horizontale omnidirectionnelle de 650 mètres, et une portée verticale de 5.4 mètres; pour le faciès F2, un variogramme gaussien de variance 2.25, effet pépité de 0.25, une portée horizontale omnidirectionnelle de 900 mètres, et une portée verticale de 7.5 mètres. Les faciès F1 et F2 sont modélisés séparément sans nécessité de respecter une certaine continuité spatiale de Kxy à travers l'interface, car les 2 faciès sont déposés selon des épisodes géologiques distincts.



Distribution spatiale de K_{xy} calibrée dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3, avec la position horizontale des points de mesure et des points-pilote.

3.3 Ensemble de distributions spatiales par simulations géostatistiques

Pour exprimer l'hétérogénéité qui existe localement, et permettre la calibration locale du modèle en régime transitoire, des simulations géostatistiques 3D de K_{xy} sont complétées distinctement dans une portion locale de l'unité du Roc_5, et dans les faciès F1 et F3 de l'unité EskerSG_3. La région locale où les simulations géostatistiques sont effectuées est une région approximativement circulaire de rayon 2km centrée sur le site de l'UTES. Cette zone contient 355 046 éléments dans l'unité Roc_5, 417 655 éléments dans le faciès F1 de l'unité EskerSG_3, et 322 070 éléments dans le faciès F2 de l'unité EskerSG_3. Les valeurs de K_{xy} krigées et calibrées sur le contour de la région locale sont ajoutées aux points de contrôle afin de faire tendre les valeurs de K_{xy} simulées vers les valeurs de K_{xy} calibrées régionalement, et ainsi éviter des sauts artificiels de la conductivité aux abords de la région.

La méthode géostatistique employée est celle des bandes tournantes, qui se veut une approximation de la méthode des simulations gaussiennes séquentielles (SGS) en 1D de façon radiale. L'utilisation d'un nombre élevé de bandes tournantes permet d'approximer les relations spatiales dans les autres dimensions spatiales, et ainsi générer plusieurs réalisations équiprobables de K_{xy} en une fraction du temps nécessaire qu'il n'en prendrait pour rouler des SGS sur un aussi grand nombre de points.

Les mêmes données de K_{xy} que celles utilisées pour le krigeage 3D dans les faciès F1 et F2 de l'unité EskerSG_3 sont utilisées comme données initiales pour les simulations géostatistiques, soit toutes les

valeurs de Kxy mesurées par essai de perméabilité multi-niveaux jugées fiables sur les puits récents et historiques.

4 Conditions aux frontières

4.1 Réseau hydrologique,

Une condition de type « charge constante » égale à l'élévation de la surface topographique est assignée aux principaux cours d'eau à l'intérieur du domaine de modélisation. Le niveau topographique a été assigné aux nœuds représentant les conditions aux frontières dans le logiciel Gocad. Ce processus d'assignation des élévations engendre toujours des variations non désirées du niveau des cours d'eau lors du transfert d'élévation d'une grille à une autre, induisant des rivières qui « remontent » en élévation. Une intervention manuelle est nécessaire afin de corriger ces anomalies et ainsi générer des cours d'eau qui s'écoulent toujours vers le bas. Les nœuds avec les élévations corrigées sont ainsi réimportés dans Feflow pour l'assignation de la condition aux frontières de type « charge constante ».

4.2 Roc

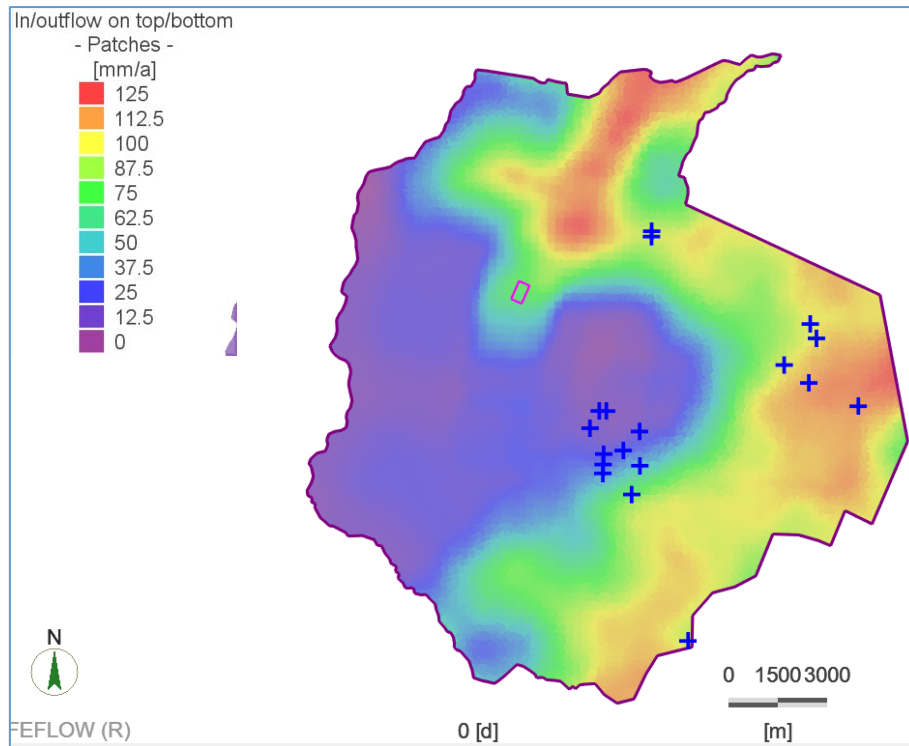
Une charge constante correspondant au niveau d'eau de la Rivière Châteauguay est assignée au roc à la limite sud-ouest du modèle. Cette condition aux frontières représente l'apport d'eau provenant du roc à la rivière à cet endroit où le roc peut être affleurant.

4.3 Esker

Une charge constante correspondant au niveau d'eau de la Rivière Châteauguay est assignée au sud-ouest du modèle, où l'unité *EskerSG_3* est modélisée comme étant en connexion avec la Rivière Châteauguay.

5 Recharge

La recharge provient d'une distribution spatiale d'un modèle initialement développé par Croteau et coll. (2010), effectué avec HELP, et modifié par le travail de François Huchet afin de représenter l'utilisation d'eau par les municipalités, et autres grands utilisateurs industriels de la région. La recharge fluctue notamment en fonction de la géologie de surface, et varie de 0 mm/an à 120 mm/an. Certains grands utilisateurs d'eau (croix bleues sur la carte ci-après) ont été inclus dans le modèle comme des puits de pompage avec un débit correspondant à leur utilisation d'eau estimée. La distribution de recharge a été fixée pendant la calibration du modèle, et ne sera pas modifiée.



Distribution spatiale de la recharge efficace assignée à la première couche du modèle hydrogéologique. Les croix bleues représentent les grands utilisateurs d'eau industriels.

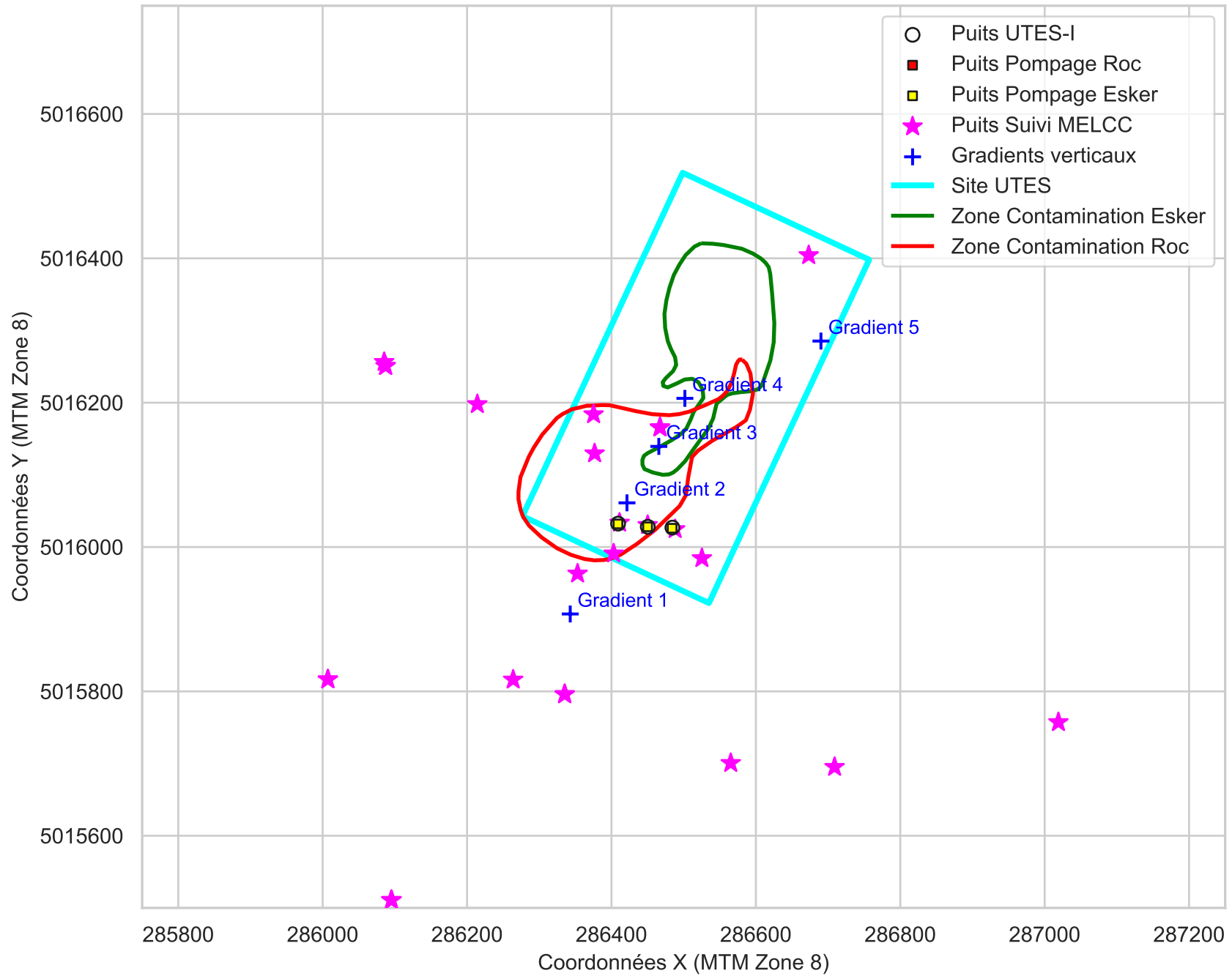
Annexe 7

Résultats complets de l'évaluation des
différents scénarios de l'UTES-II

Figures en support de l'évaluation des critères de décision

Scénario SA

Figure SA-1
Scénario SA



Scénario SA - Schéma Kxy moyen

	PW111	PW112	PW113
ID	1	2	3
X	286484.0	286450.0	286409.0
Y	5016026.0	5016028.0	5016032.0
Z	44.52	44.529999	43.330002
NAME	PW111	PW112	PW113
UNIT	Esker	Esker	Esker
SCREENTOP	20.92	21.03	20.83
SCREENBOT	8.37	8.53	8.63
CAPACITY_INPUT	1200	1200	1200
PT_DESC	PompageAval	PompageAval	PompageAval
Pump1	250	250	250
Pump2	500	500	500
Pump3	1200	1200	1200
Pump4	1500	1500	1500
Pump5	2000	2000	2000
Pump6	2500	2500	2500

Figure SA-2
Scénario SA - Gradients verticaux en fonction de la réalisation du schéma Kxy moyen

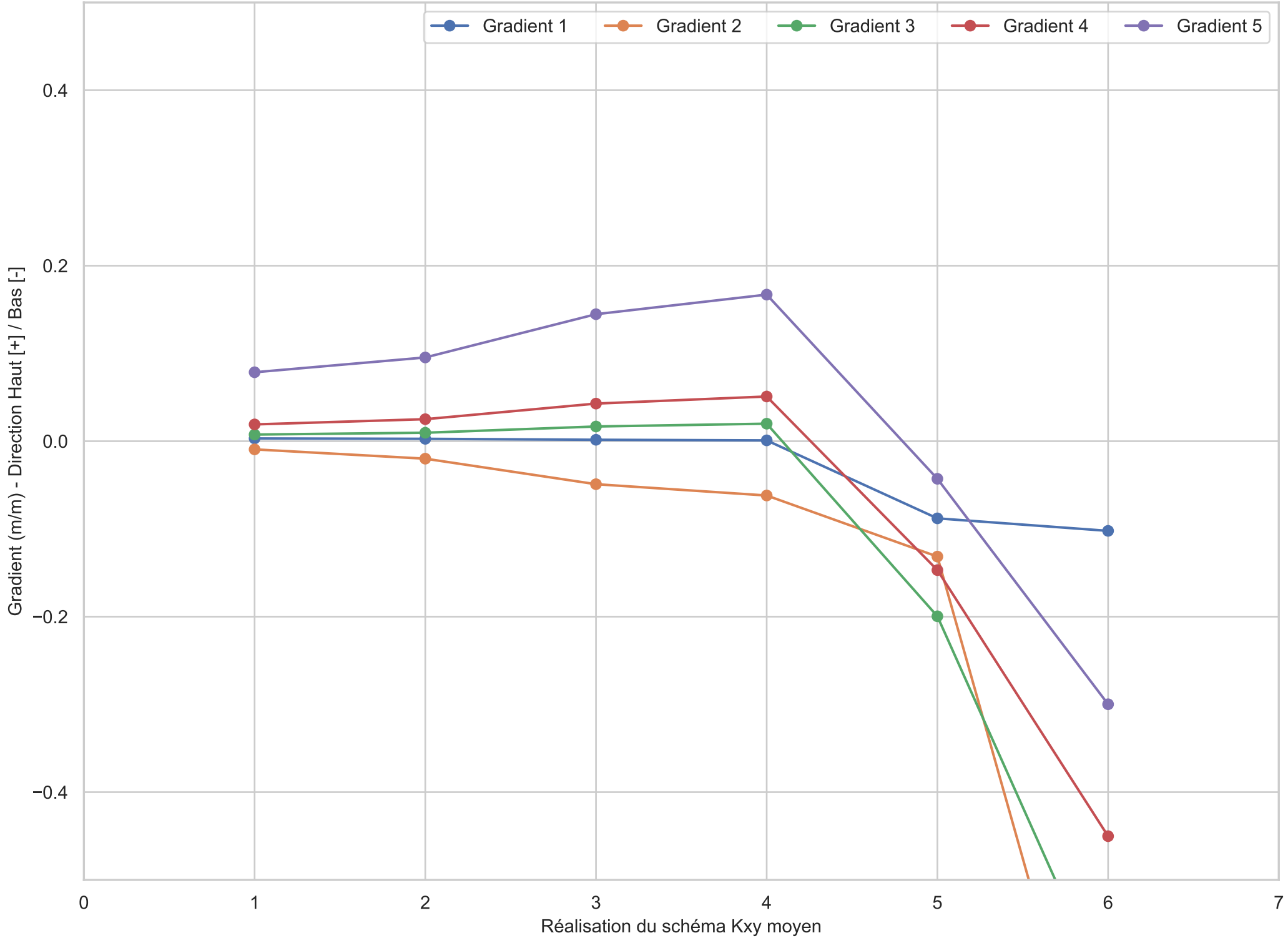
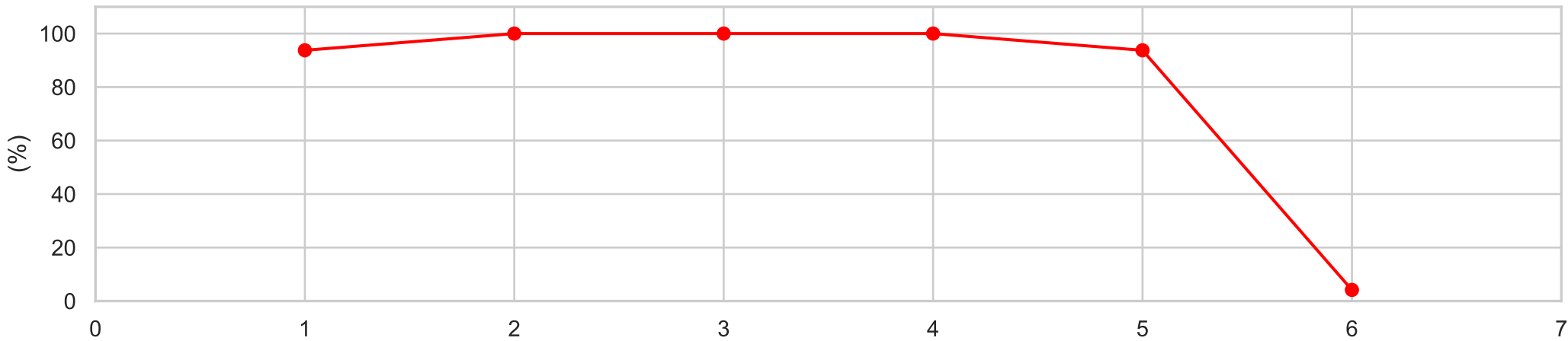
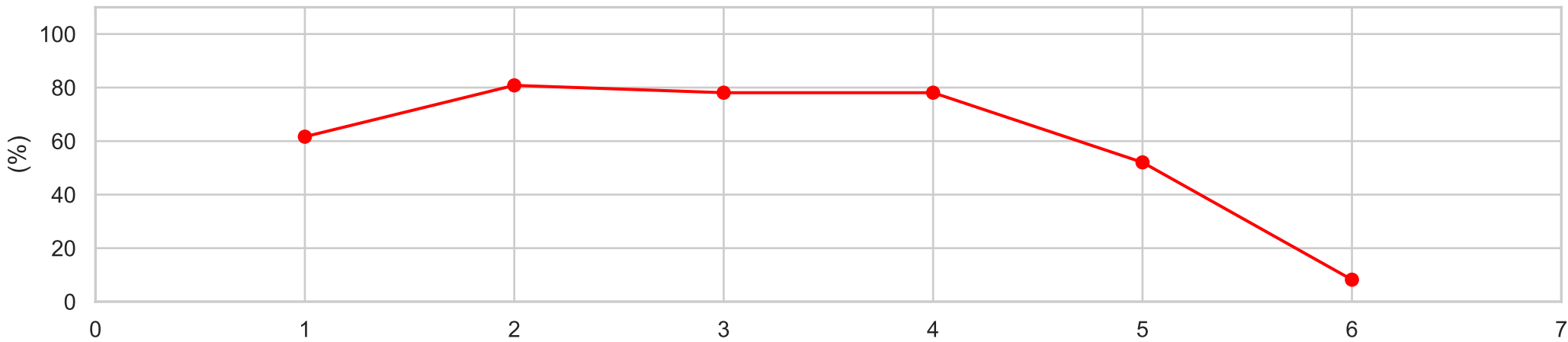


Figure SA-3

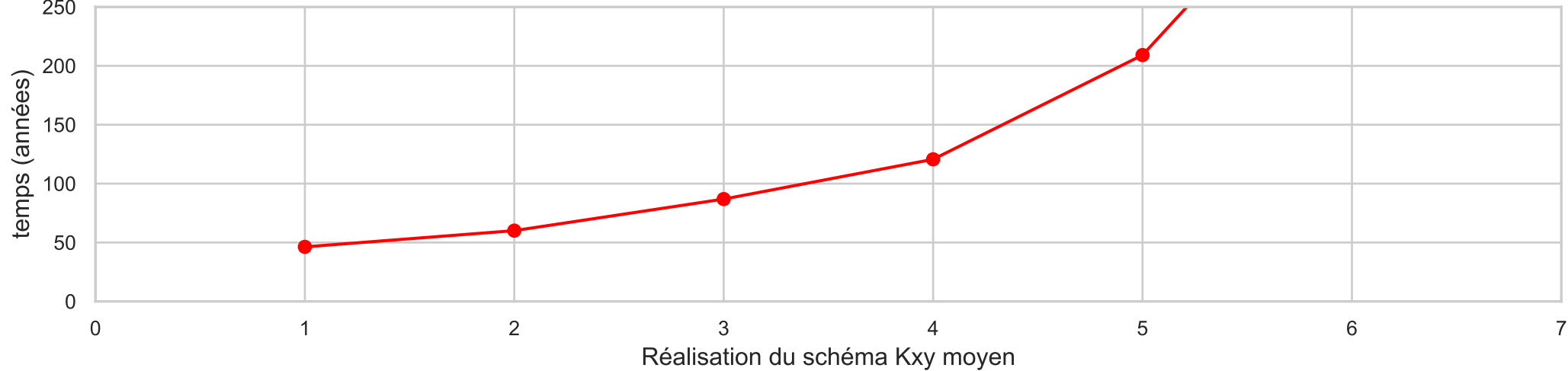
Scénario SA - Proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années



Scénario SA - Proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 ans



Scénario SA - Temps de parcours minimum pour atteindre la zone de restriction



Scénario SA - Schéma Probabiliste

Figure SA-4
Scénario SA - Gradients verticaux entre Roc et Esker

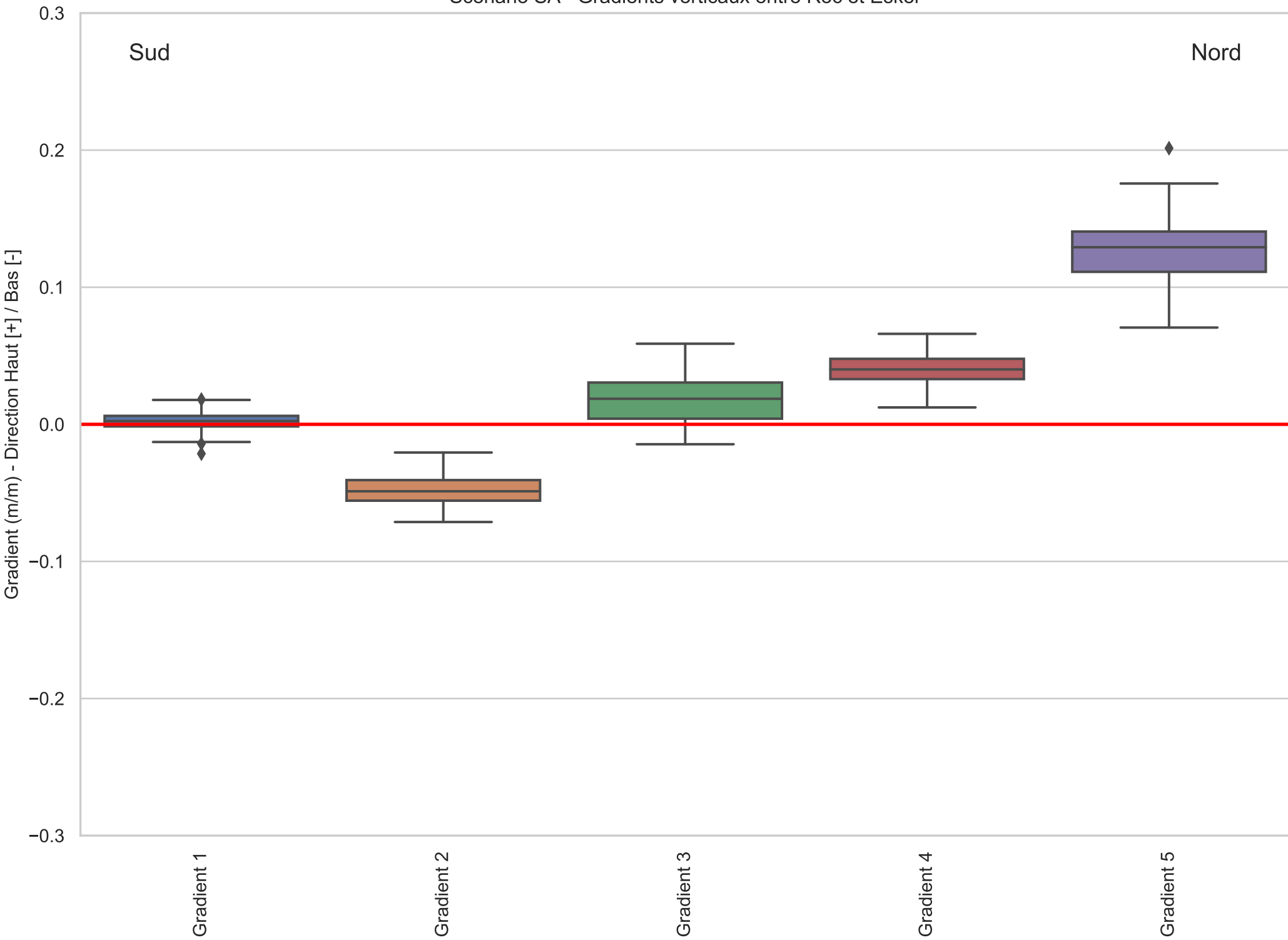


Figure SA-5

Scénario SA - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

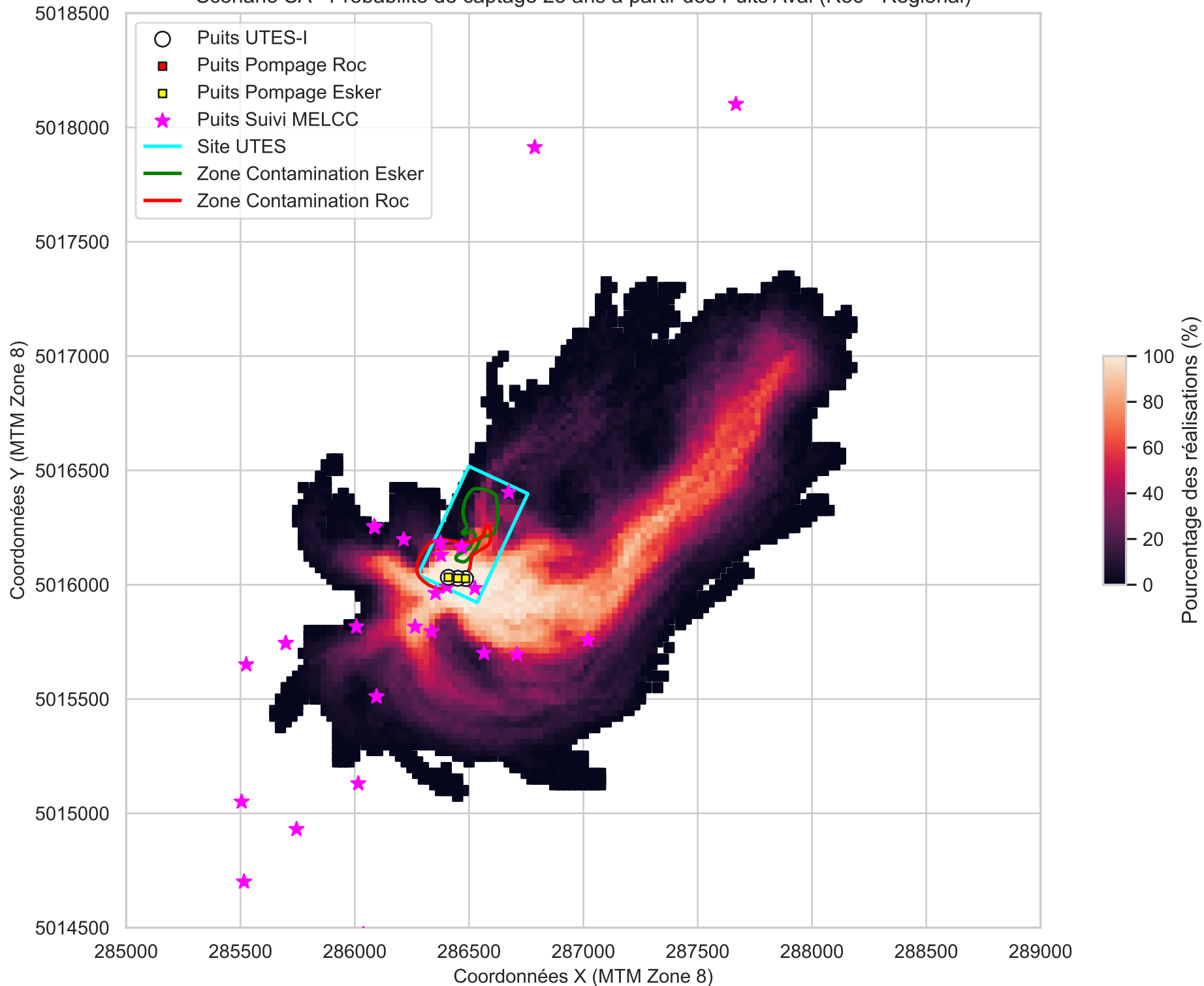


Figure SA-6

Scénario SA - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

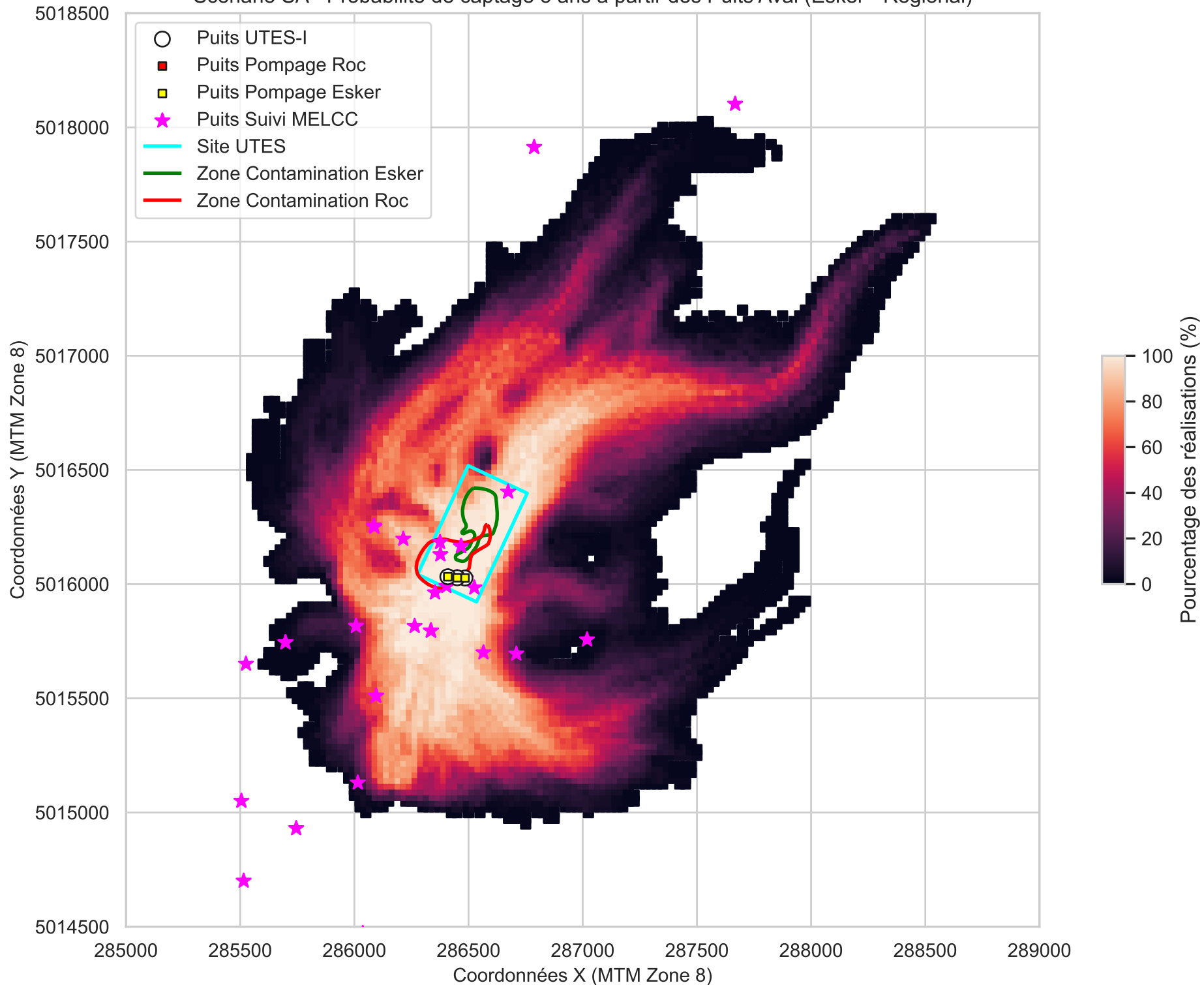


Figure SA-7

Scénario SA - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

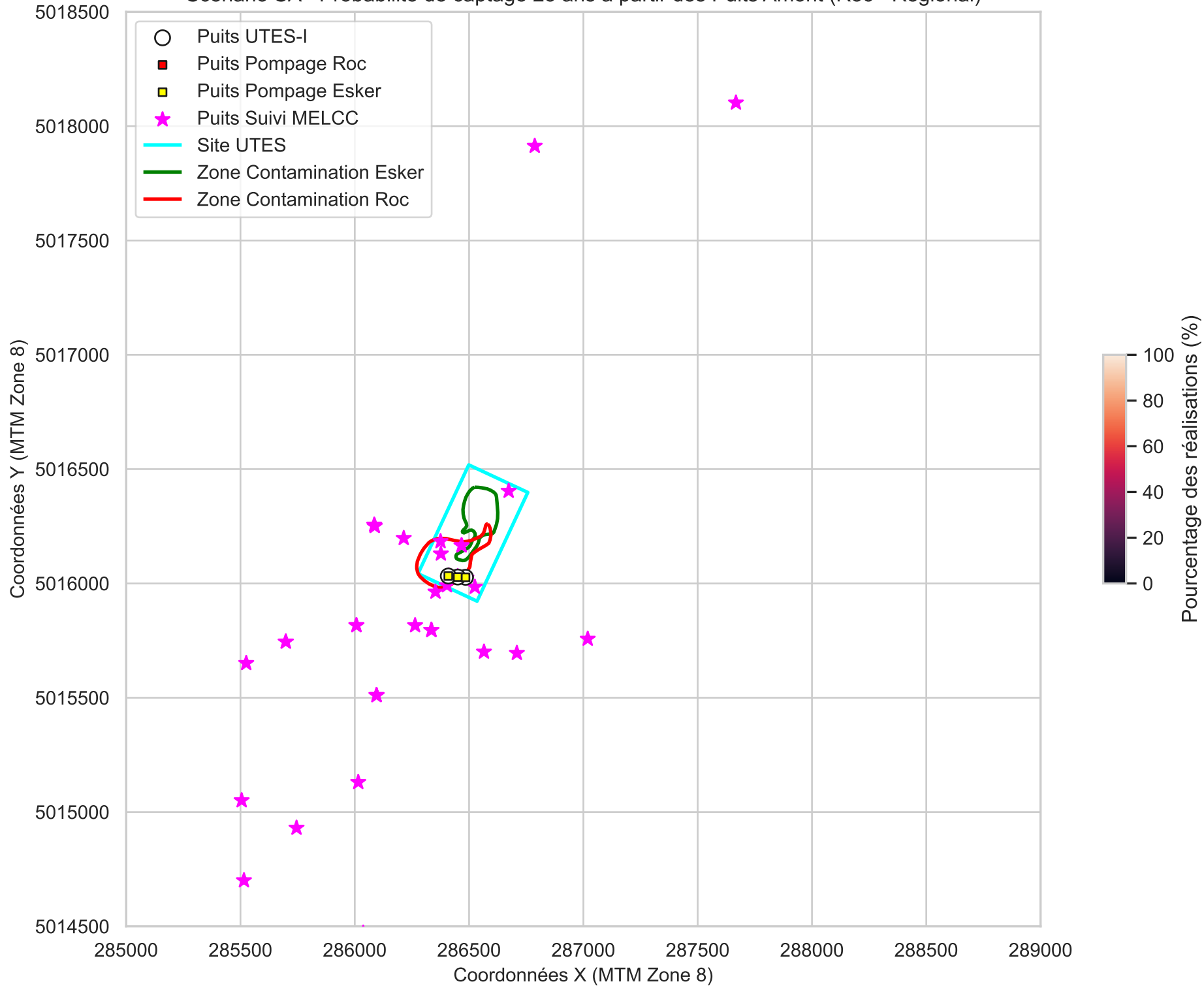


Figure SA-8

Scénario SA - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

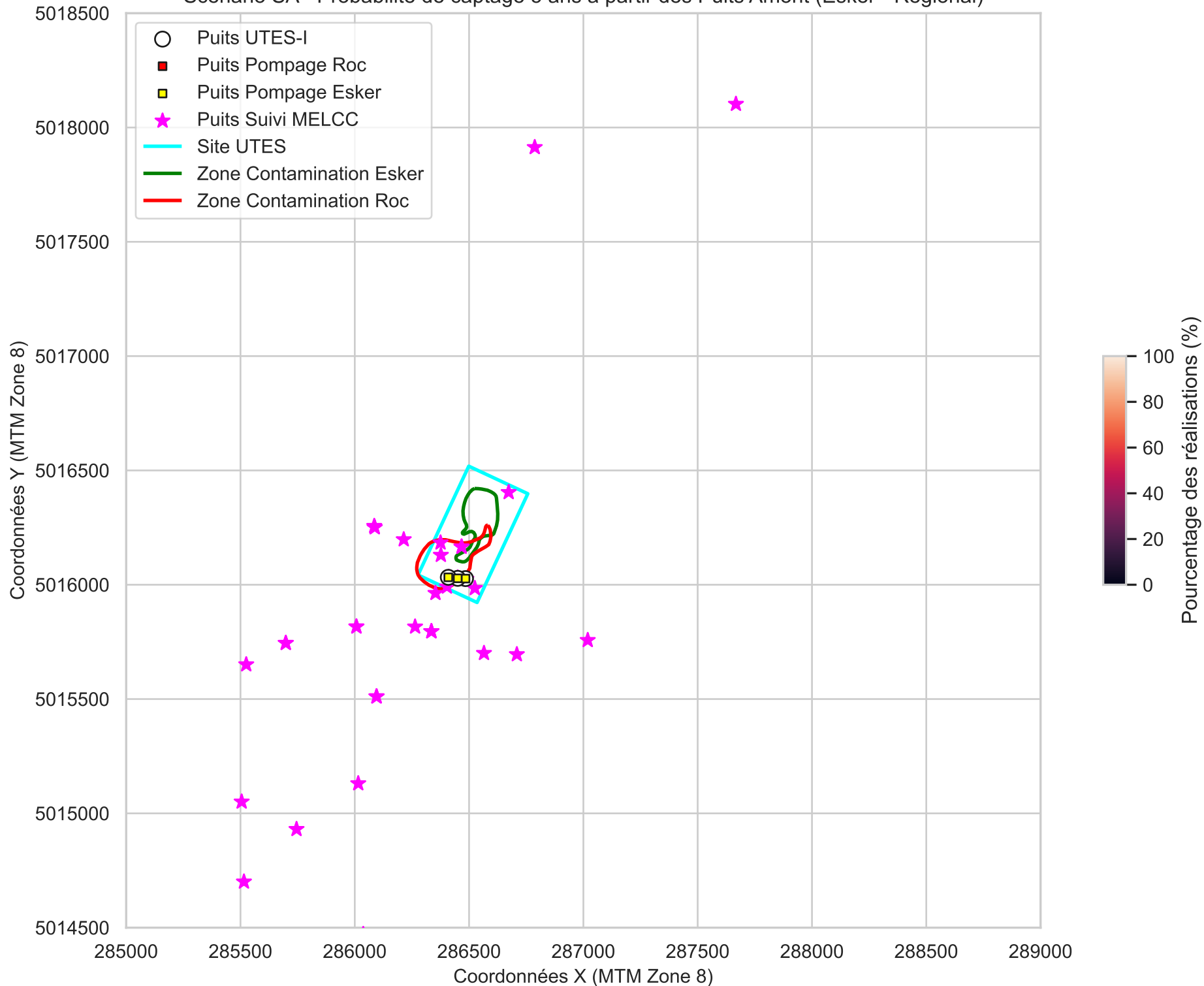


Figure SA-9
Scénario SA - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

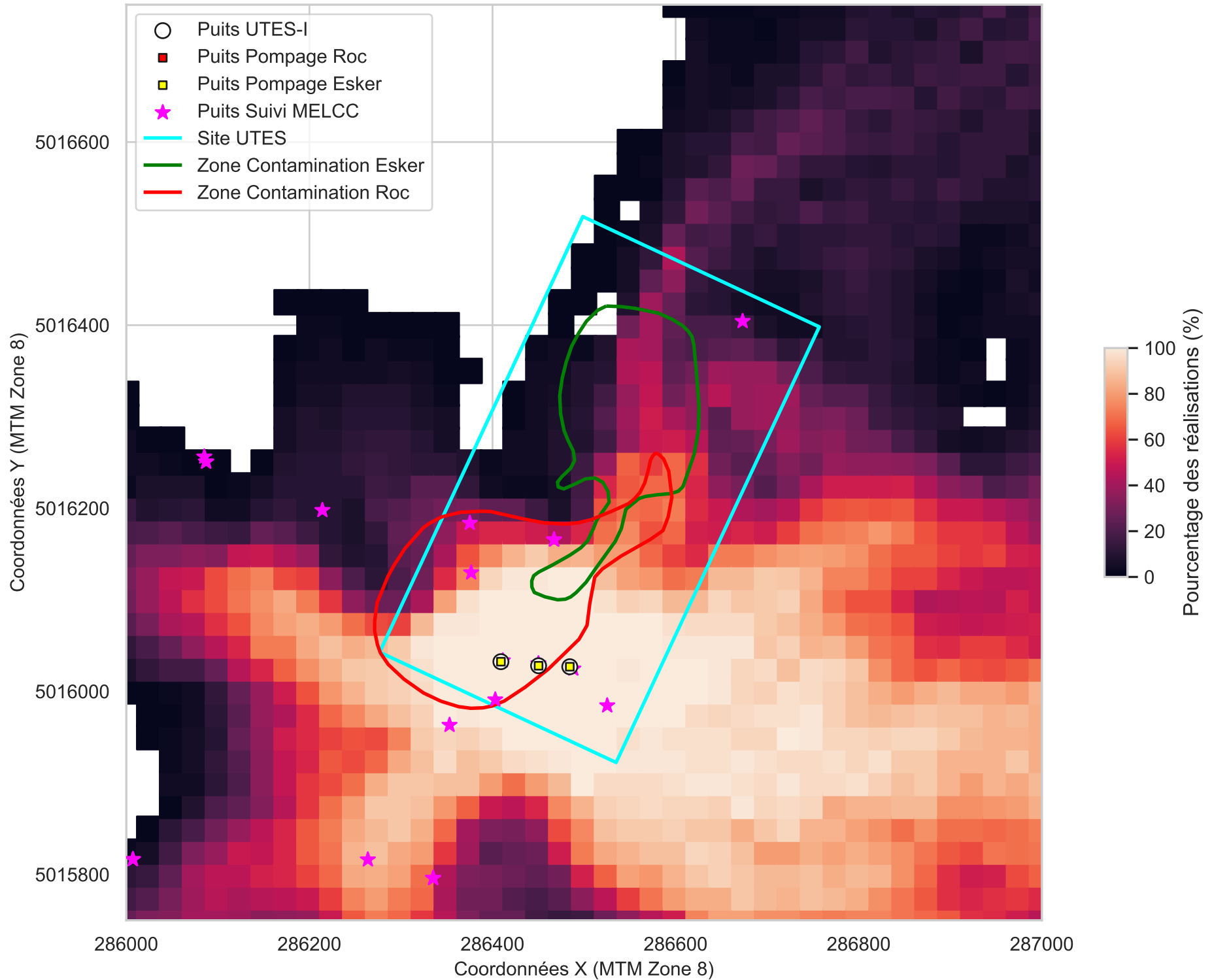


Figure SA-10

Scénario SA - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

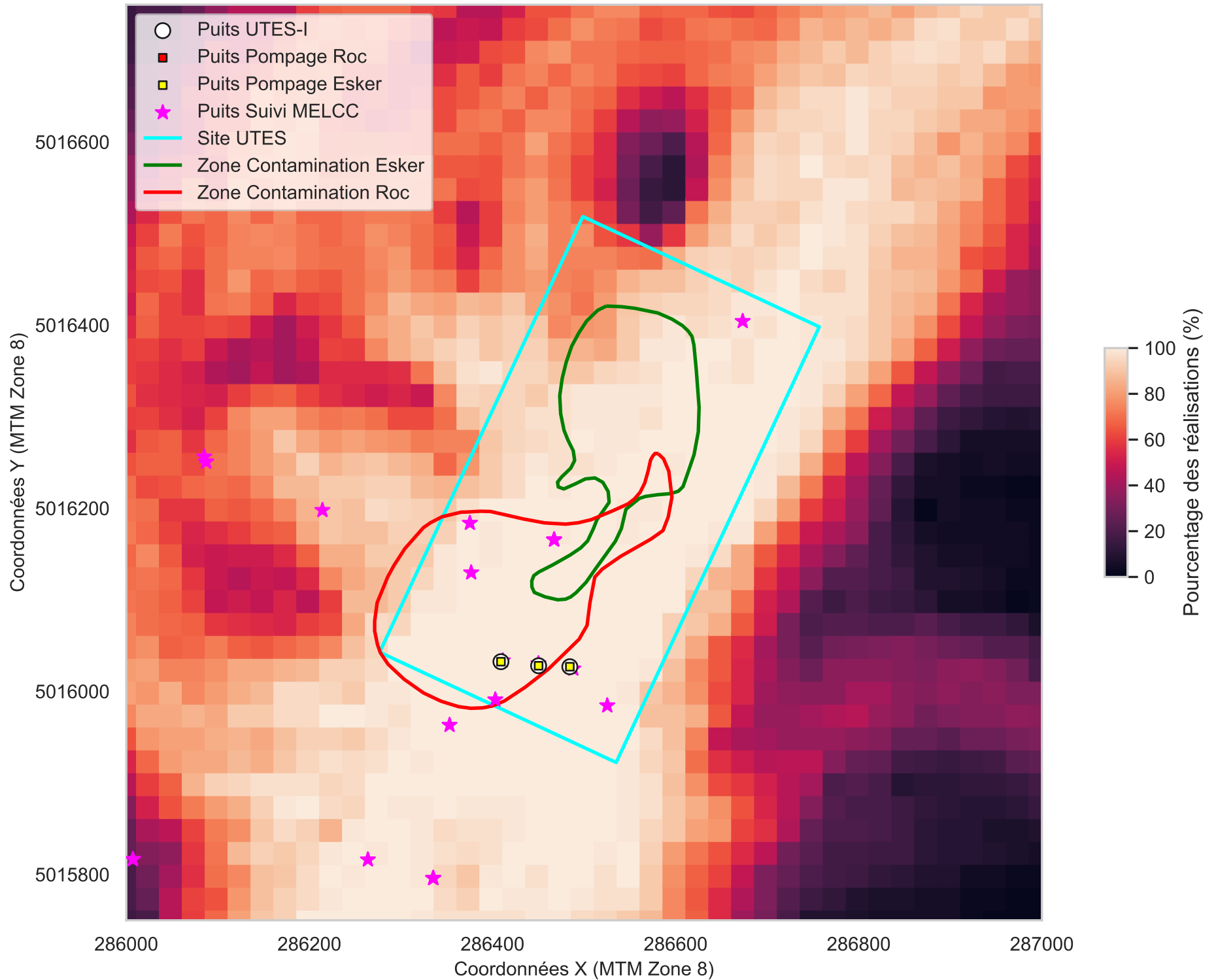


Figure SA-11
Scénario SA - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

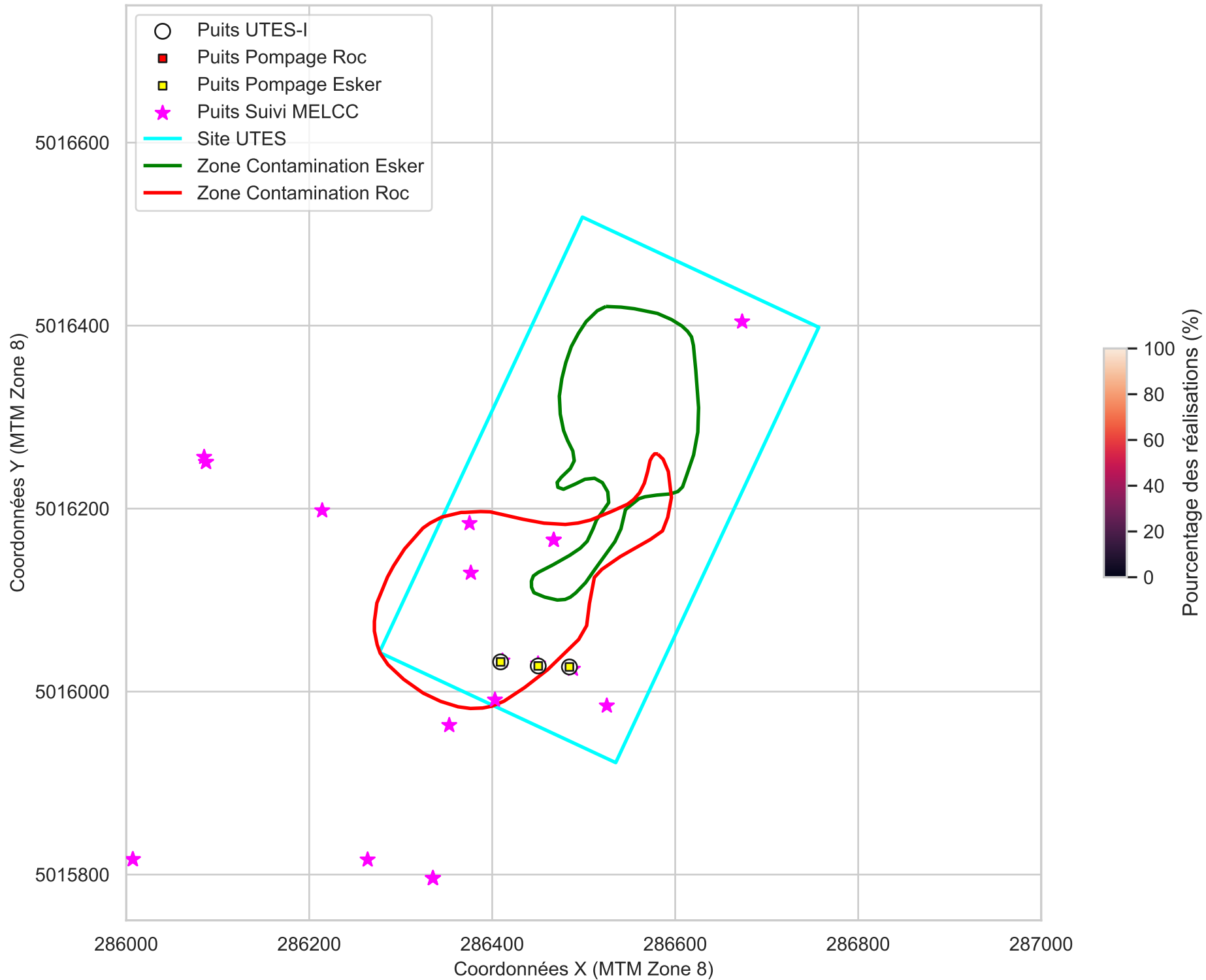


Figure SA-12

Scénario SA - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

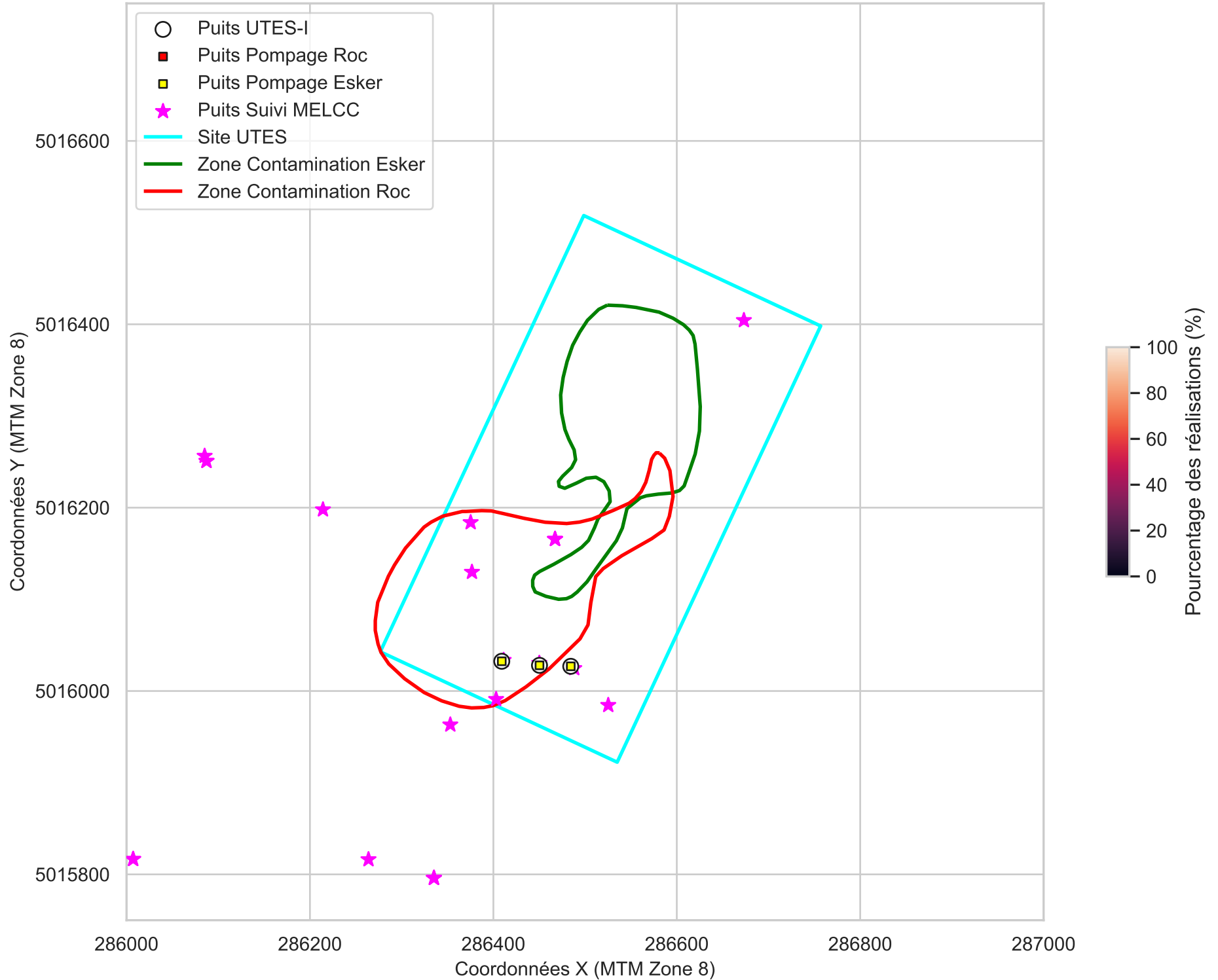


Figure SA-13
Scénario SA - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

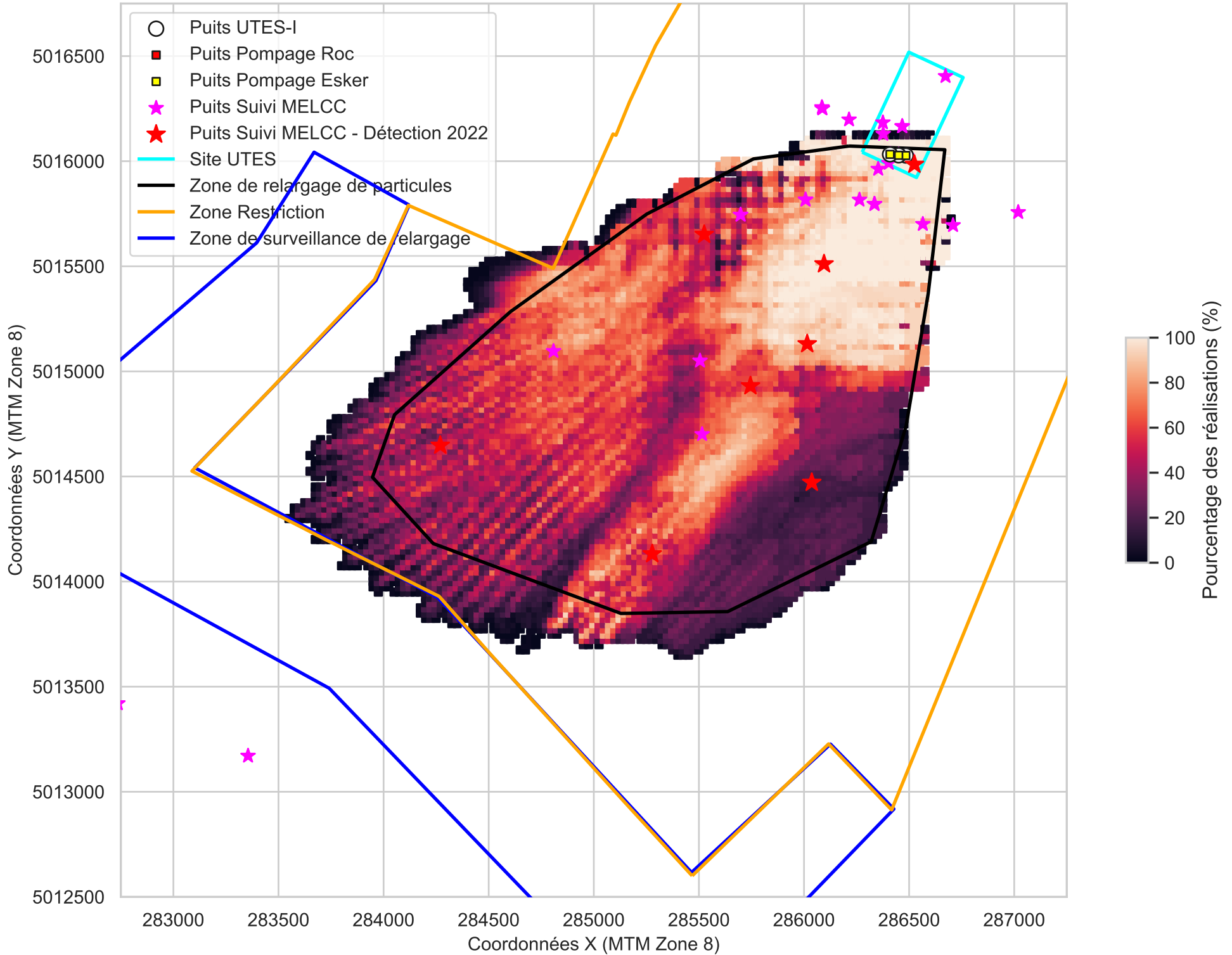
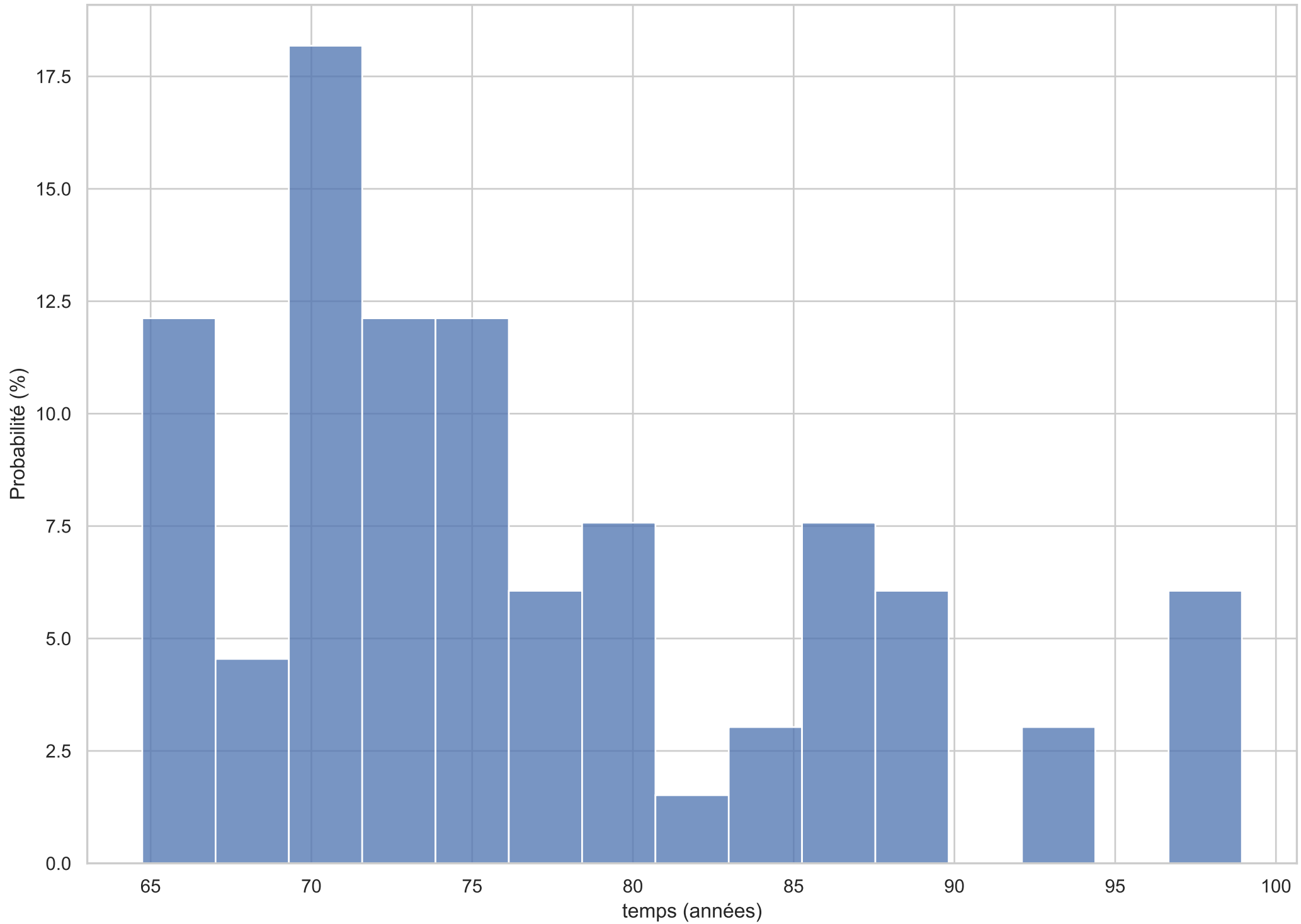


Figure SA-14
Scénario SA - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Scénario SA - Schéma Arrêt

Figure SA-15
Scénario SA - Variation des gradients verticaux en fonction du temps après arrêt du pompage

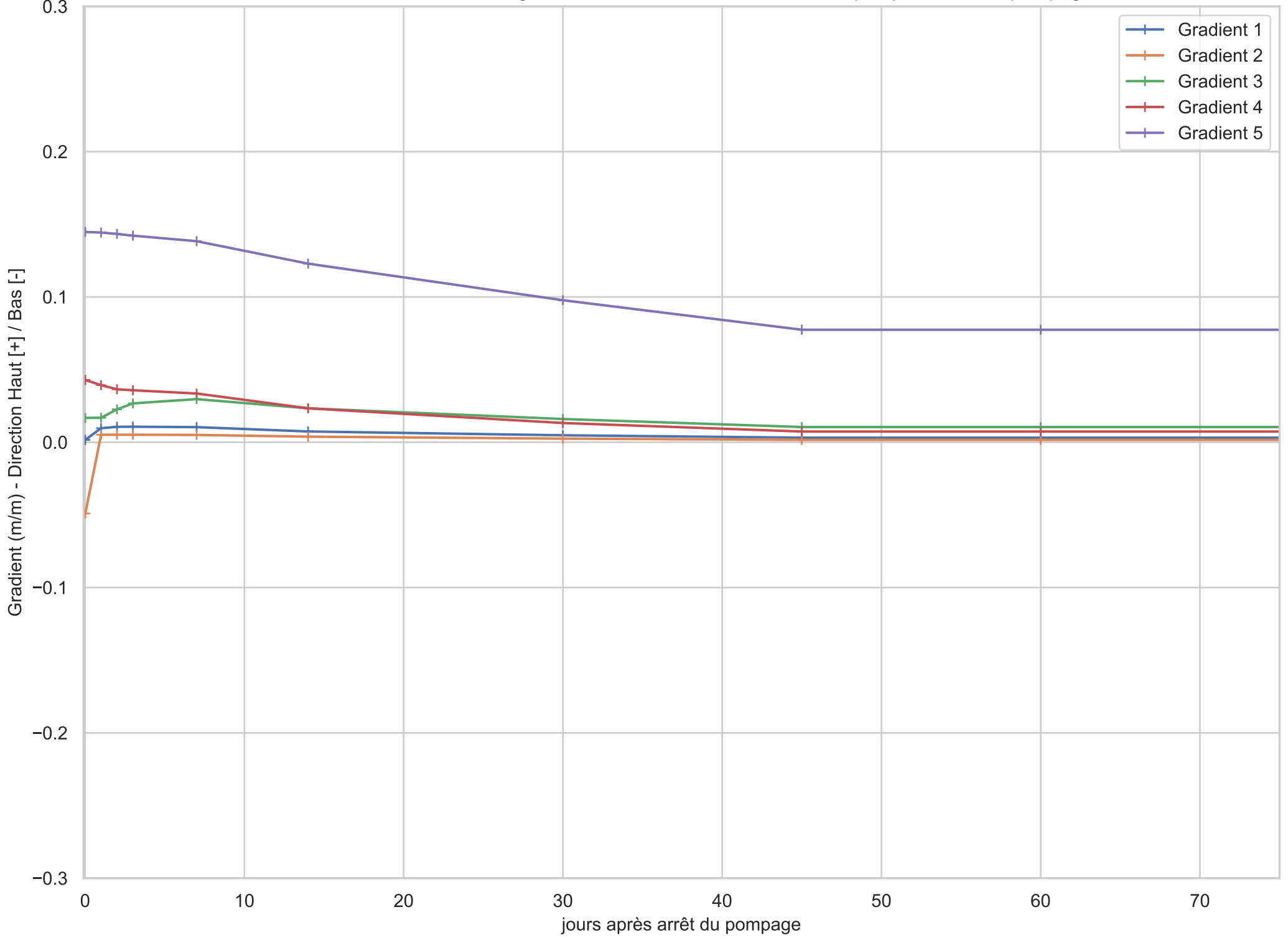


Figure SA-16(1)

Scénario SA - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

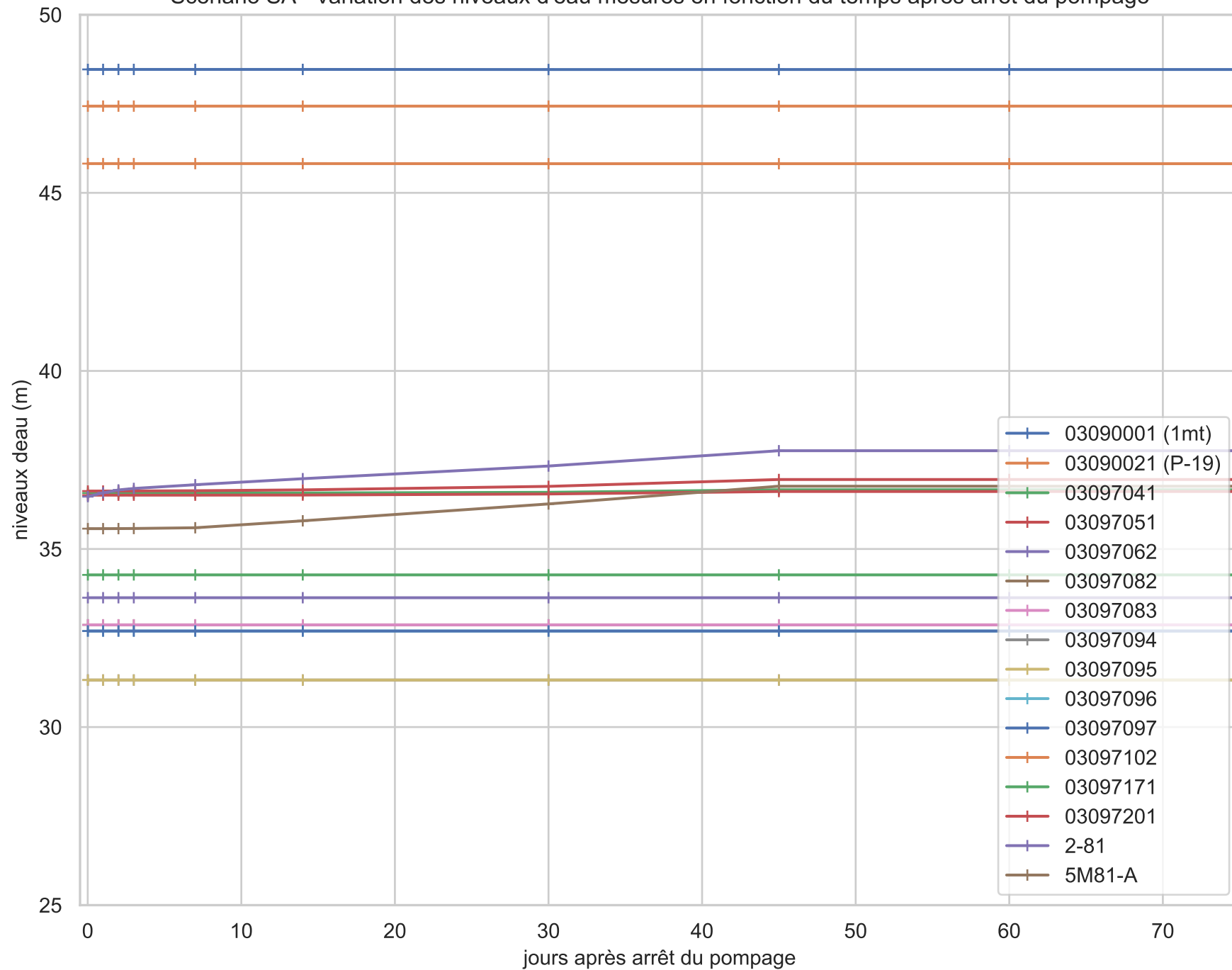


Figure SA-16(3)

Scénario SA - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

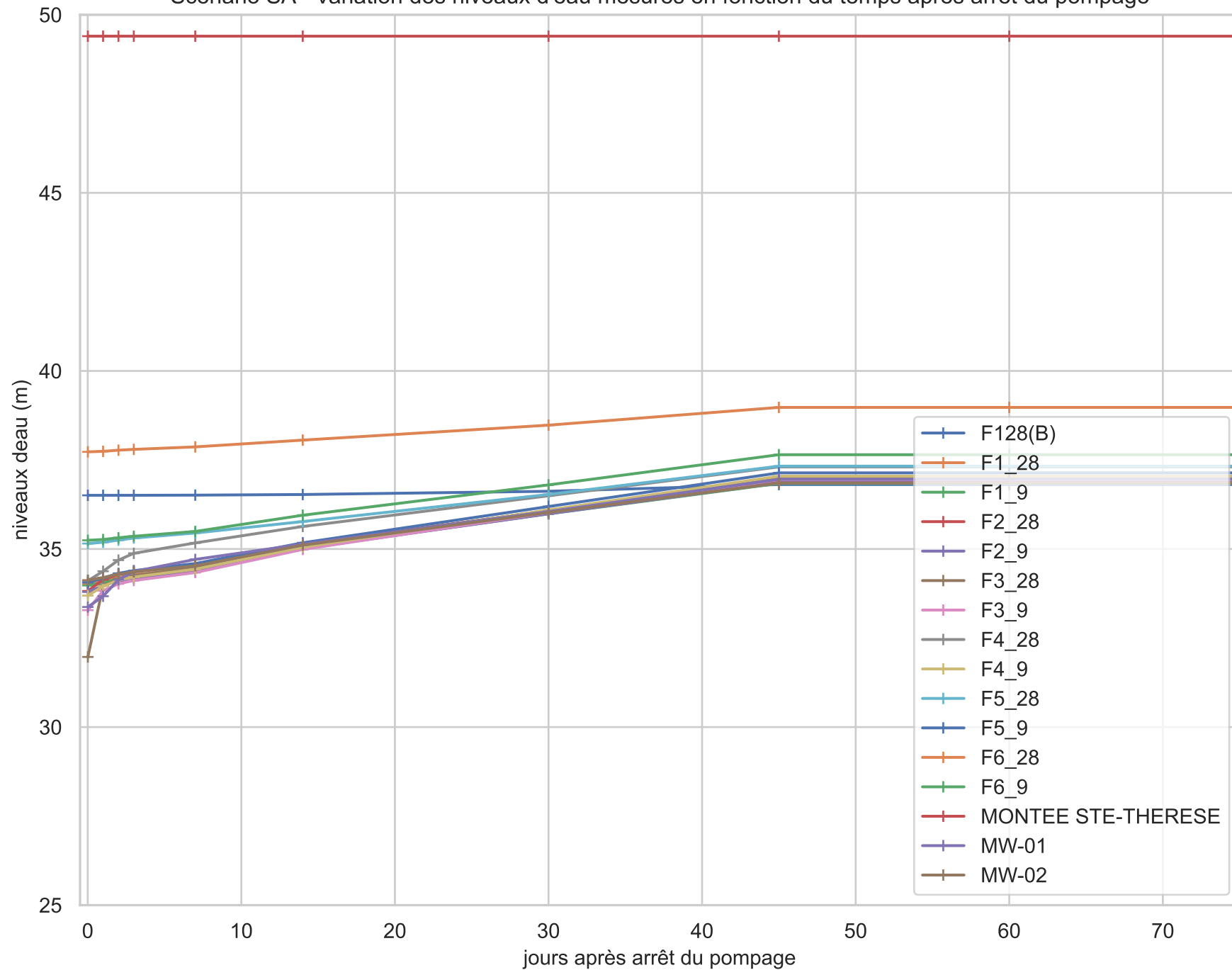


Figure SA-16(4)

Scénario SA - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

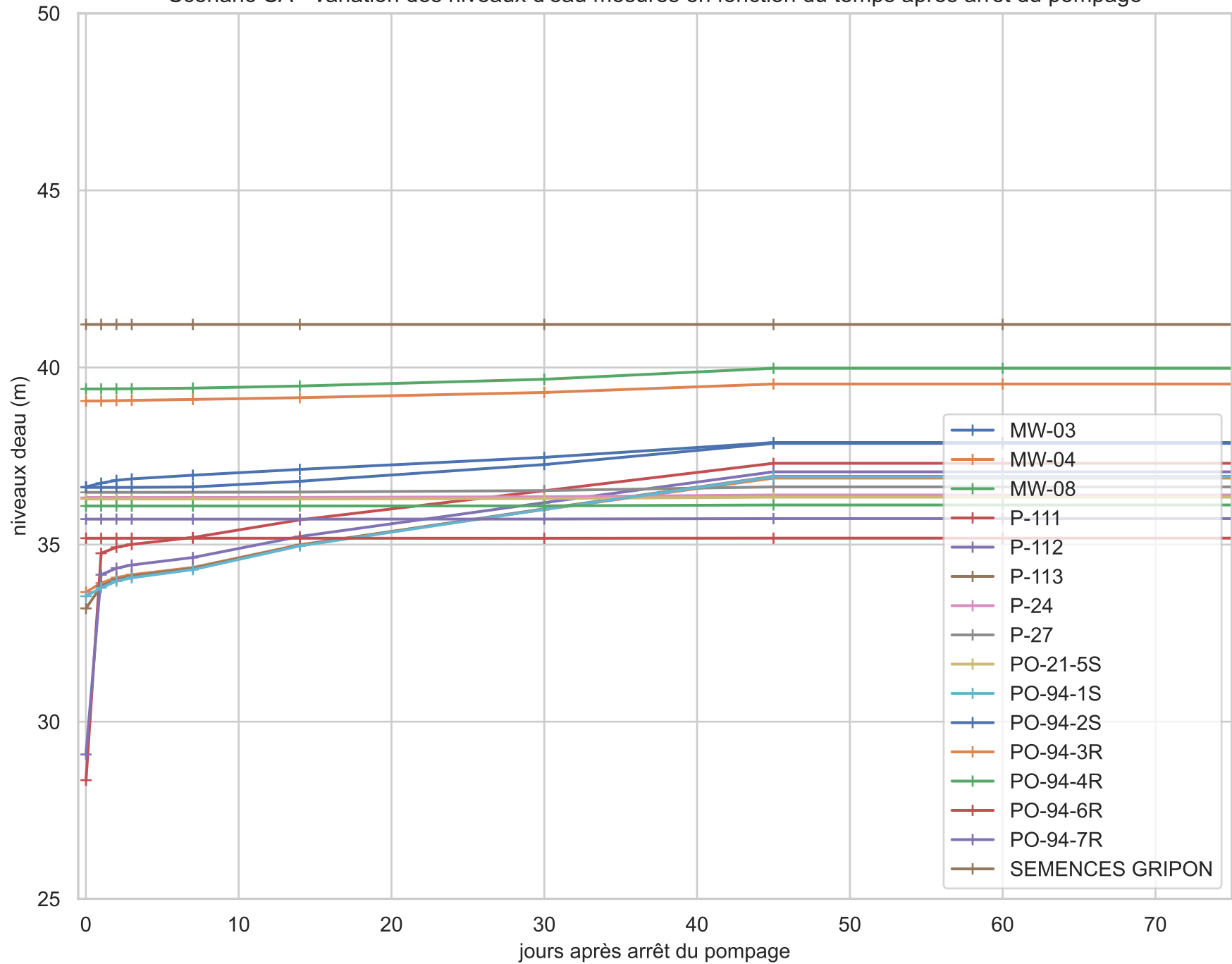


Figure SA-17
Scenario SA - Migration de la zone contaminée de l'esker après arrêt du pompage



Scénario SA - Schéma Nord

Figure SA-18
Scénario SA - Variation des gradients verticaux en fonction de la réalisation

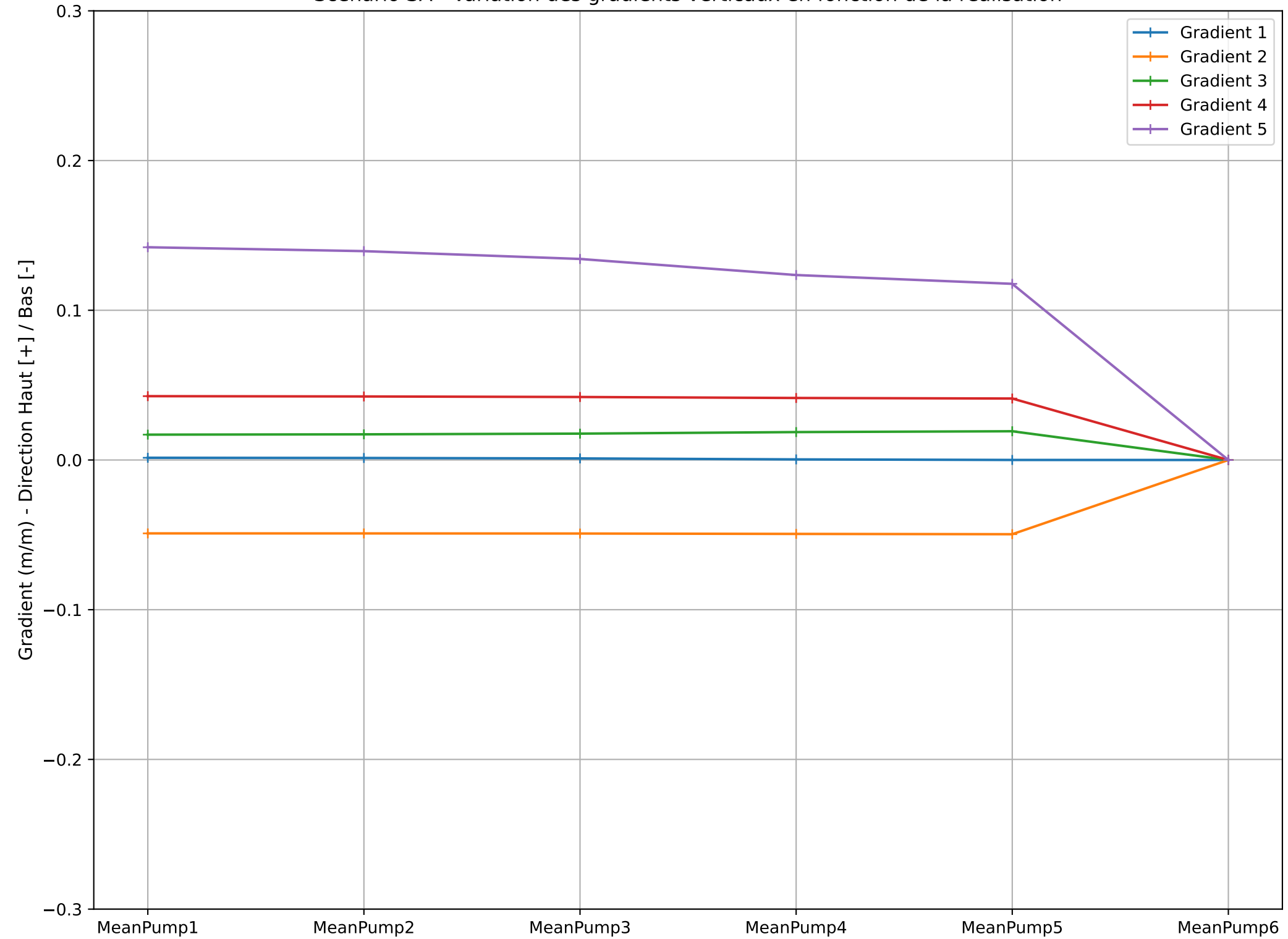


Figure SA-19(1)
 Scénario SA - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

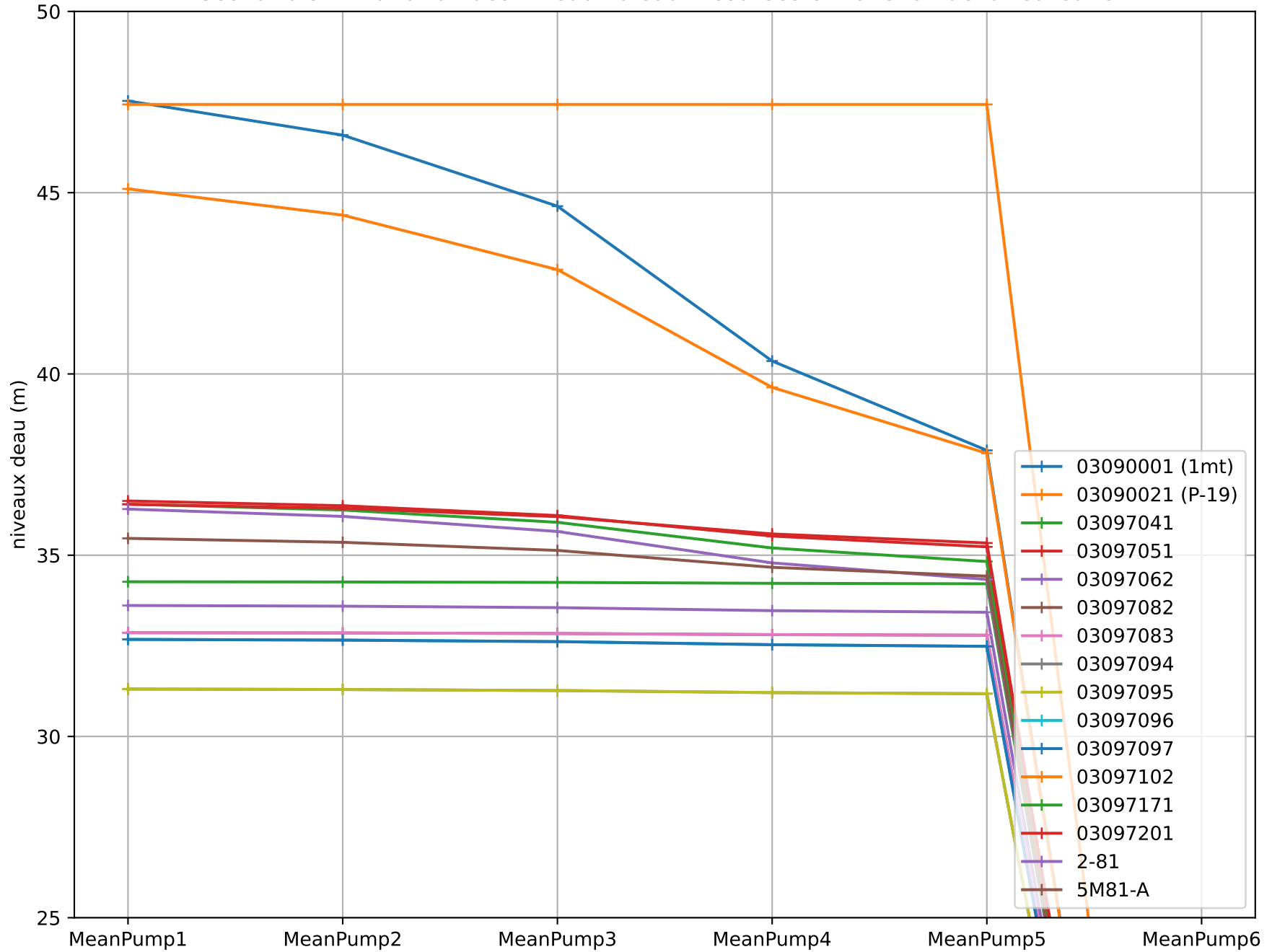


Figure SA-20
Scénario SA - Traçage de particules dans l'esker à partir des puits Nord sur 25 ans

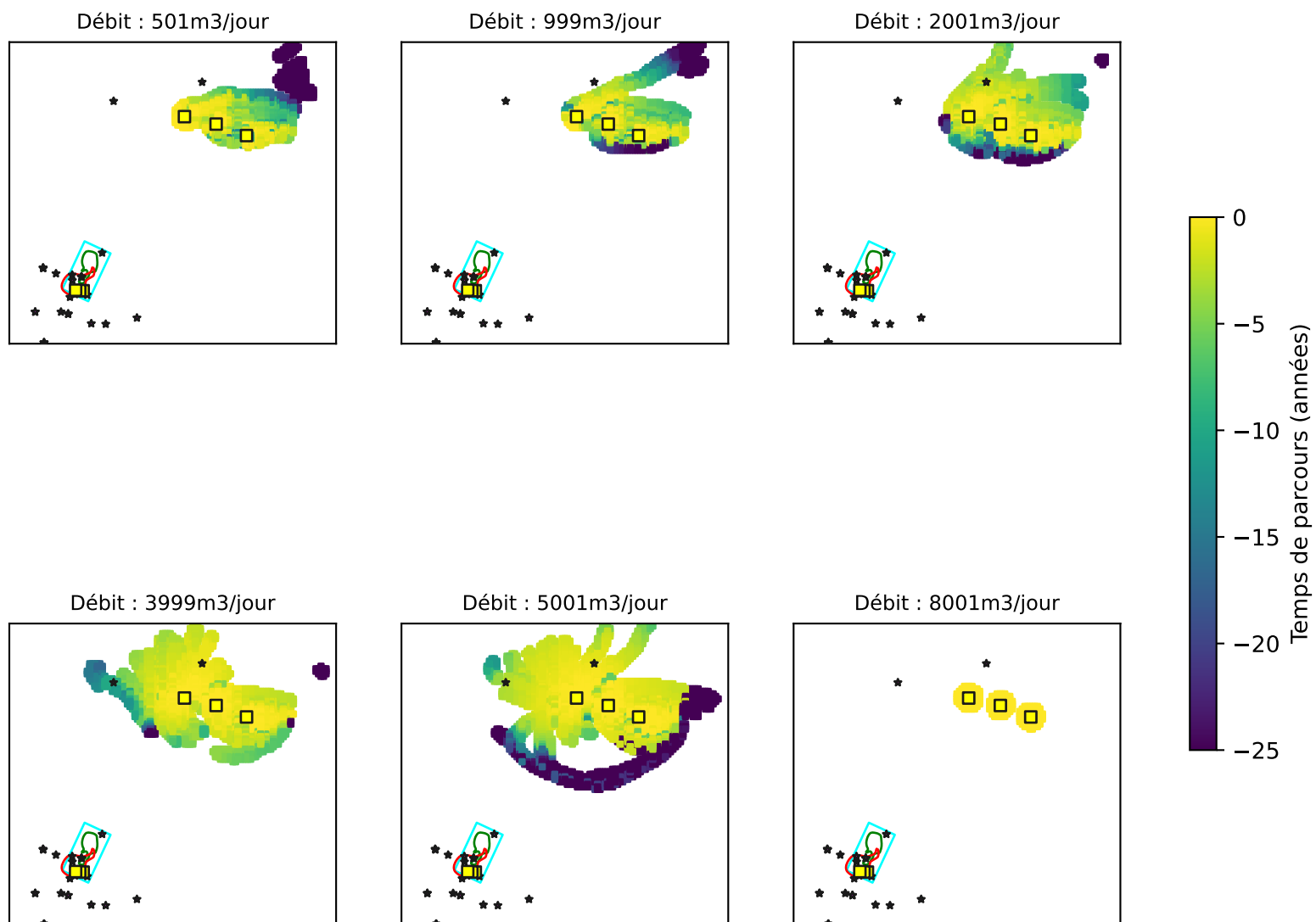


Figure SA-21
Scénario SA - Traçage de particules au roc à partir des puits au Nord sur 25 ans

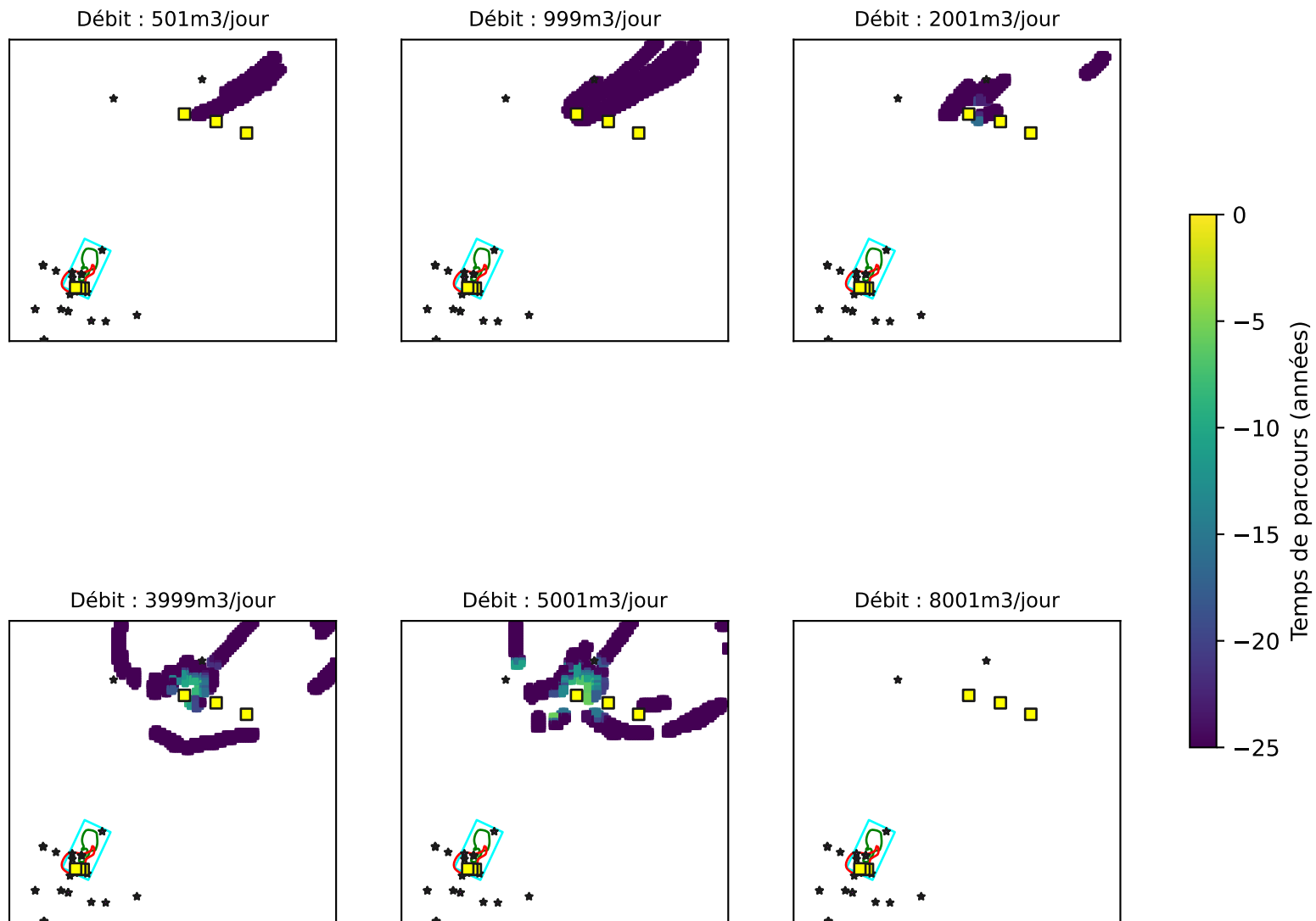
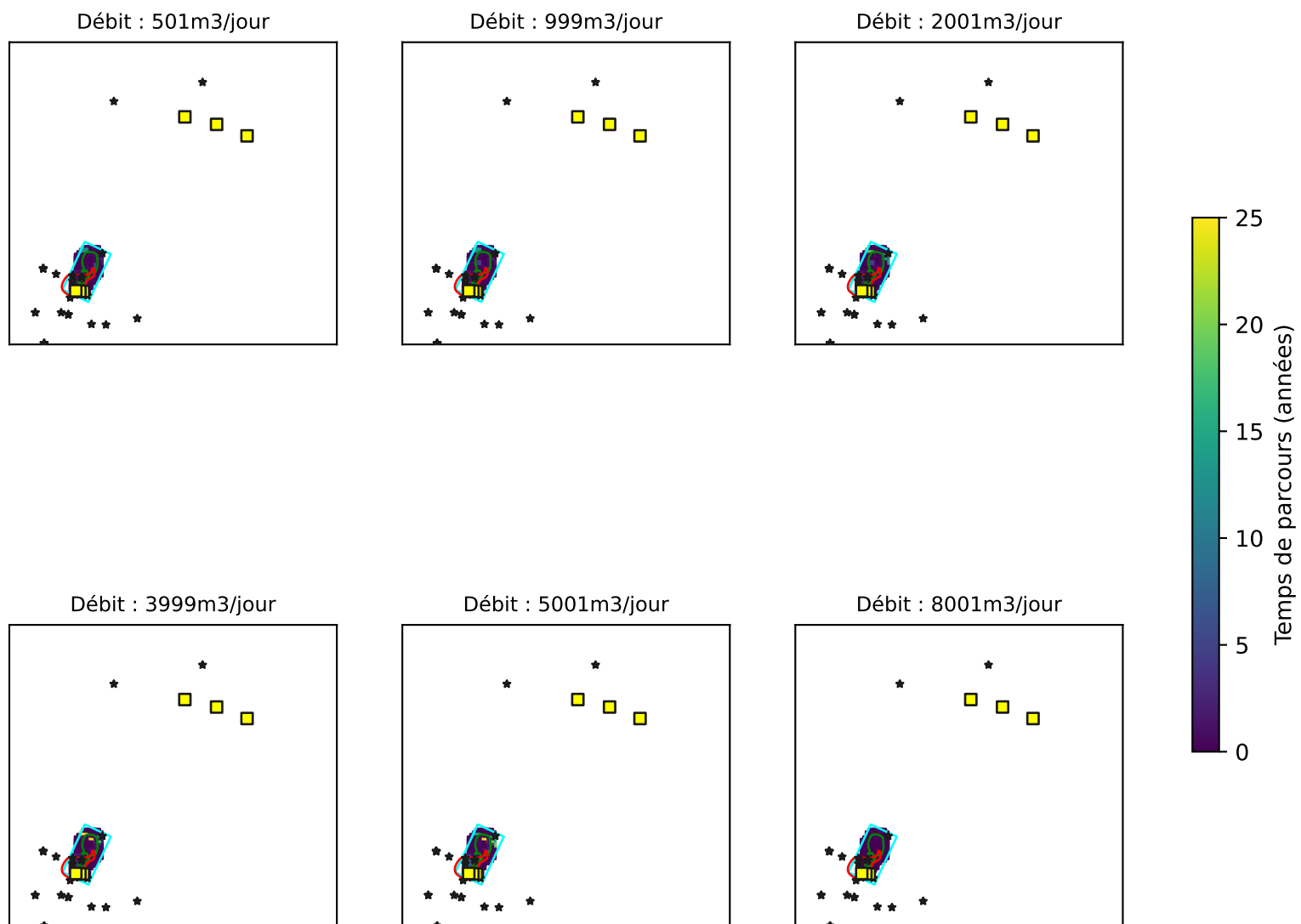


Figure SA-22
Scénario SA - Traçage de particules à partir de la zone source de l'esker sur 25 ans



Scénario SA_S3R3 - Schéma Climat

Figure SA-23
Scénario SA_S3R3 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

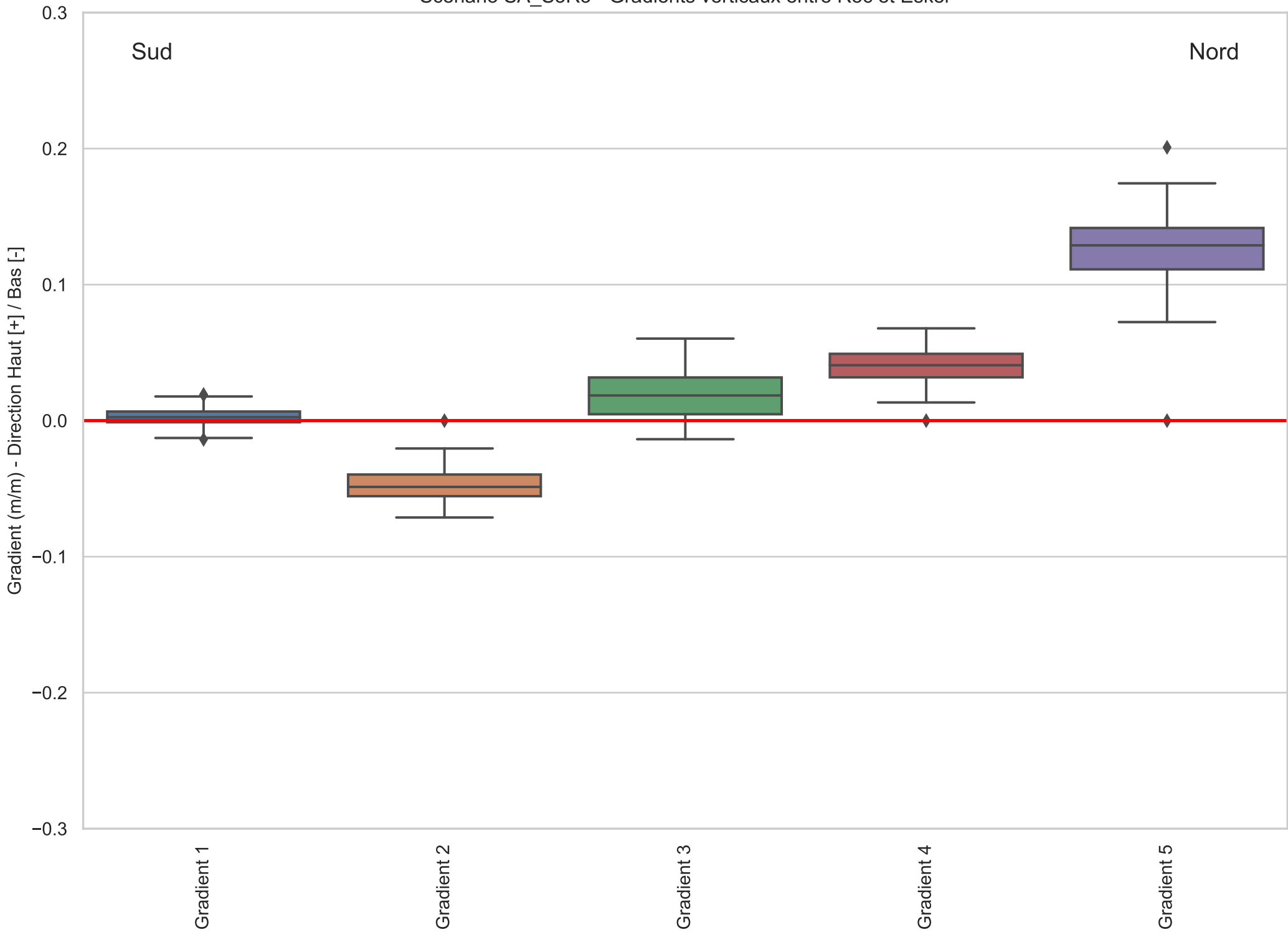


Figure SA-24

Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

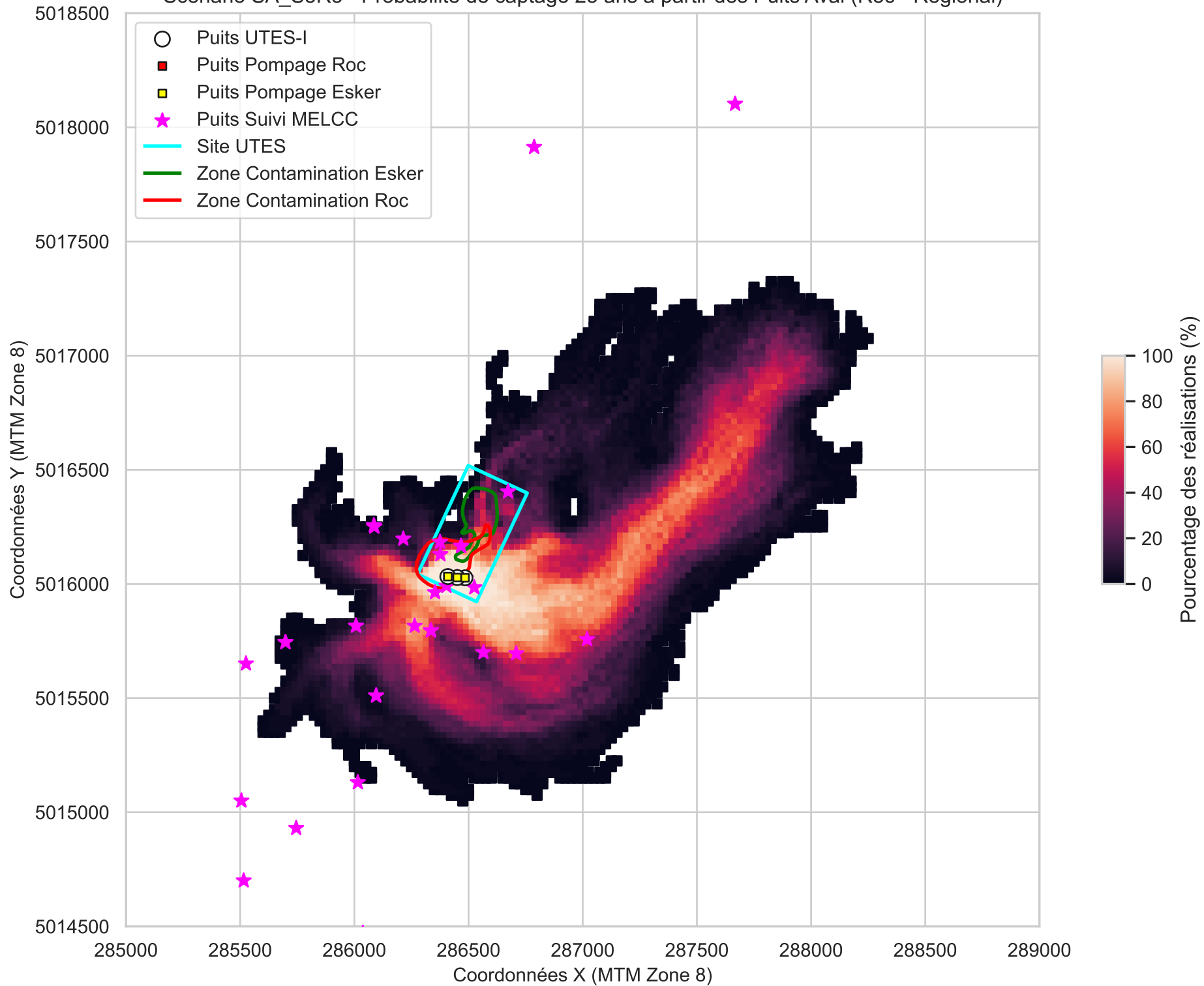


Figure SA-25

Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

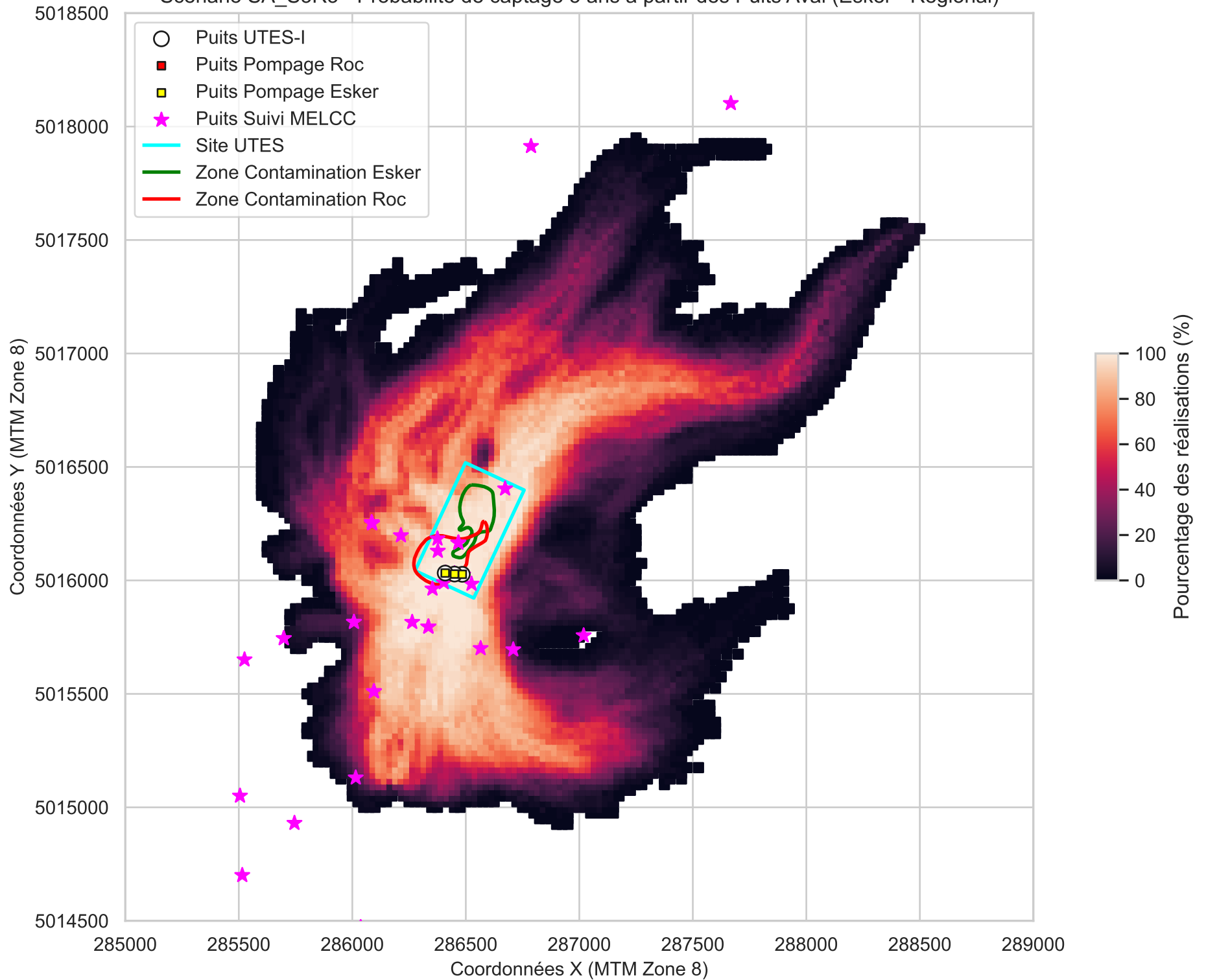


Figure SA-26

Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

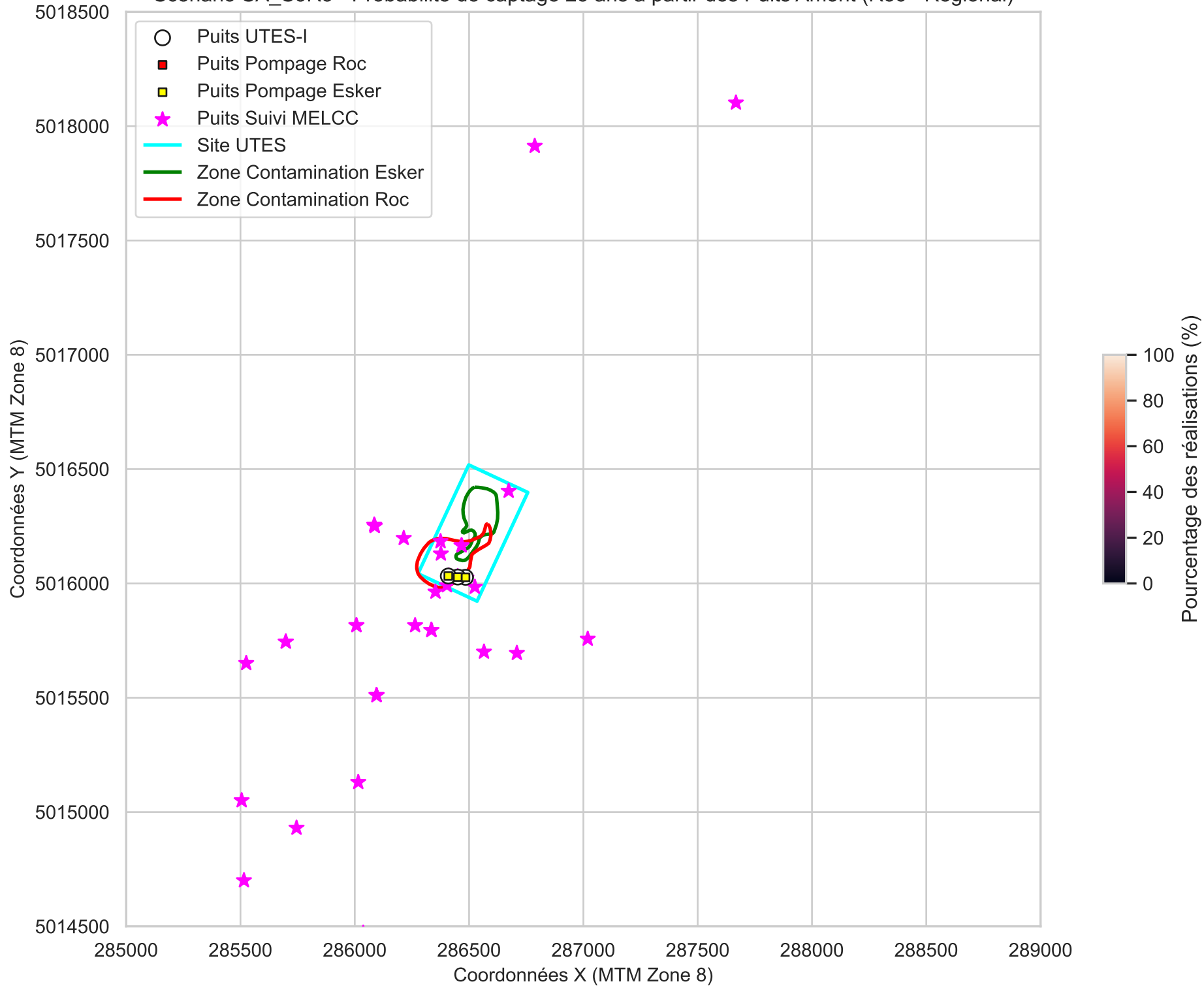


Figure SA-27

Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

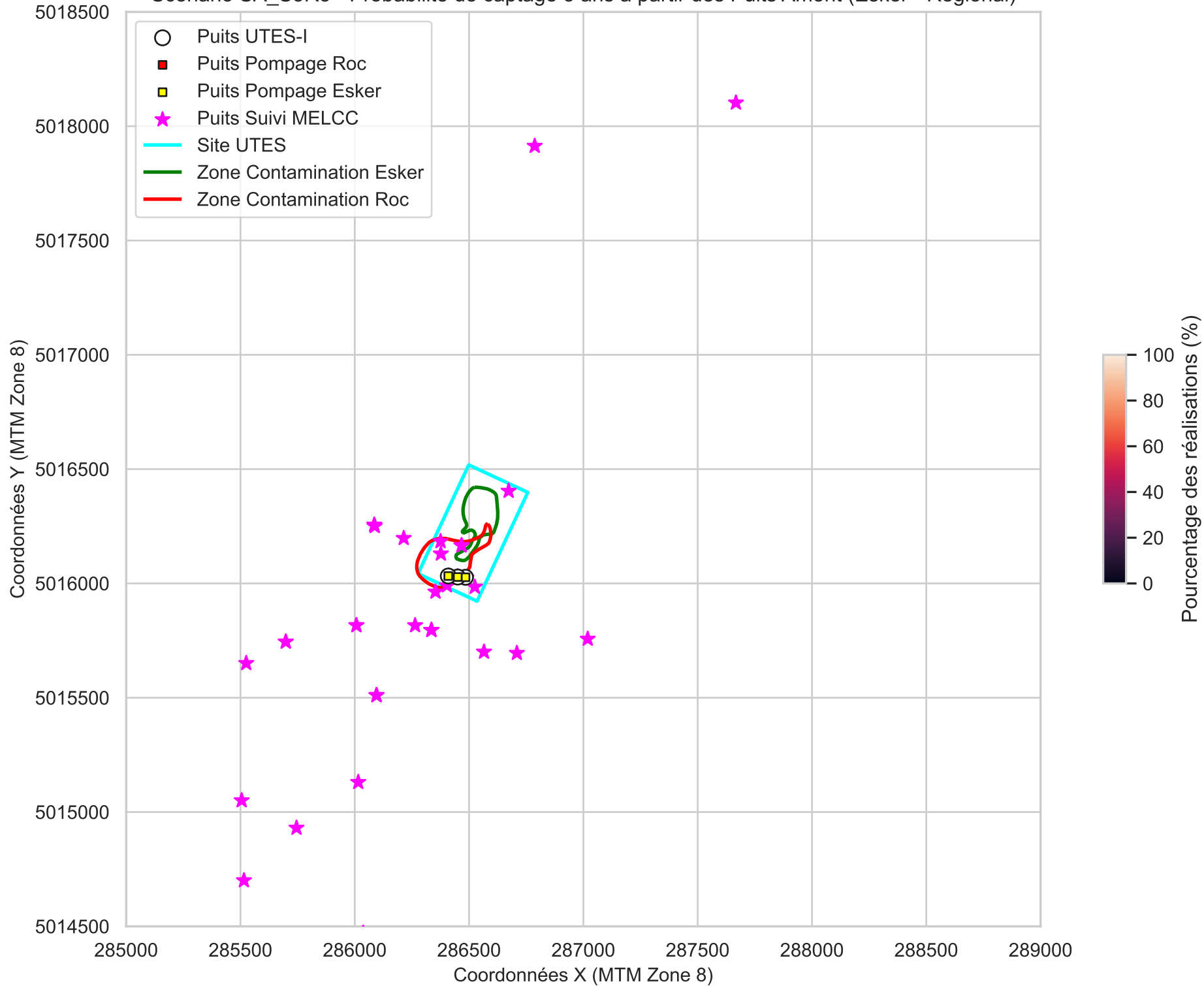


Figure SA-28

Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

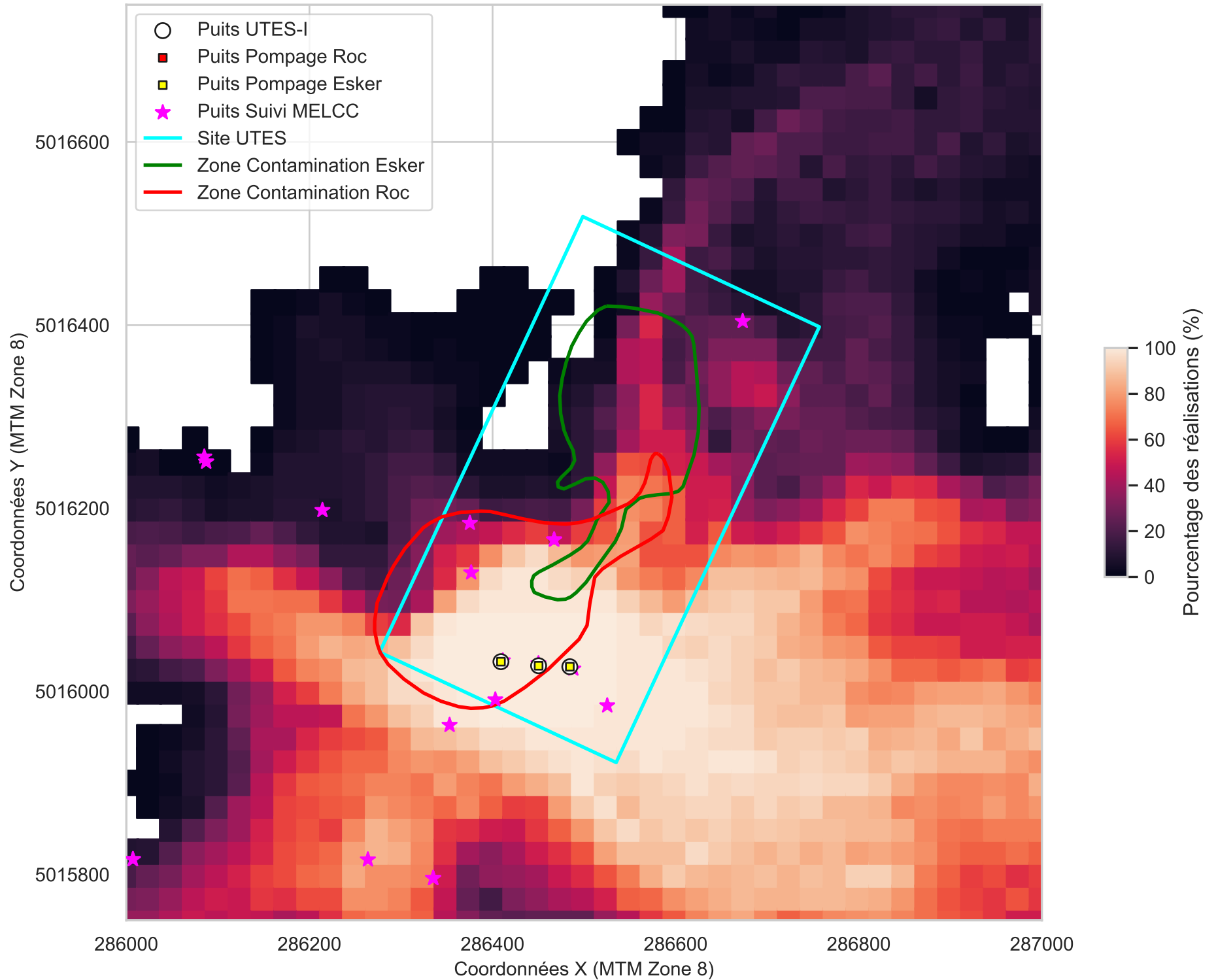


Figure SA-29
Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

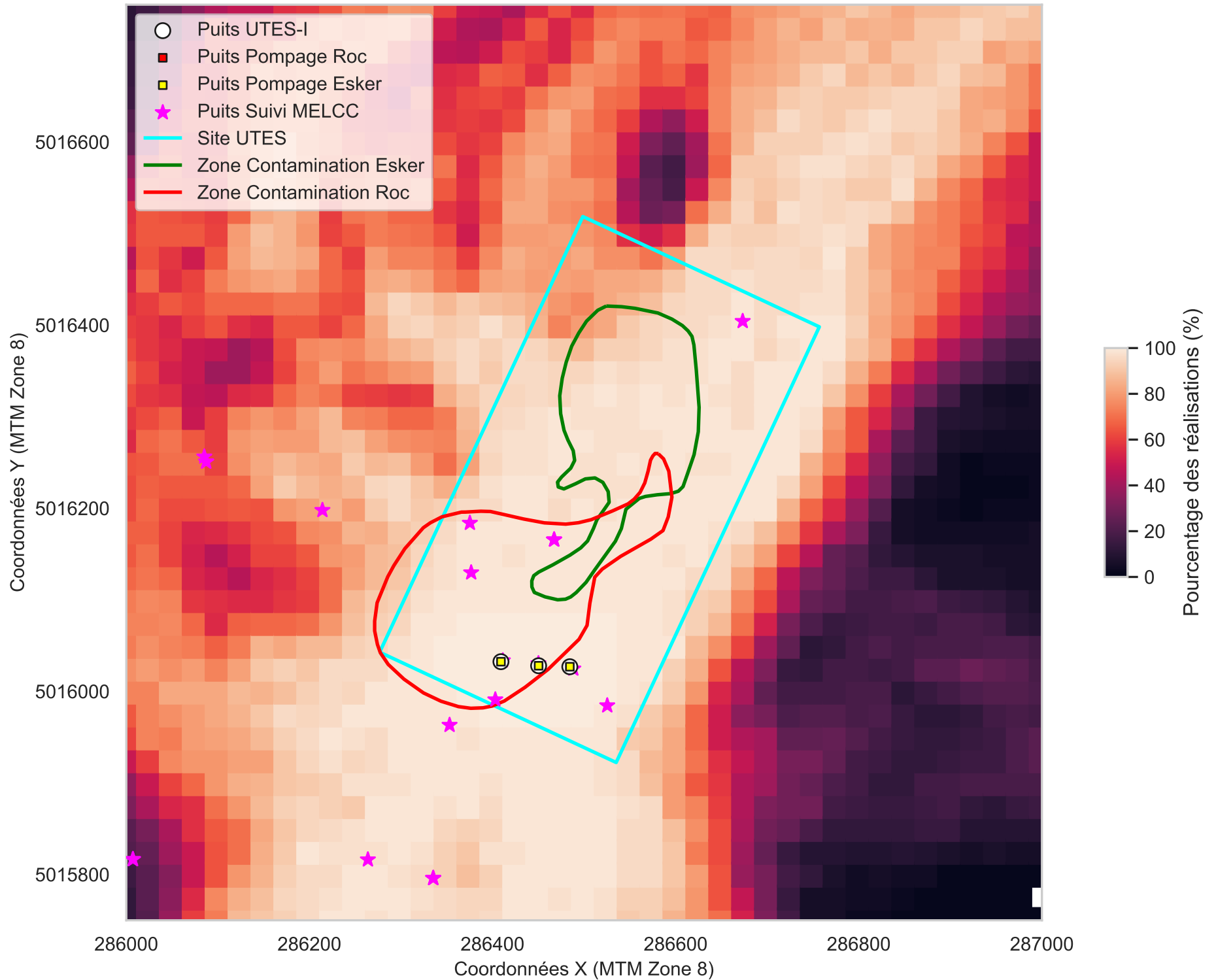


Figure SA-30
Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

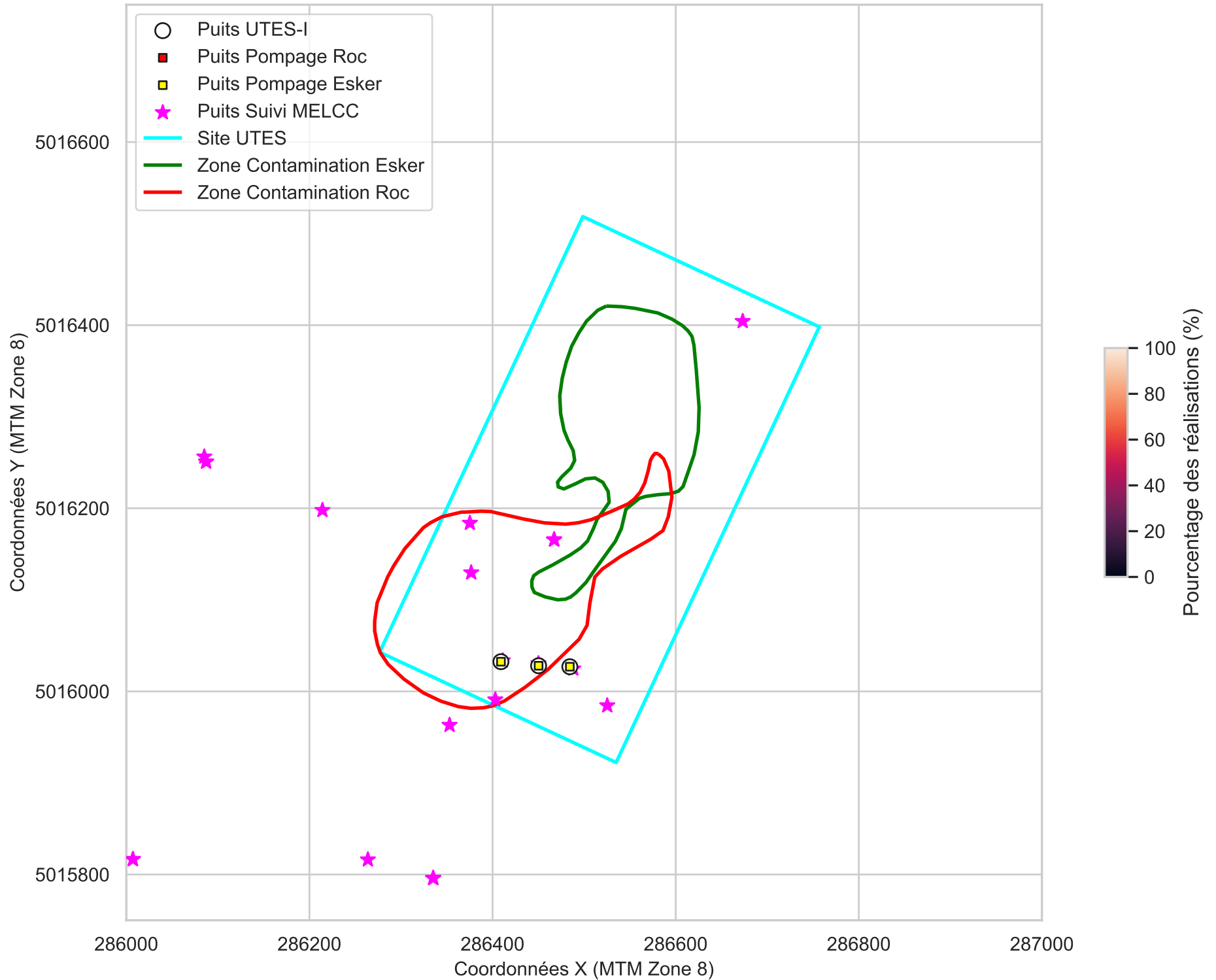


Figure SA-31

Scénario SA_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

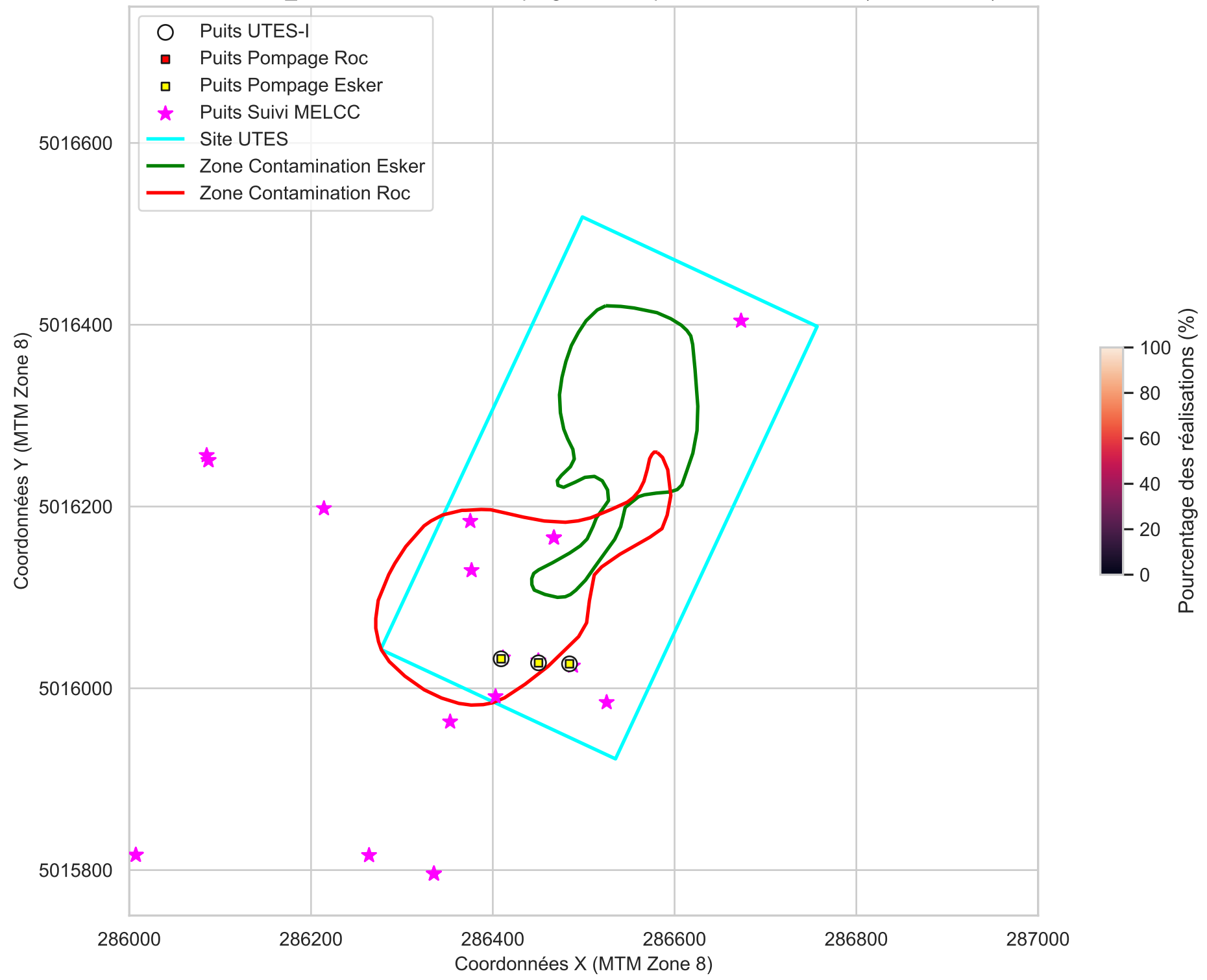


Figure SA-32
Scénario SA_S3R3 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

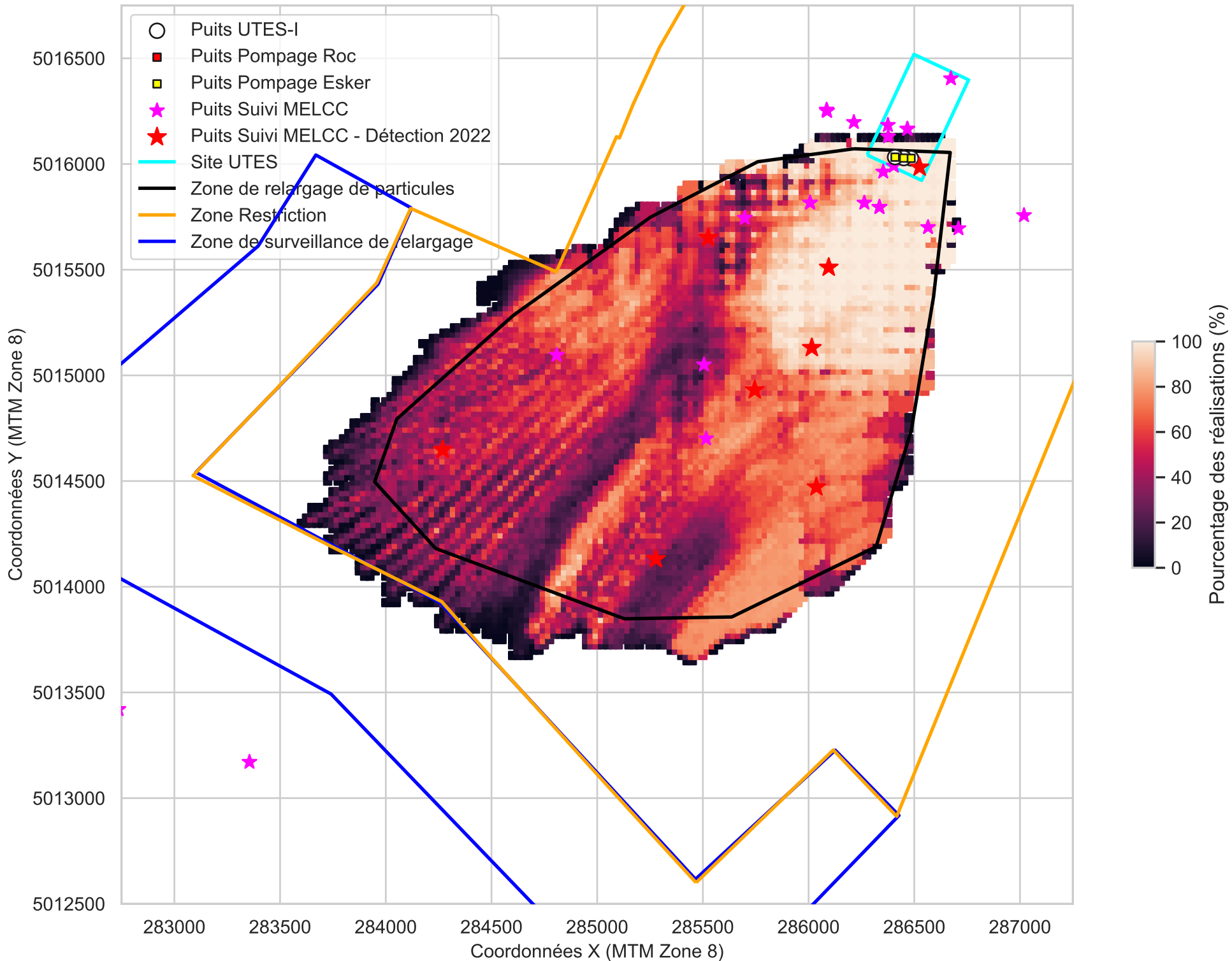
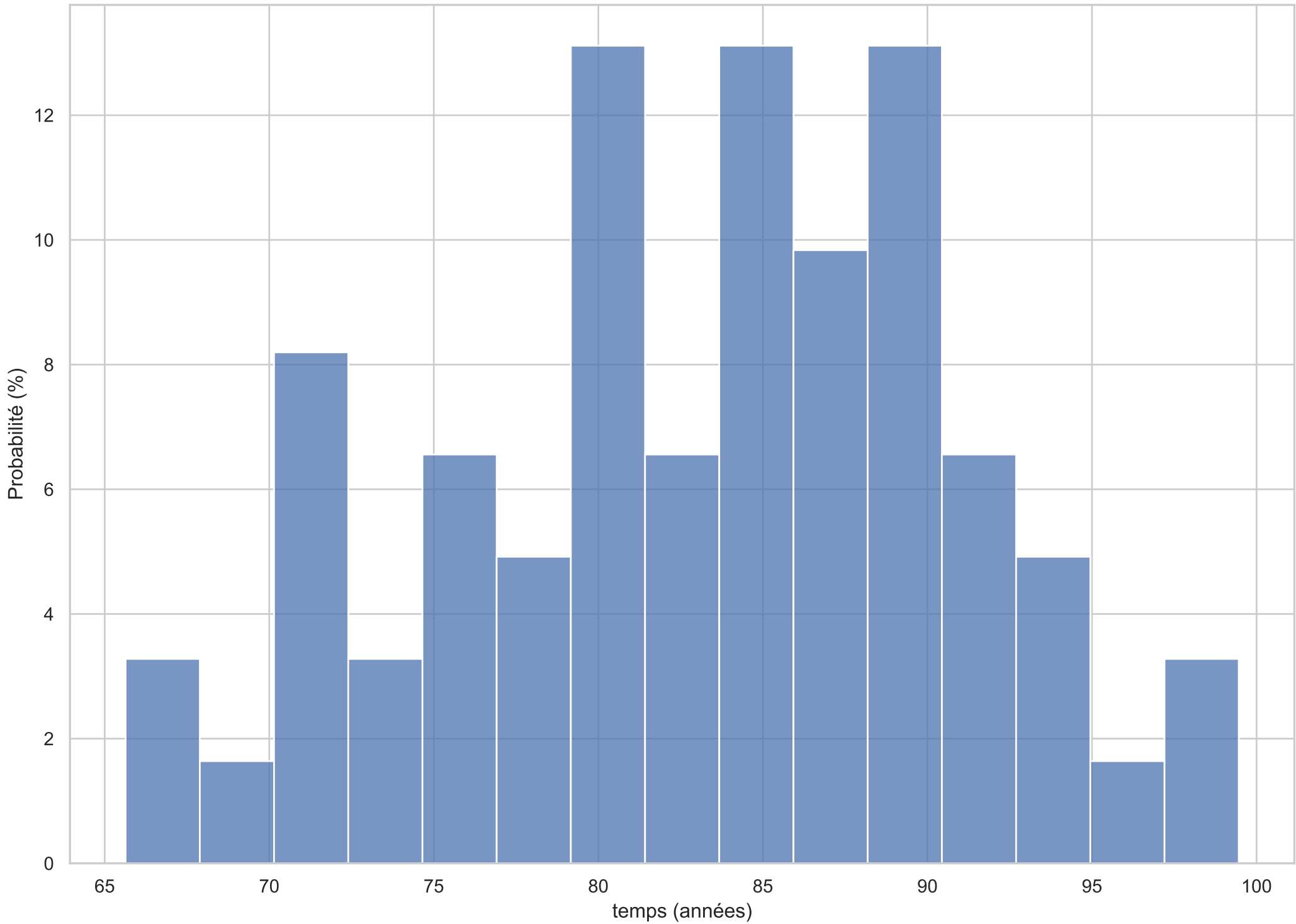


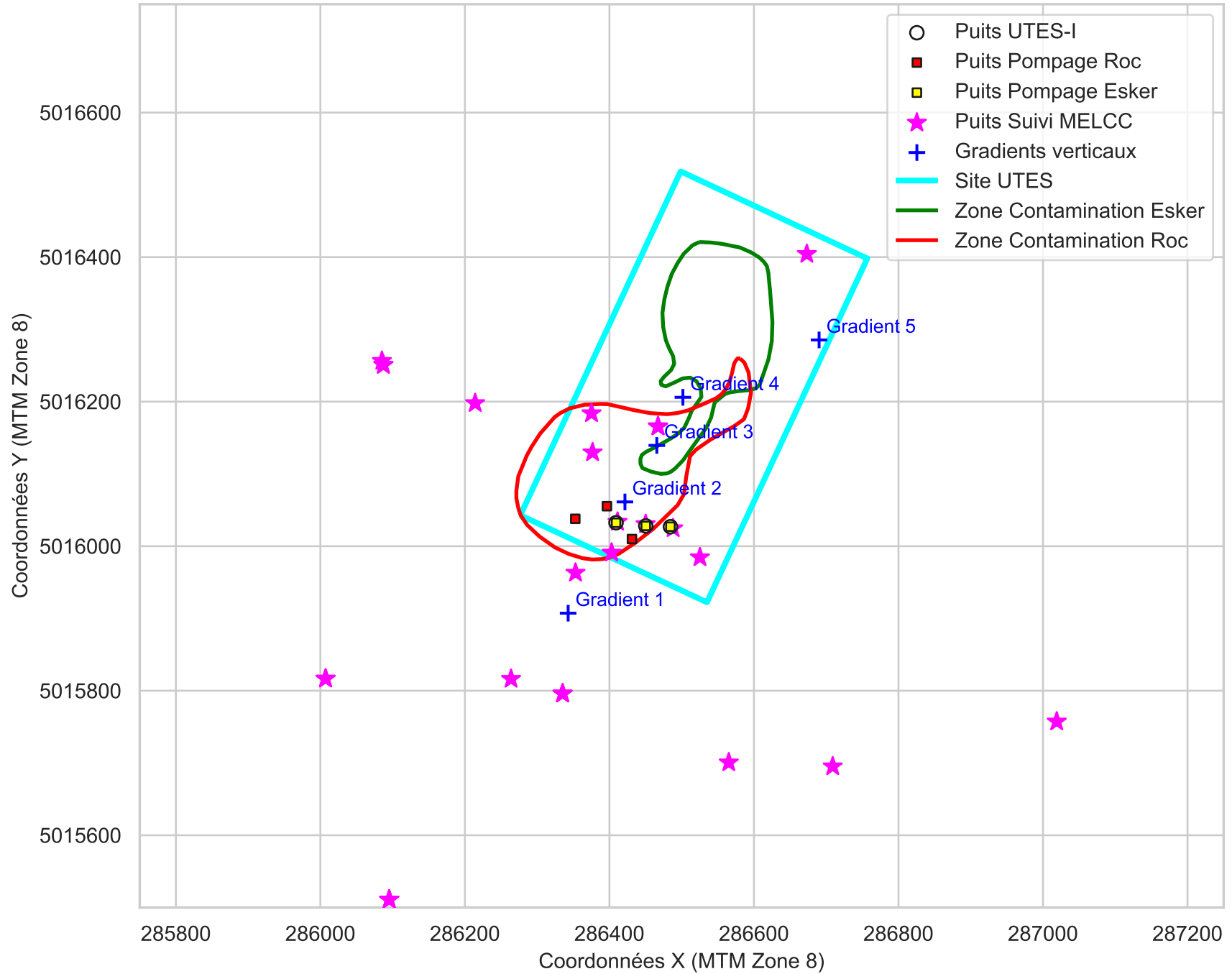
Figure SA-33
Scénario SA_S3R3 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Figures en support de l'évaluation des critères de décision

Scénario A

Figure A-1
Scénario A



Scénario A - Schéma Kxy moyen

	PW111	PW112	PW113	A1	A2	A3
ID	1	2	3	4	5	6
X	286484.0	286450.0	286409.0	286396.0	286431.0	286352.0
Y	5016026.0	5016028.0	5016032.0	5016055.0	5016009.0	5016037.0
Z	44.52	44.529999	43.330002	42.98999	42.71455	41.913765
NAME	PW111	PW112	PW113	A1	A2	A3
UNIT	Esker	Esker	Esker	Roc	Roc	Roc
SCREENTOP	20.92	21.03	20.83	12.10954	13.315337	12.243443
SCREENBOT	16.6	16.0	17.0	2.10954	3.315337	2.243443
CAPACITY INPUT	500	500	500	100	100	100
PT_DESC	PompageAval	PompageAval	PompageAval	PompageAval	PompageAval	PompageAval
Pump1	100	100	100	50	50	50
Pump2	100	100	100	100	100	100
Pump3	100	100	100	250	250	250
Pump4	100	100	100	500	500	500
Pump5	100	100	100	1000	1000	1000
Pump6	250	250	250	50	50	50
Pump7	250	250	250	100	100	100
Pump8	250	250	250	250	250	250
Pump9	250	250	250	500	500	500
Pump10	250	250	250	1000	1000	1000
Pump11	500	500	500	50	50	50
Pump12	500	500	500	100	100	100
Pump13	500	500	500	250	250	250
Pump14	500	500	500	500	500	500
Pump15	500	500	500	1000	1000	1000
Pump16	1000	1000	1000	50	50	50
Pump17	1000	1000	1000	100	100	100
Pump18	1000	1000	1000	250	250	250
Pump19	1000	1000	1000	500	500	500
Pump20	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Pump21	2000	2000	2000	50	50	50
Pump22	2000	2000	2000	100	100	100
Pump23	2000	2000	2000	250	250	250
Pump24	2000	2000	2000	500	500	500
Pump25	2000	2000	2000	1000	1000	1000

Figure A-2
Scénario A - Gradients verticaux en fonction de la réalisation du schéma Kxy moyen

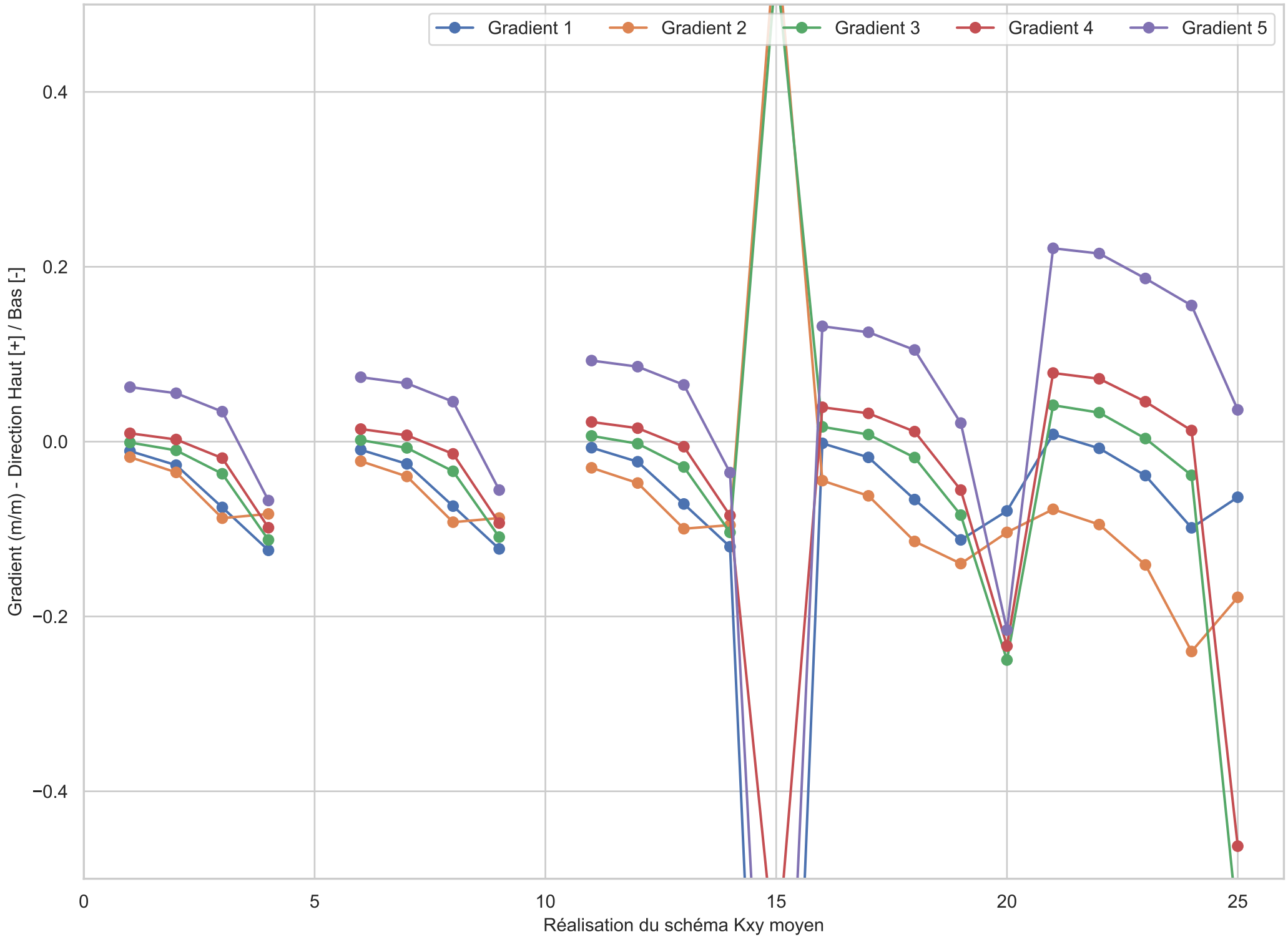
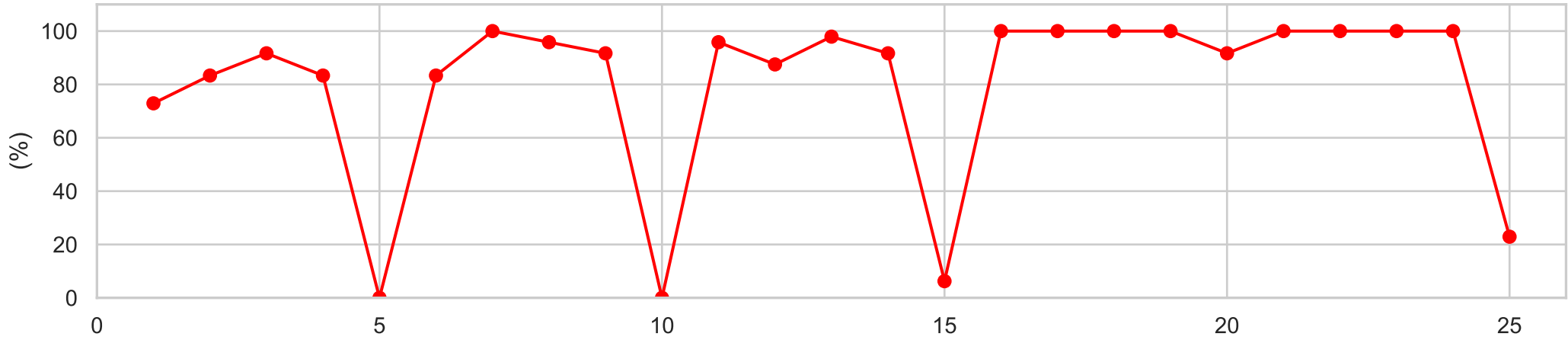
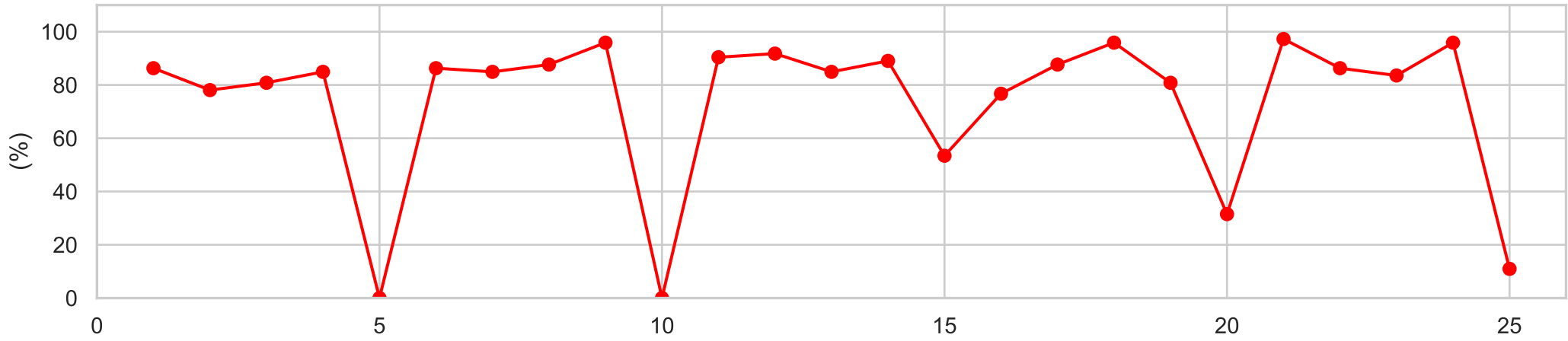


Figure A-3

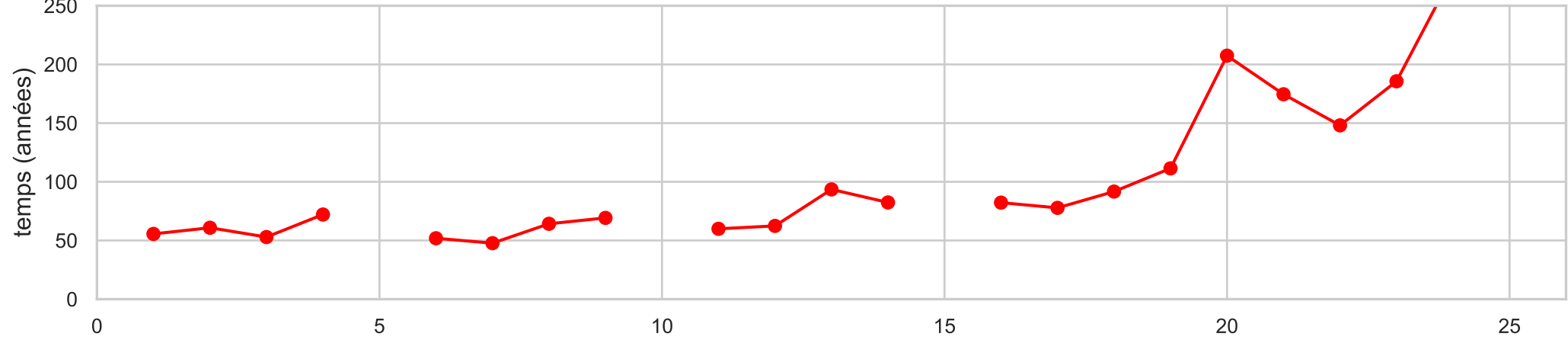
Scénario A - Proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années



Scénario A - Proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 ans



Scénario A - Temps de parcours minimum pour atteindre la zone de restriction



Réalisation du schéma Kxy moyen

Scénario A - Schéma Probabiliste

Figure A-4
Scénario A - Gradients verticaux entre Roc et Esker

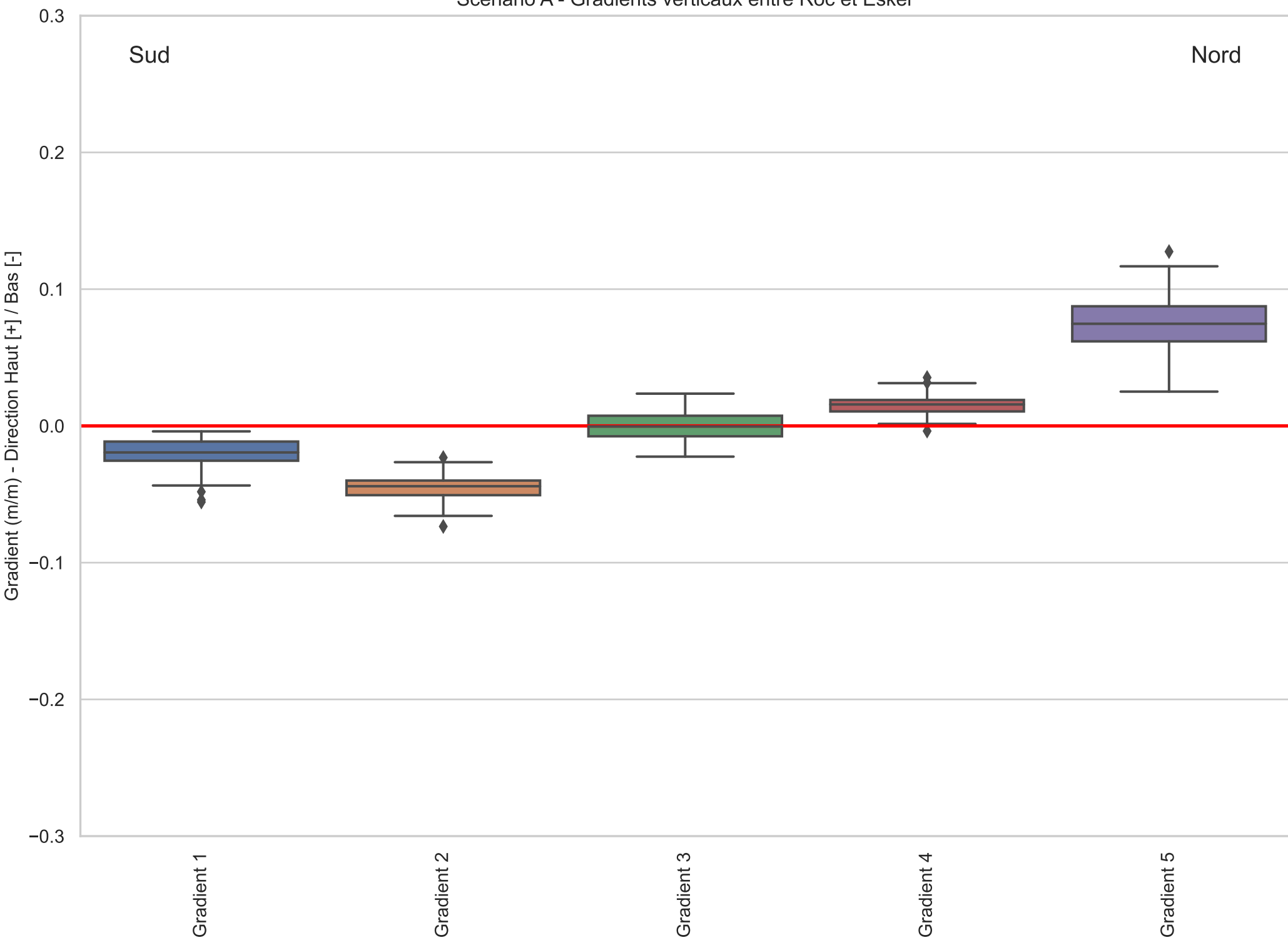


Figure A-5

Scénario A - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

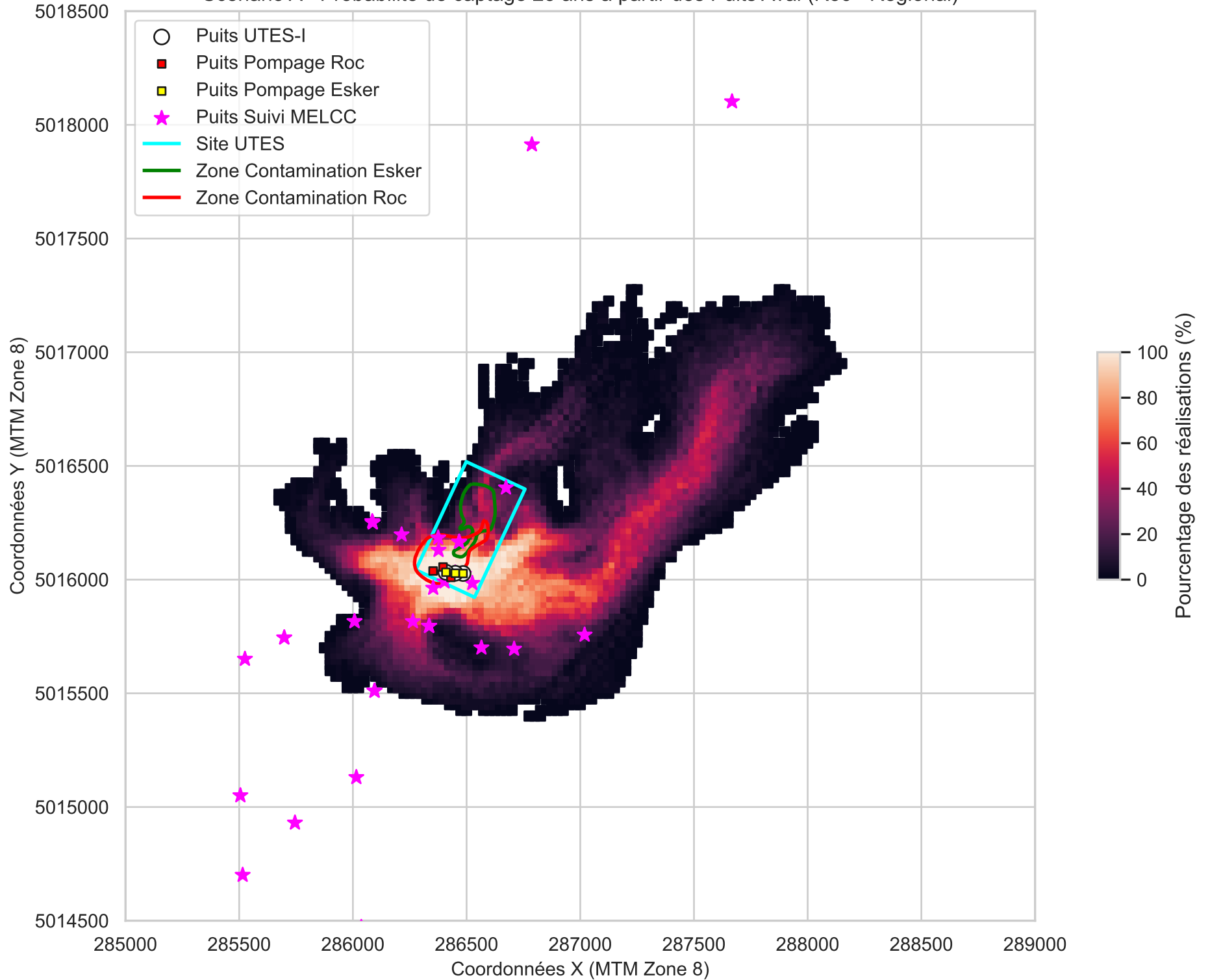


Figure A-6

Scénario A - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

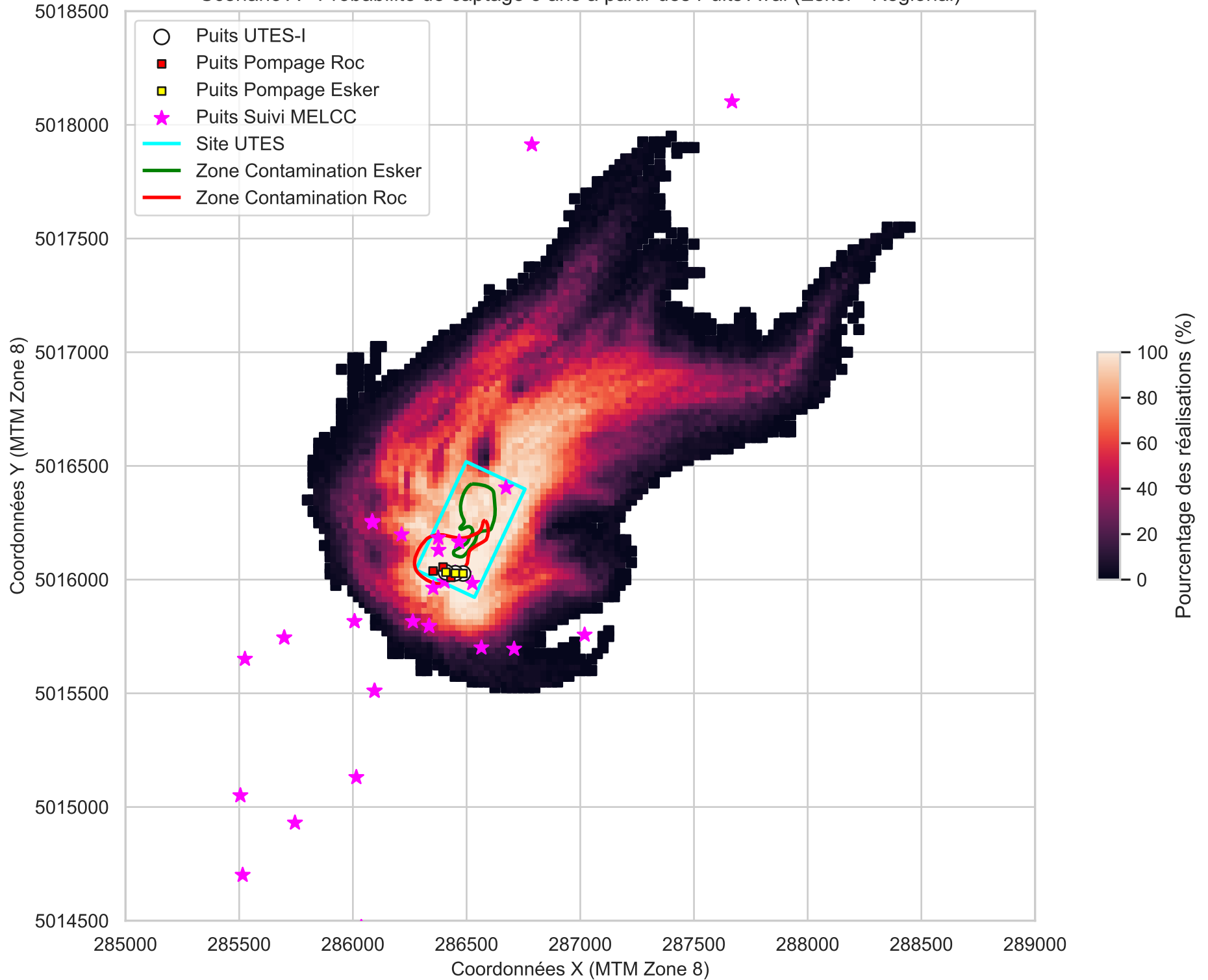


Figure A-7

Scénario A - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

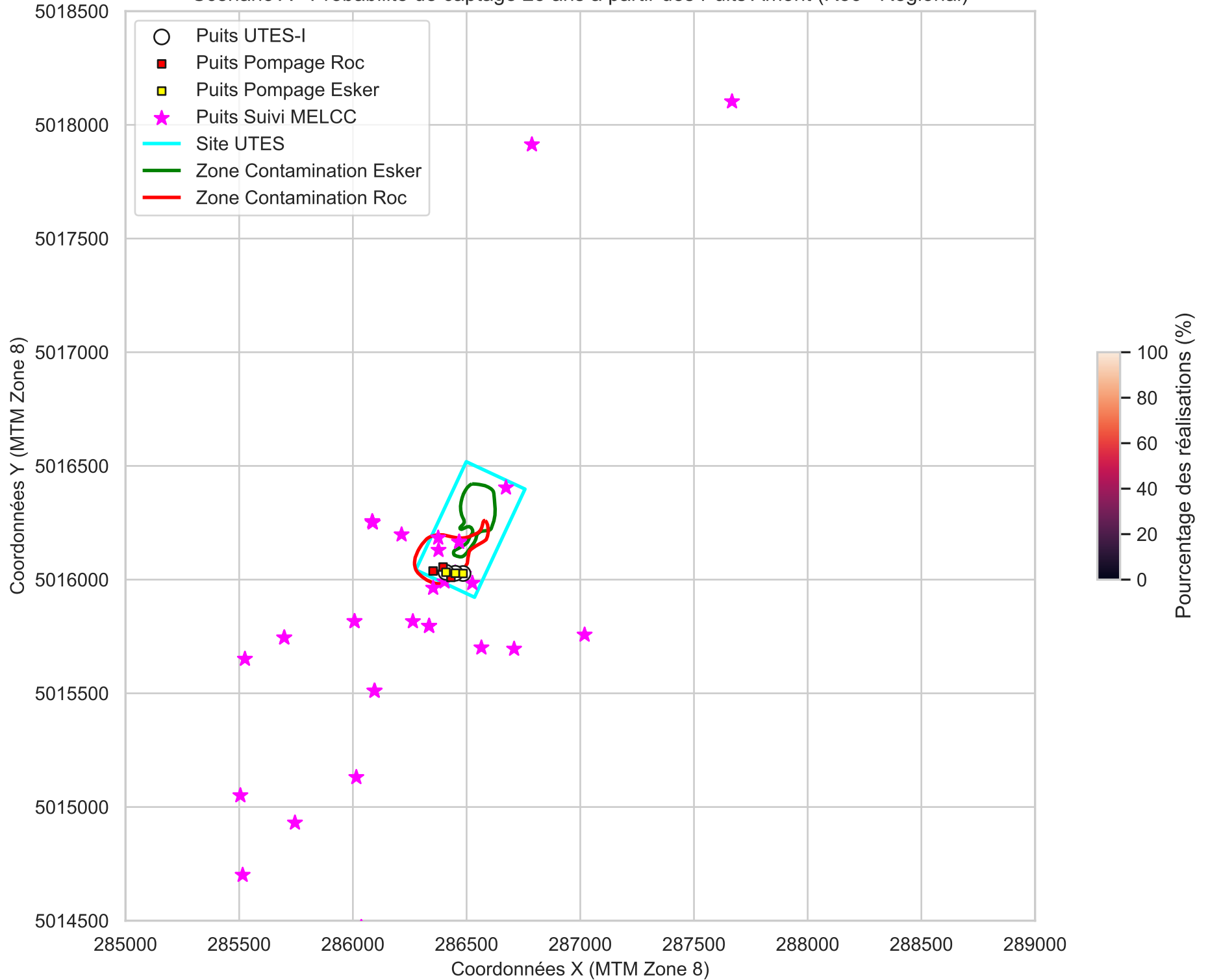


Figure A-8

Scénario A - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

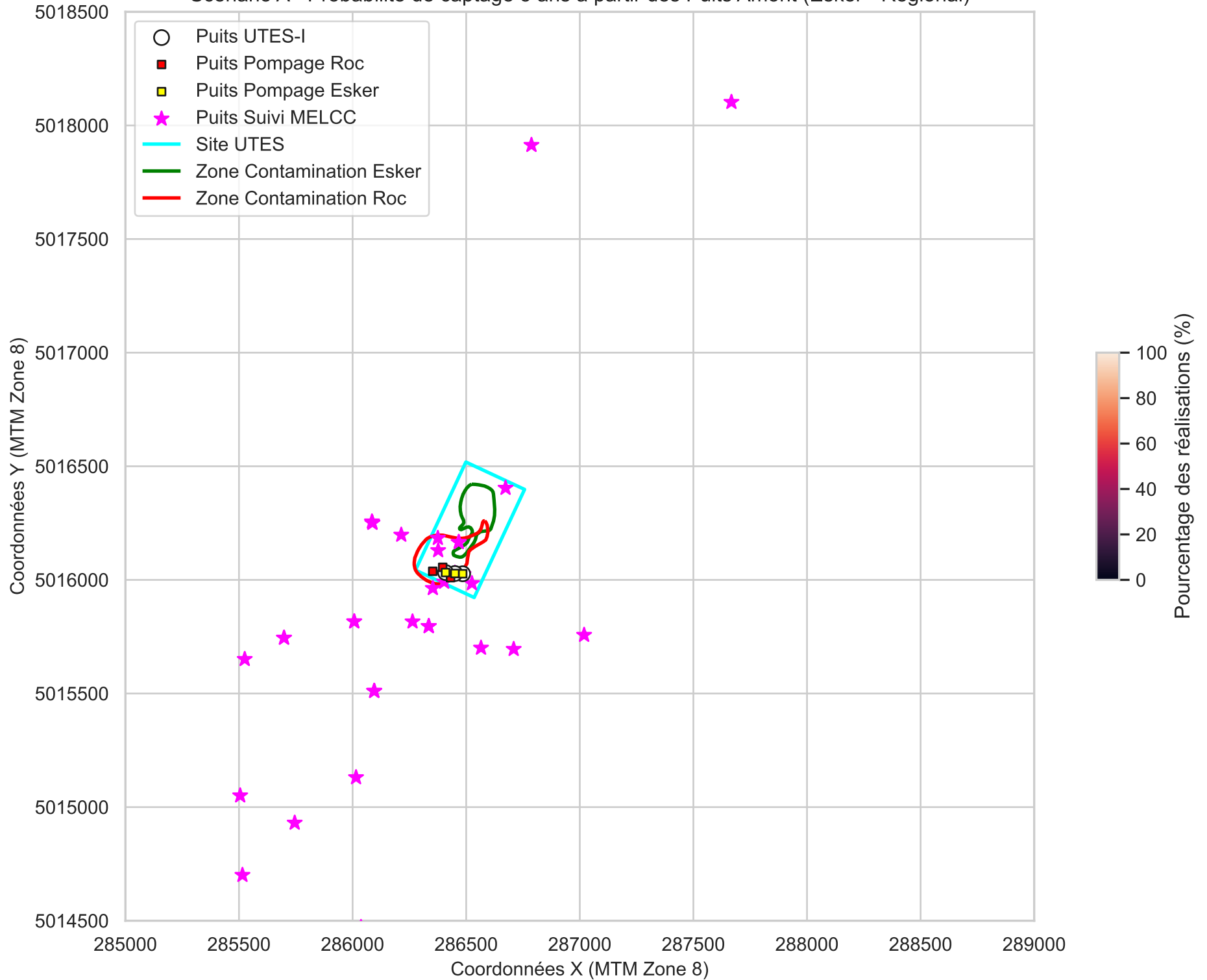


Figure A-9
Scénario A - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

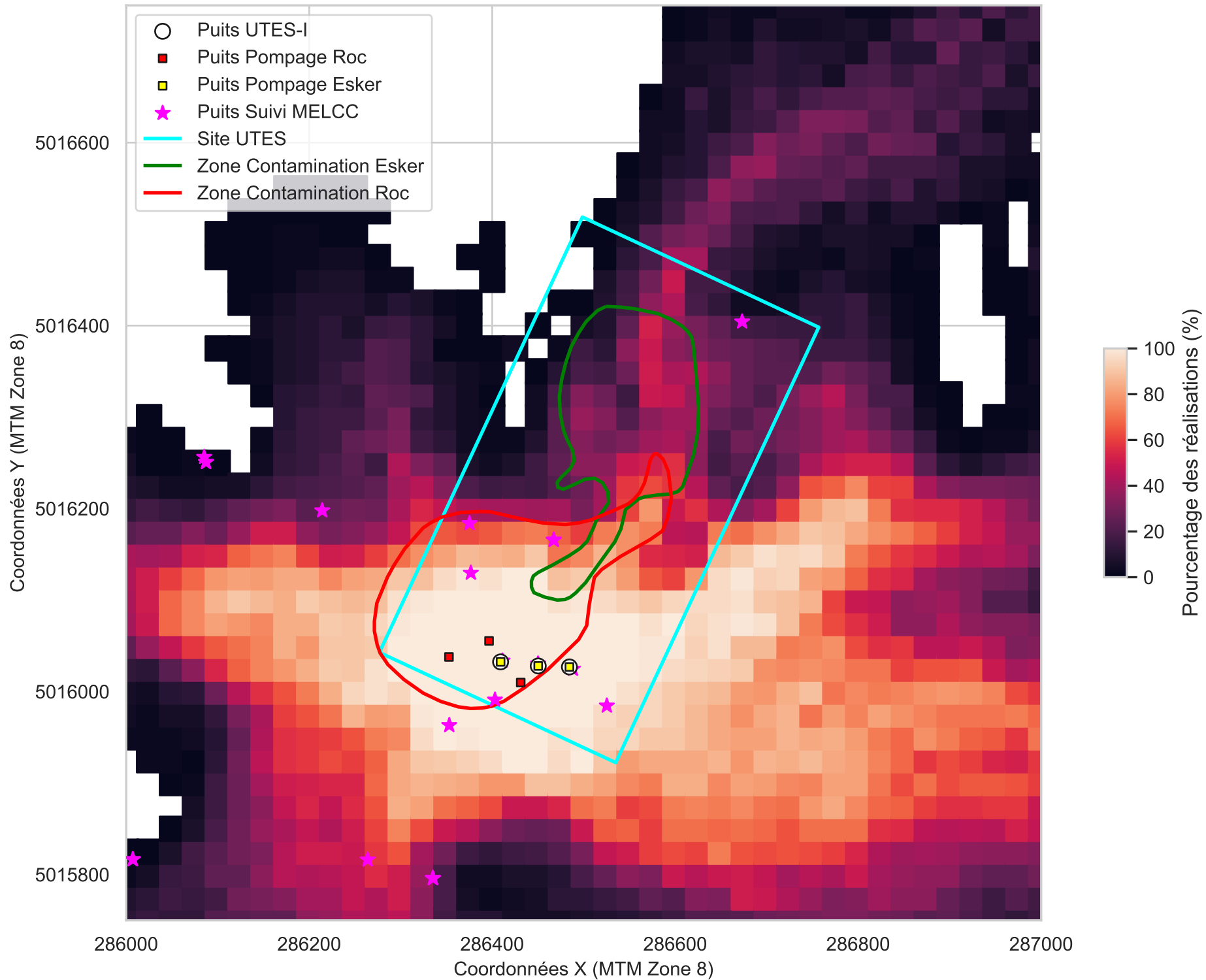


Figure A-10
Scénario A - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

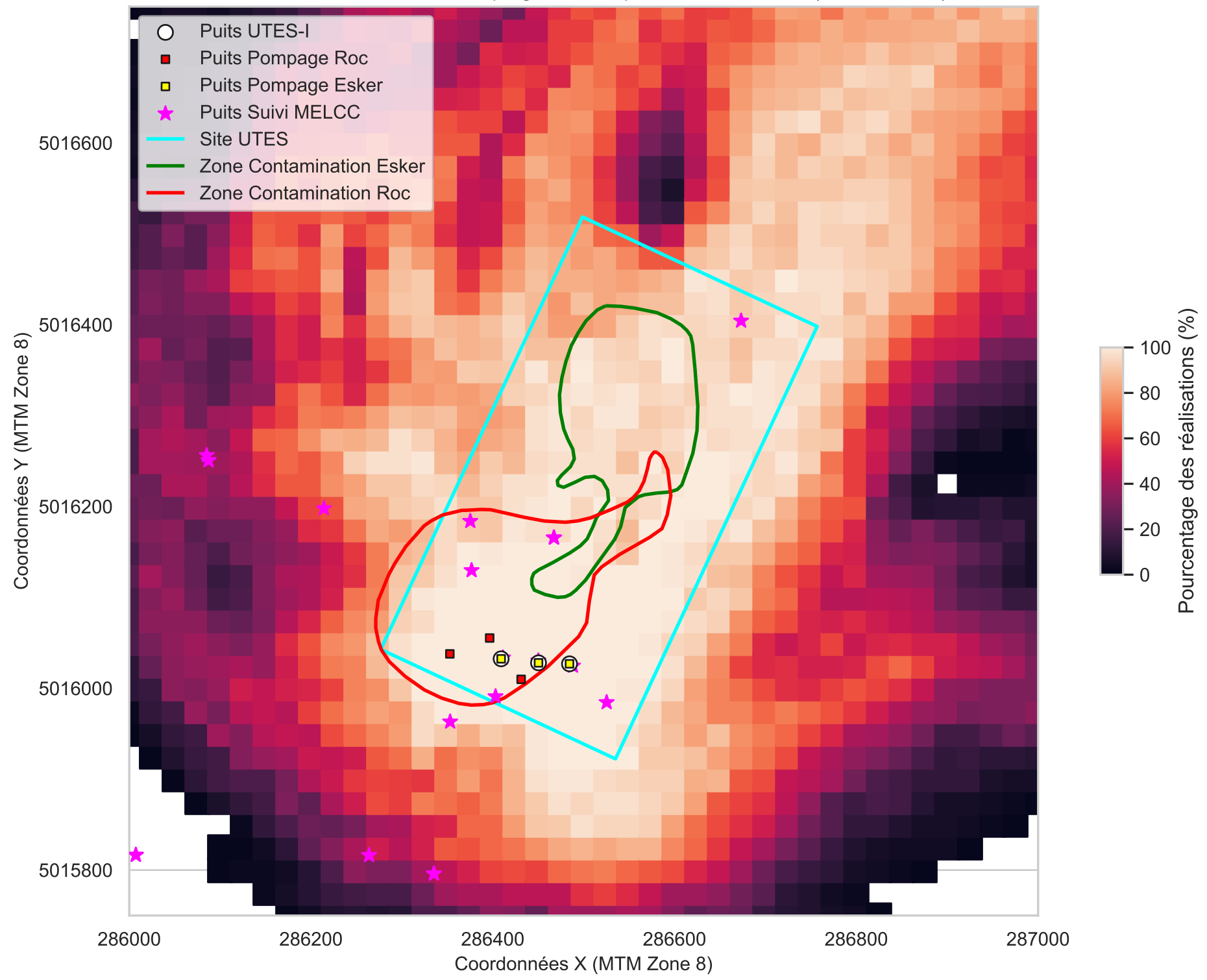


Figure A-11

Scénario A - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

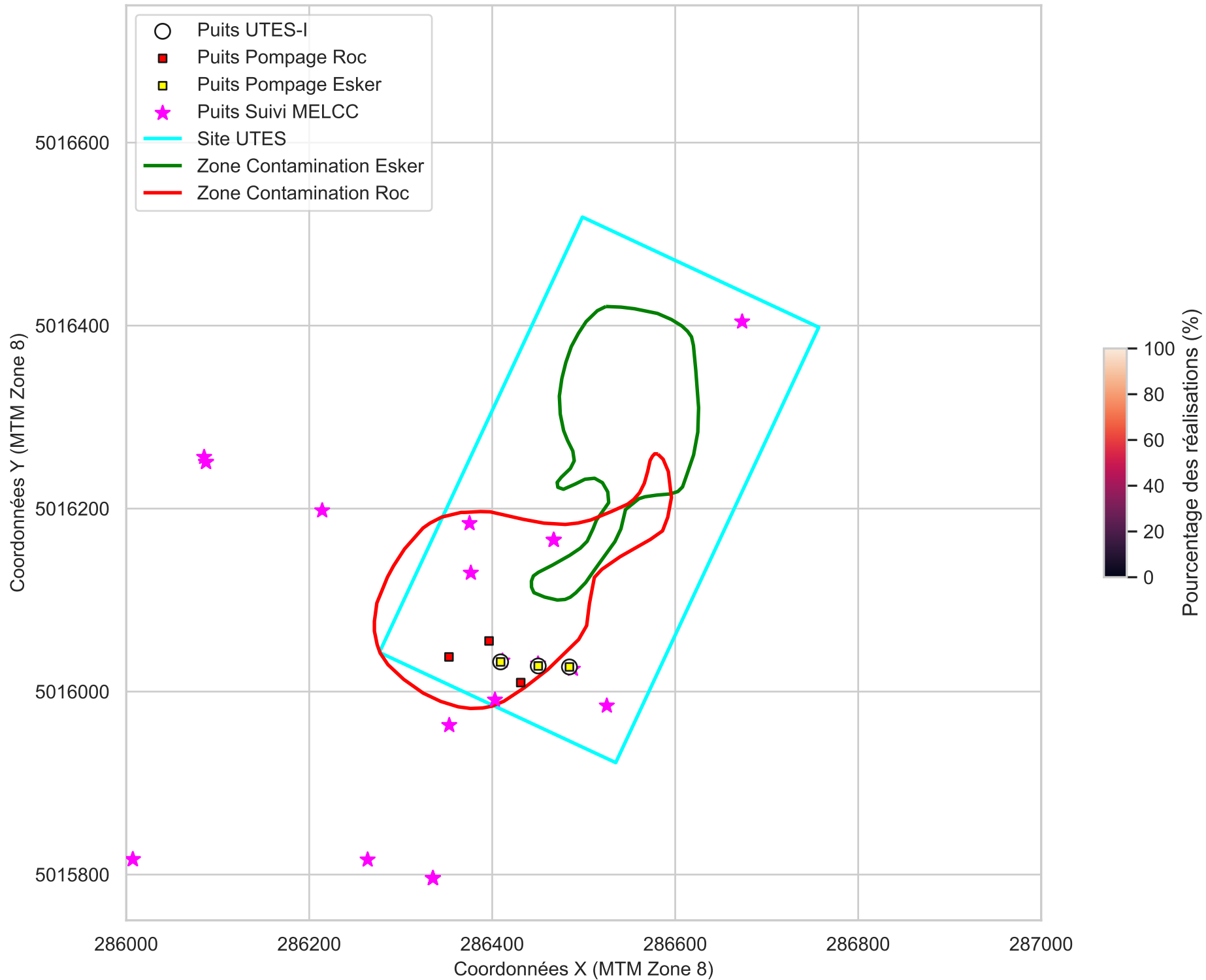


Figure A-12

Scénario A - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

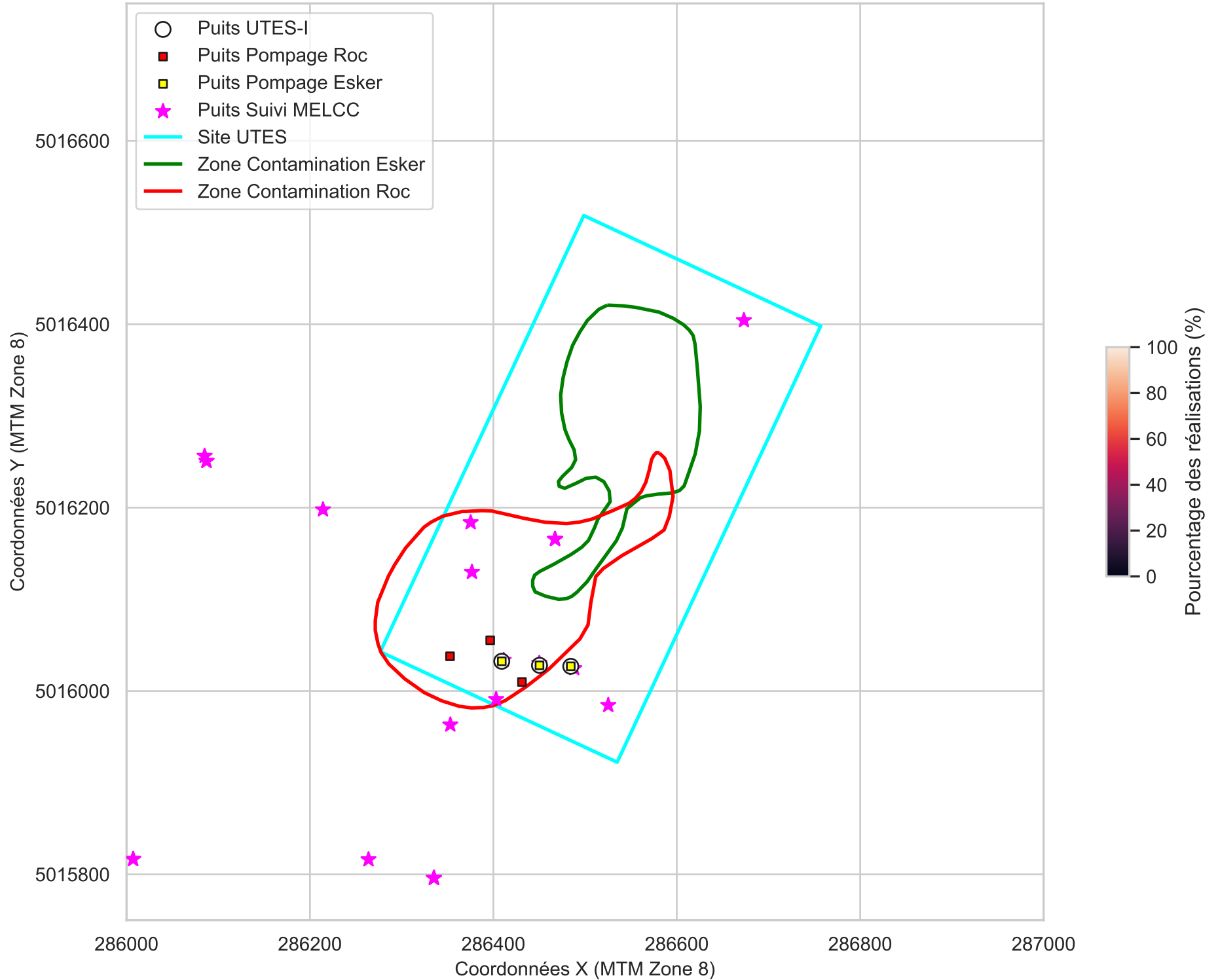


Figure A-13
Scénario A - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

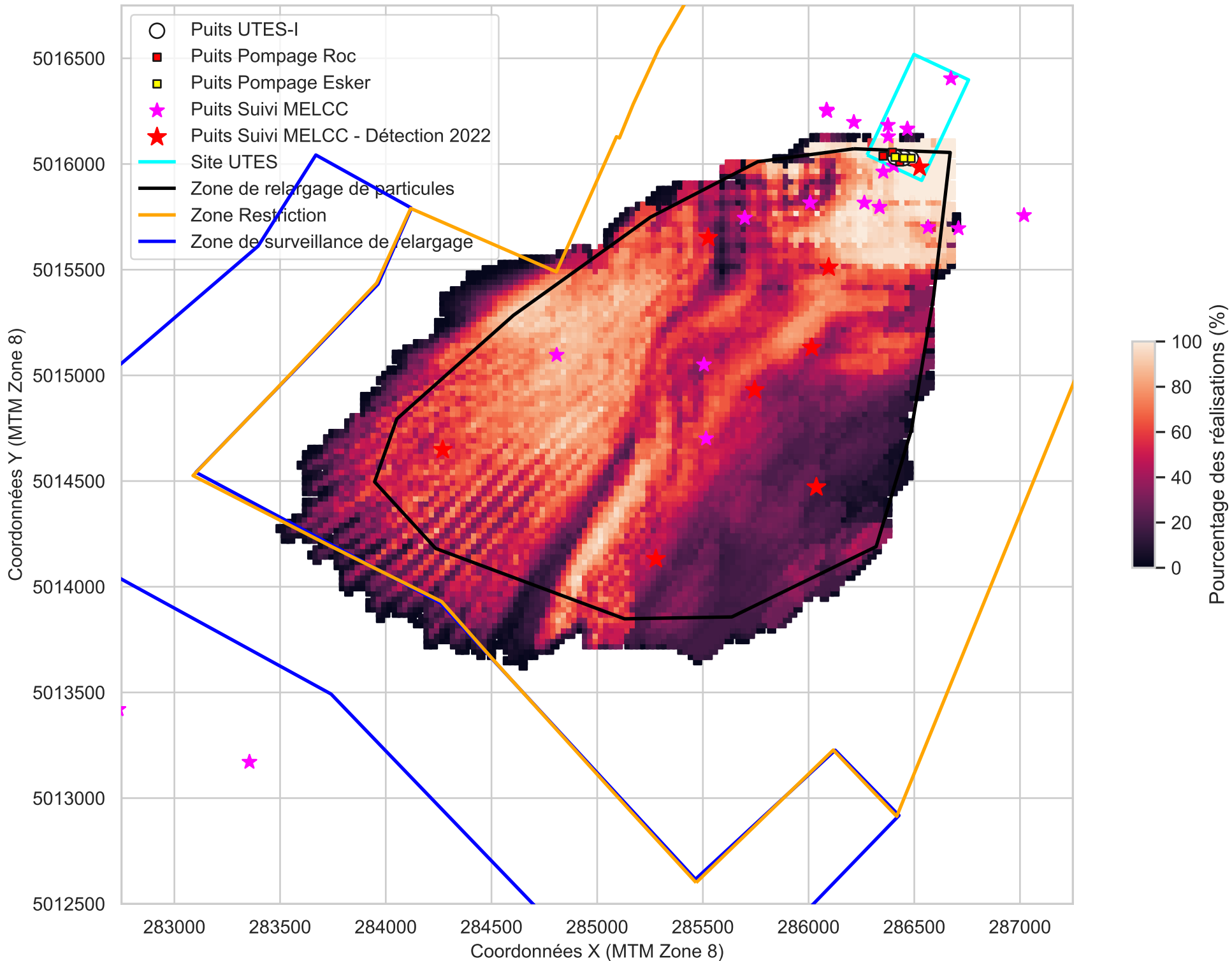
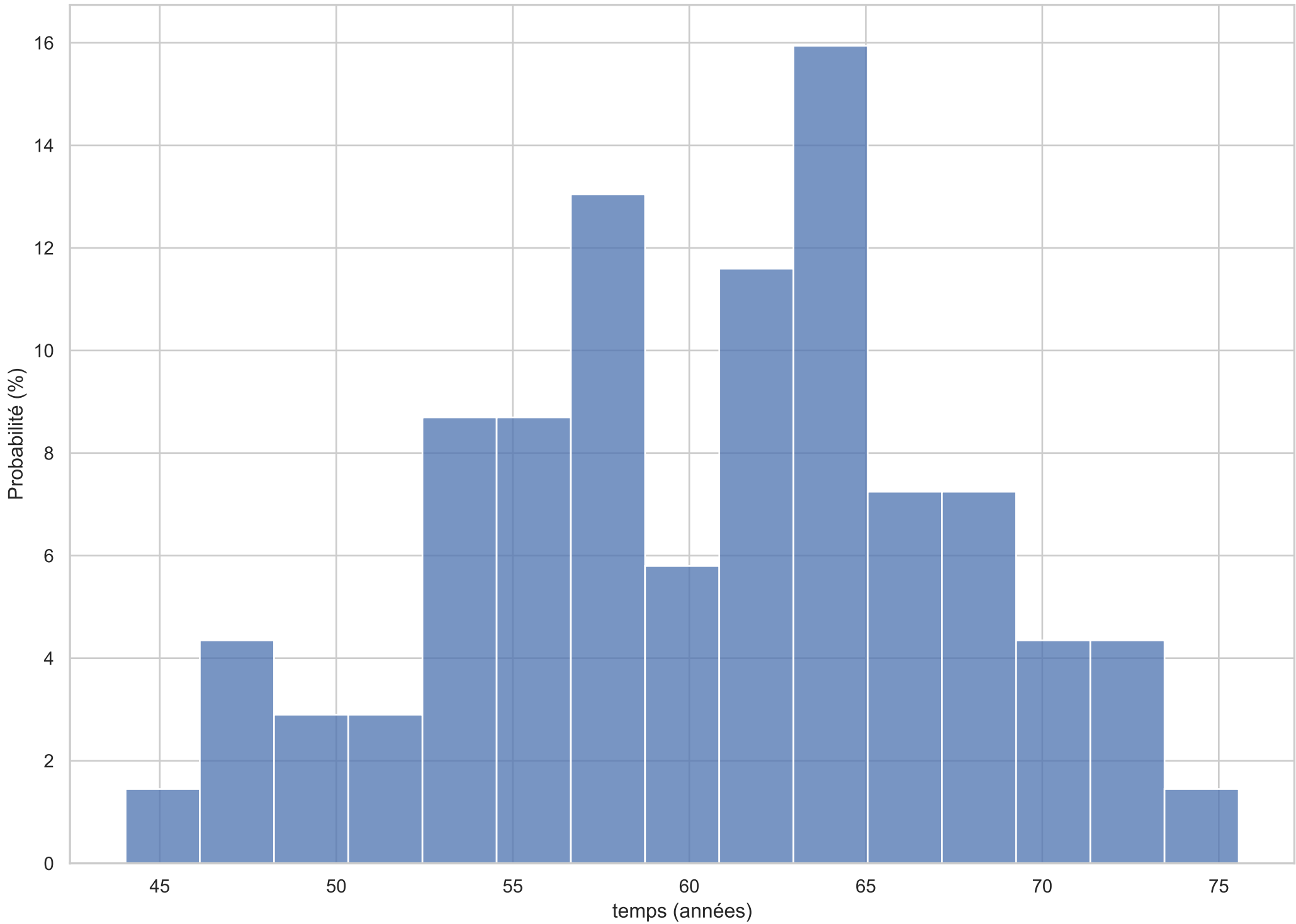


Figure A-14
Scénario A - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Scénario A - Schéma Arrêt

Figure A-15
Scénario A - Variation des gradients verticaux en fonction du temps après arrêt du pompage

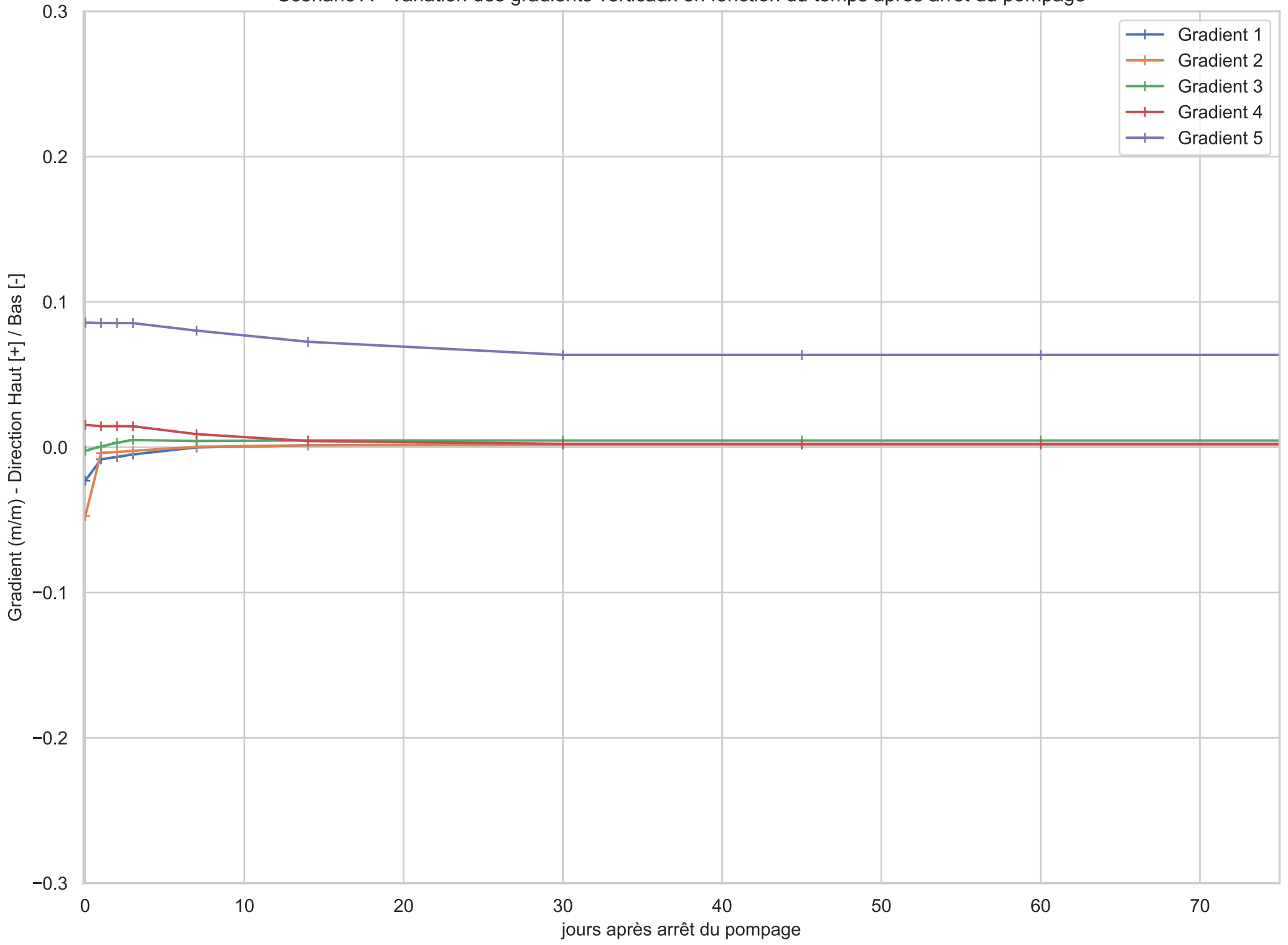


Figure A-16(1)

Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

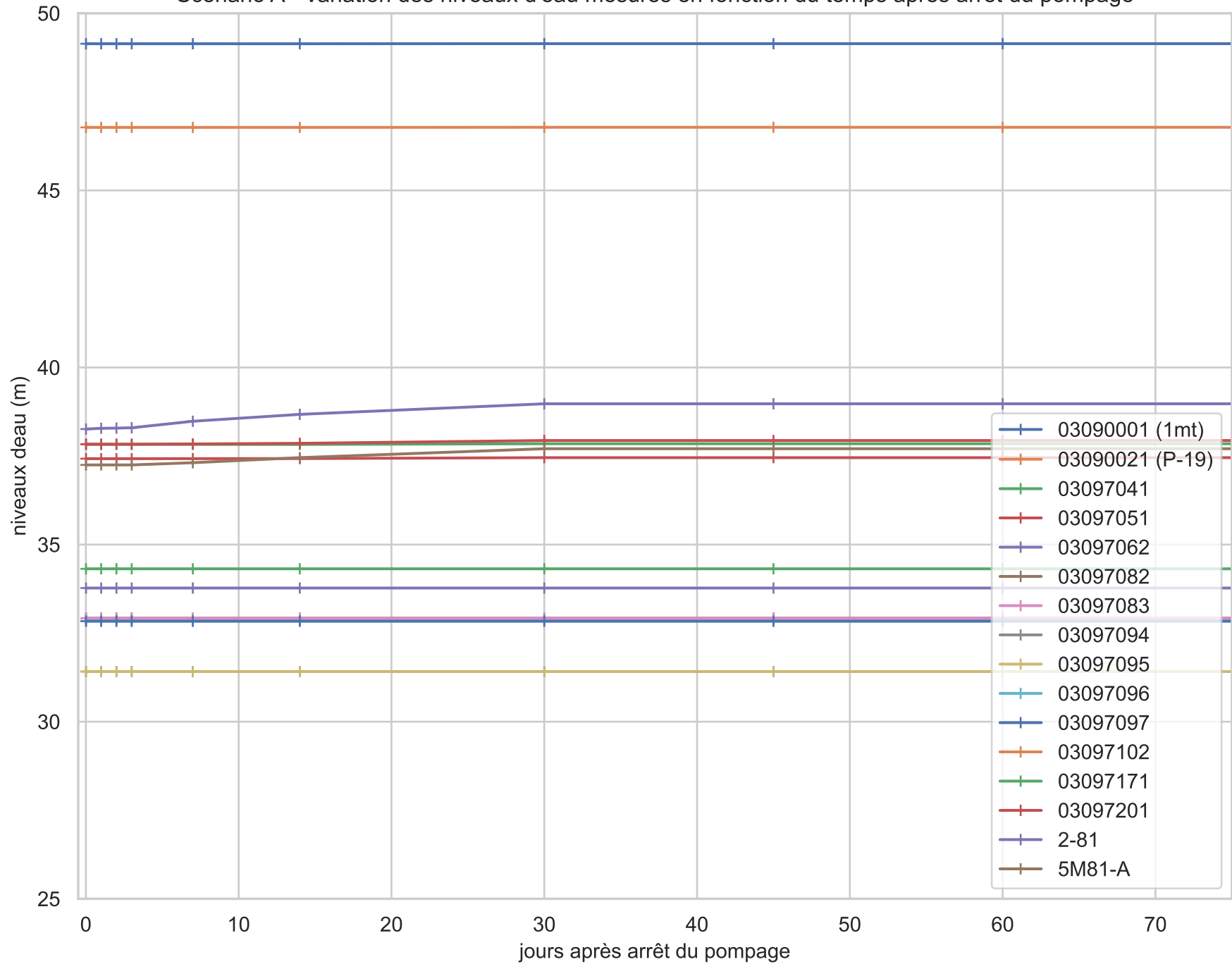


Figure A-16(2)

Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

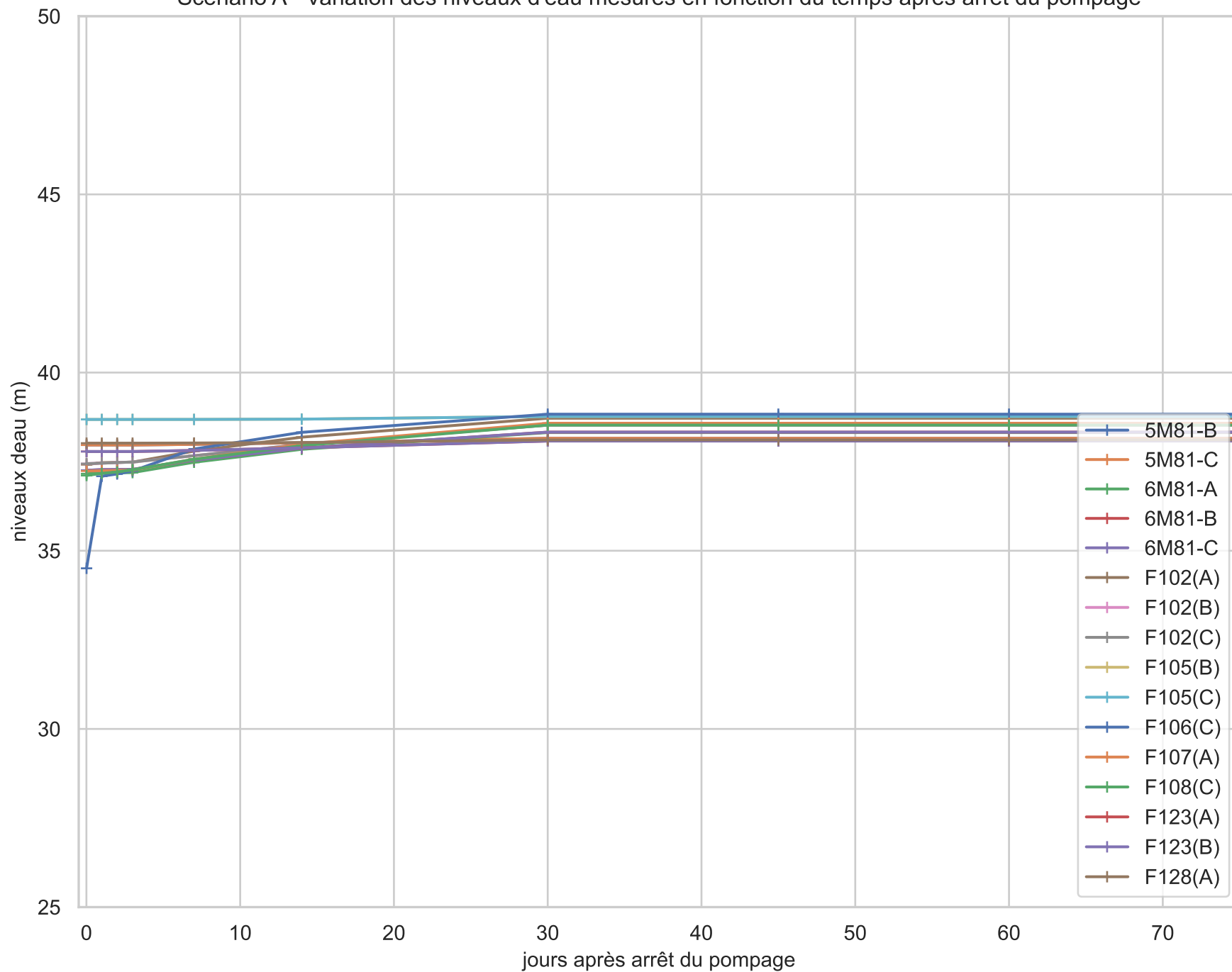


Figure A-16(3)

Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

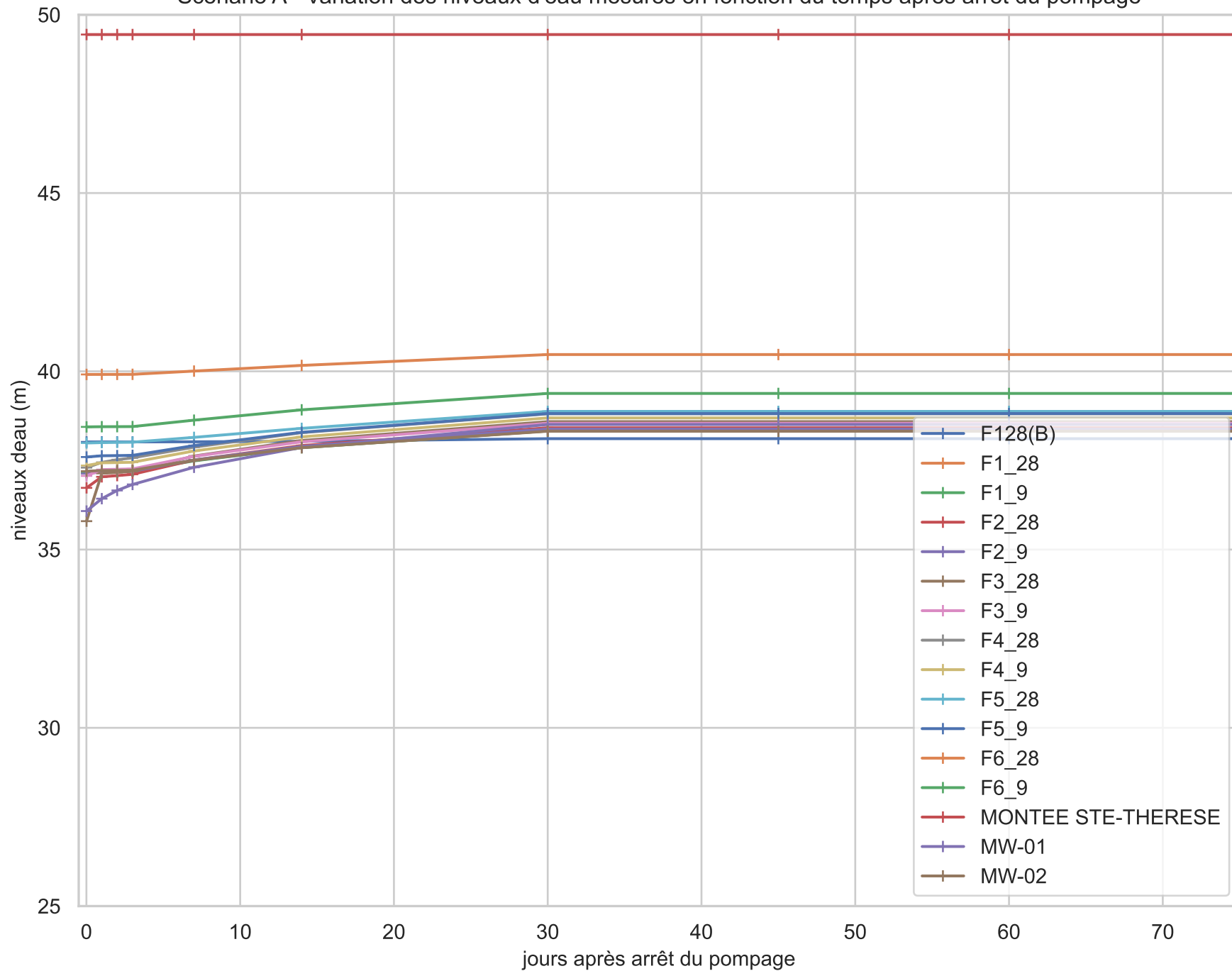


Figure A-16(4)

Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

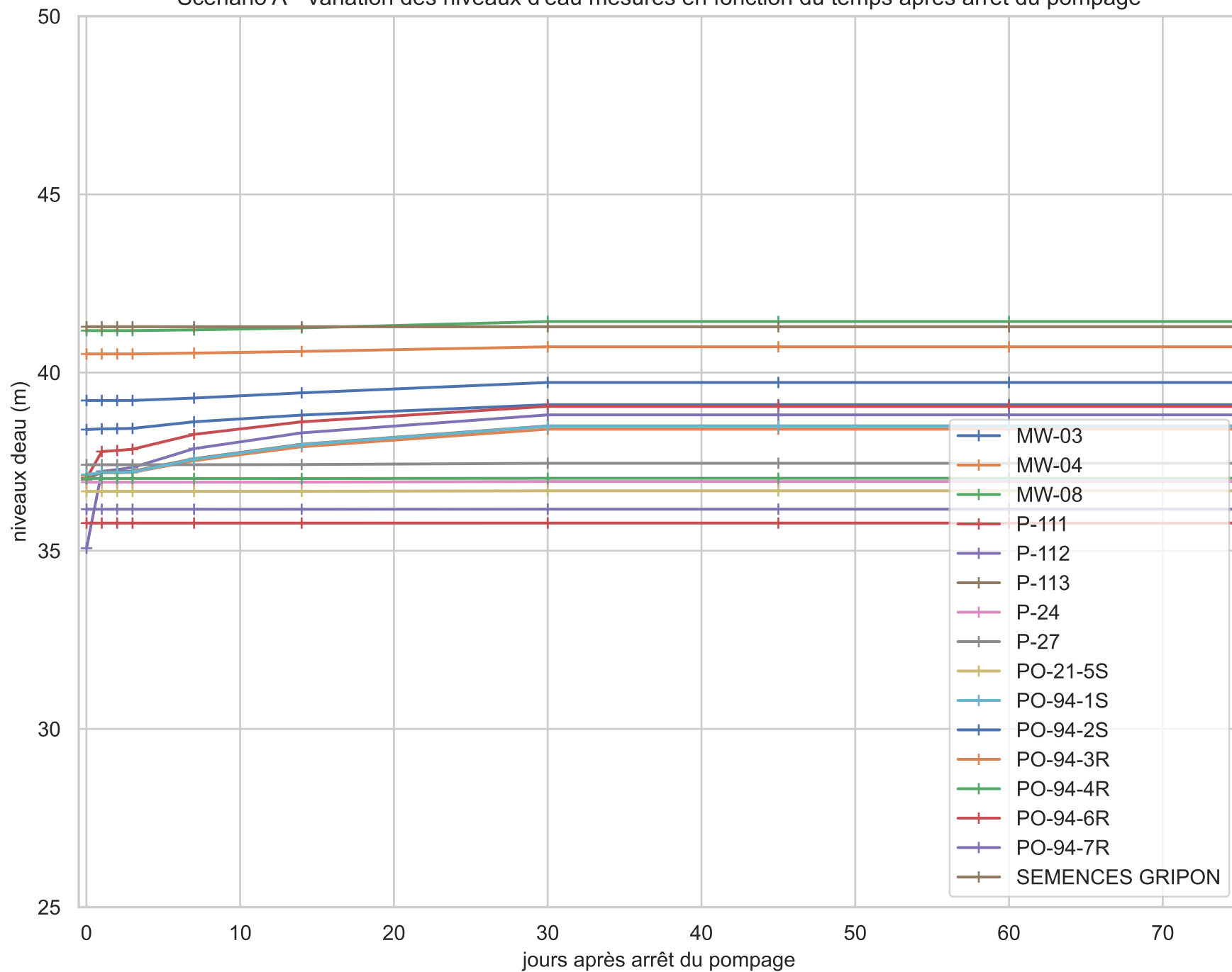


Figure A-17
Scenario A - Migration de la zone contaminée de l'esker après arrêt du pompage



Scénario A - Schéma Nord

Figure A-18
Scénario A - Variation des gradients verticaux en fonction de la réalisation

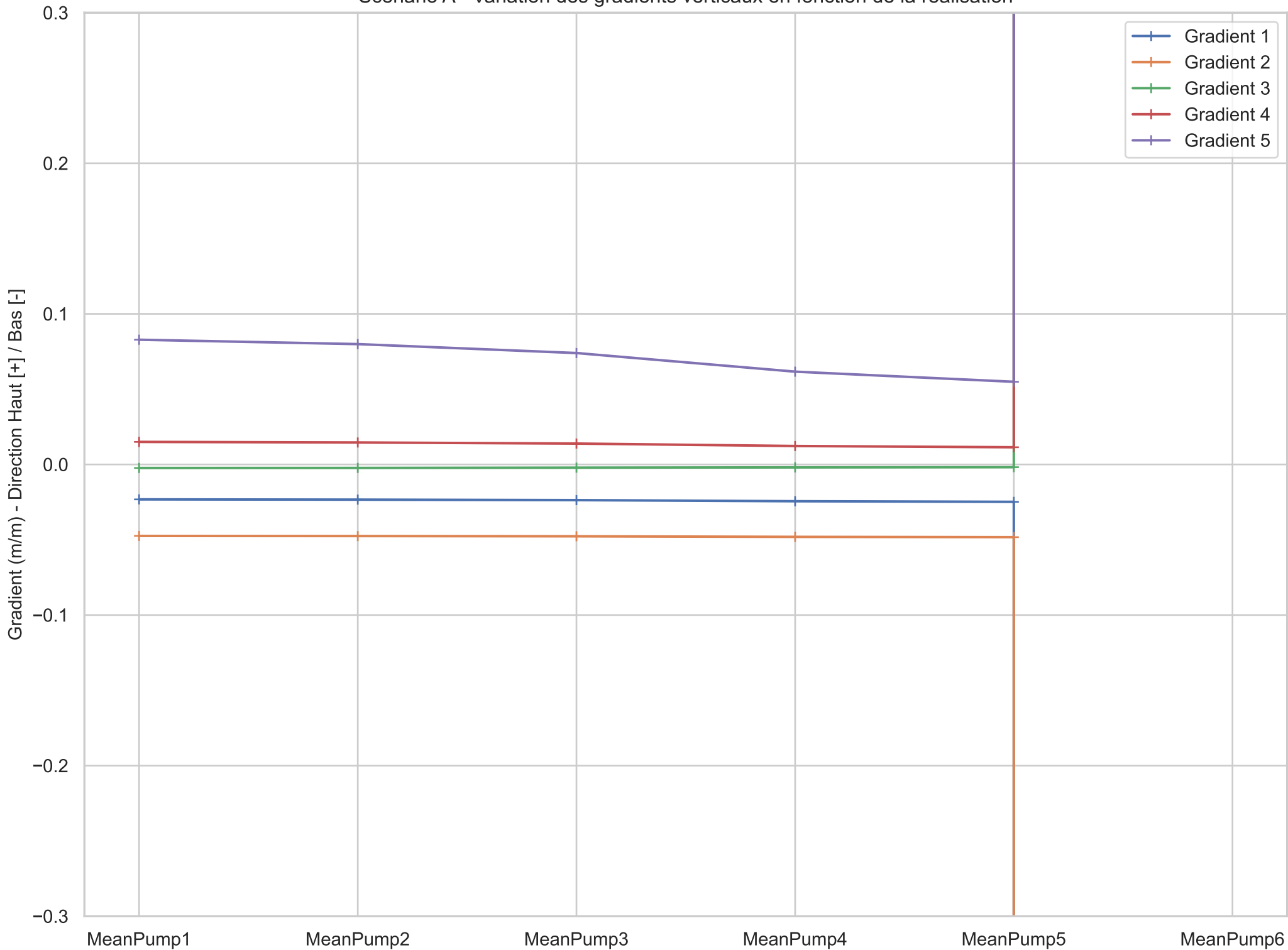


Figure A-19(1)
 Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

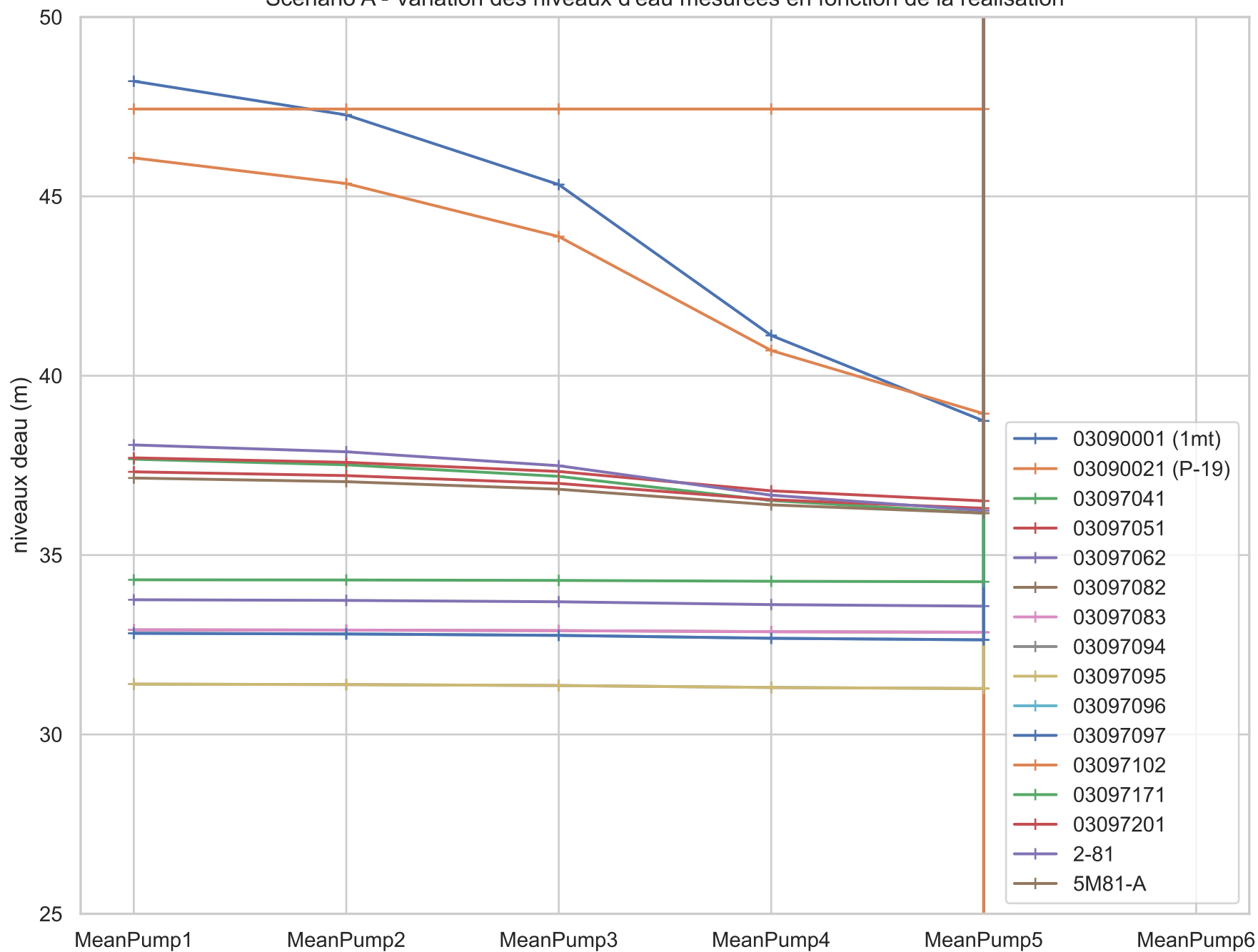


Figure A-19(2)
 Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

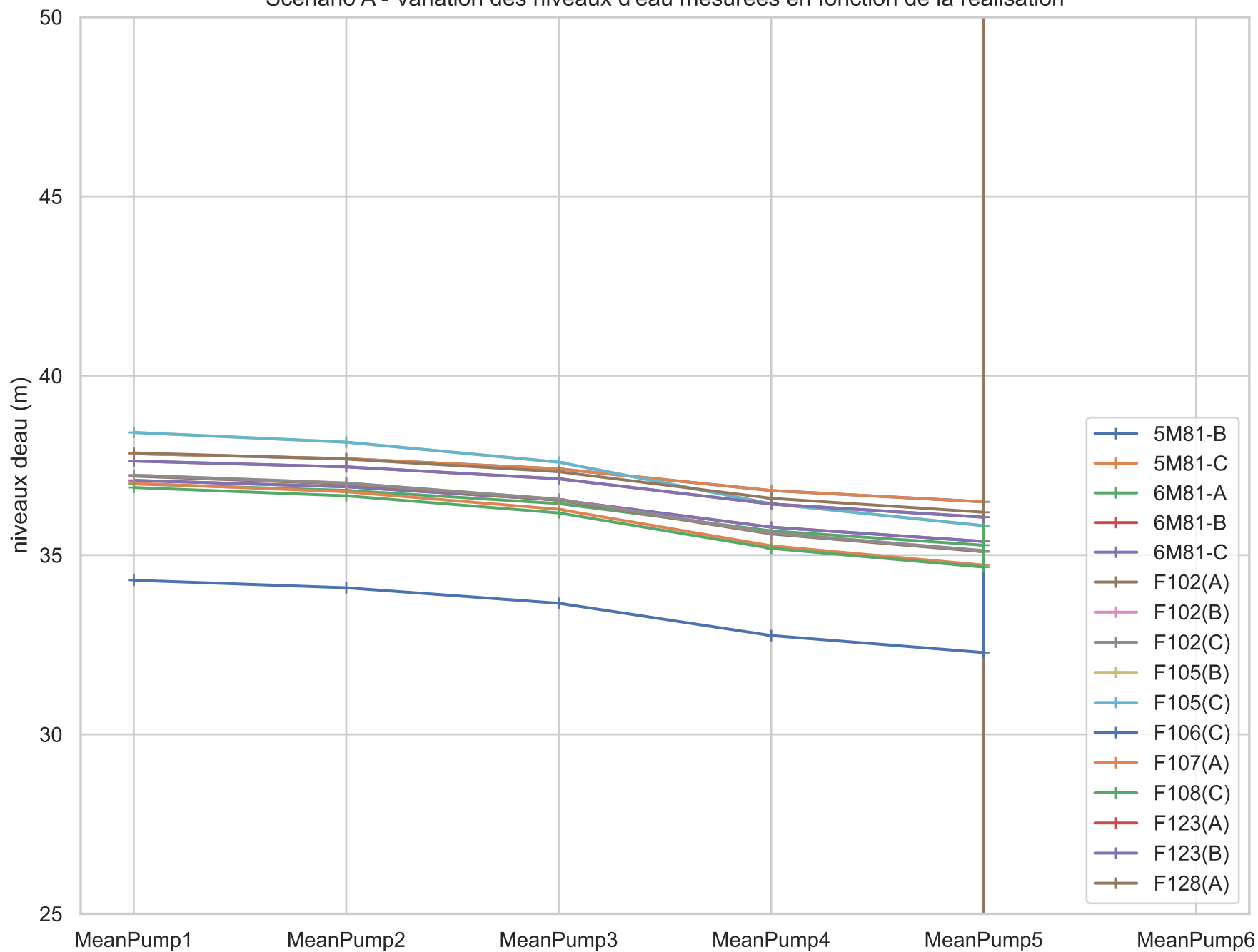


Figure A-19(3)
 Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

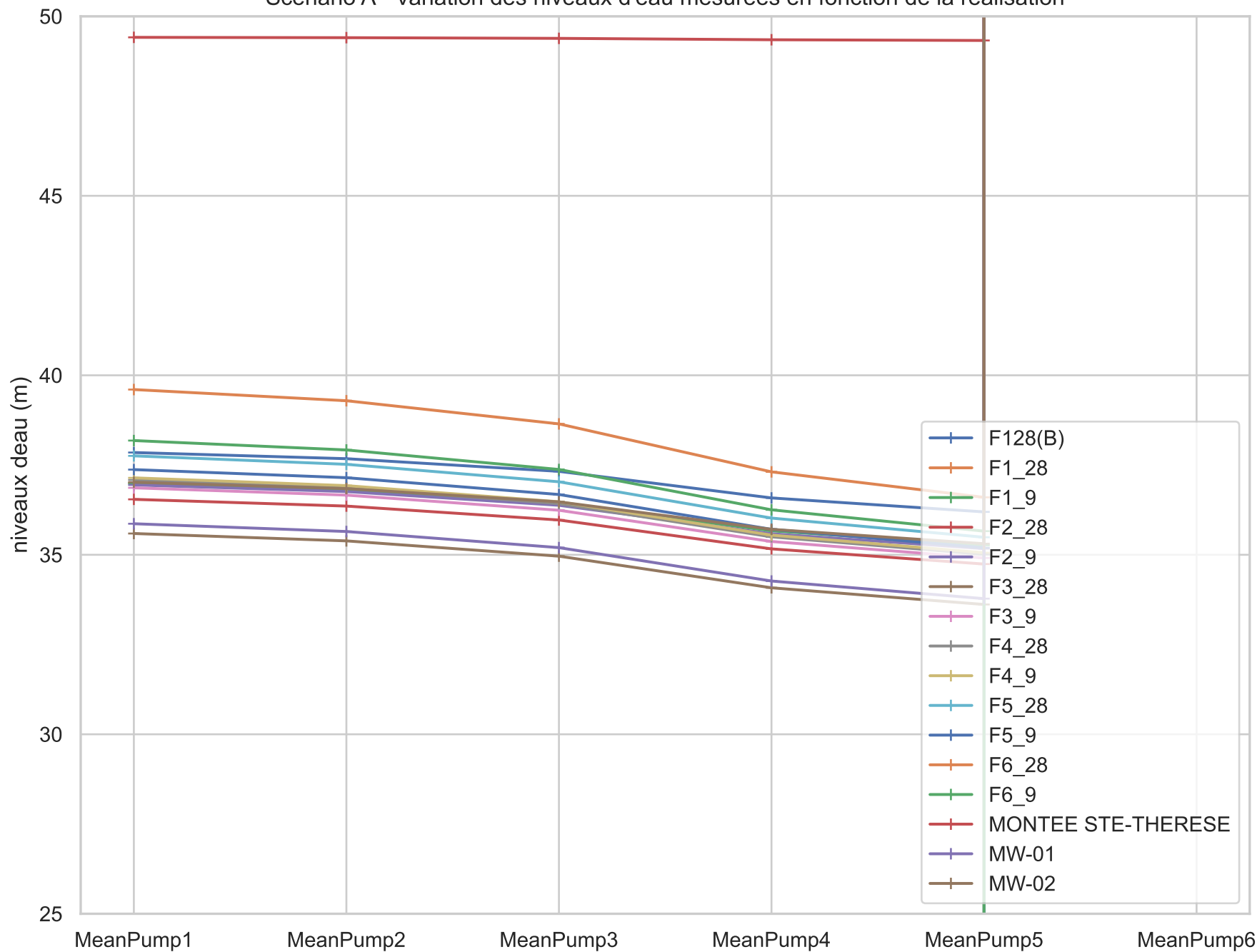


Figure A-19(4)
 Scénario A - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

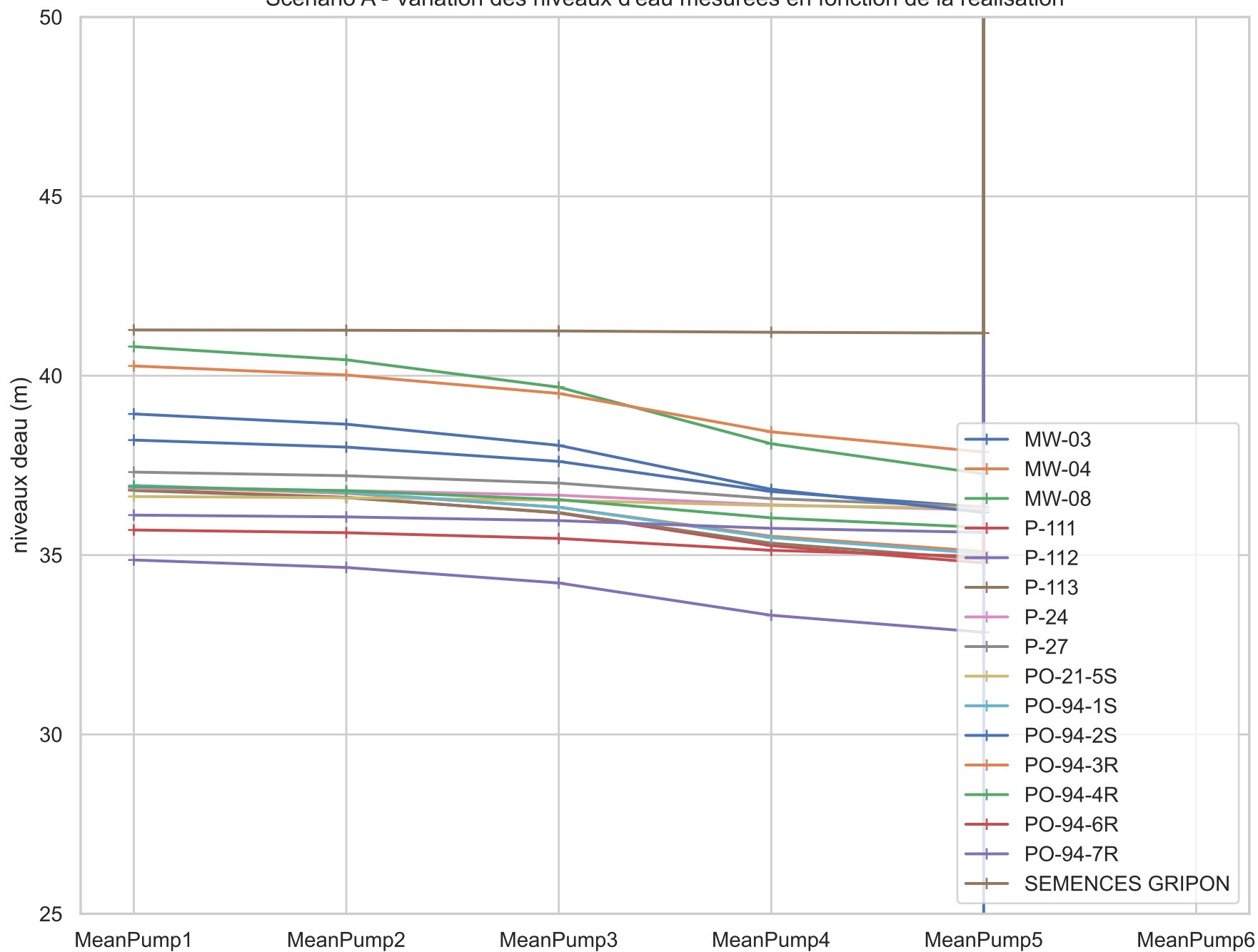


Figure A-20
Scénario A - Traçage de particules dans l'esker à partir des puits Nord sur 25 ans

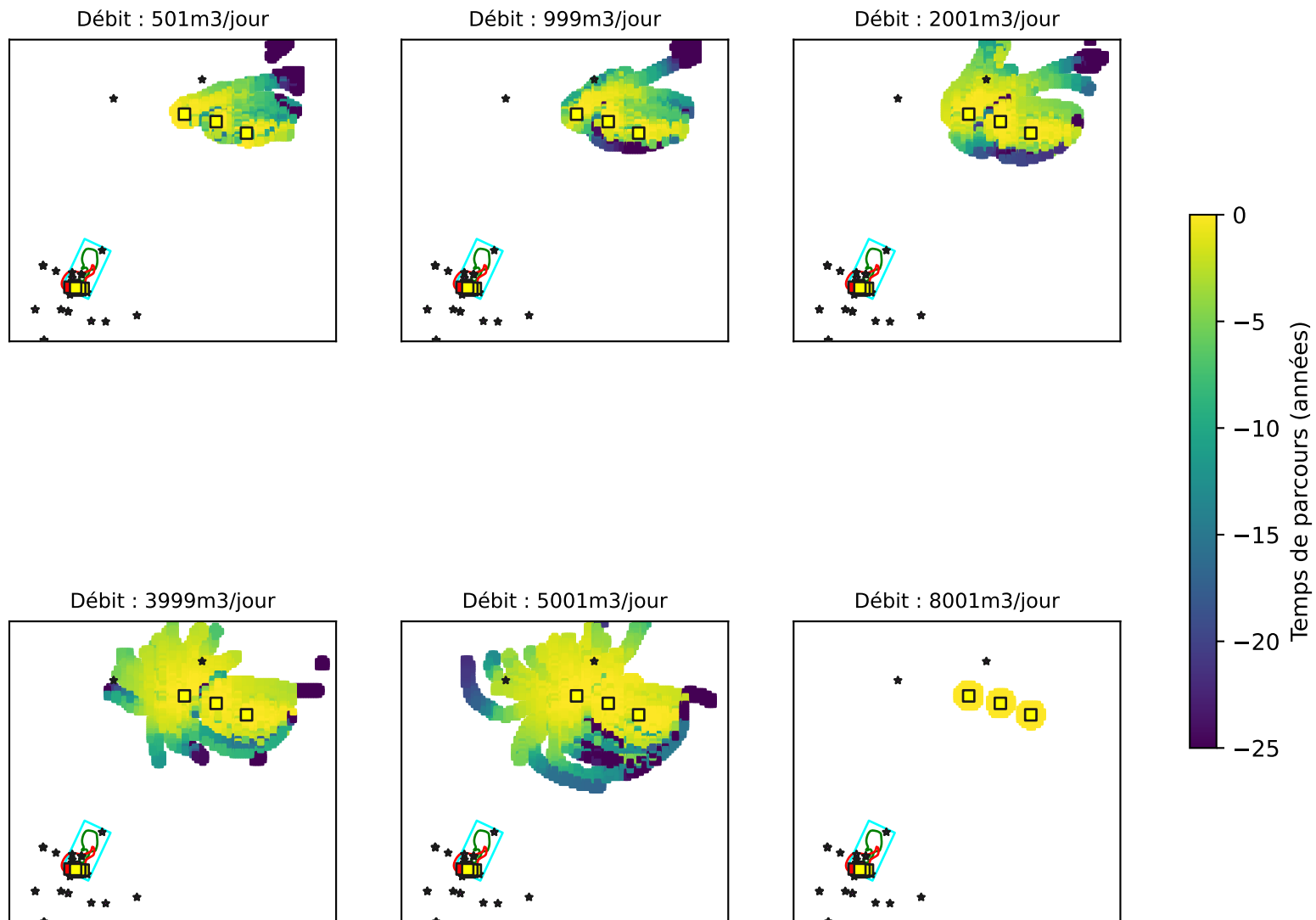


Figure A-21
Scénario A - Traçage de particules au roc à partir des puits au Nord sur 25 ans

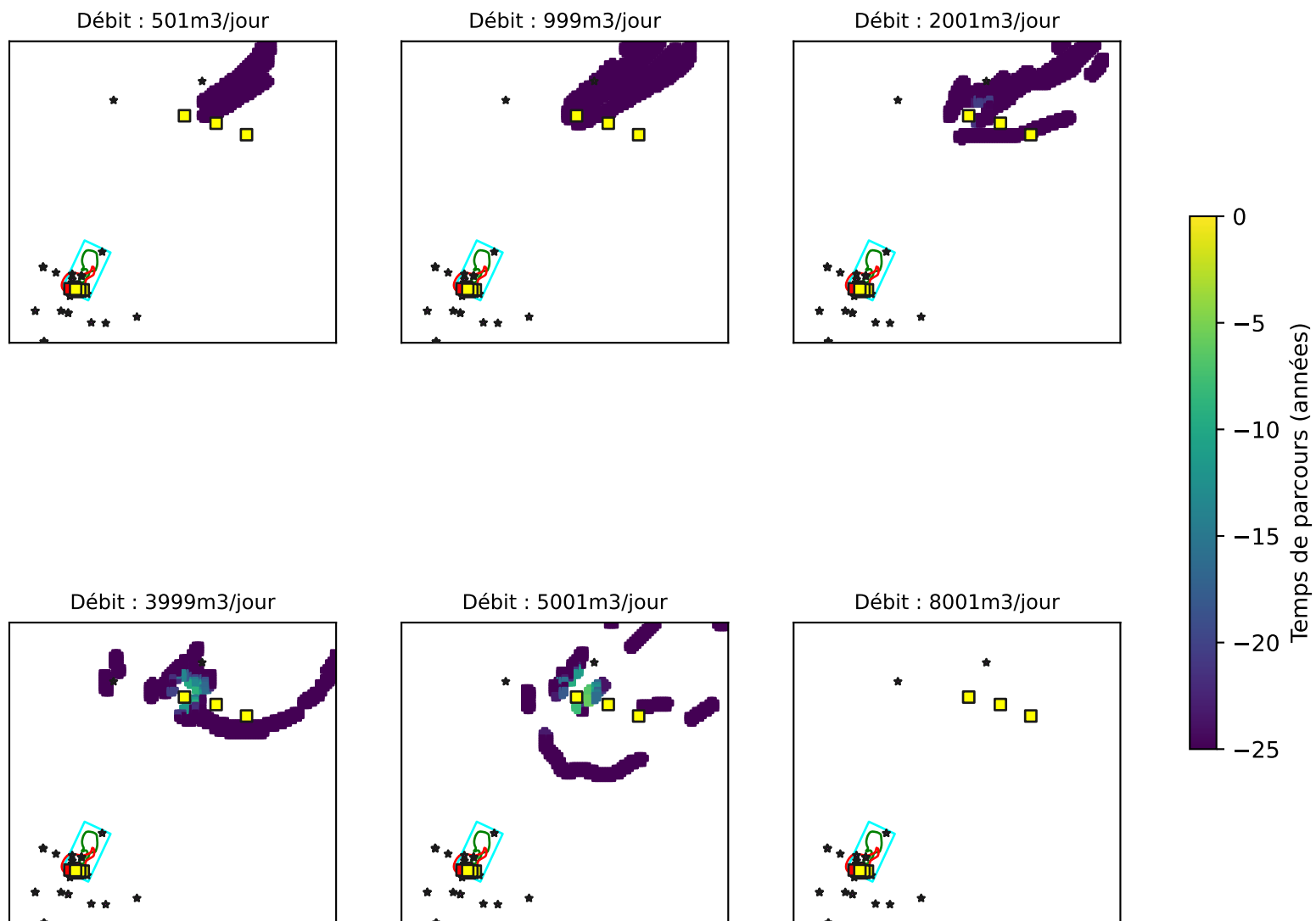
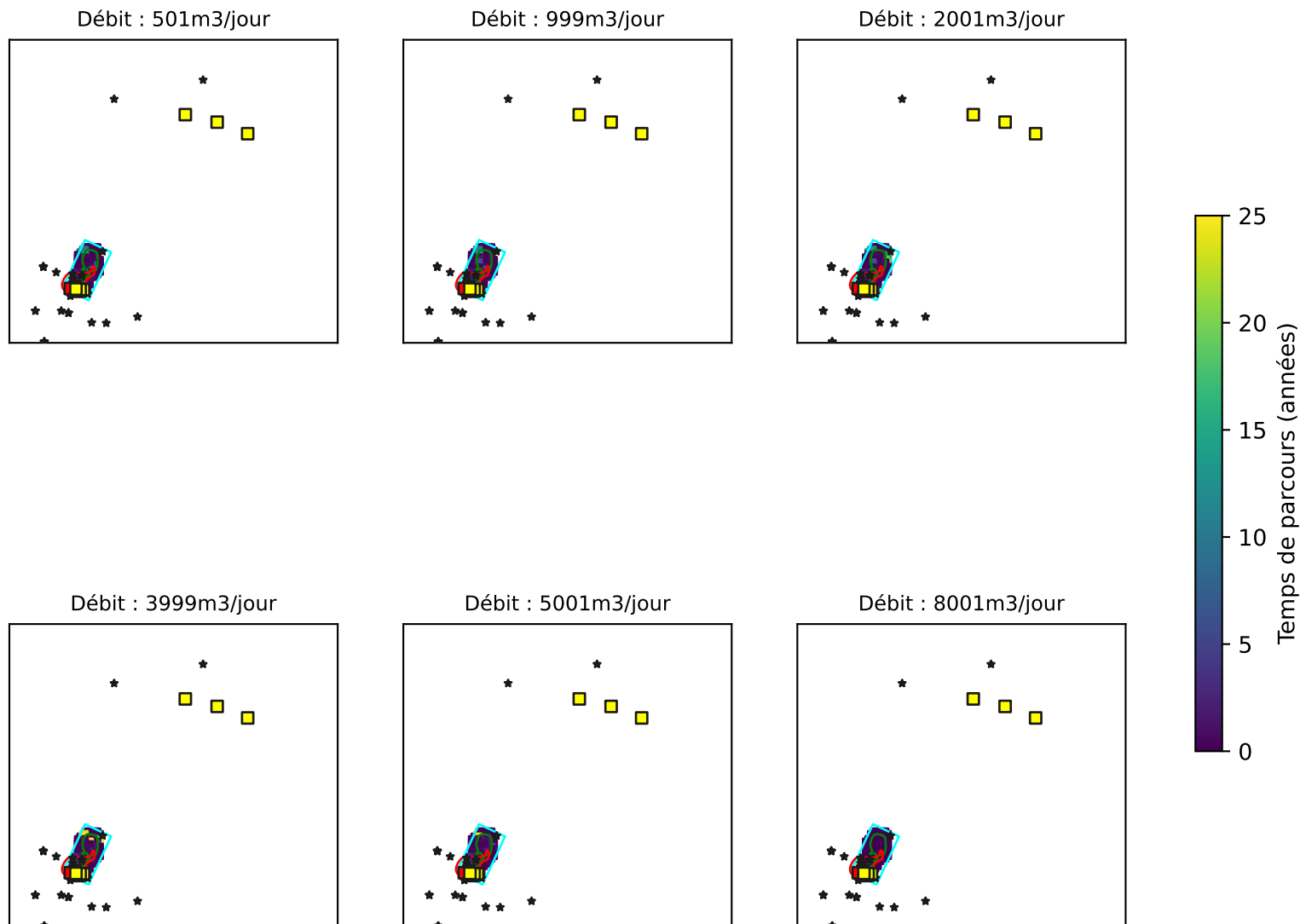


Figure A-22

Scénario A - Traçage de particules à partir de la zone source de l'esker sur 25 ans



Scénario A_S3R3 - Schéma Climat

Figure A-23
Scénario A_S3R3 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

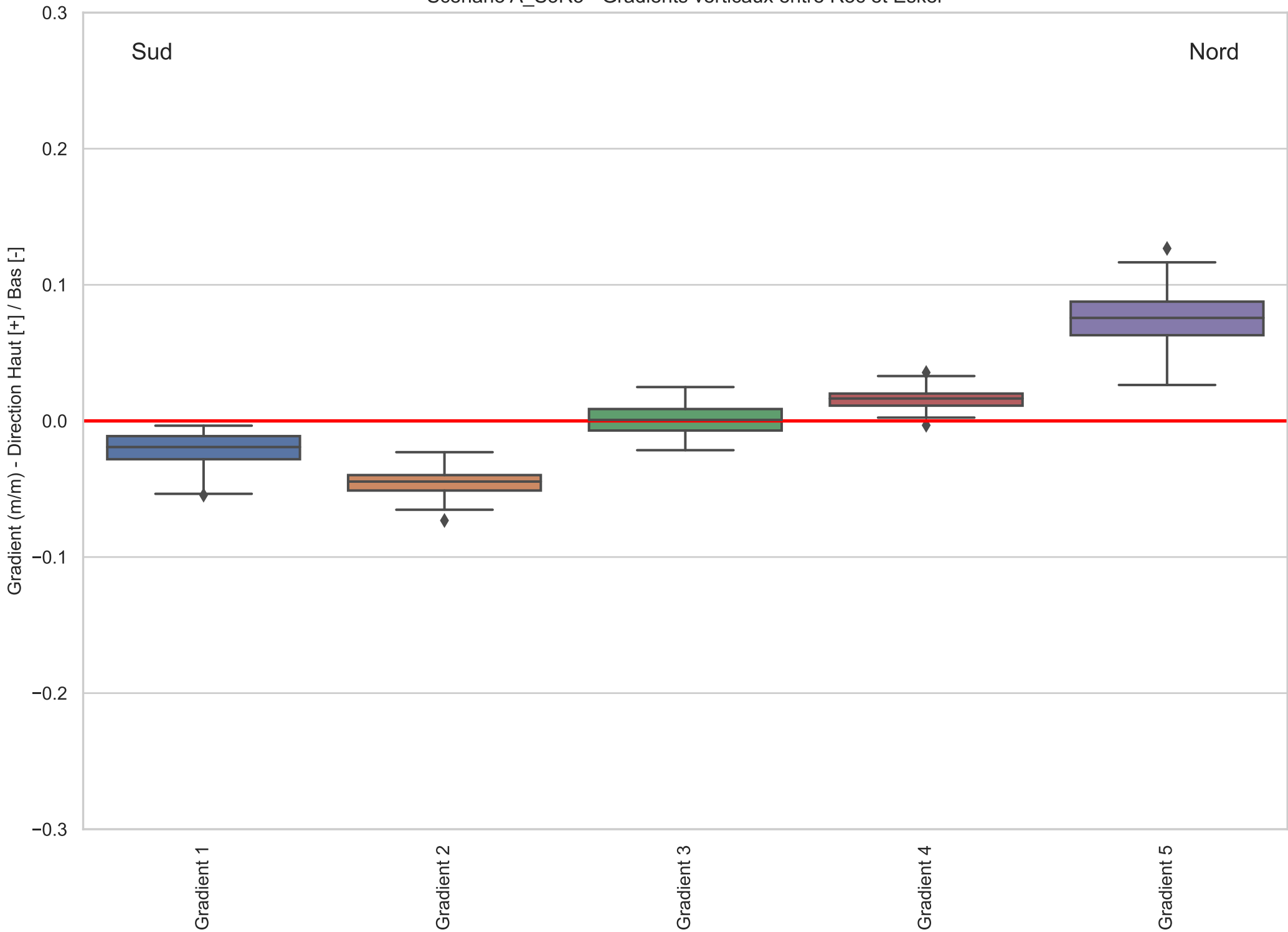


Figure A-24

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

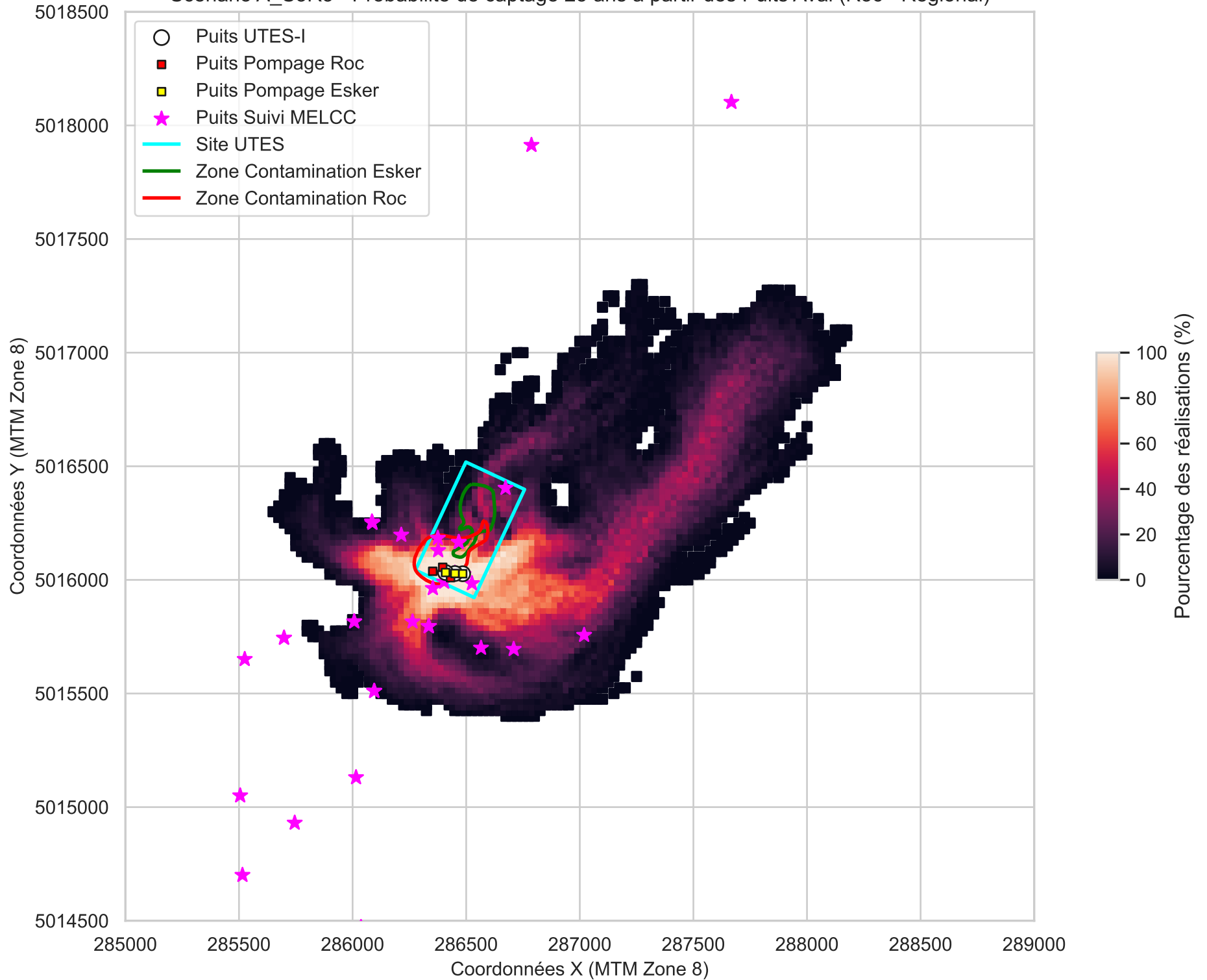


Figure A-25

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

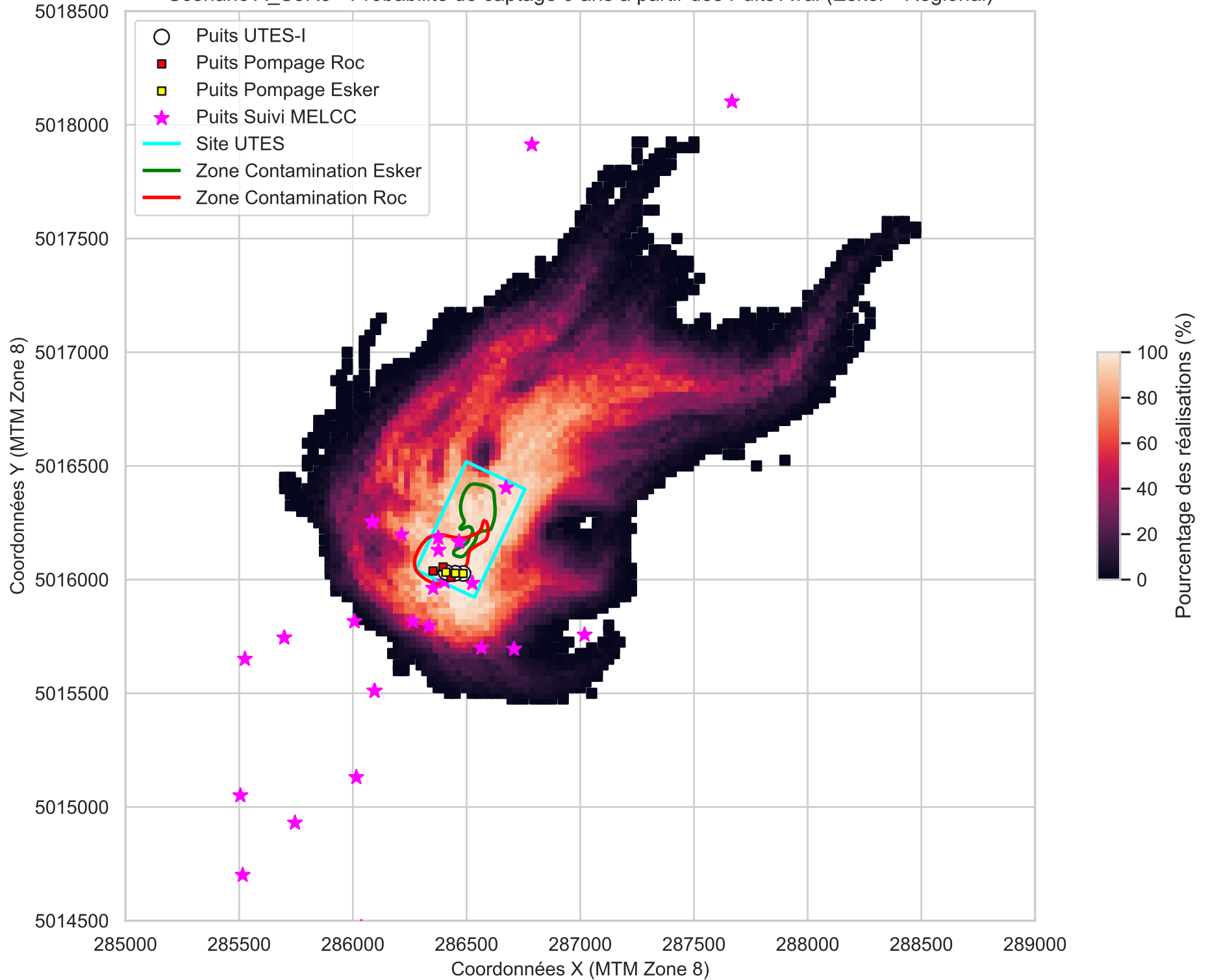


Figure A-26

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

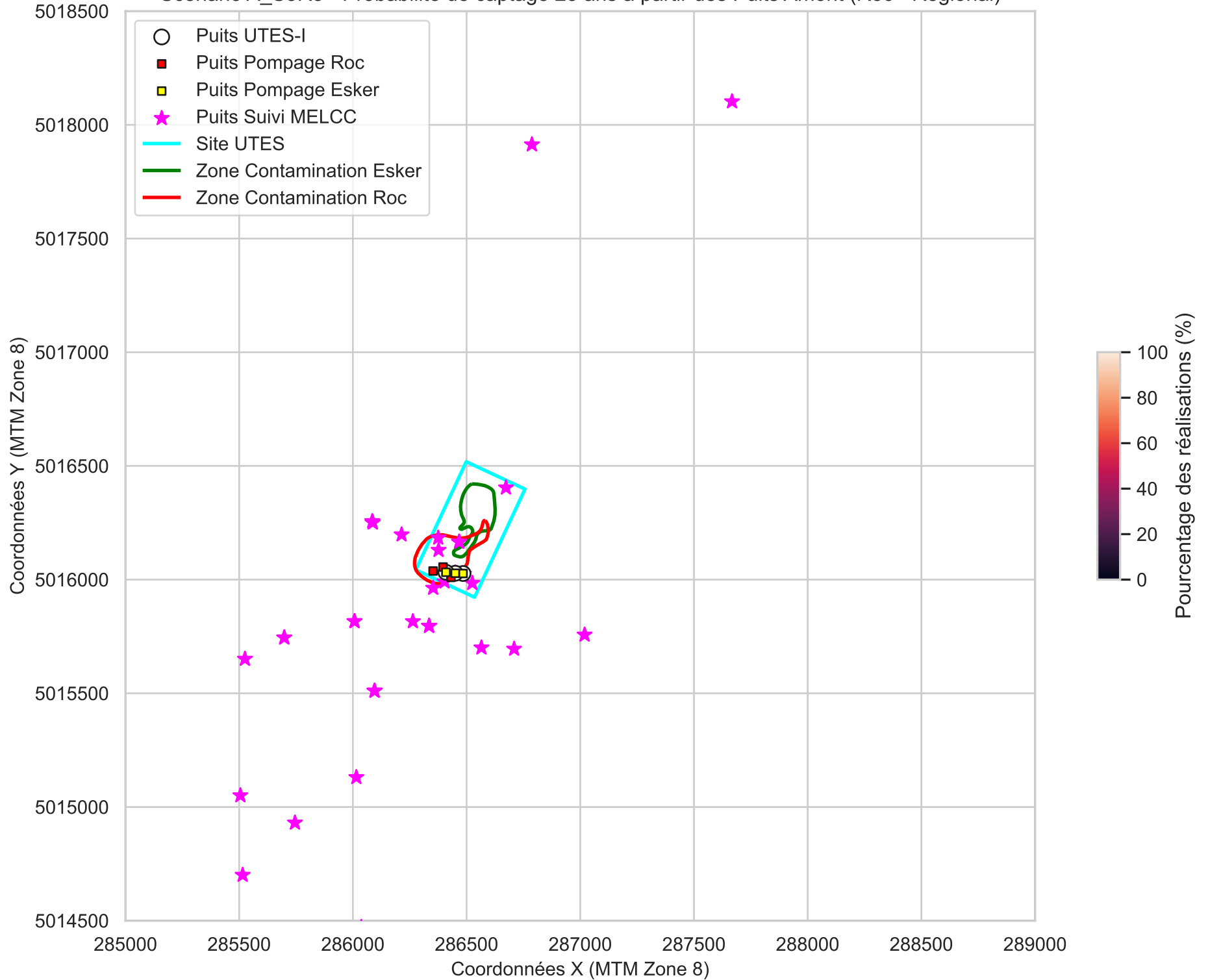


Figure A-27

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

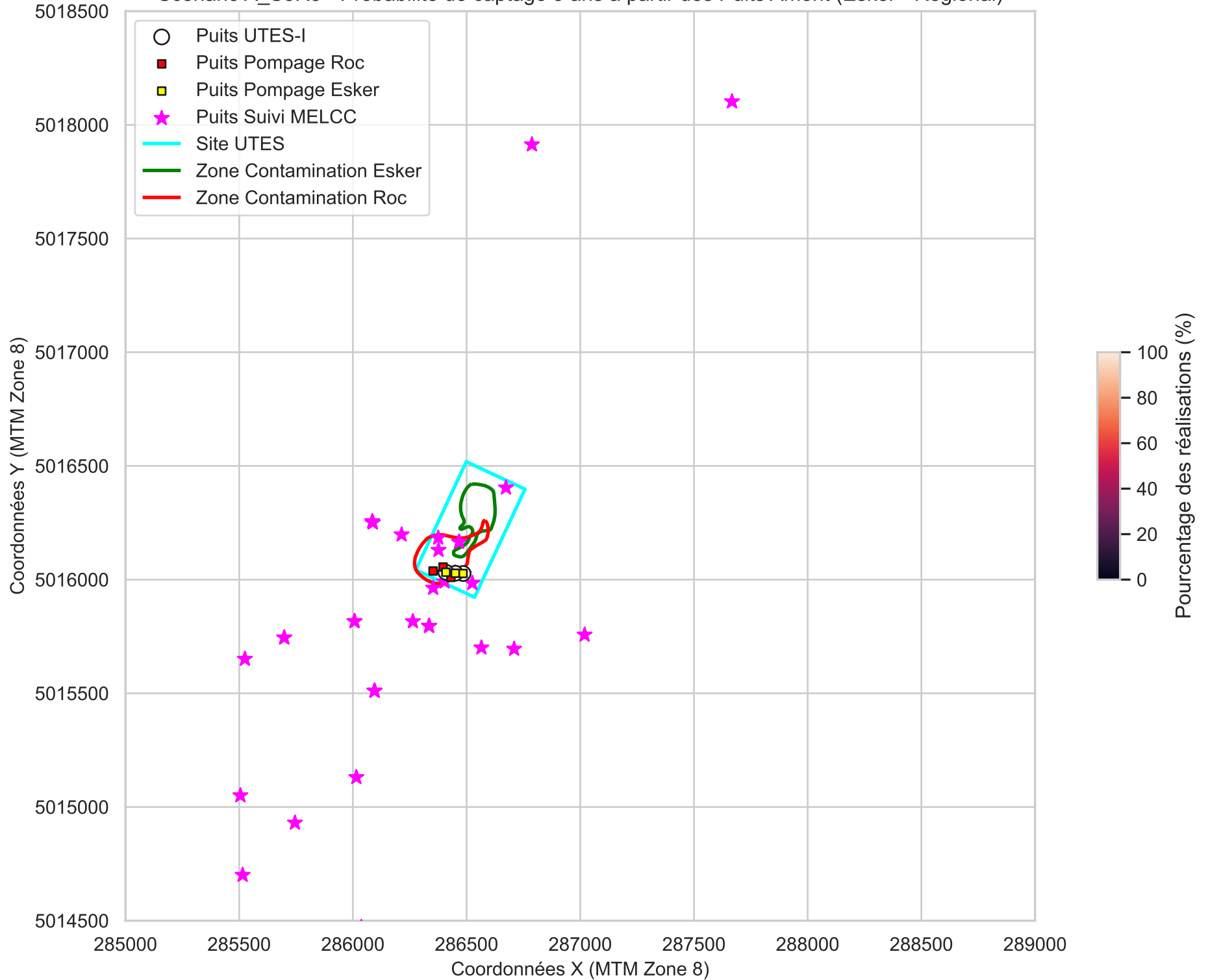


Figure A-28

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

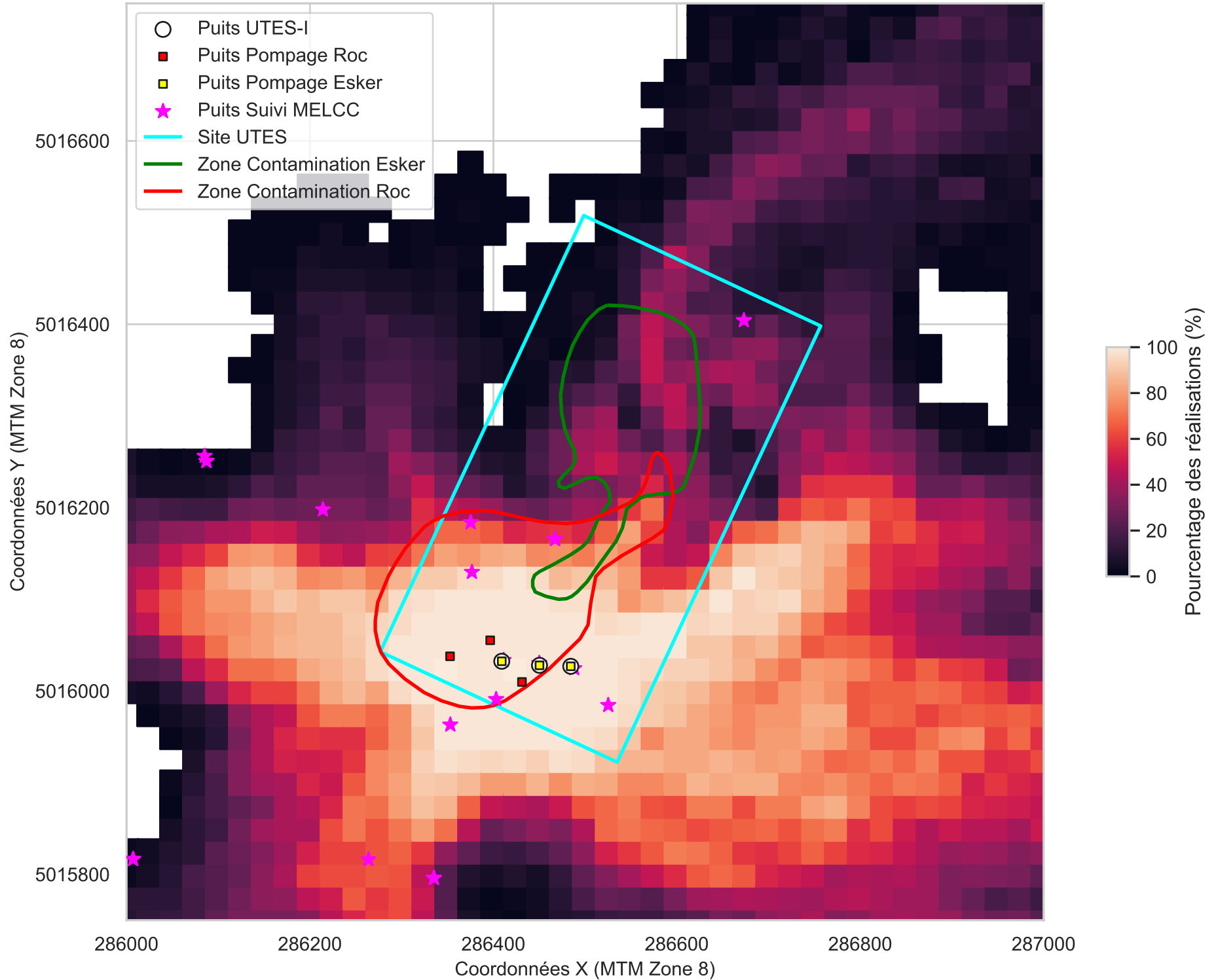


Figure A-29

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

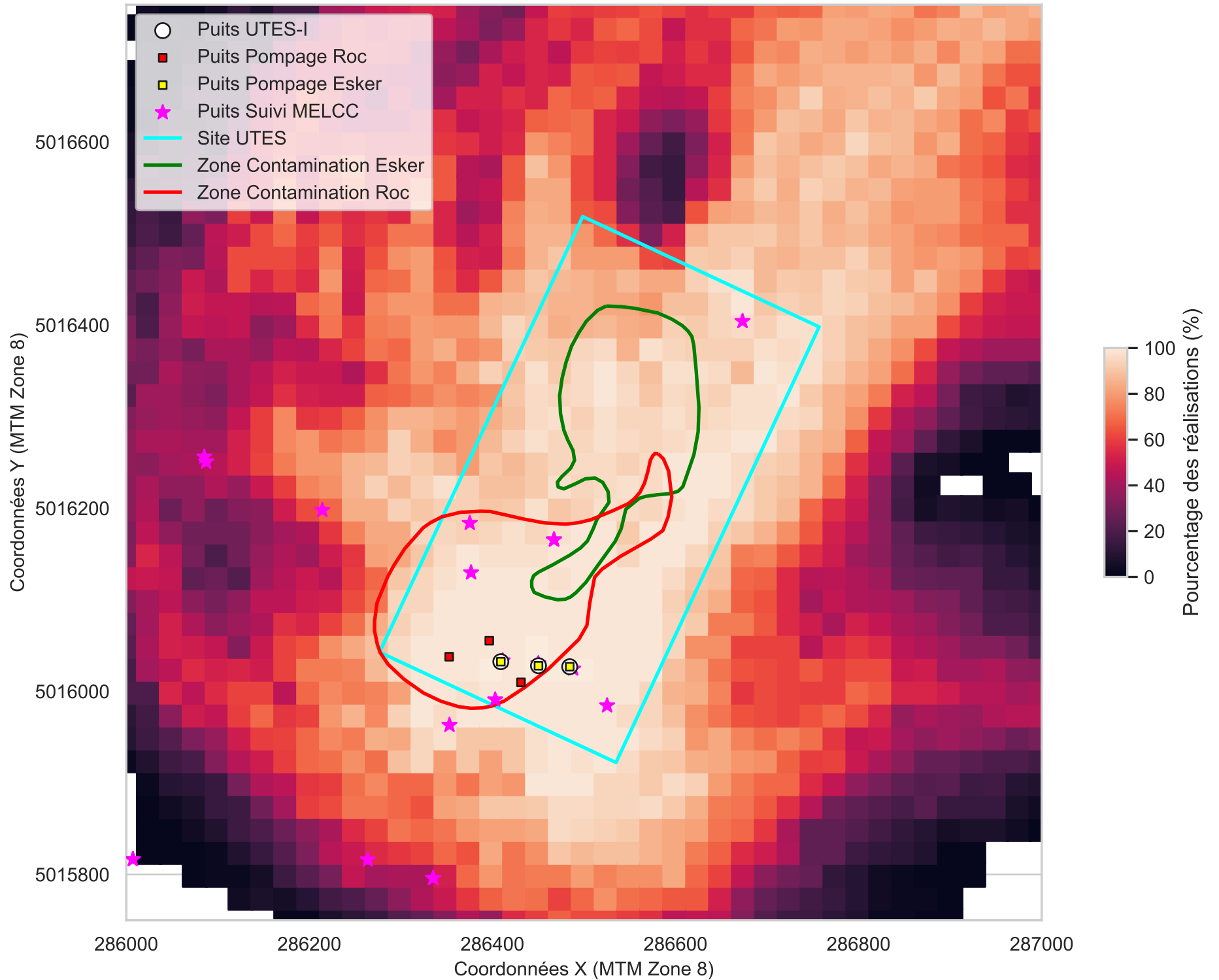


Figure A-30
Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

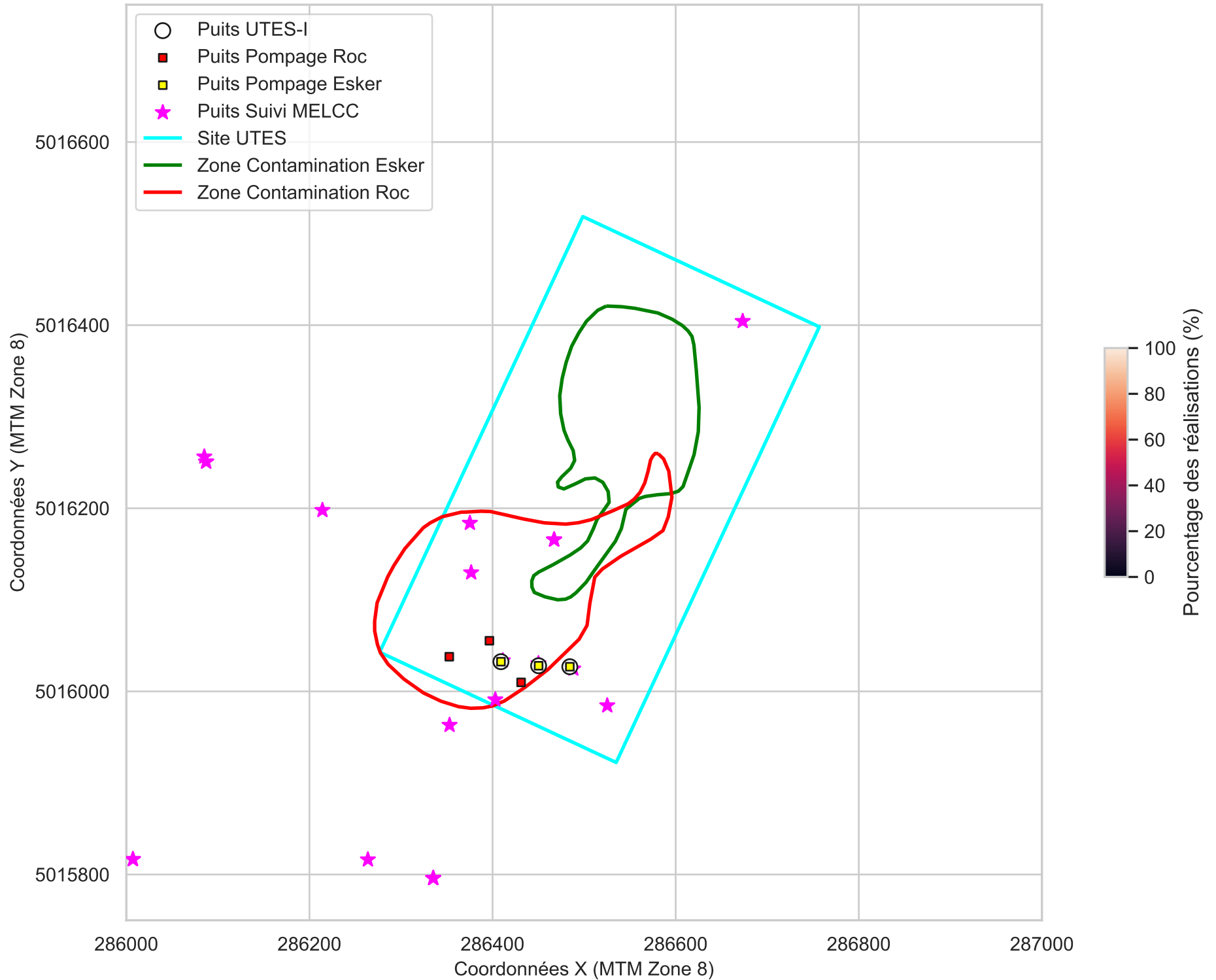


Figure A-31

Scénario A_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

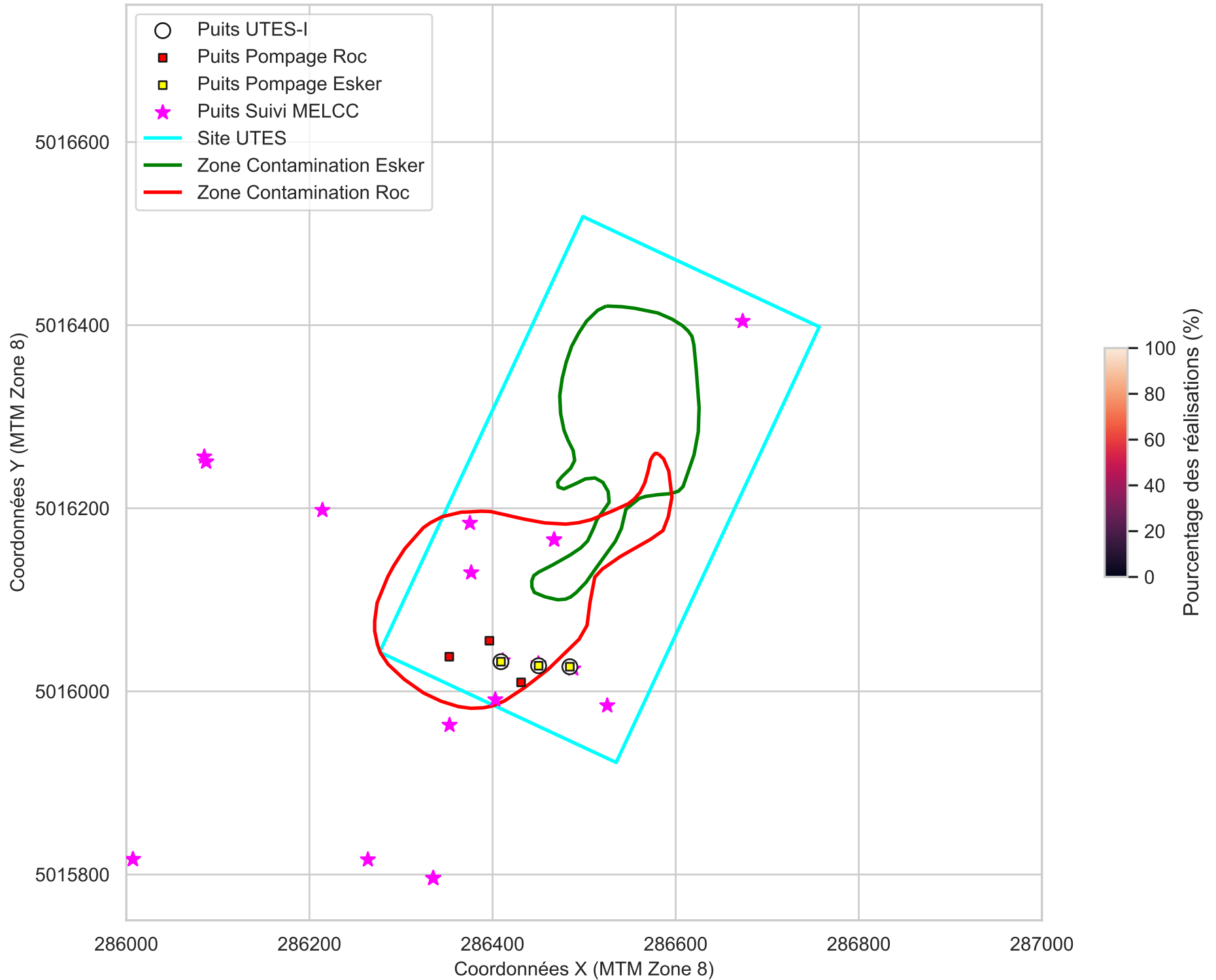


Figure A-32
Scénario A_S3R3 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

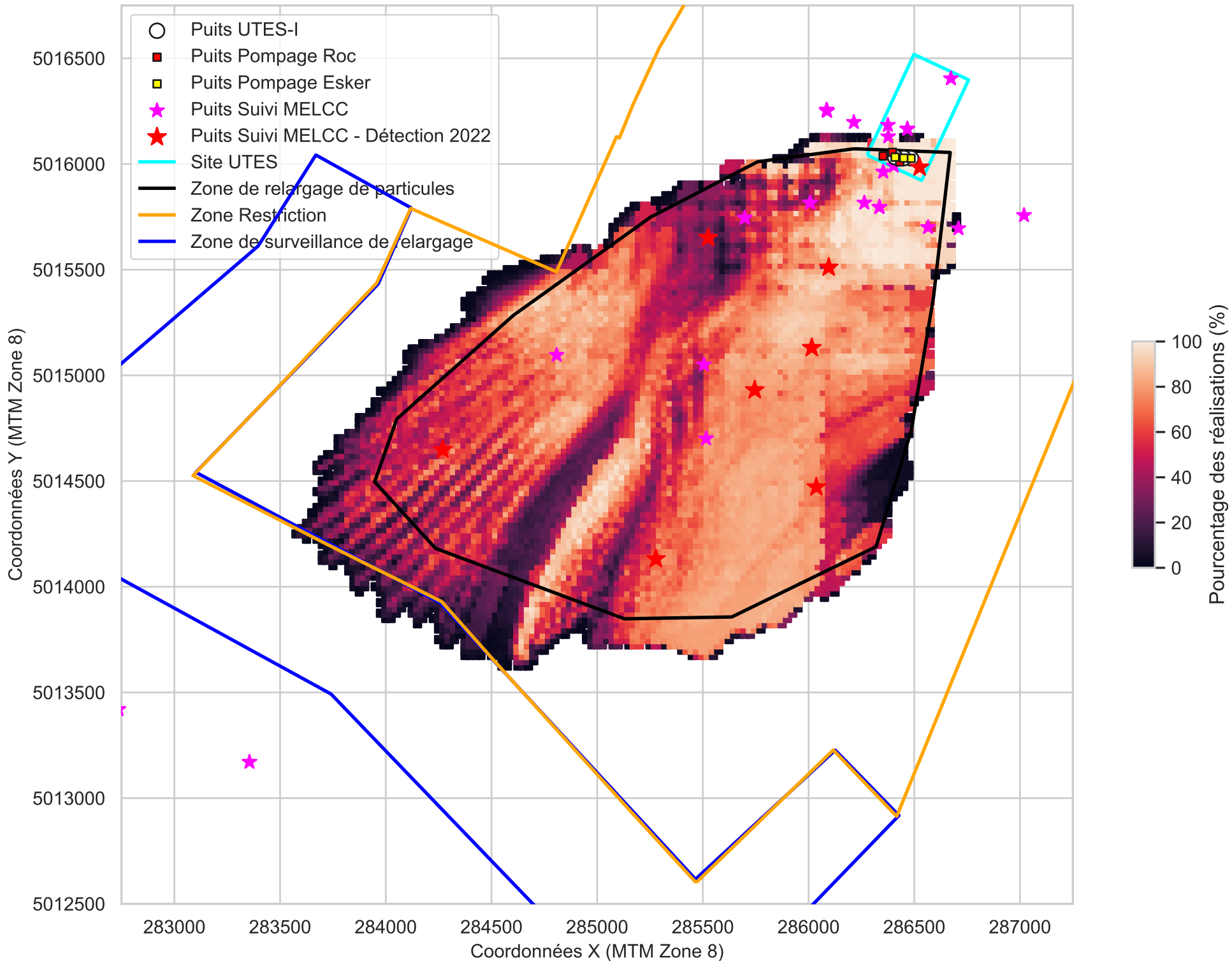
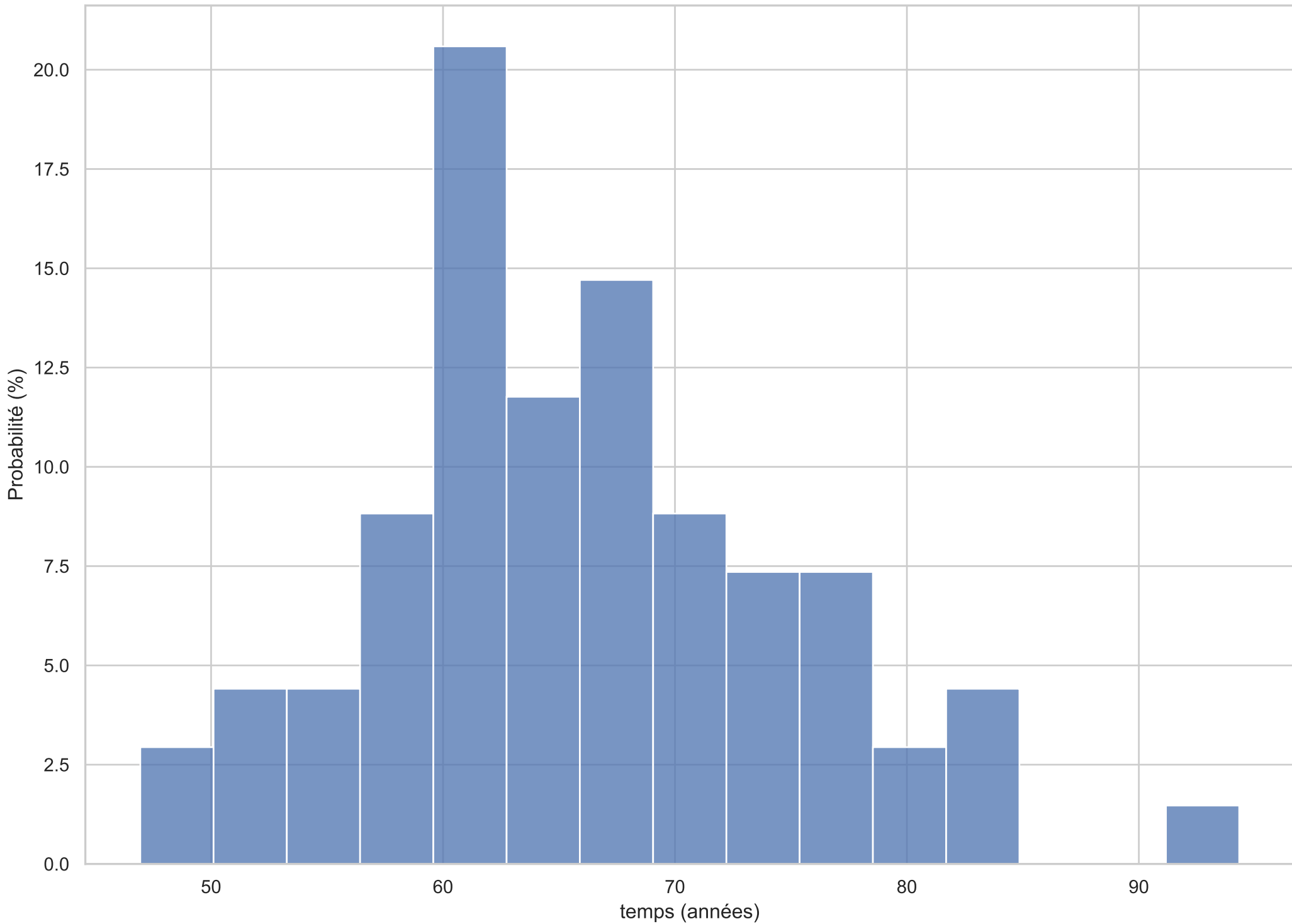


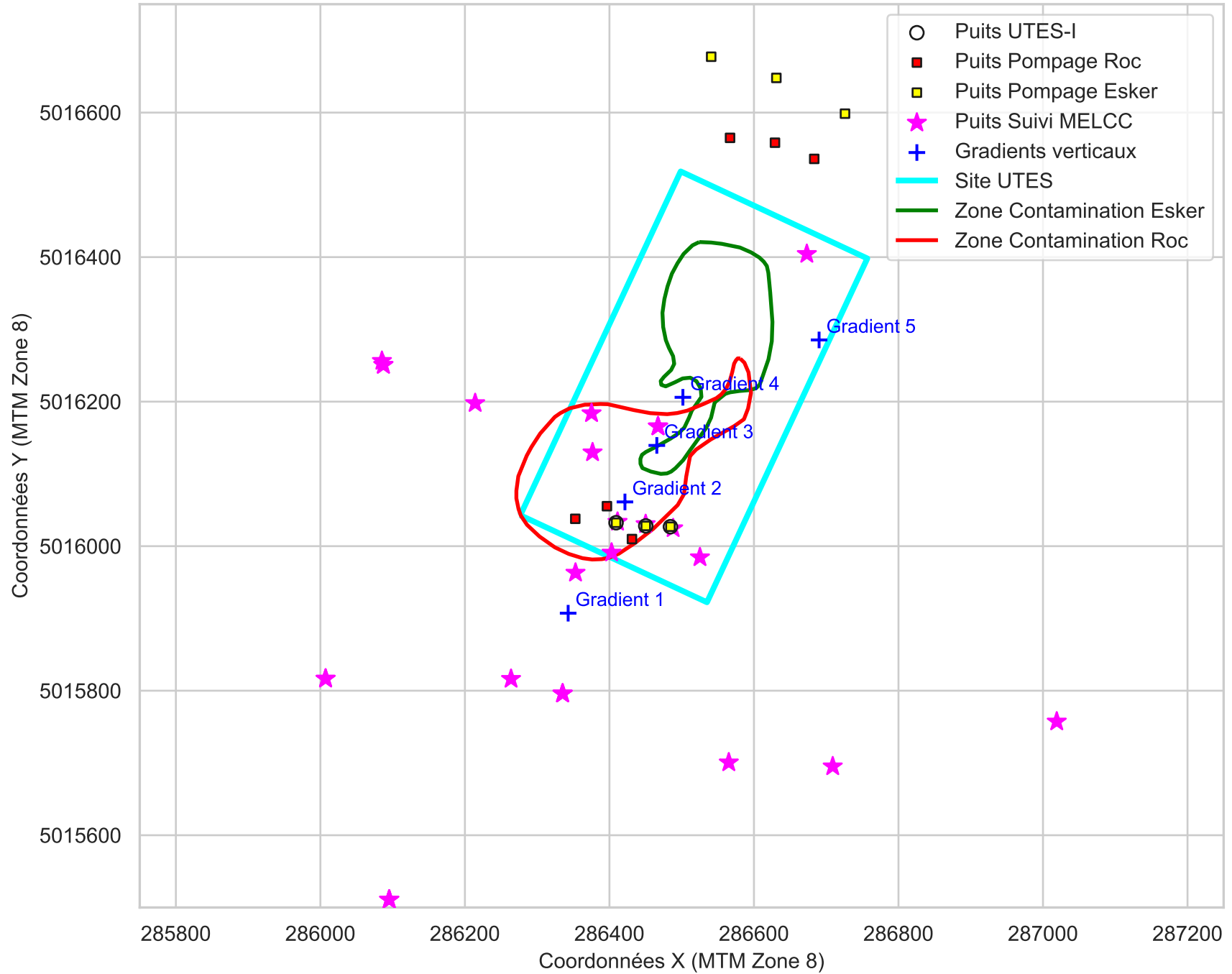
Figure A-33
Scénario A_S3R3 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Figures en support de l'évaluation des critères de décision

Scénario B

Figure B-1
Scénario B



Scénario B - Schéma Kxy moyen

Figure B-2
Scénario B - Gradients verticaux en fonction de la réalisation du schéma Kxy moyen

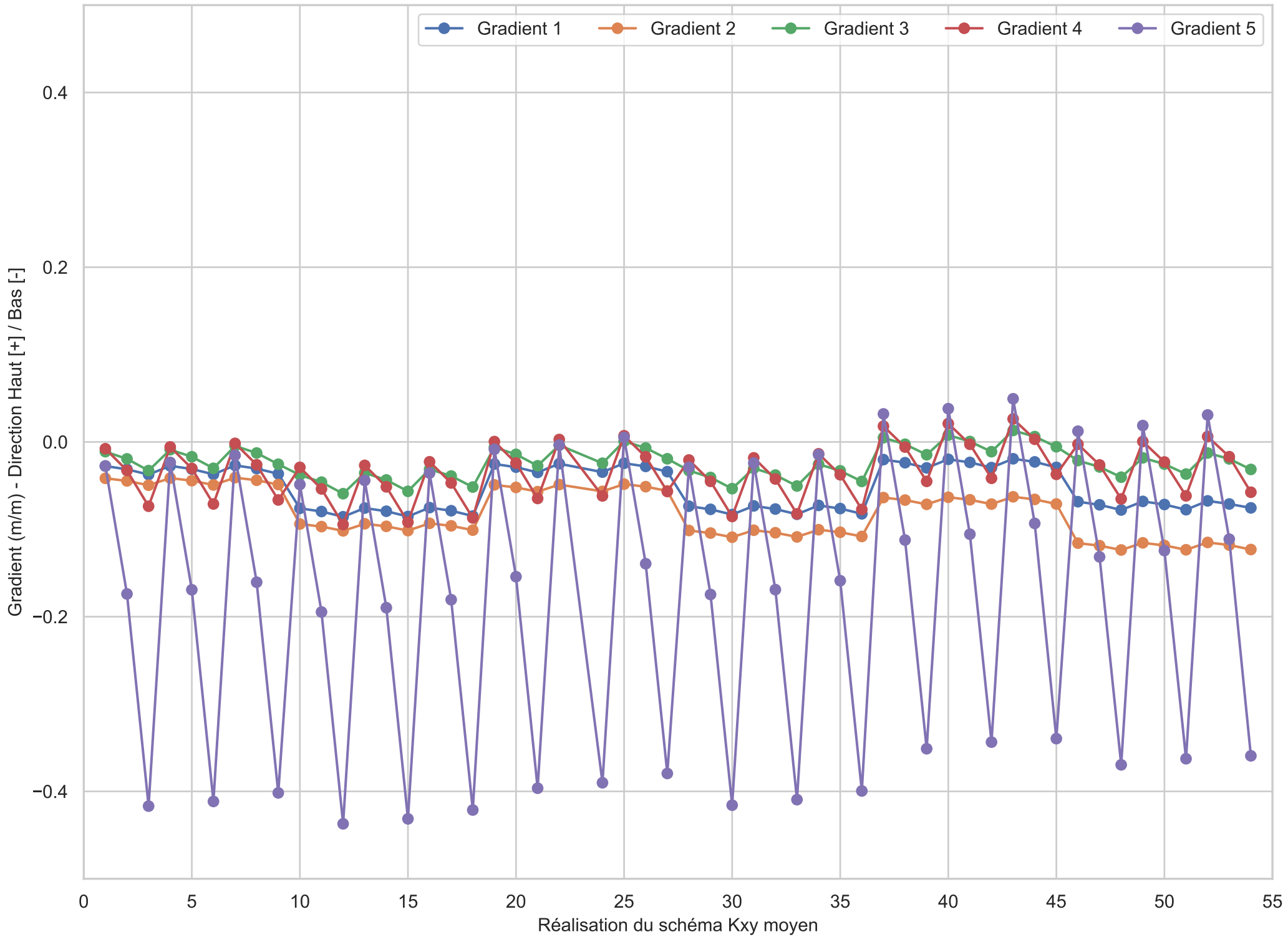
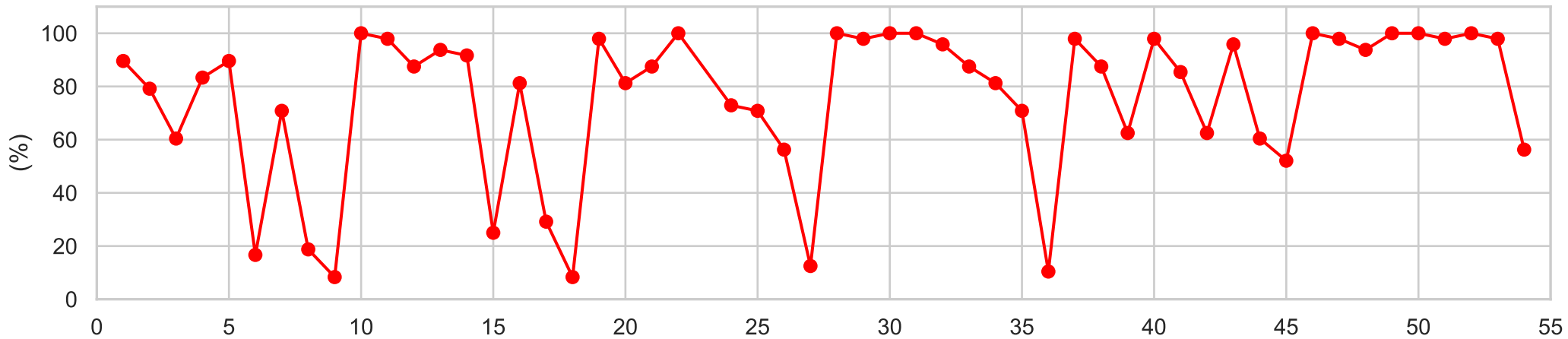
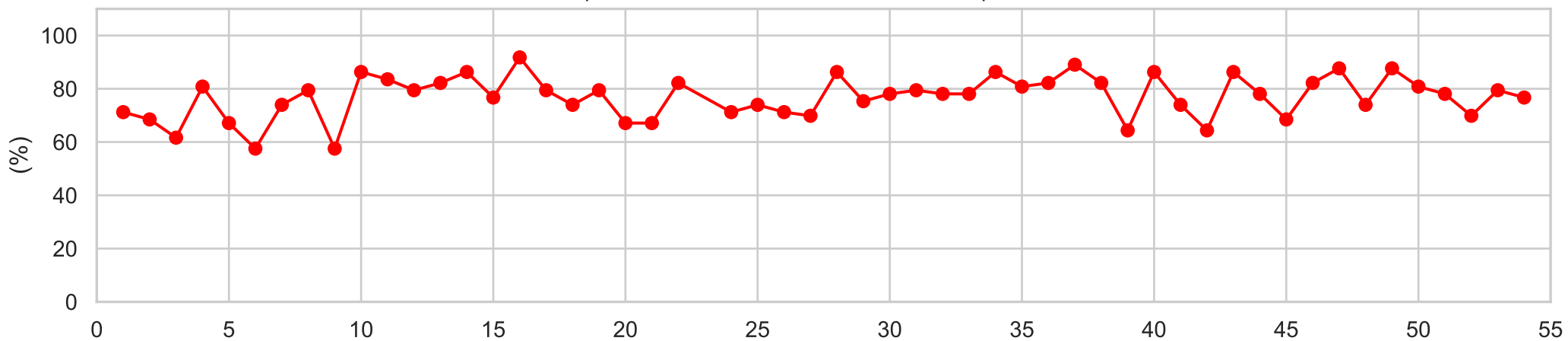


Figure B-3

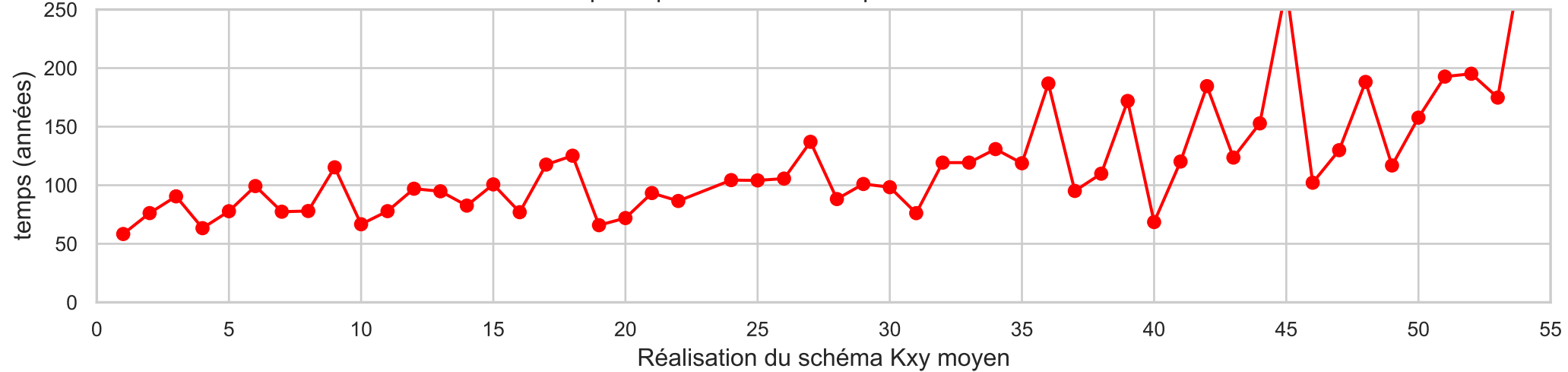
Scénario B - Proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années



Scénario B - Proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 ans



Scénario B - Temps de parcours minimum pour atteindre la zone de restriction



Réalisation du schéma Kxy moyen

Scénario B - Schéma Probabiliste

Figure B-4
Scénario B - Gradients verticaux entre Roc et Esker

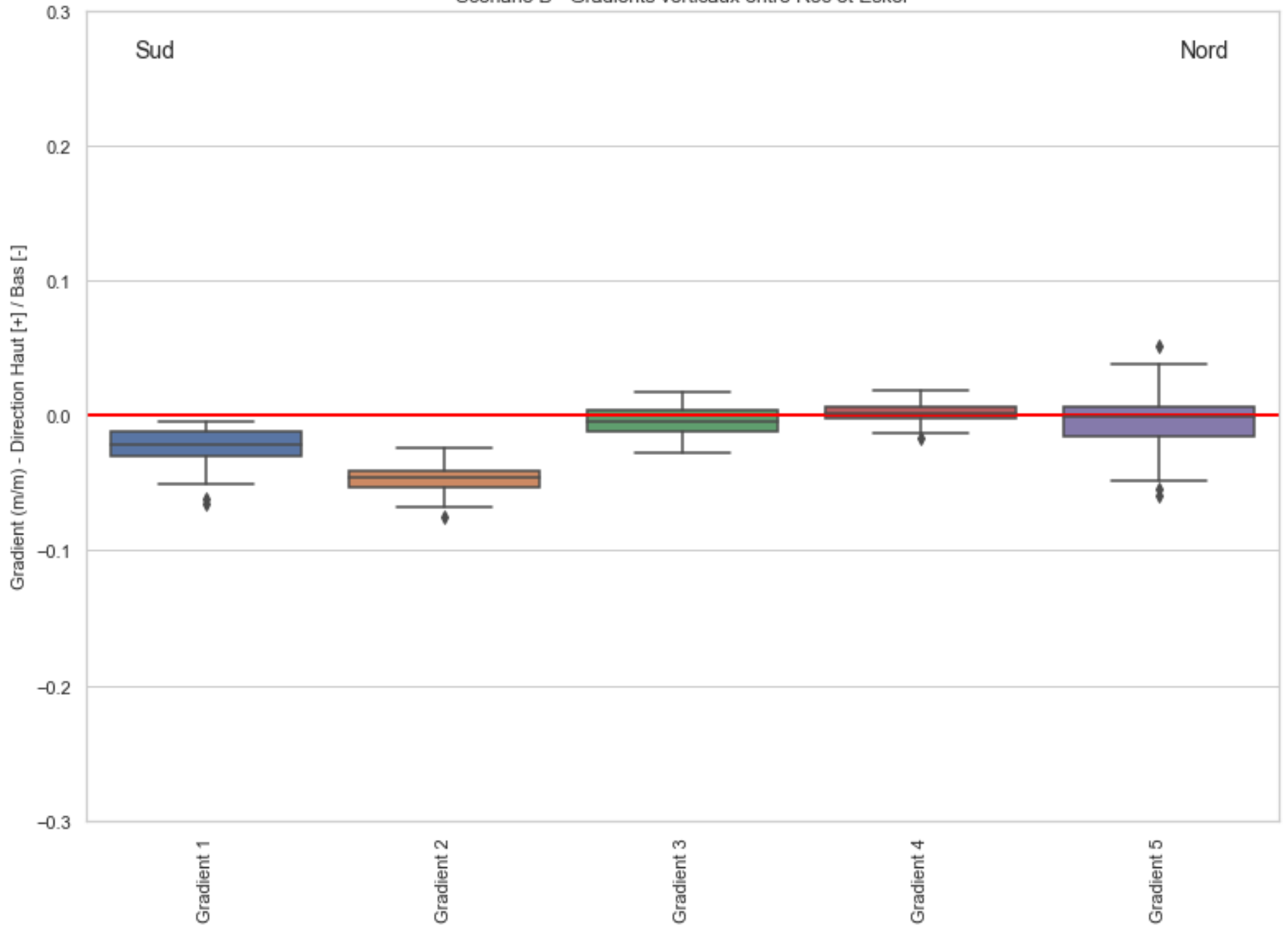


Figure B-5

Scénario B - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

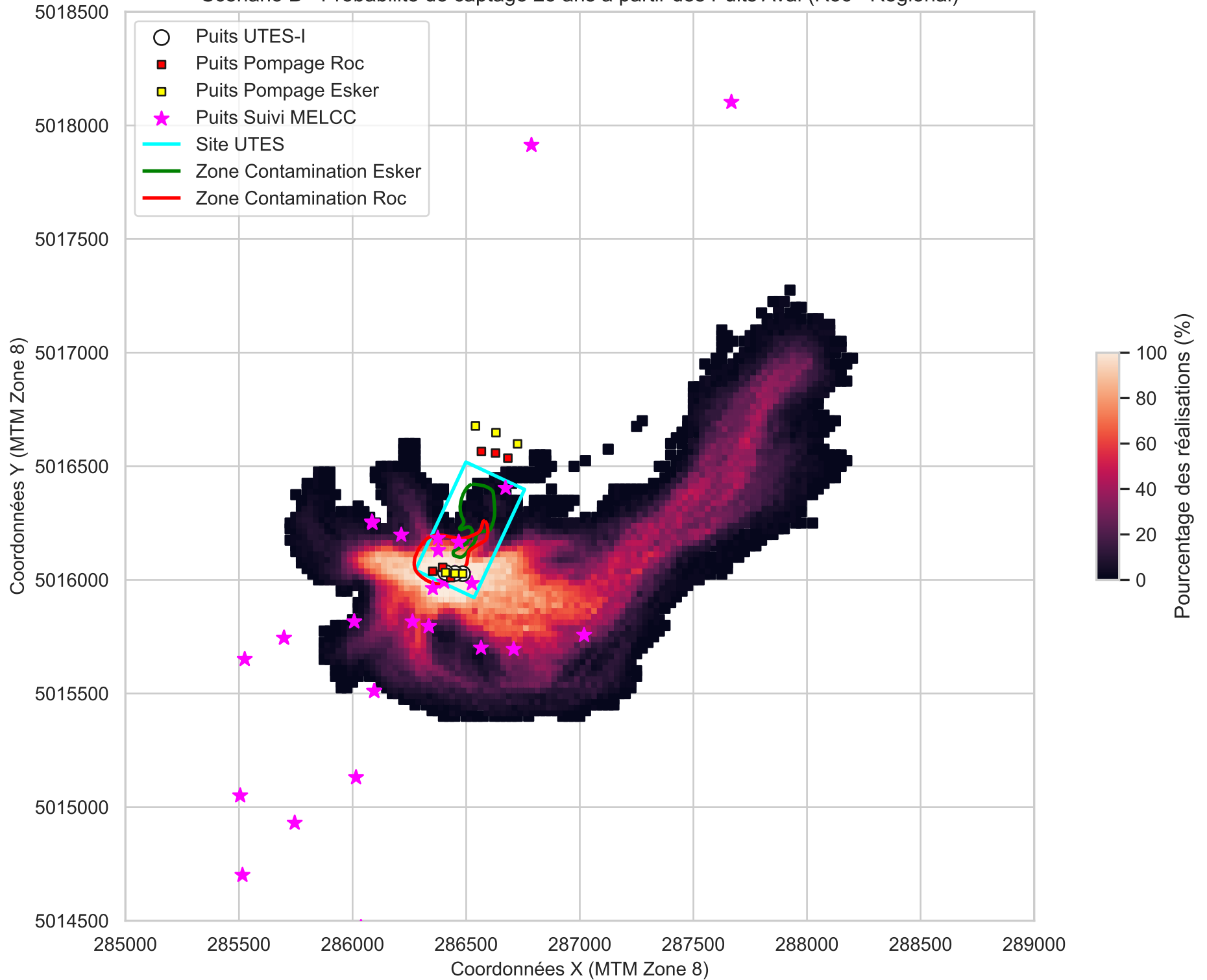


Figure B-6

Scénario B - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

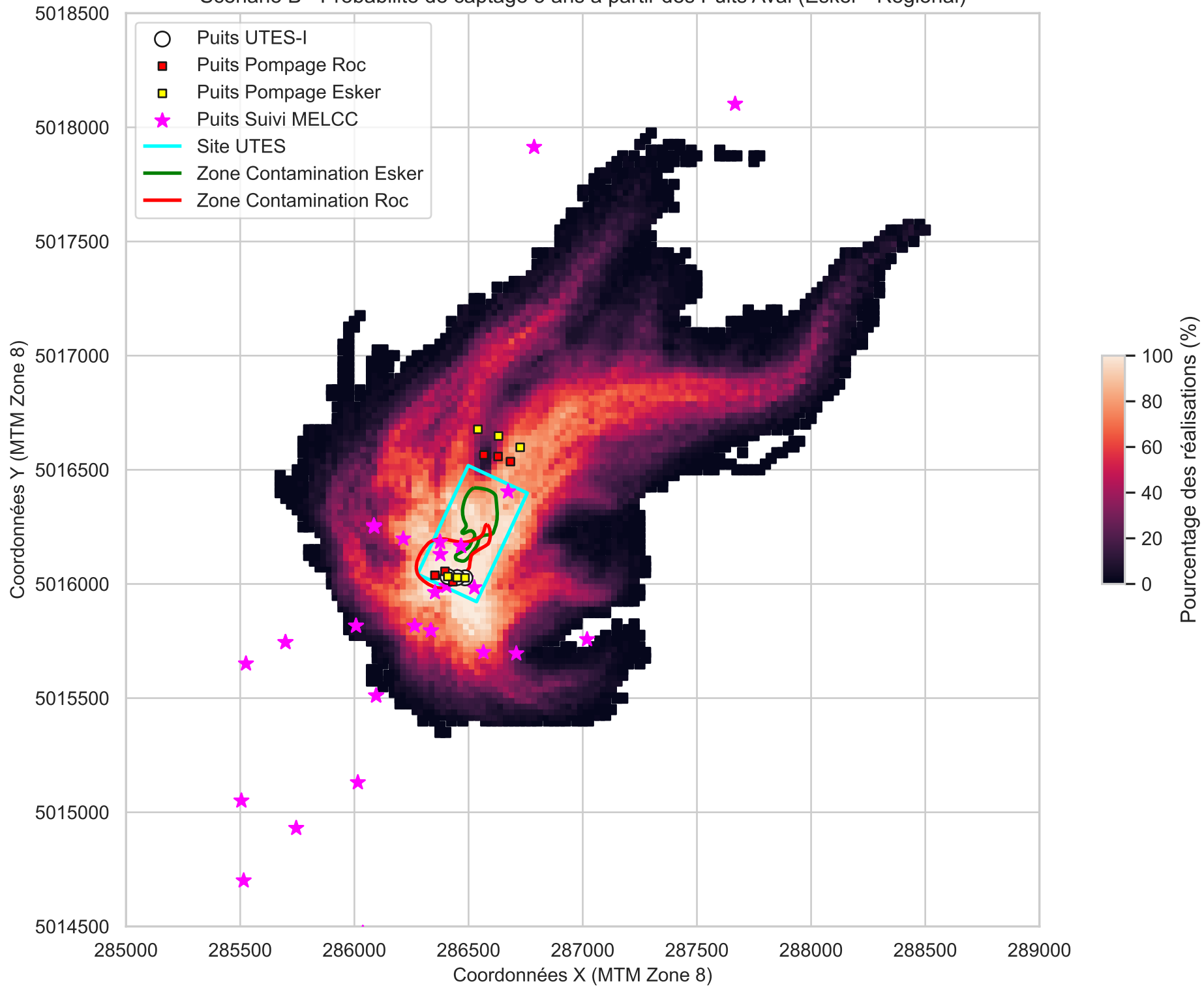


Figure B-7

Scénario B - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

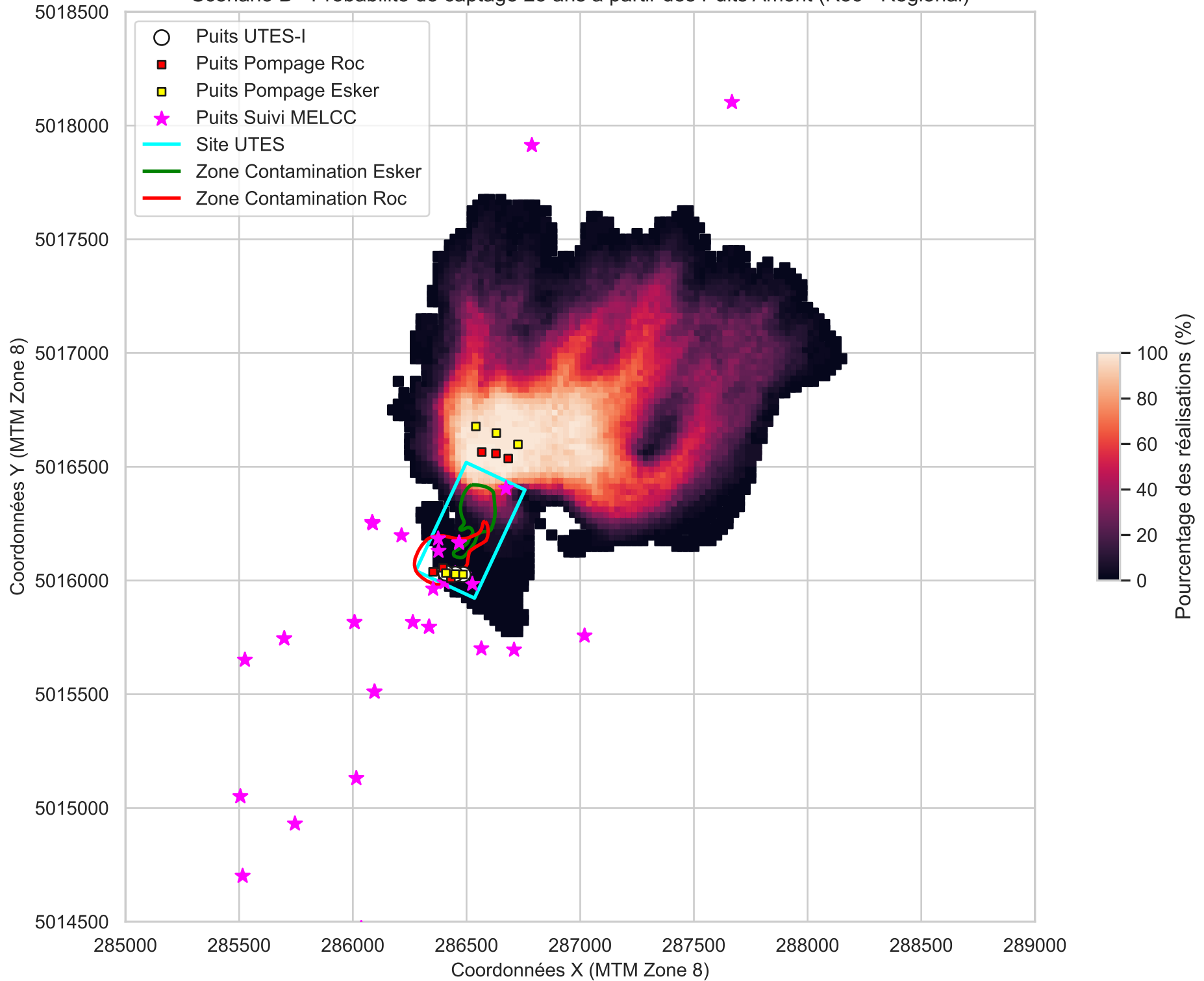


Figure B-8

Scénario B - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

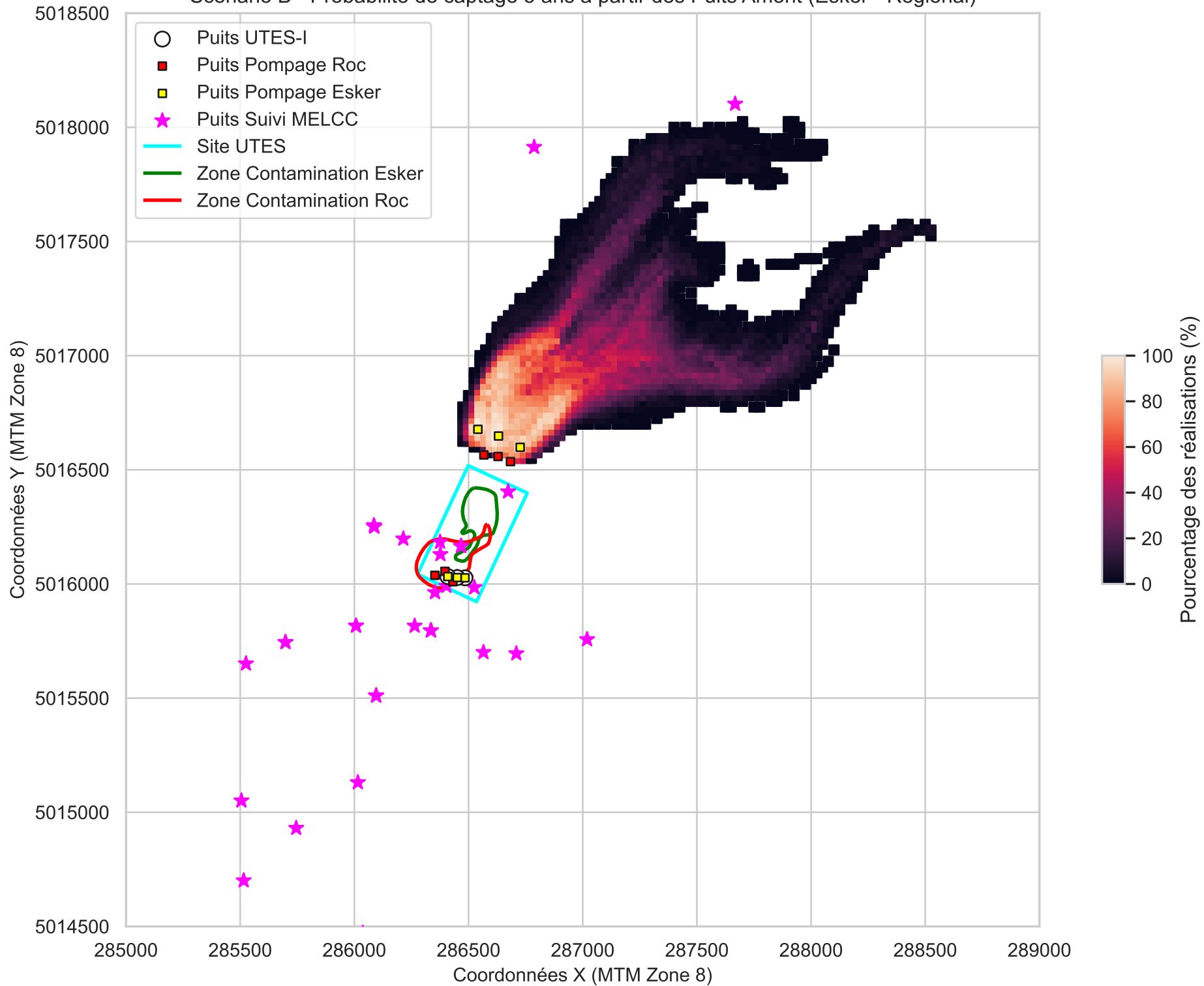


Figure B-9
Scénario B - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

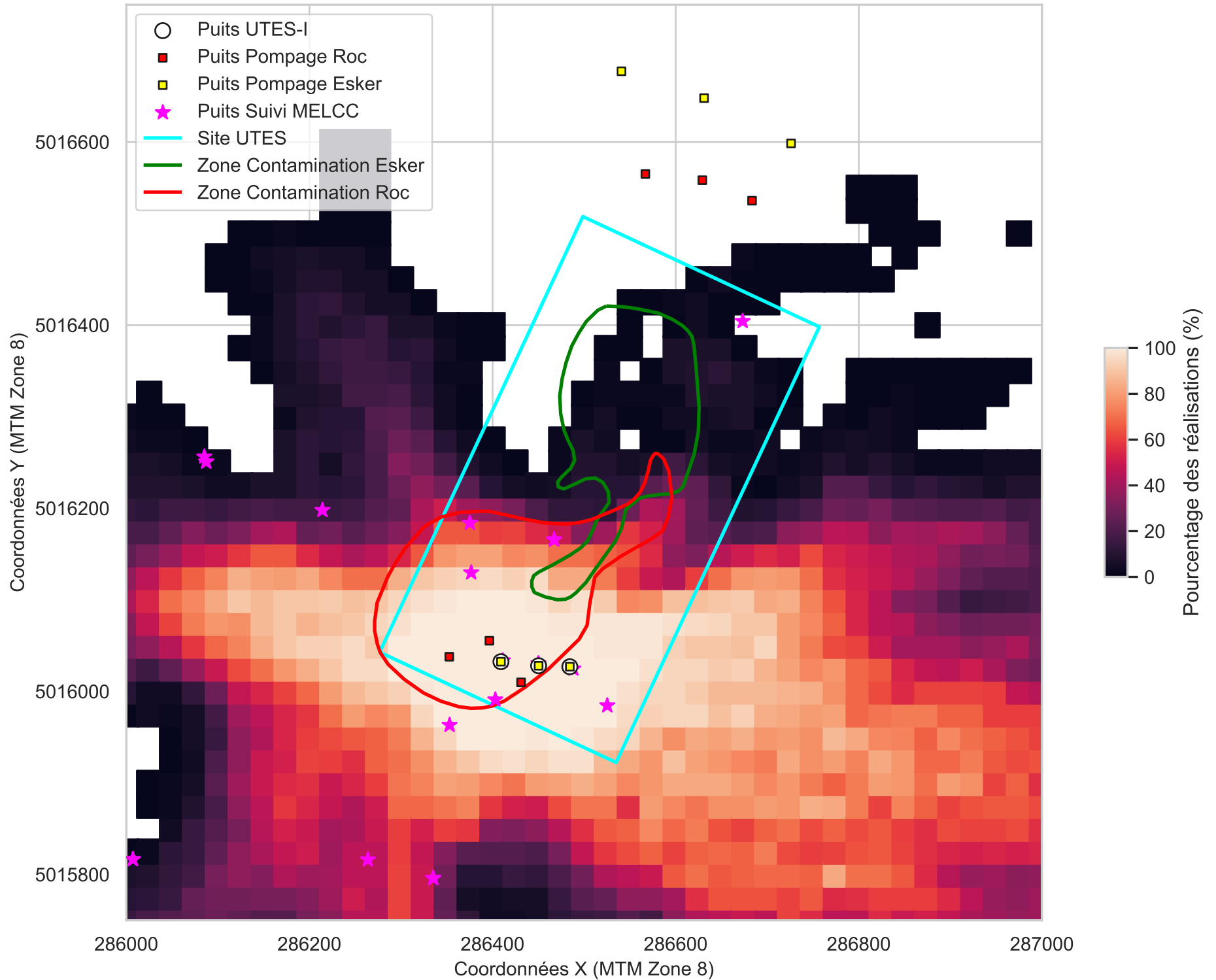


Figure B-10
Scénario B - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

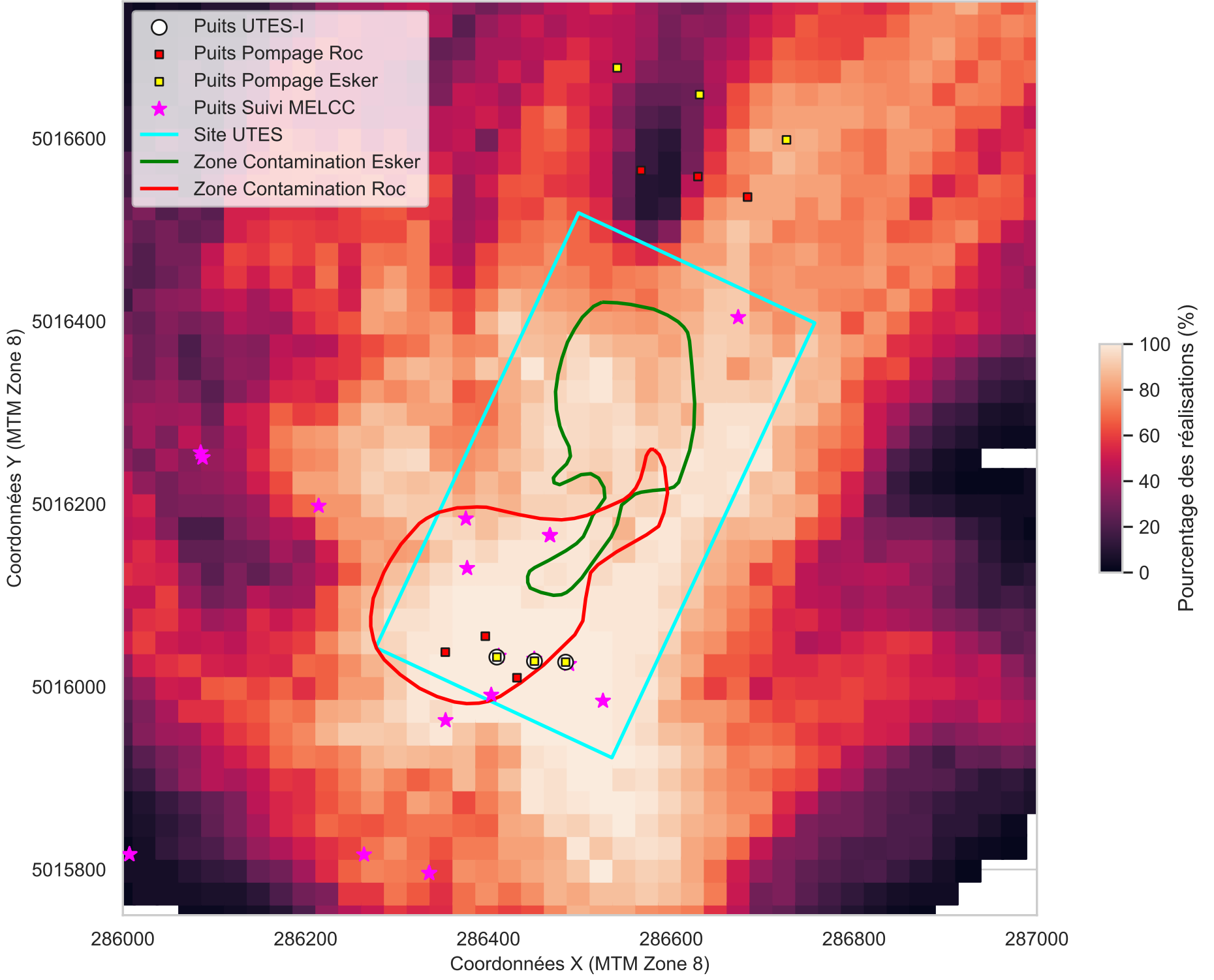


Figure B-11

Scénario B - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

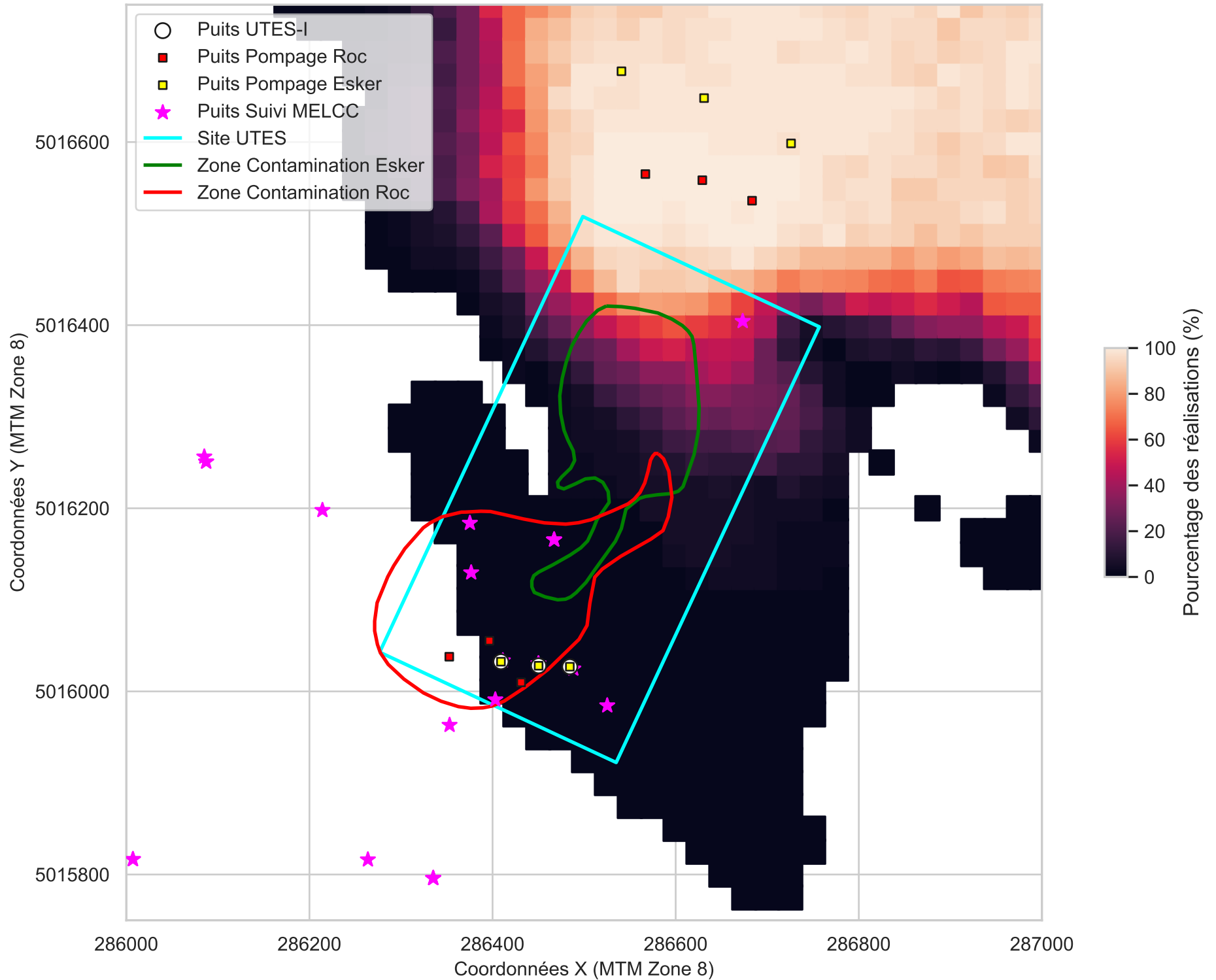


Figure B-12

Scénario B - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

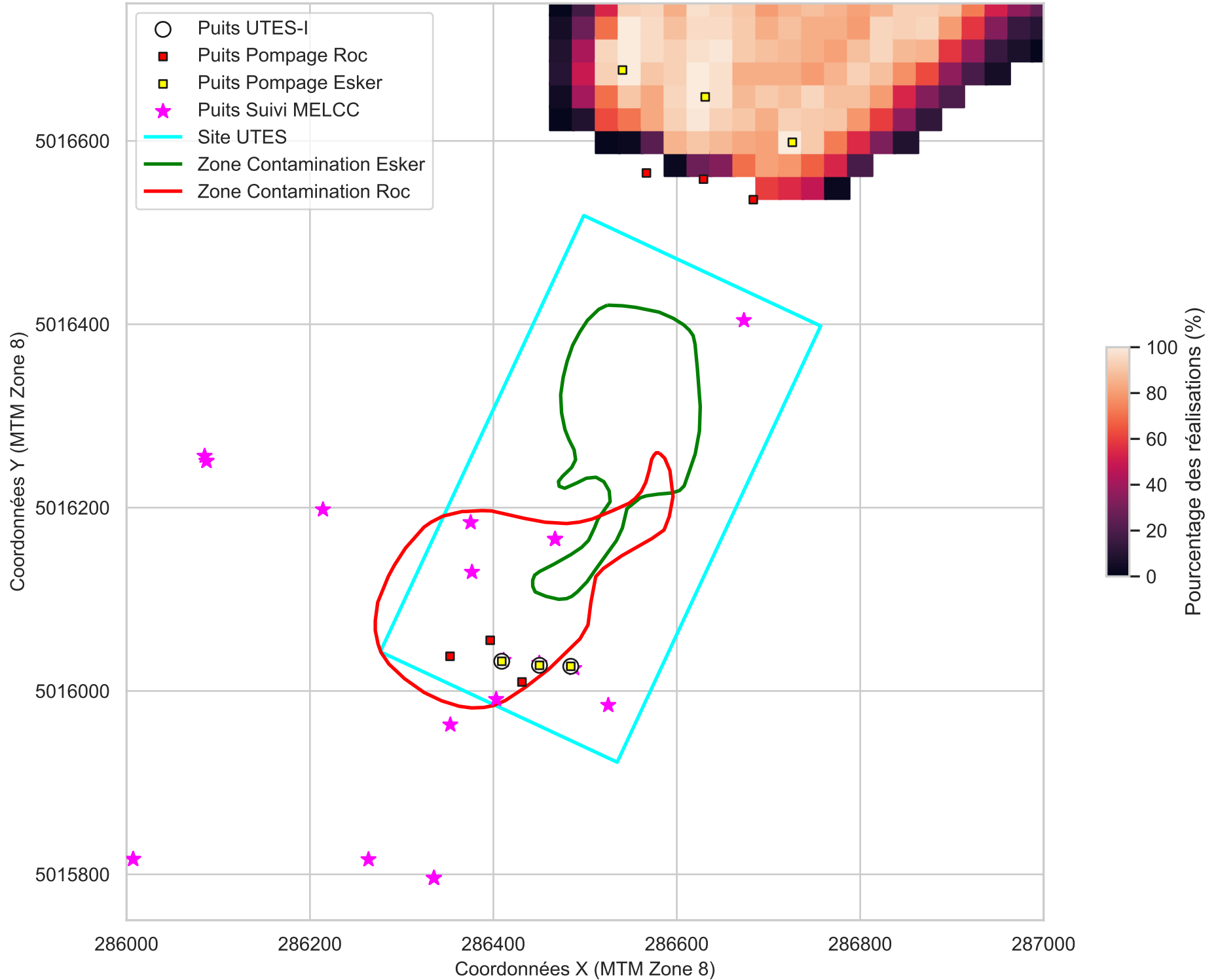


Figure B-13
Scénario B - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

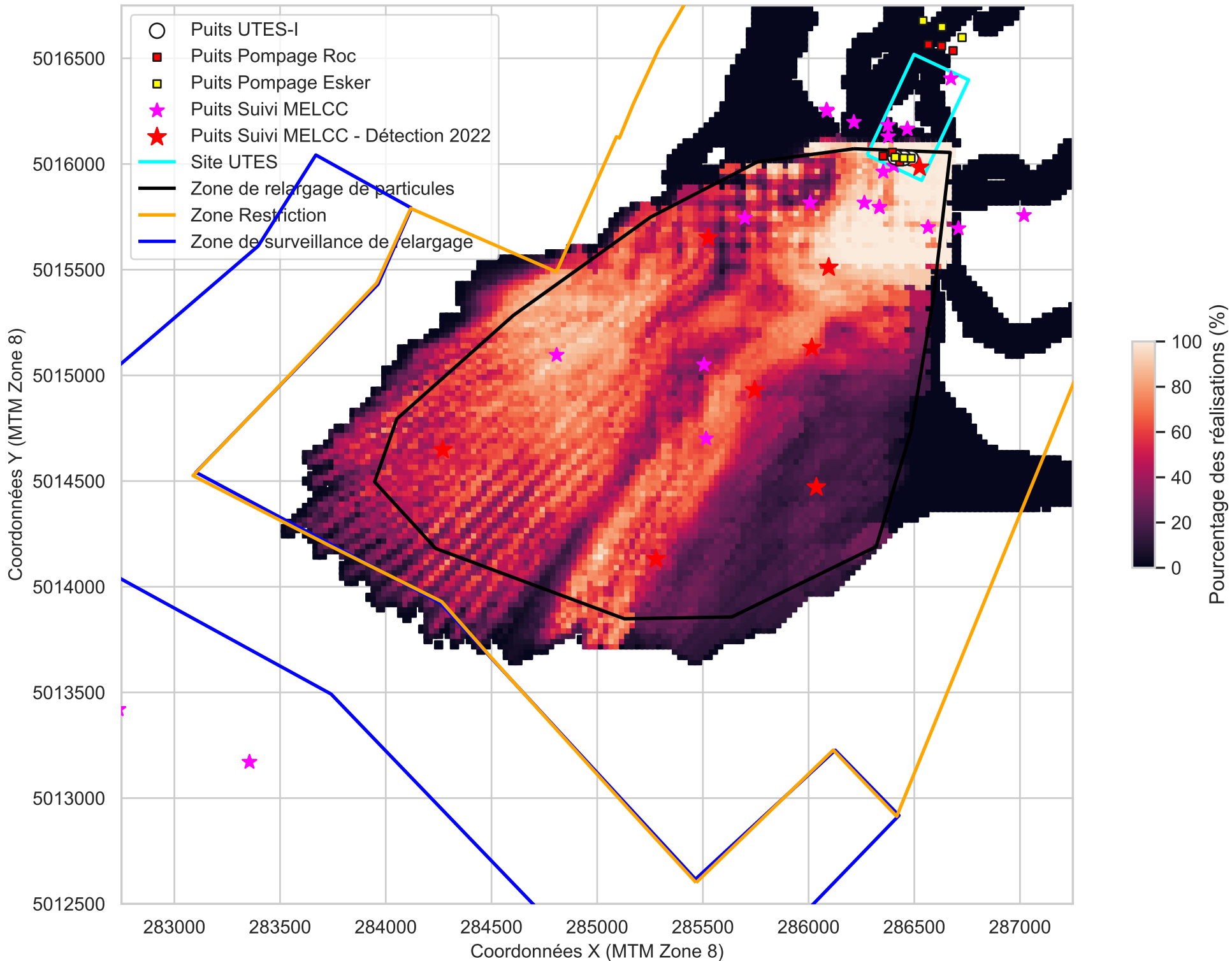
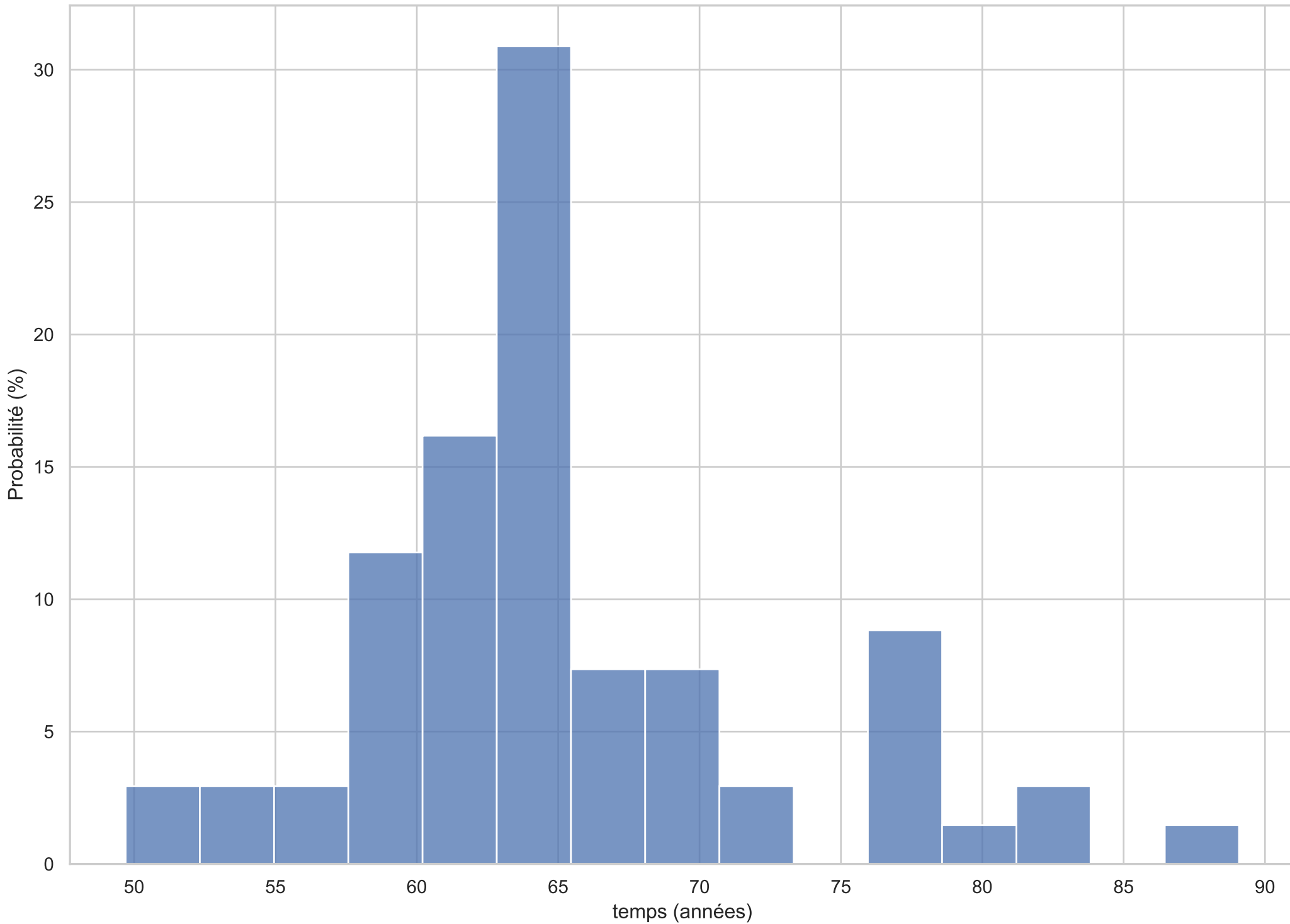


Figure B-14
Scénario B - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Scénario B - Schéma Arrêt

Figure B-15
Scénario B - Variation des gradients verticaux en fonction du temps après arrêt du pompage

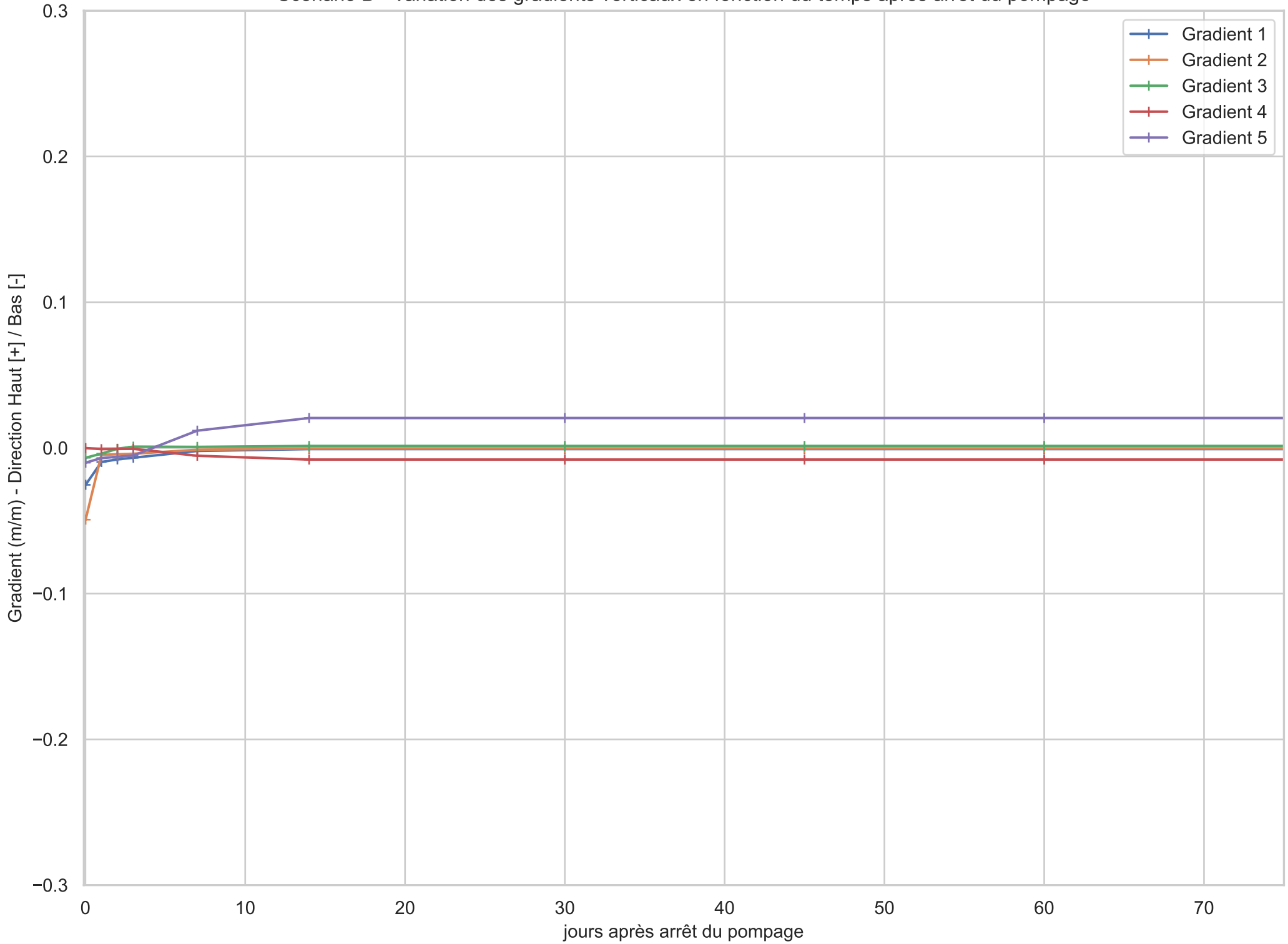


Figure B-16(1)

Scénario B - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

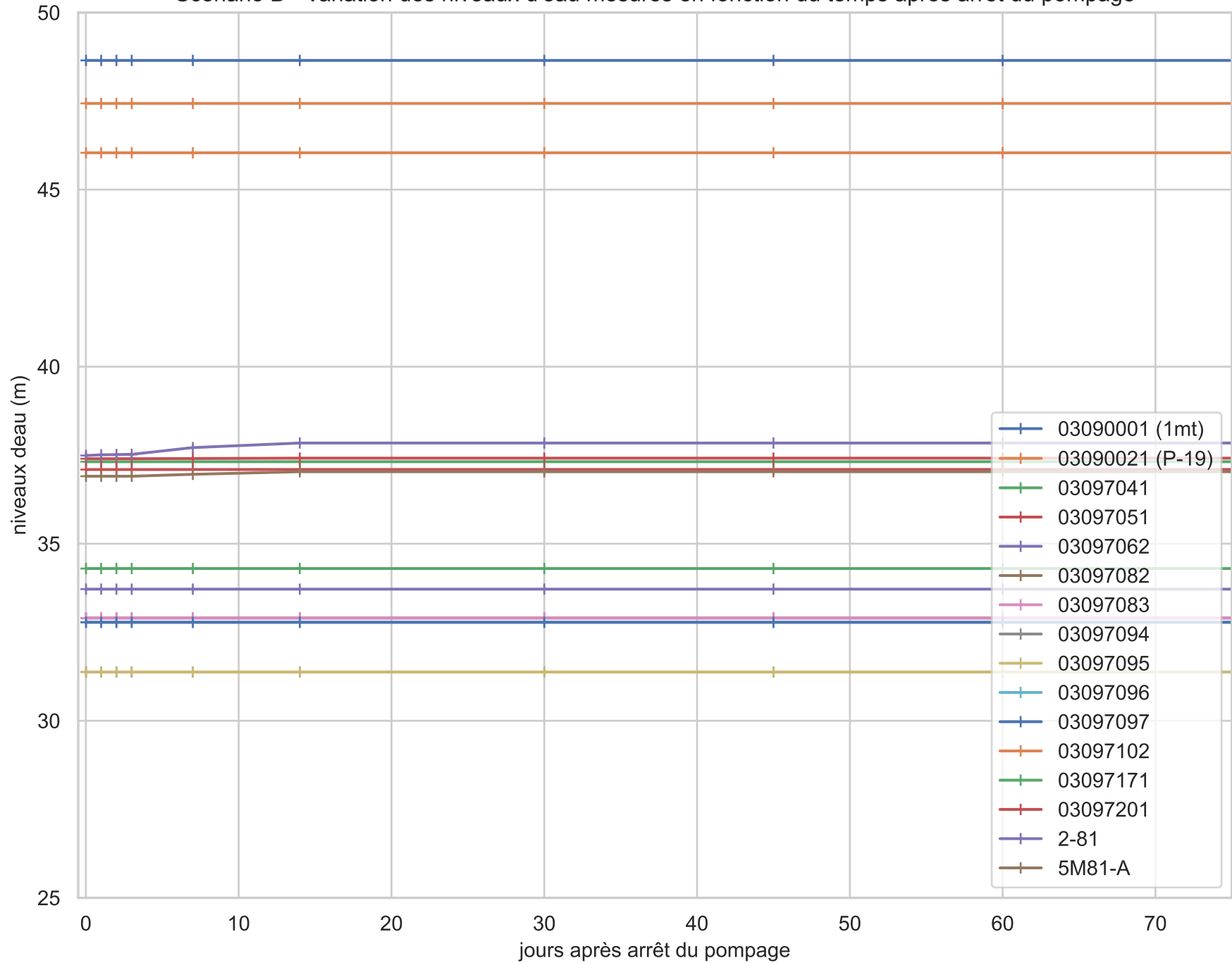


Figure B-16(3)

Scénario B - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

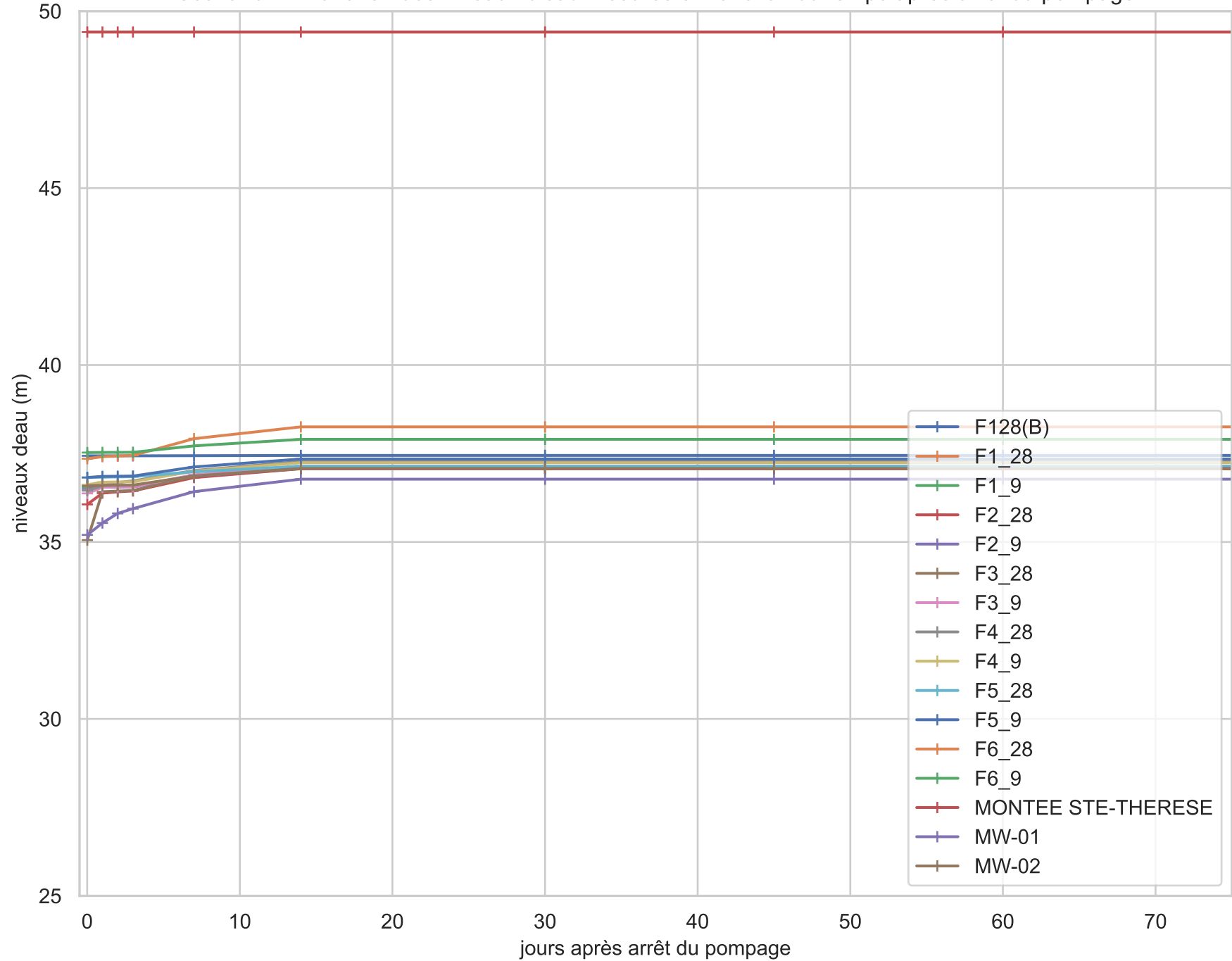
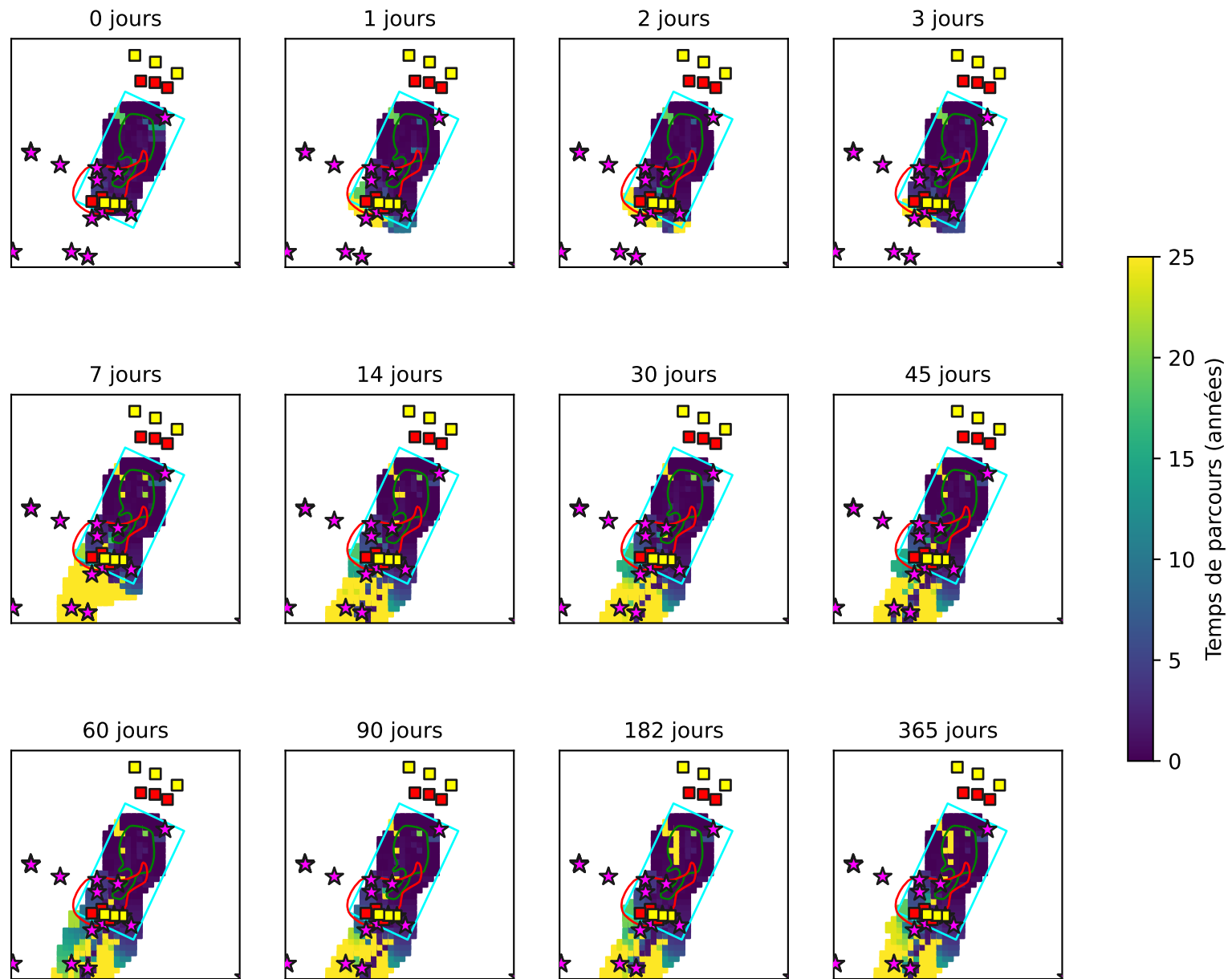


Figure B-17
Scenario B - Migration de la zone contaminée de l'esker après arrêt du pompage



Scénario B - Schéma Nord

Figure B-18
Scénario B - Variation des gradients verticaux en fonction de la réalisation

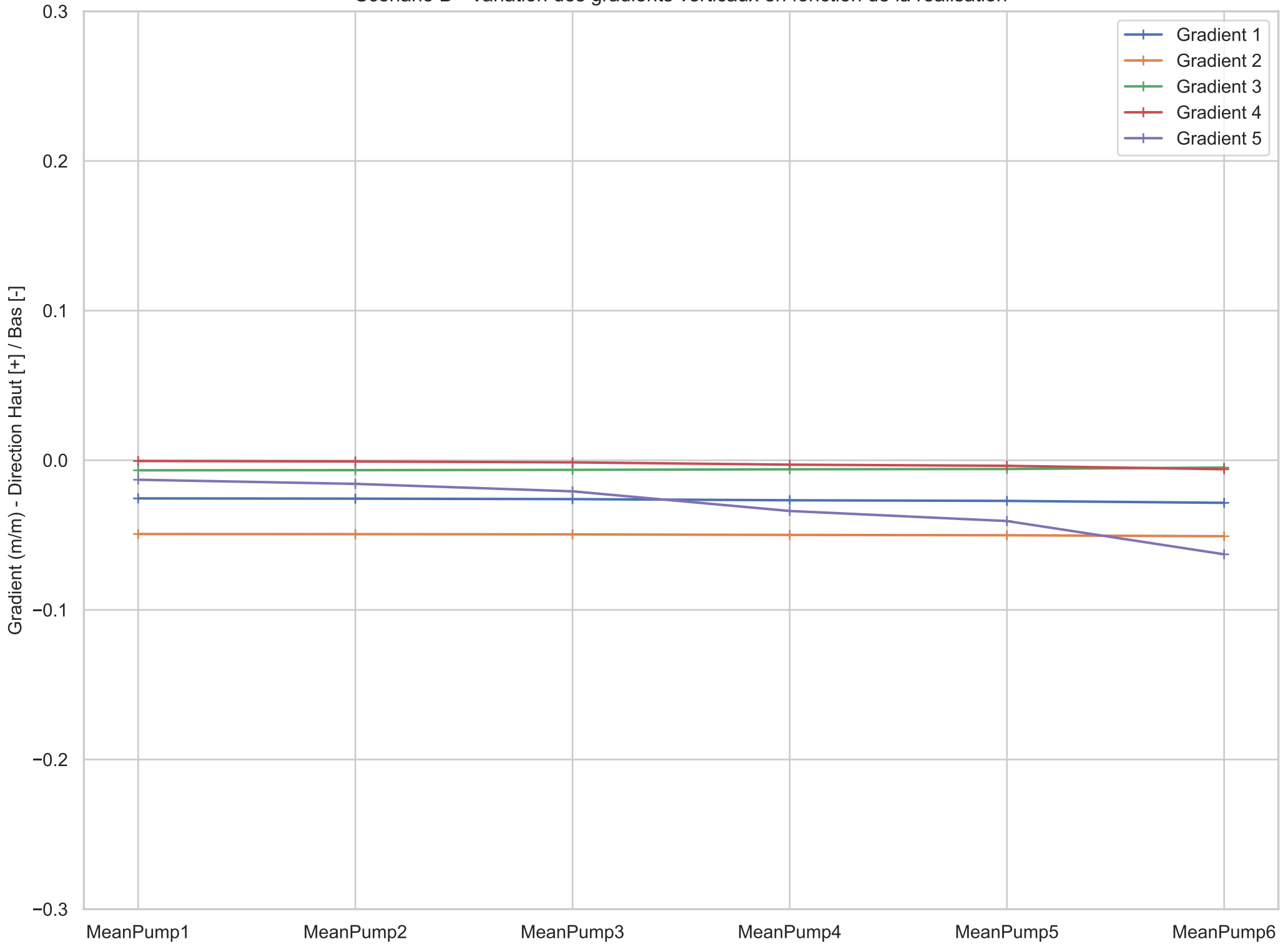


Figure B-19(1)
 Scénario B - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

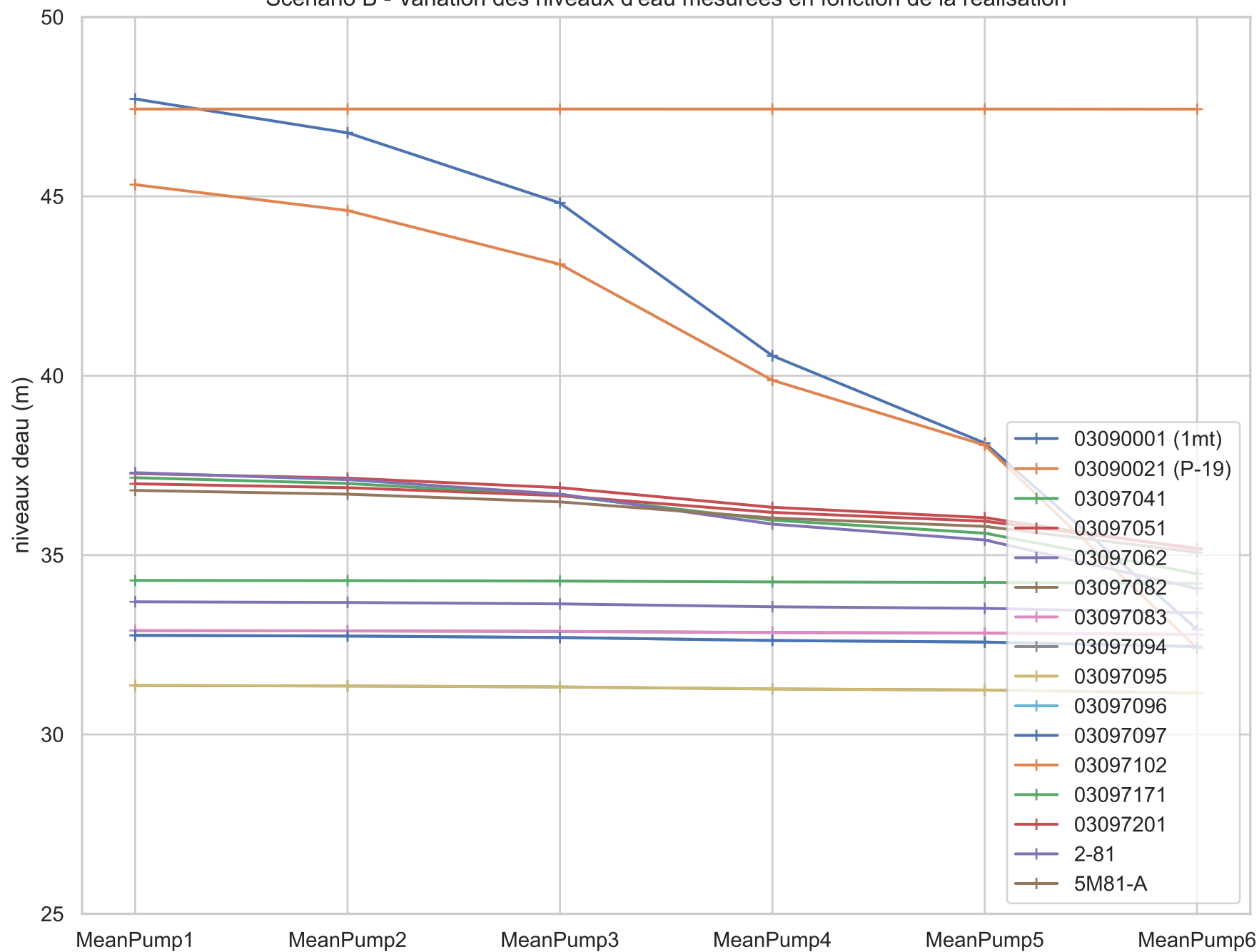


Figure B-19(2)
 Scénario B - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

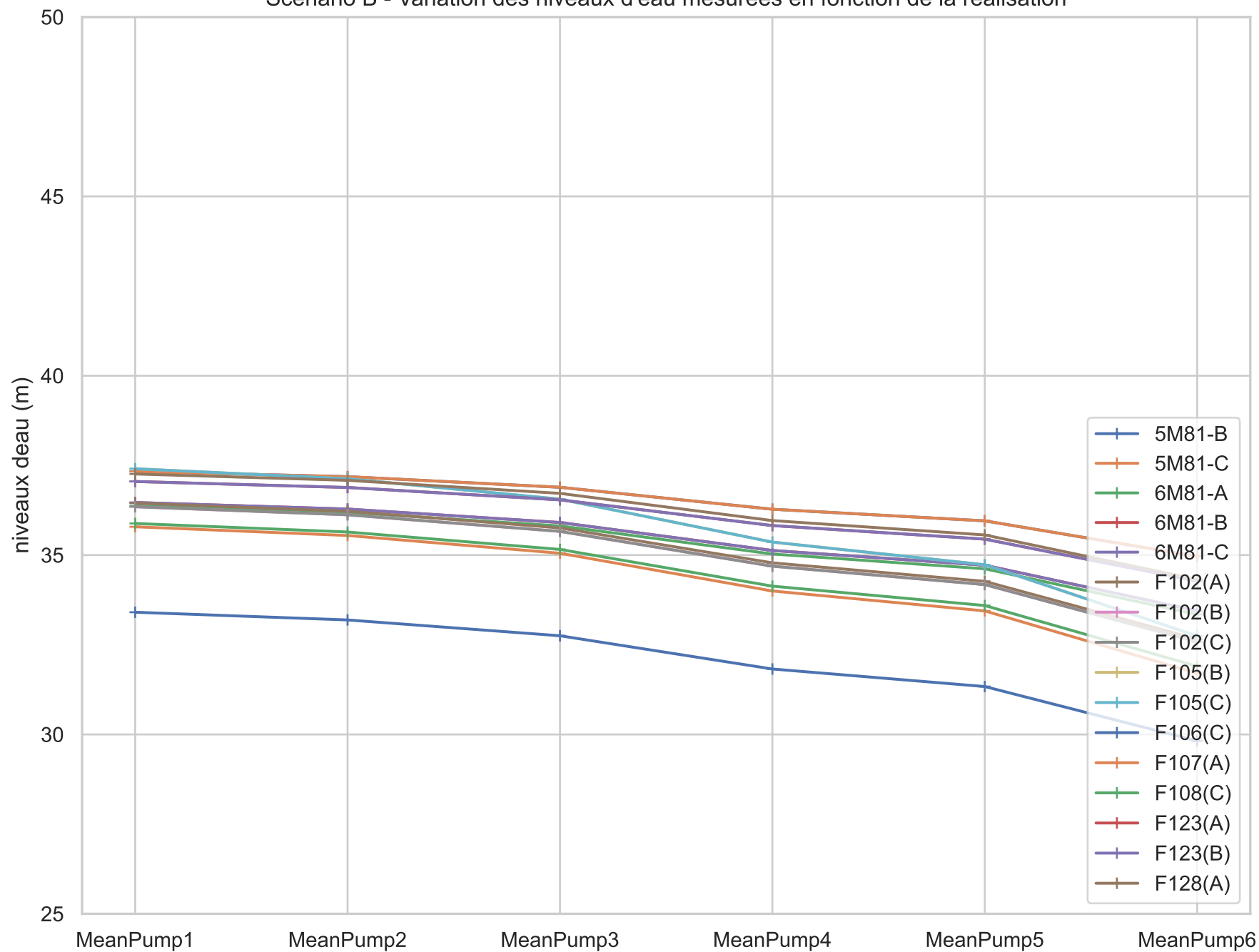


Figure B-19(3)
 Scénario B - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

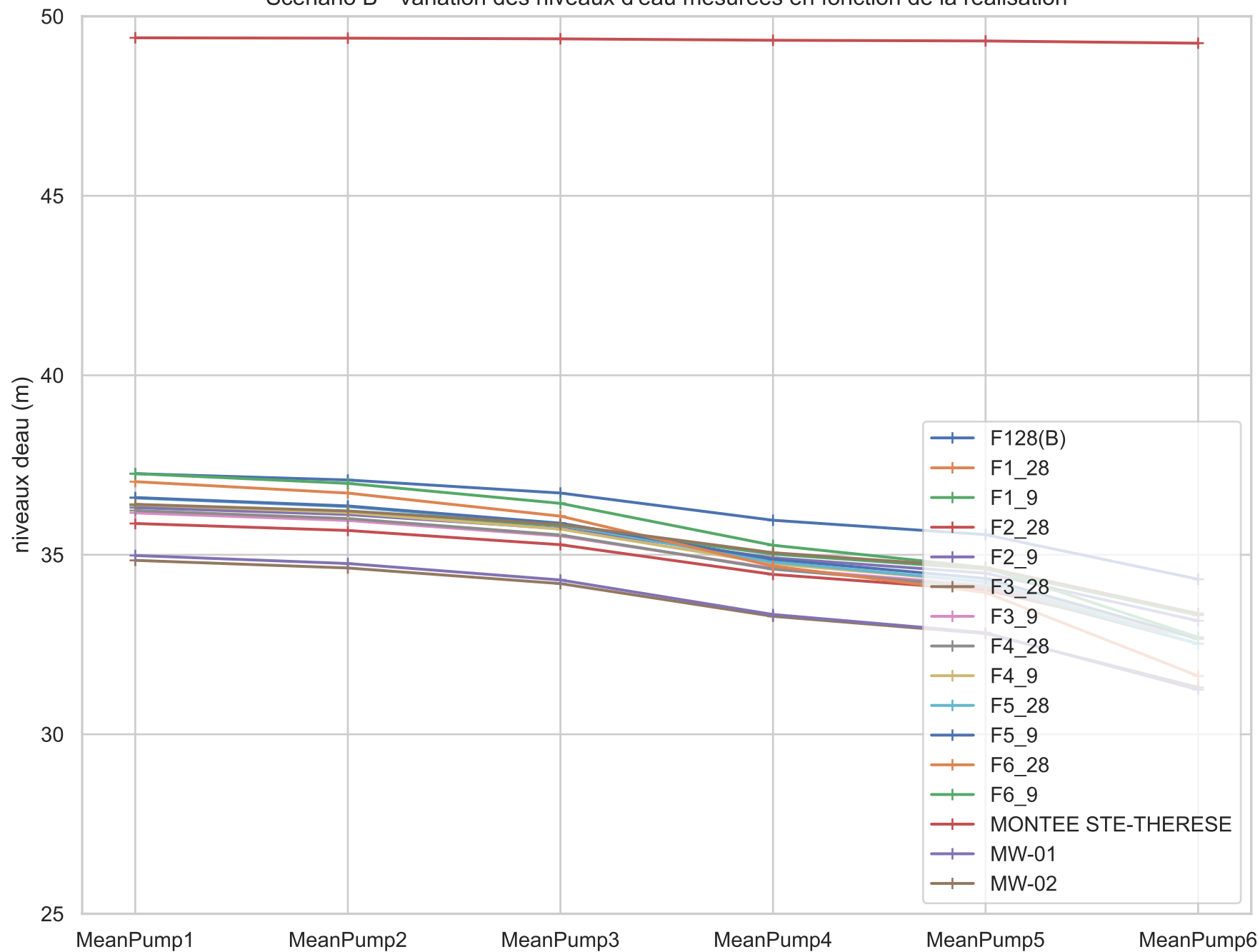


Figure B-19(4)
 Scénario B - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

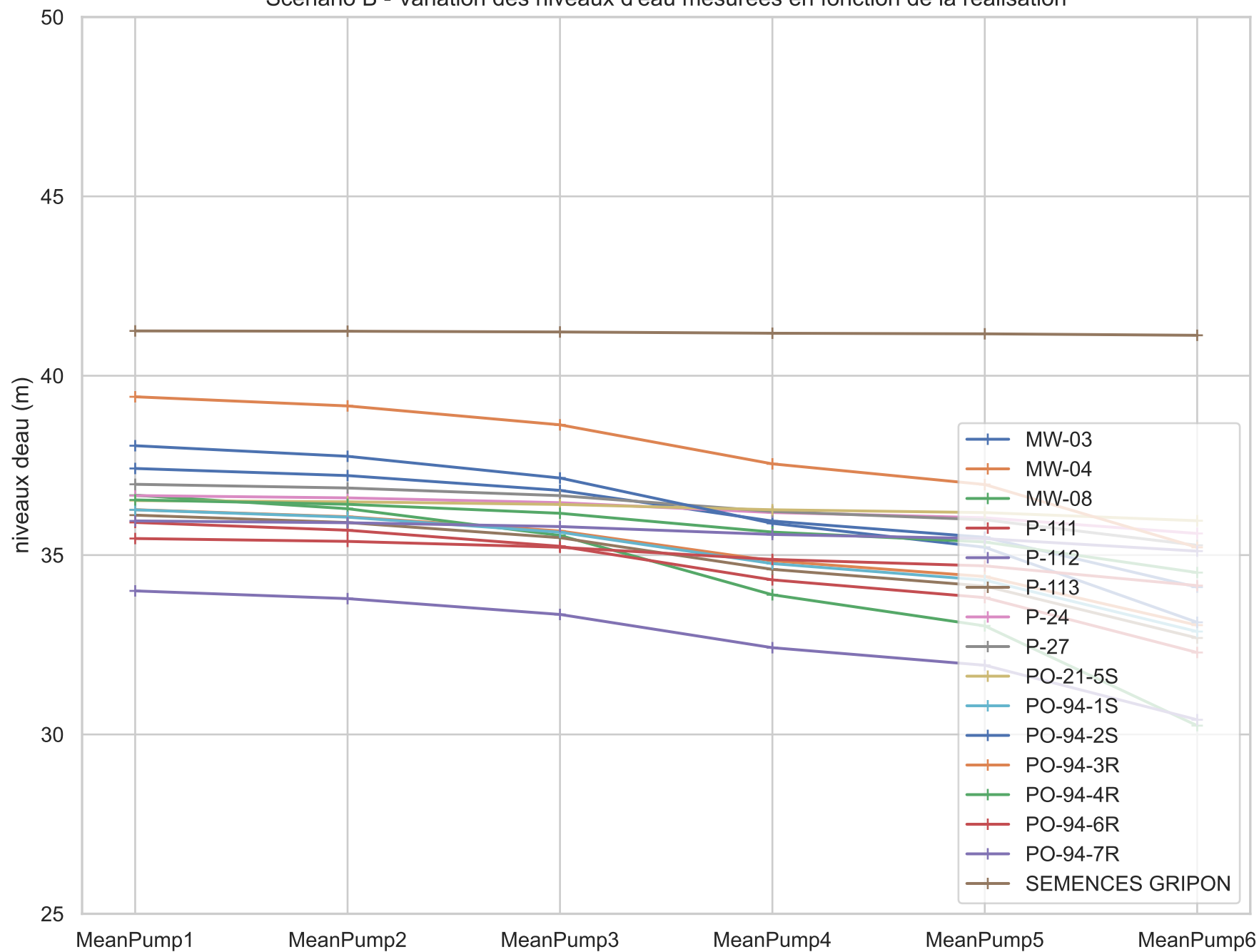


Figure B-20
Scénario B - Traçage de particules dans l'esker à partir des puits Nord sur 25 ans

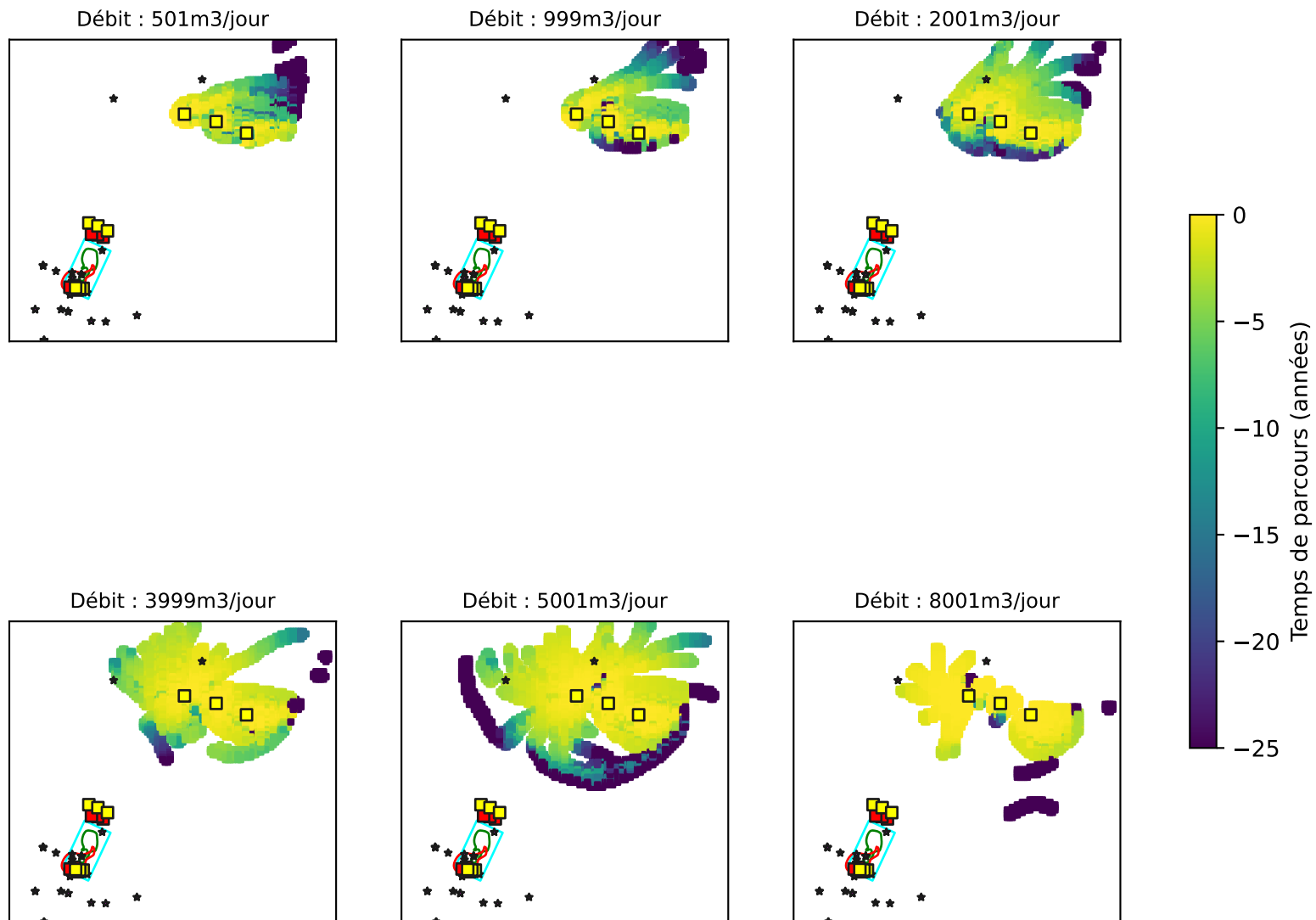


Figure B-21
Scénario B - Traçage de particules au roc à partir des puits au Nord sur 25 ans

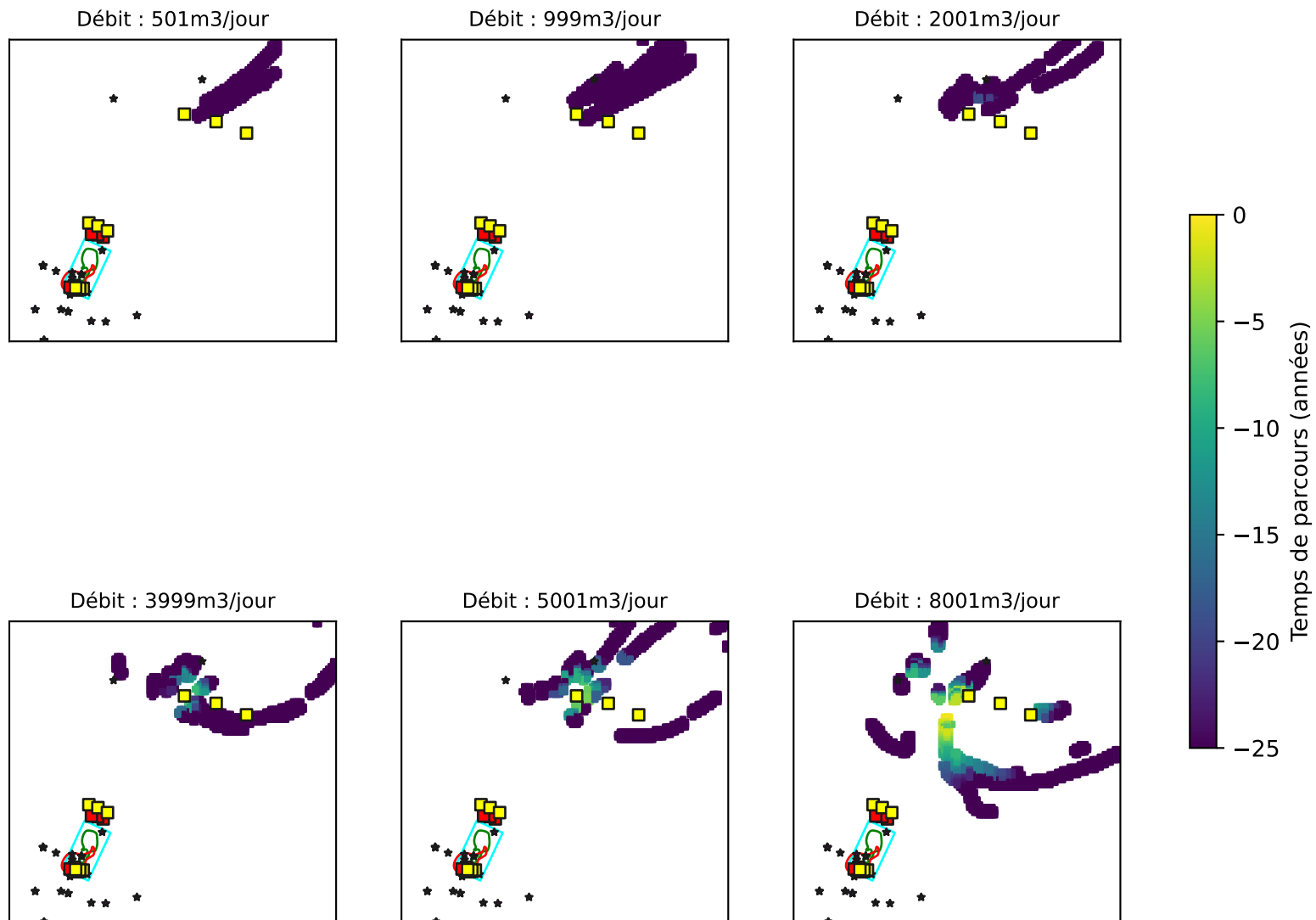
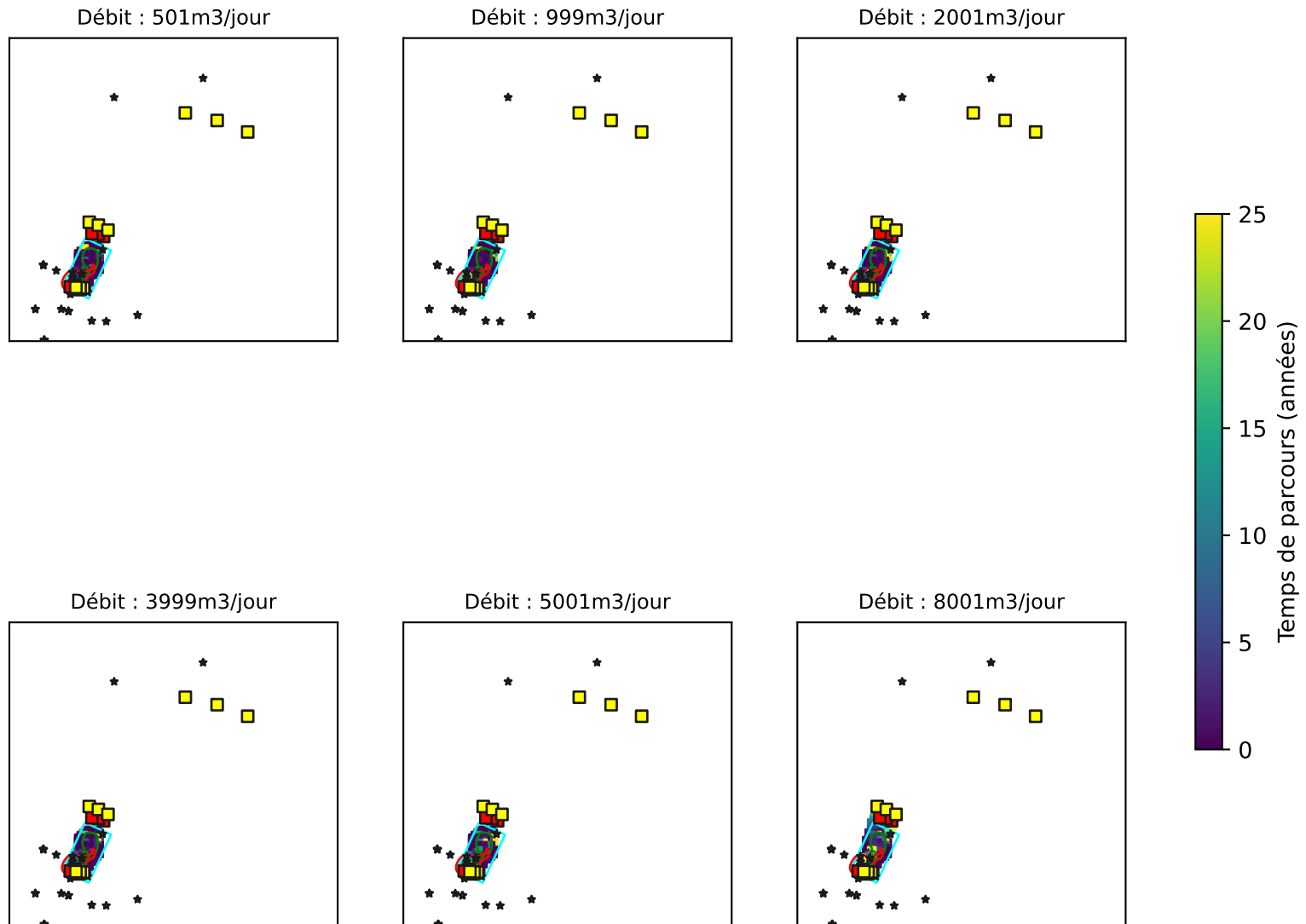


Figure B-22

Scénario B - Traçage de particules à partir de la zone source de l'esker sur 25 ans



Scénario B_S3R3 - Schéma Climat

Figure B-23
Scénario B_S3R3 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

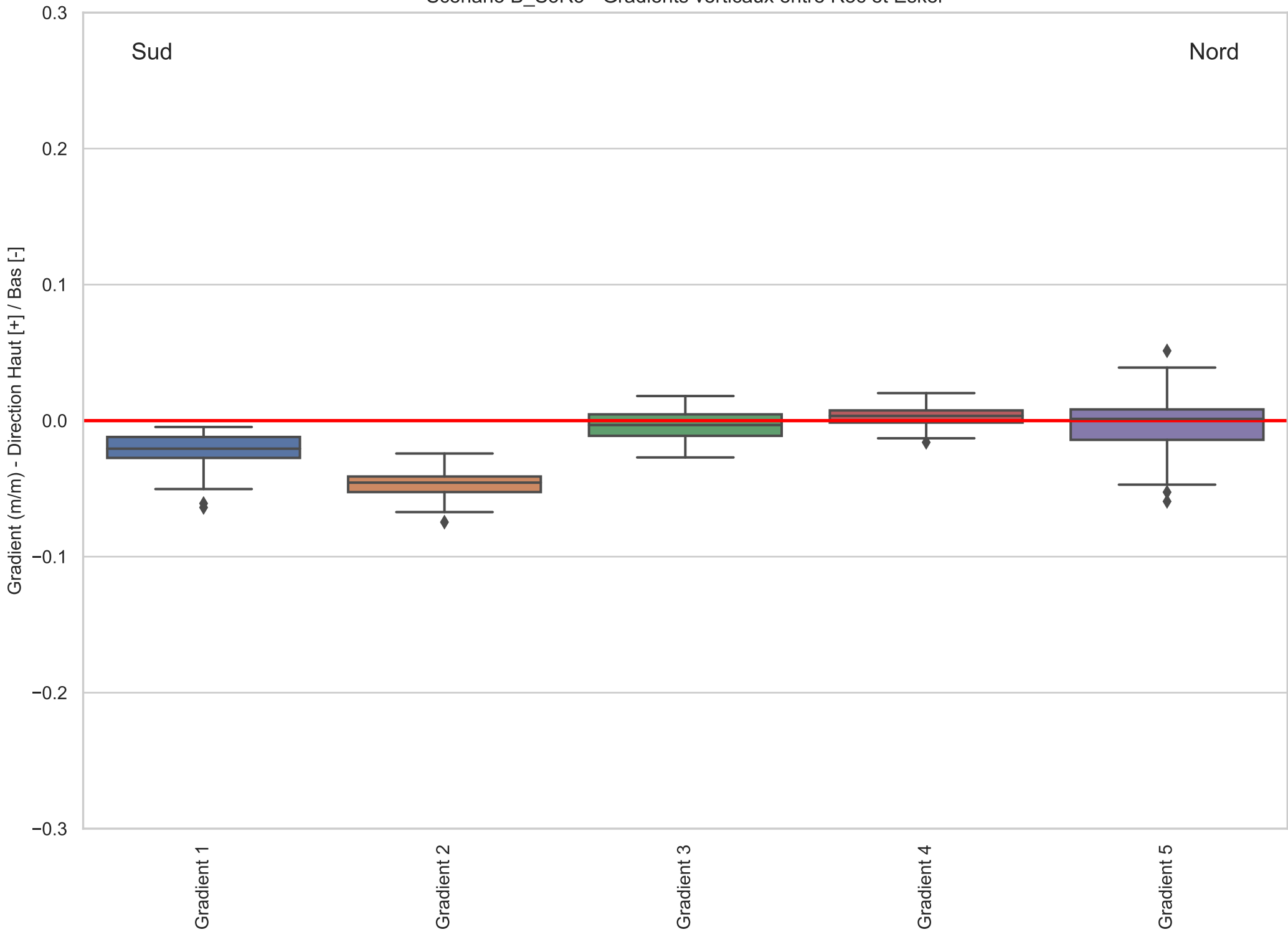


Figure B-24

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

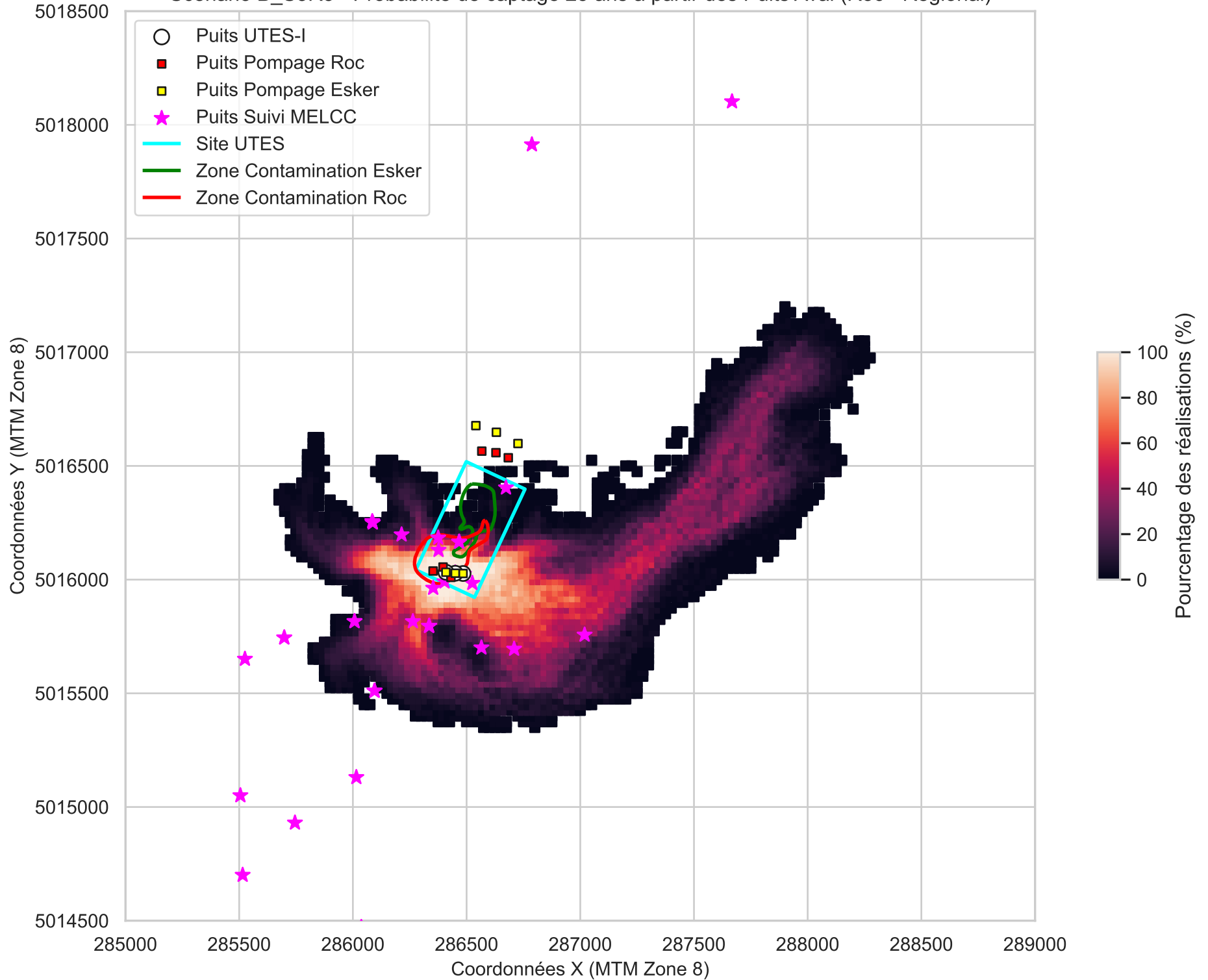


Figure B-25

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

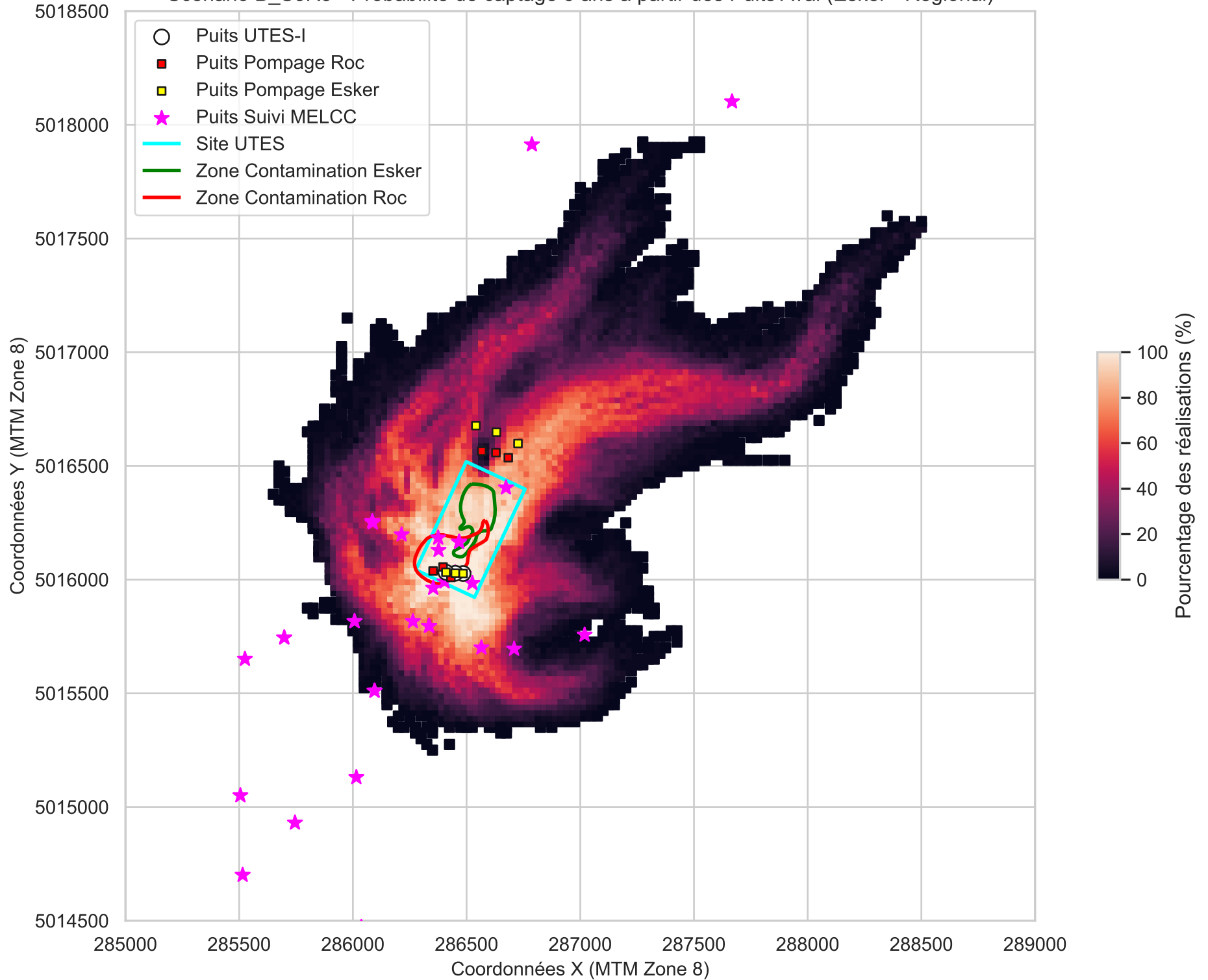


Figure B-26

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

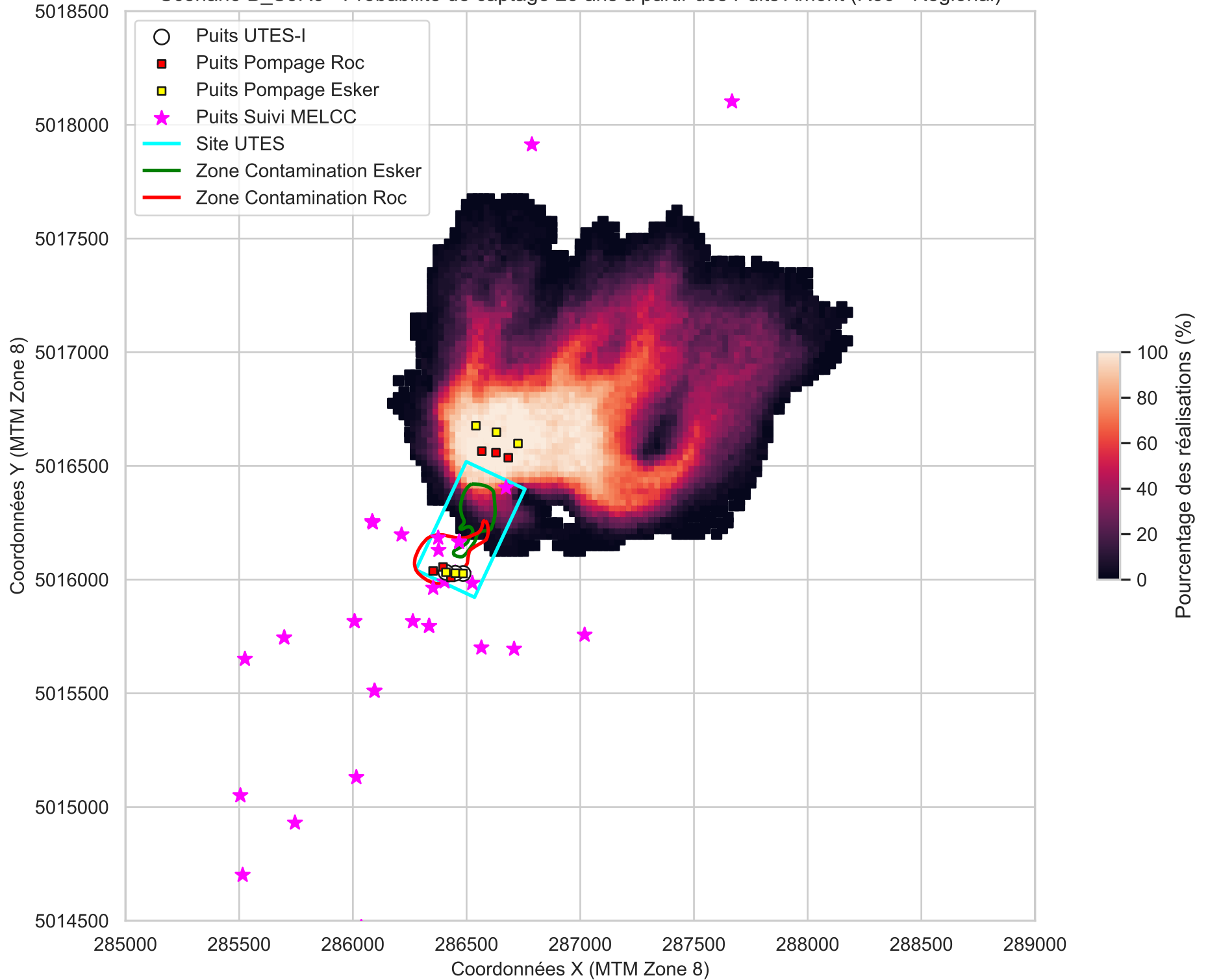


Figure B-27

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

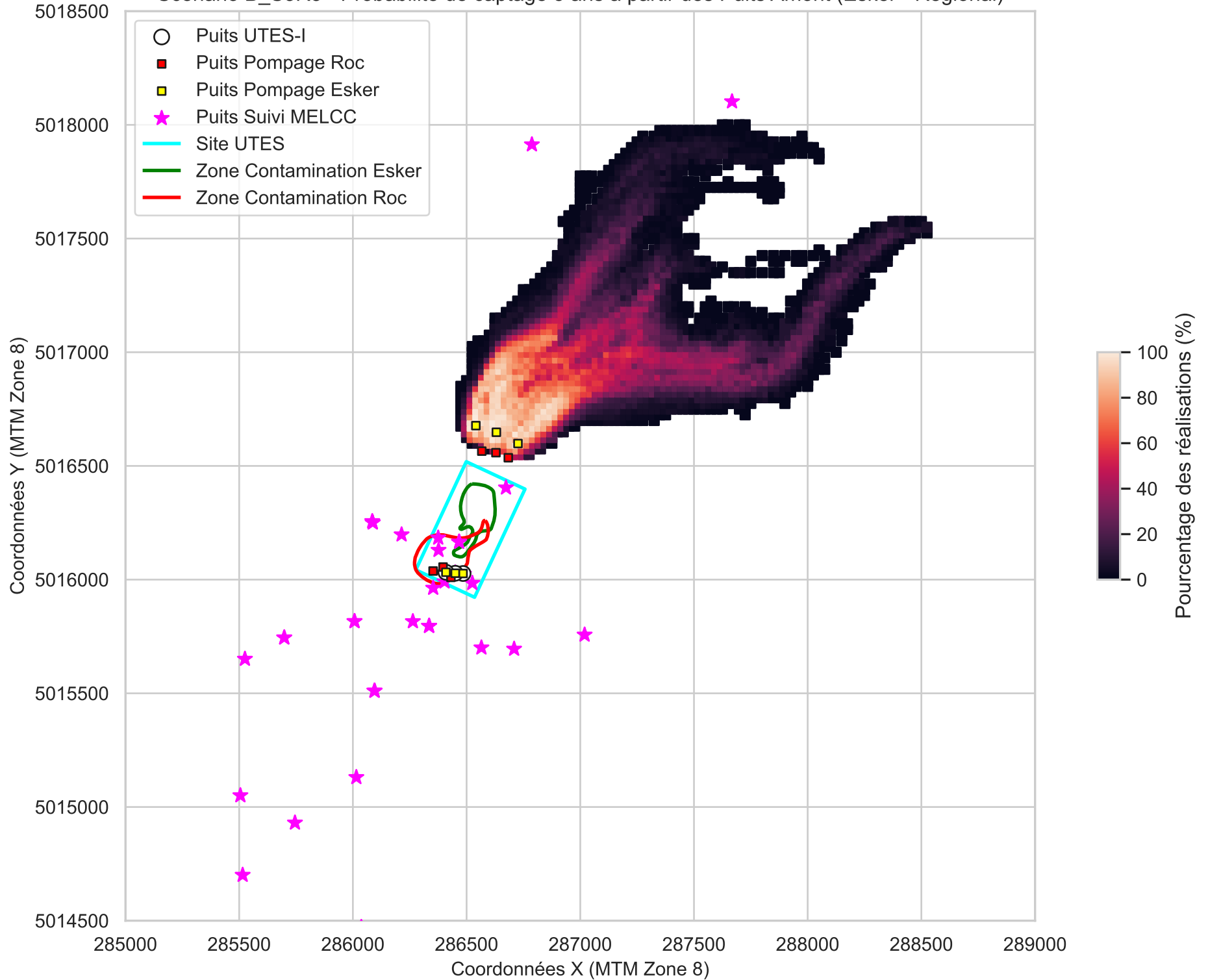


Figure B-28

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

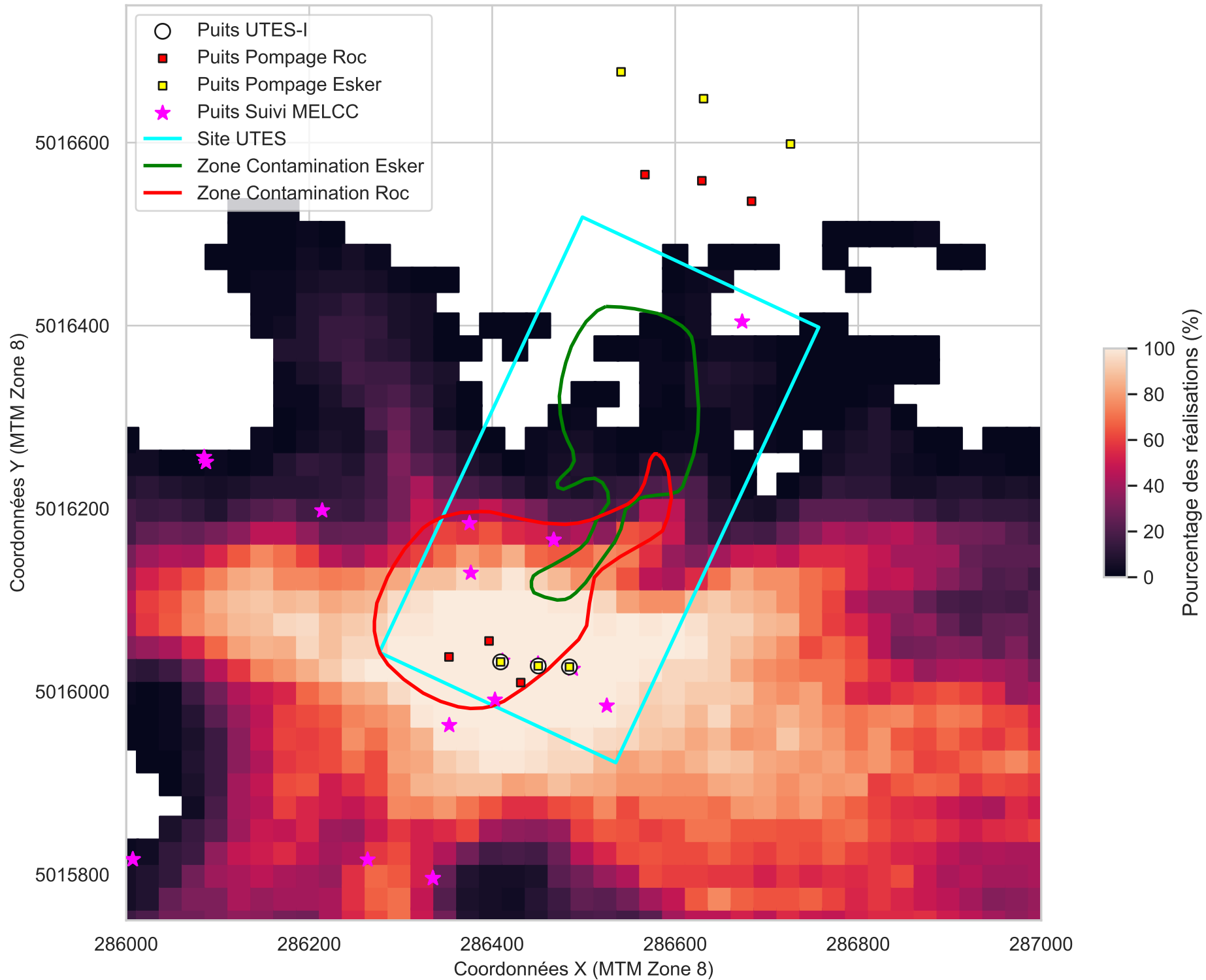


Figure B-29

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

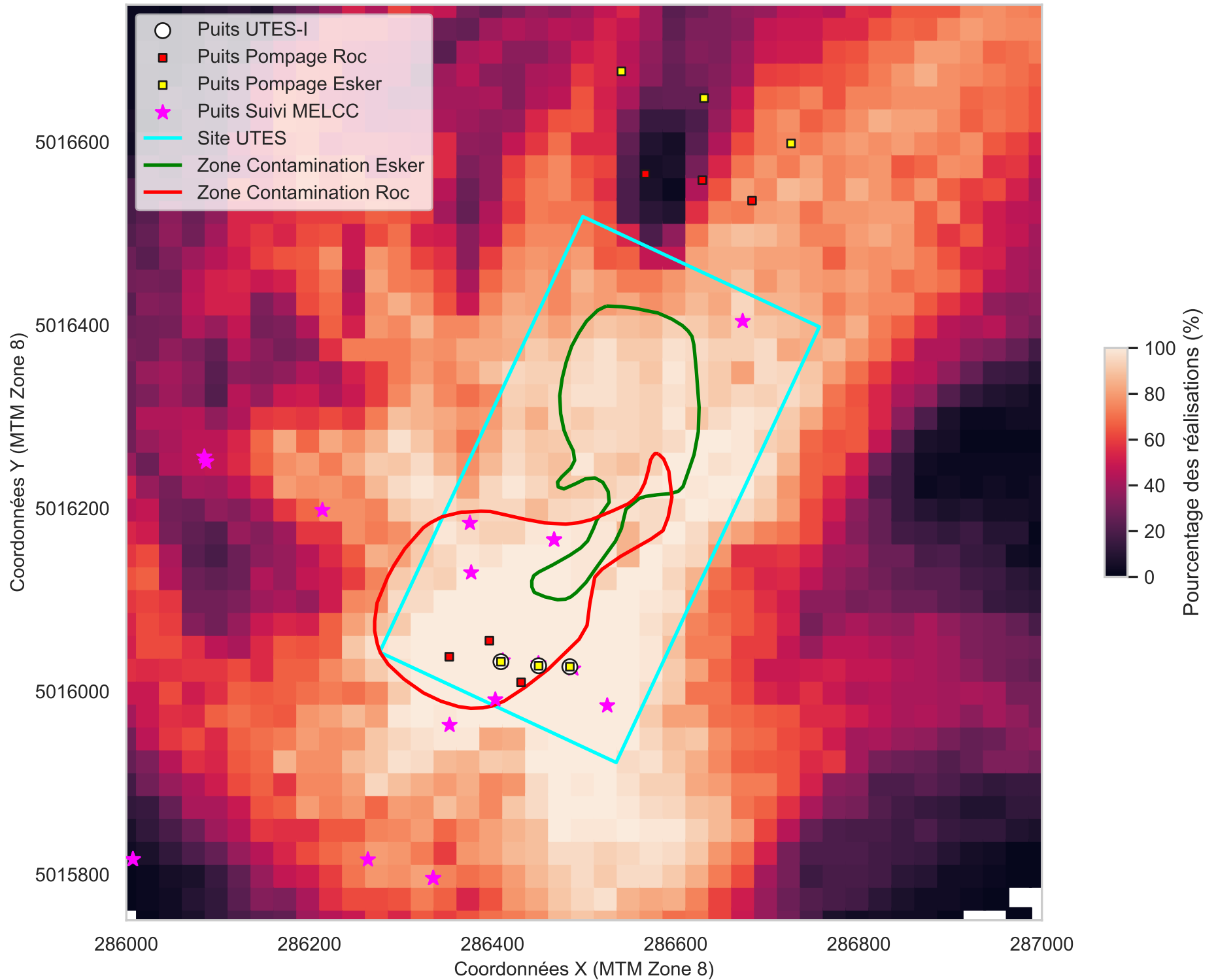


Figure B-30

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

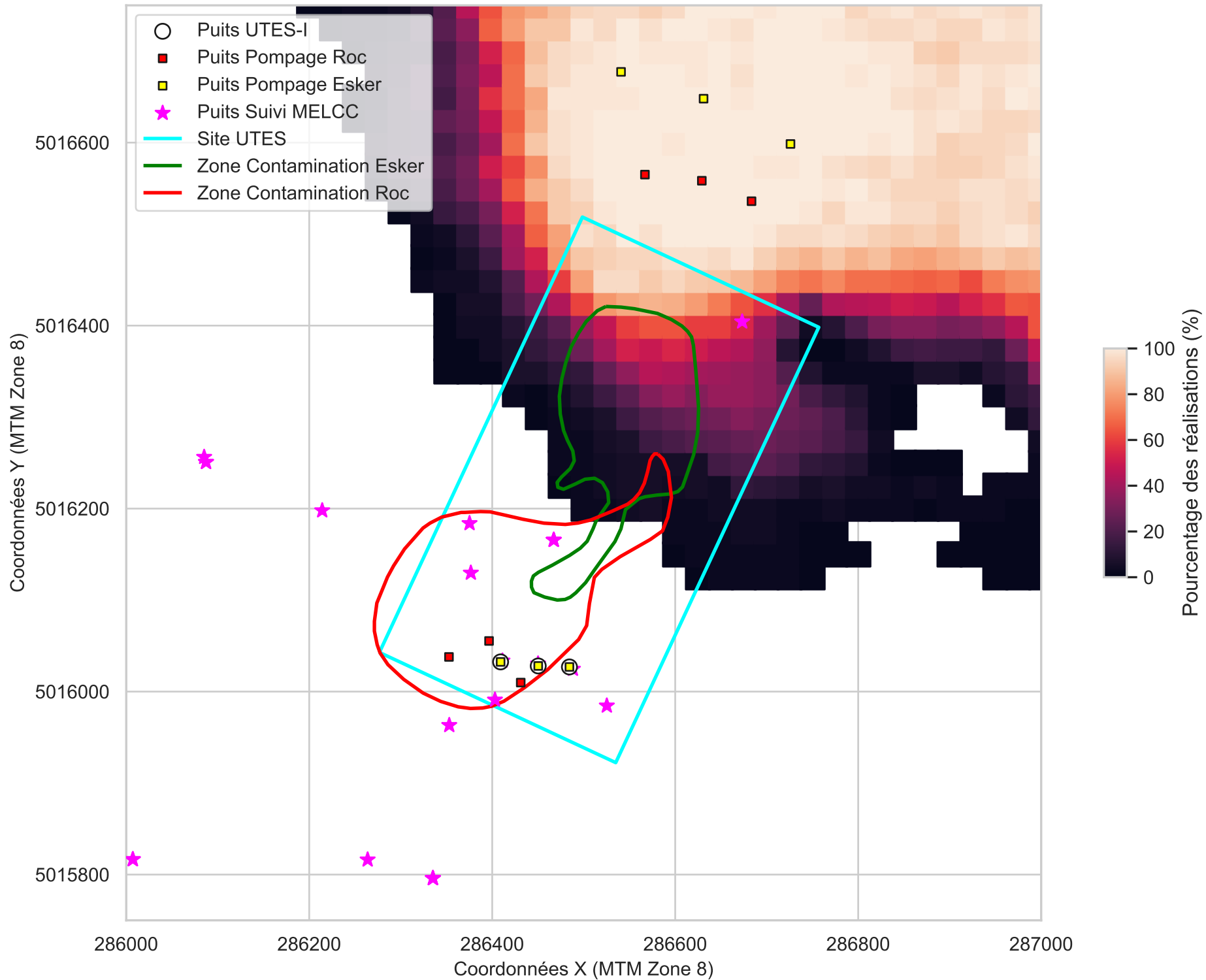


Figure B-31

Scénario B_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

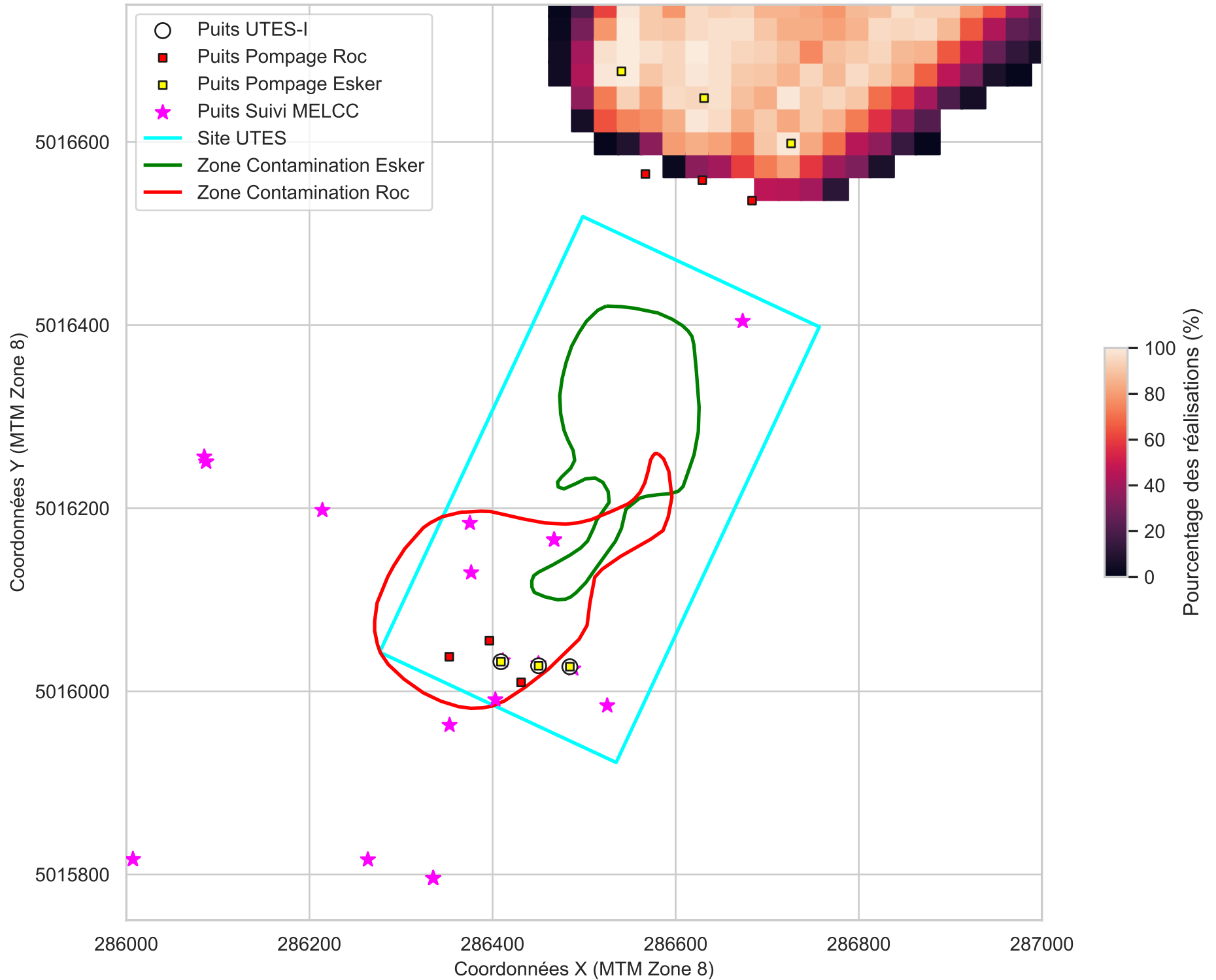


Figure B-32
Scénario B_S3R3 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

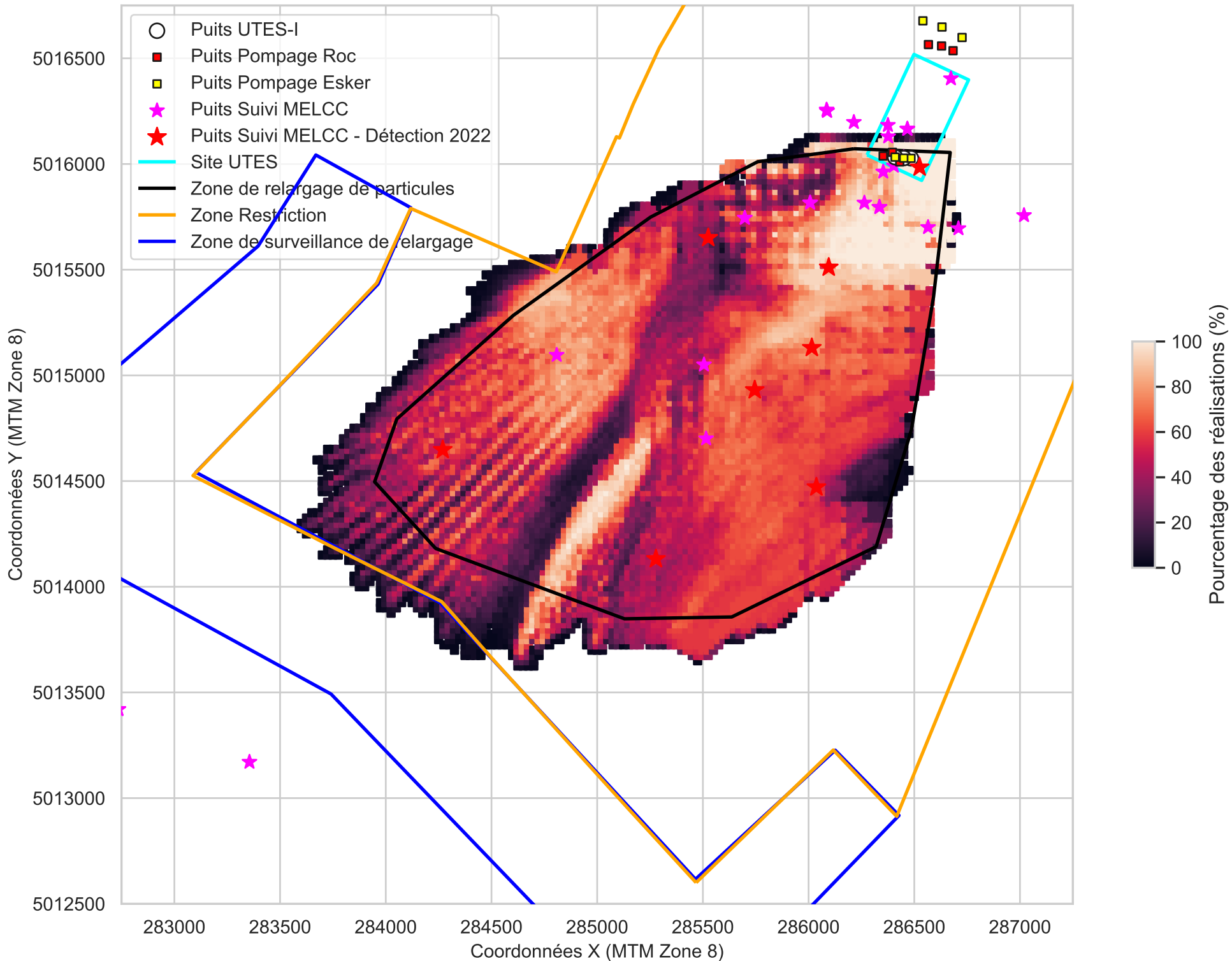
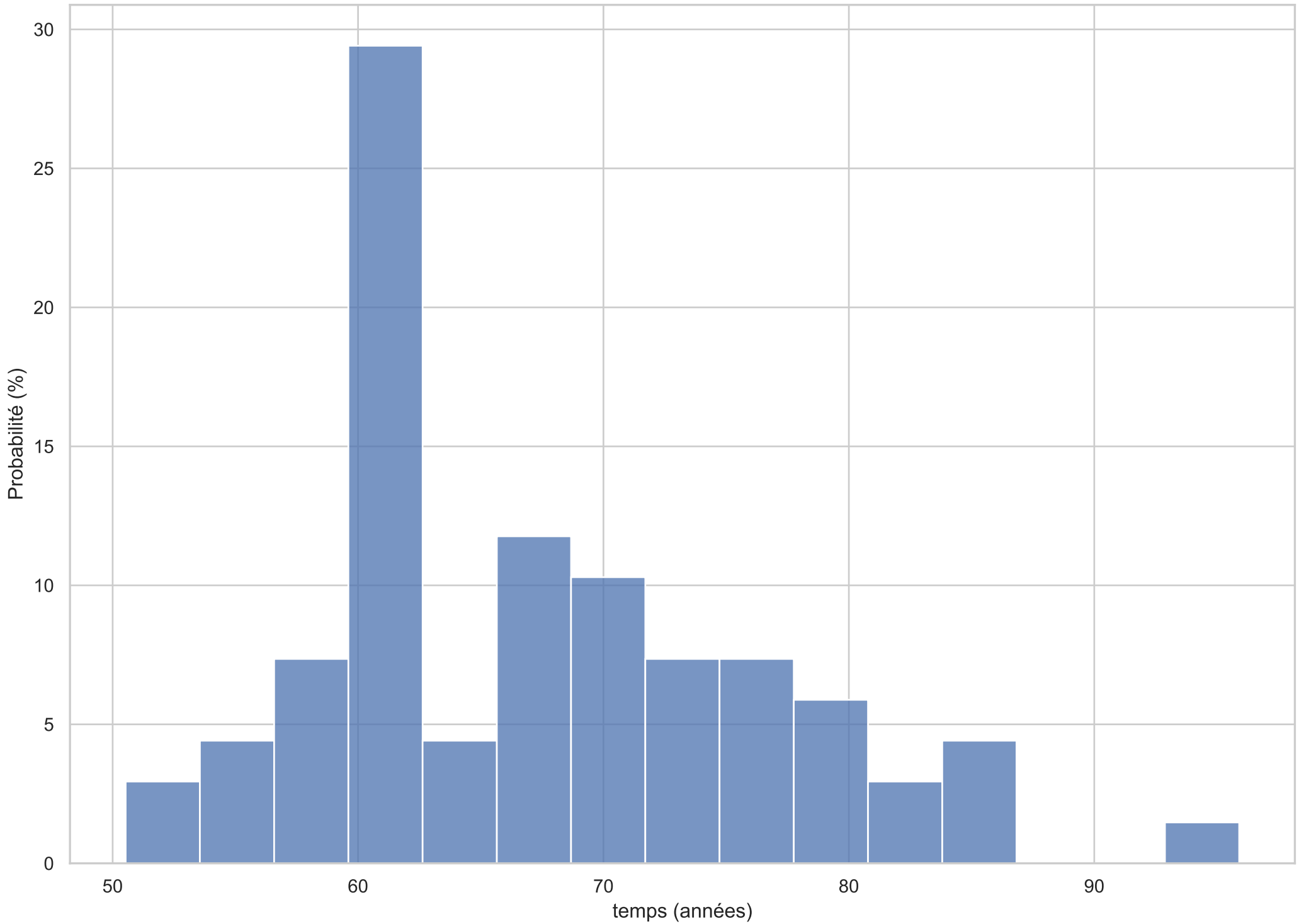


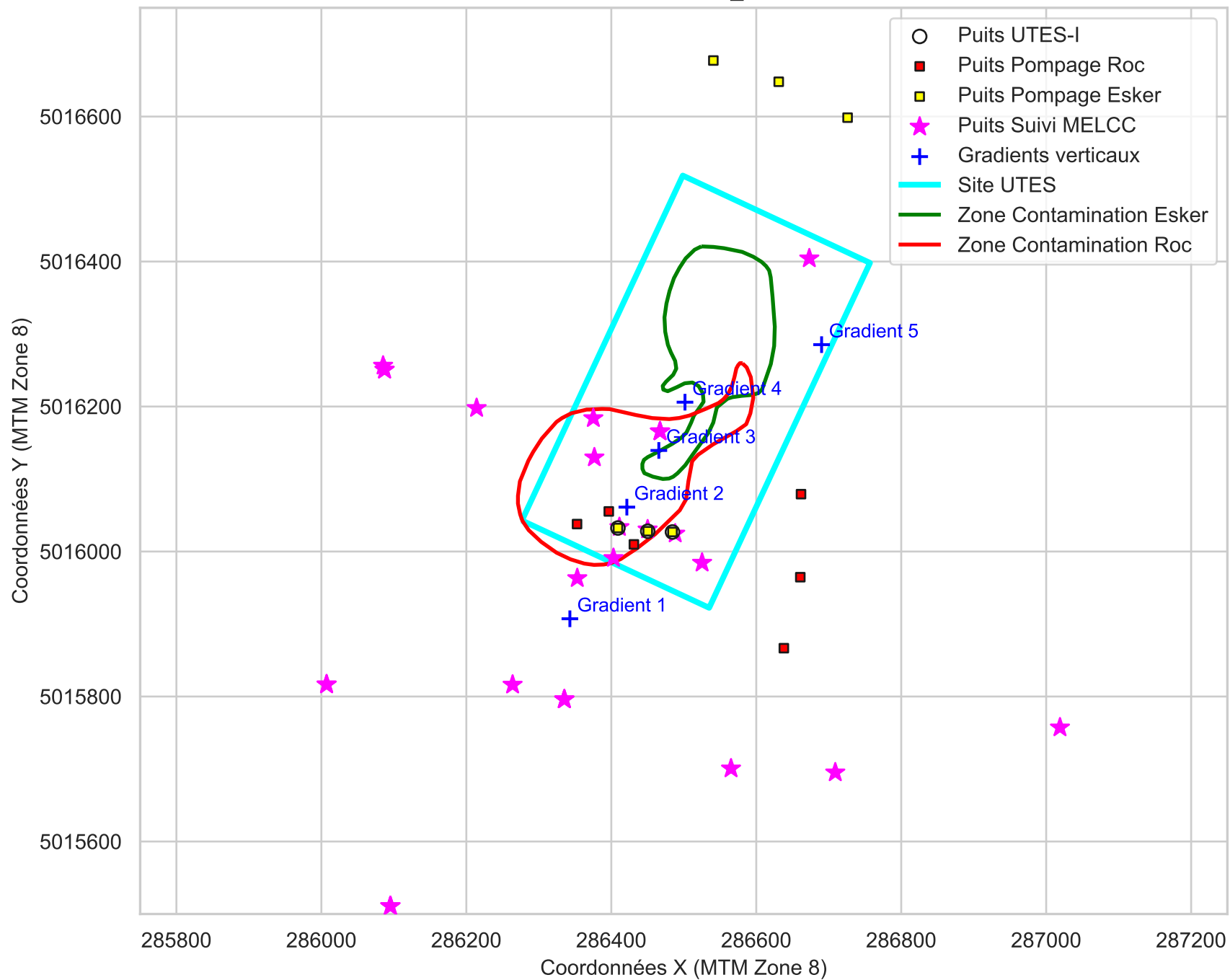
Figure B-33
Scénario B_S3R3 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Figures en support de l'évaluation des critères de décision

Scénario B_1

Figure B_1-1
Scénario B_1



Scénario B_1 - Schéma Kxy moyen

Figure B_1-2
Scénario B_1 - Gradients verticaux en fonction de la réalisation du schéma Kxy moyen

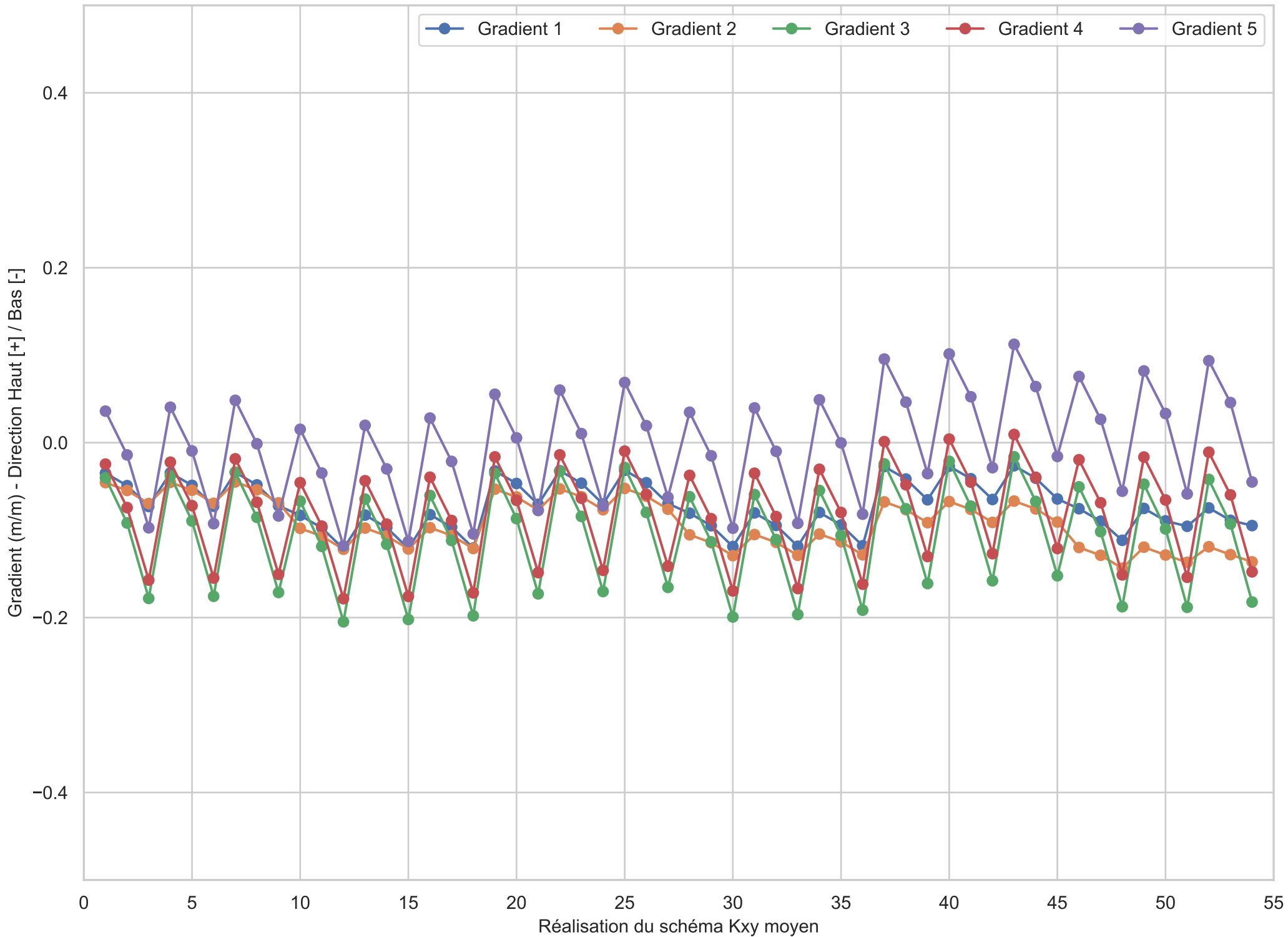
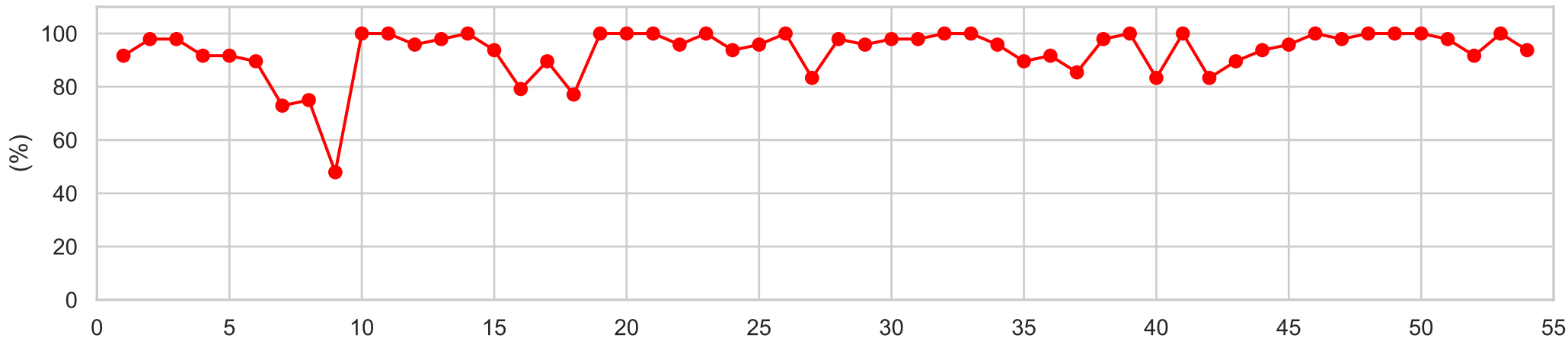
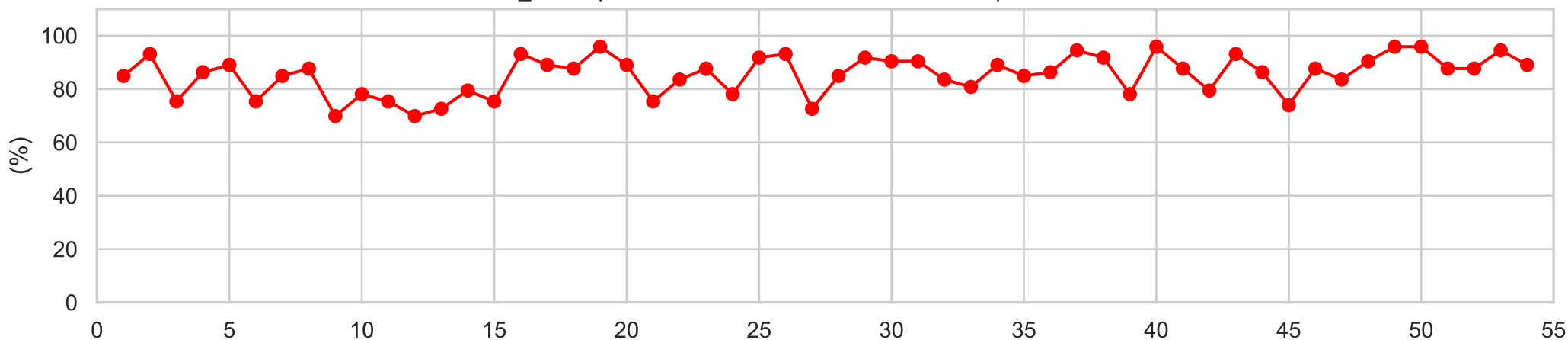


Figure B_1-3

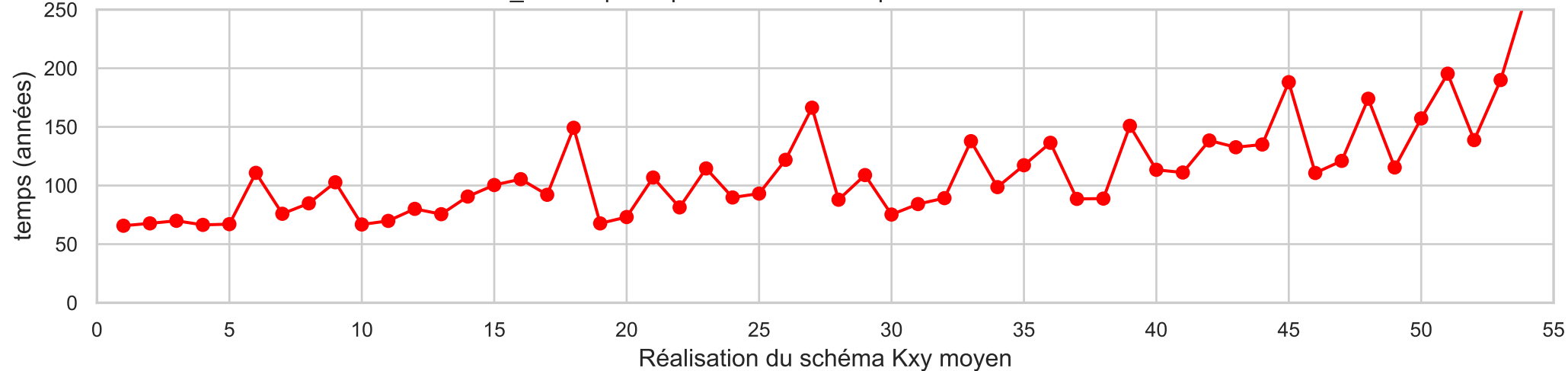
Scénario B_1 - Proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années



Scénario B_1 - Proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 ans



Scénario B_1 - Temps de parcours minimum pour atteindre la zone de restriction



Réalisation du schéma Kxy moyen

Scénario B_1 - Schéma Probabiliste

Figure B_1-4
Scénario B_1 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

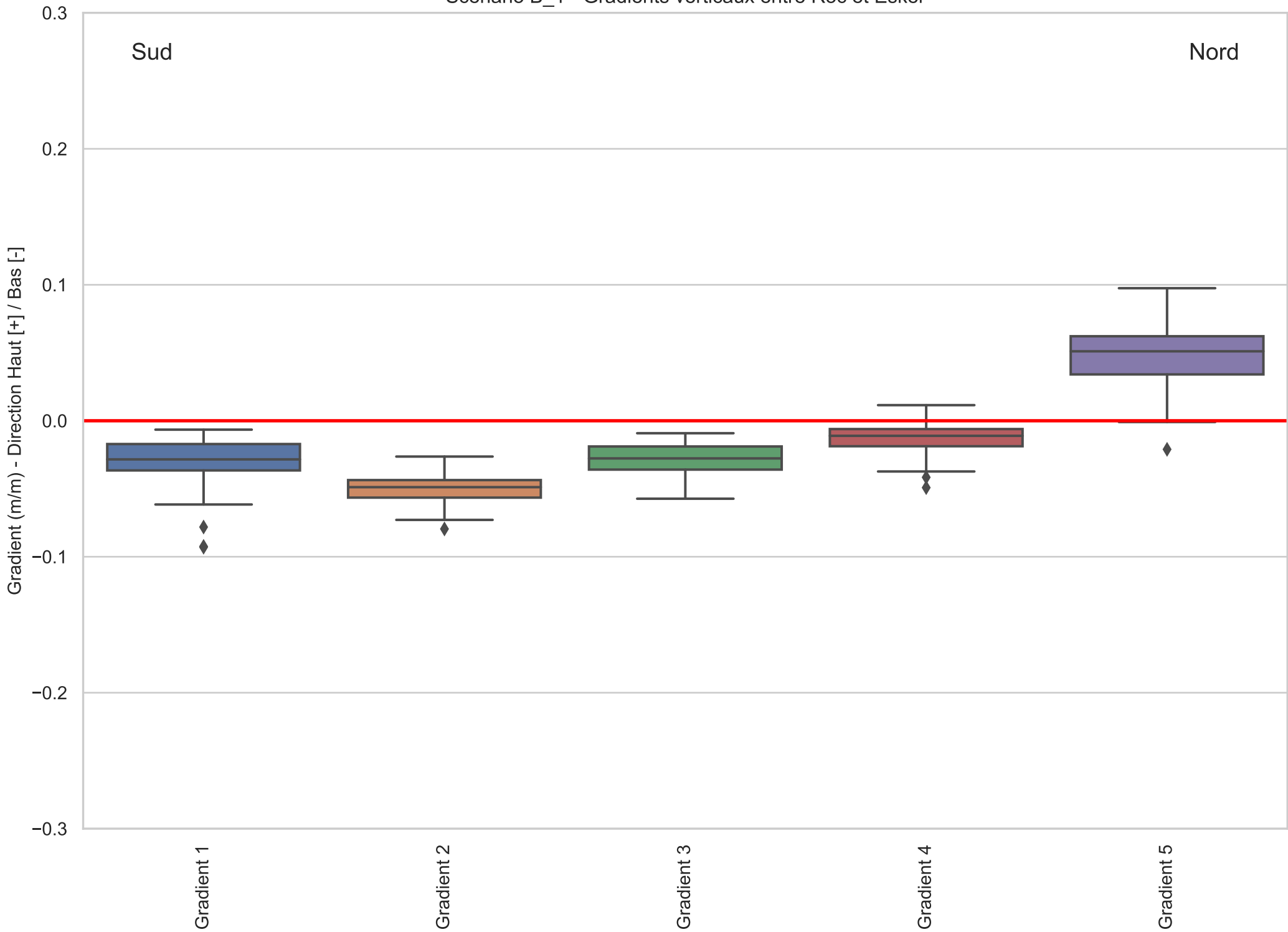


Figure B_1-5

Scénario B_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

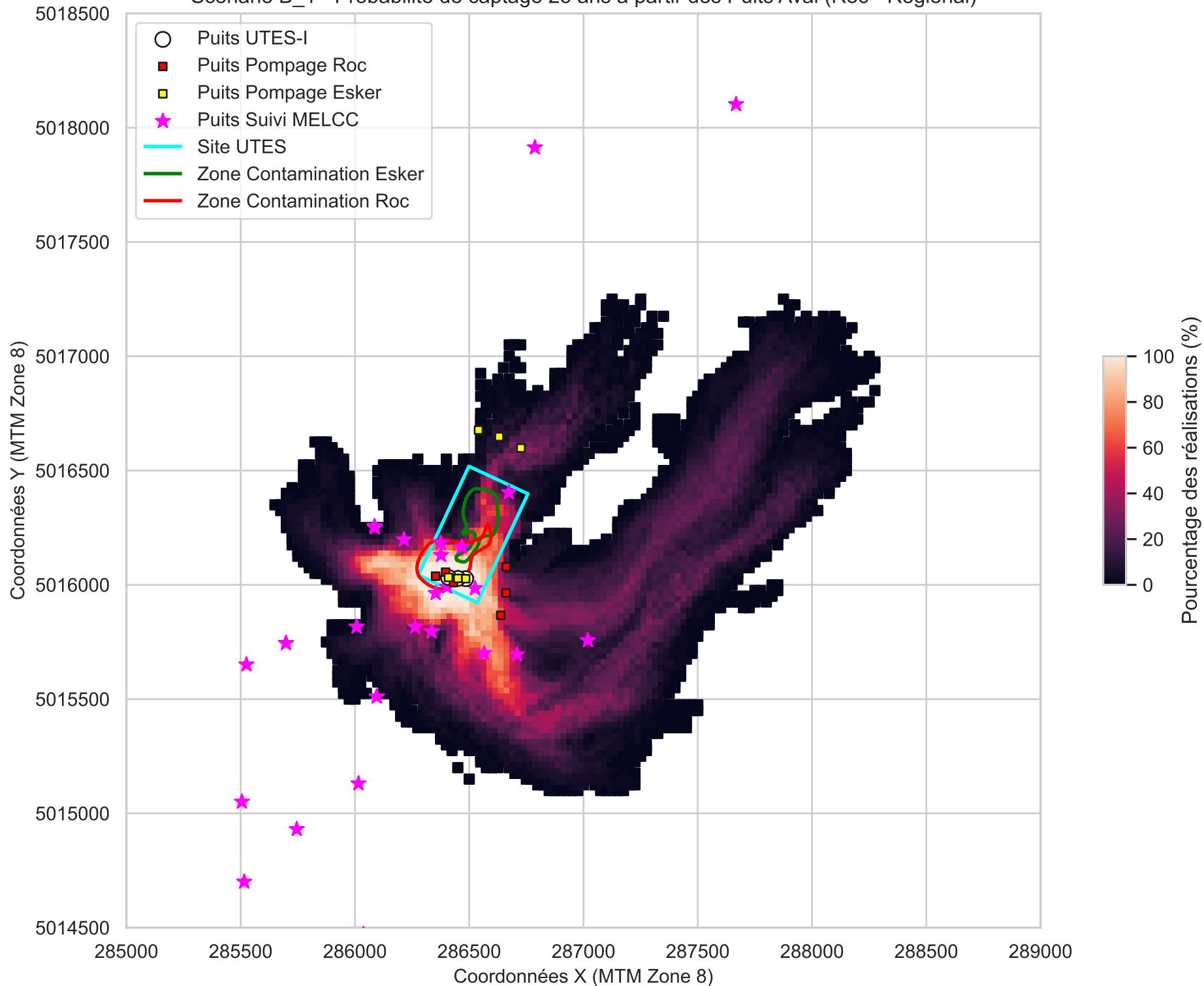


Figure B_1-6

Scénario B_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

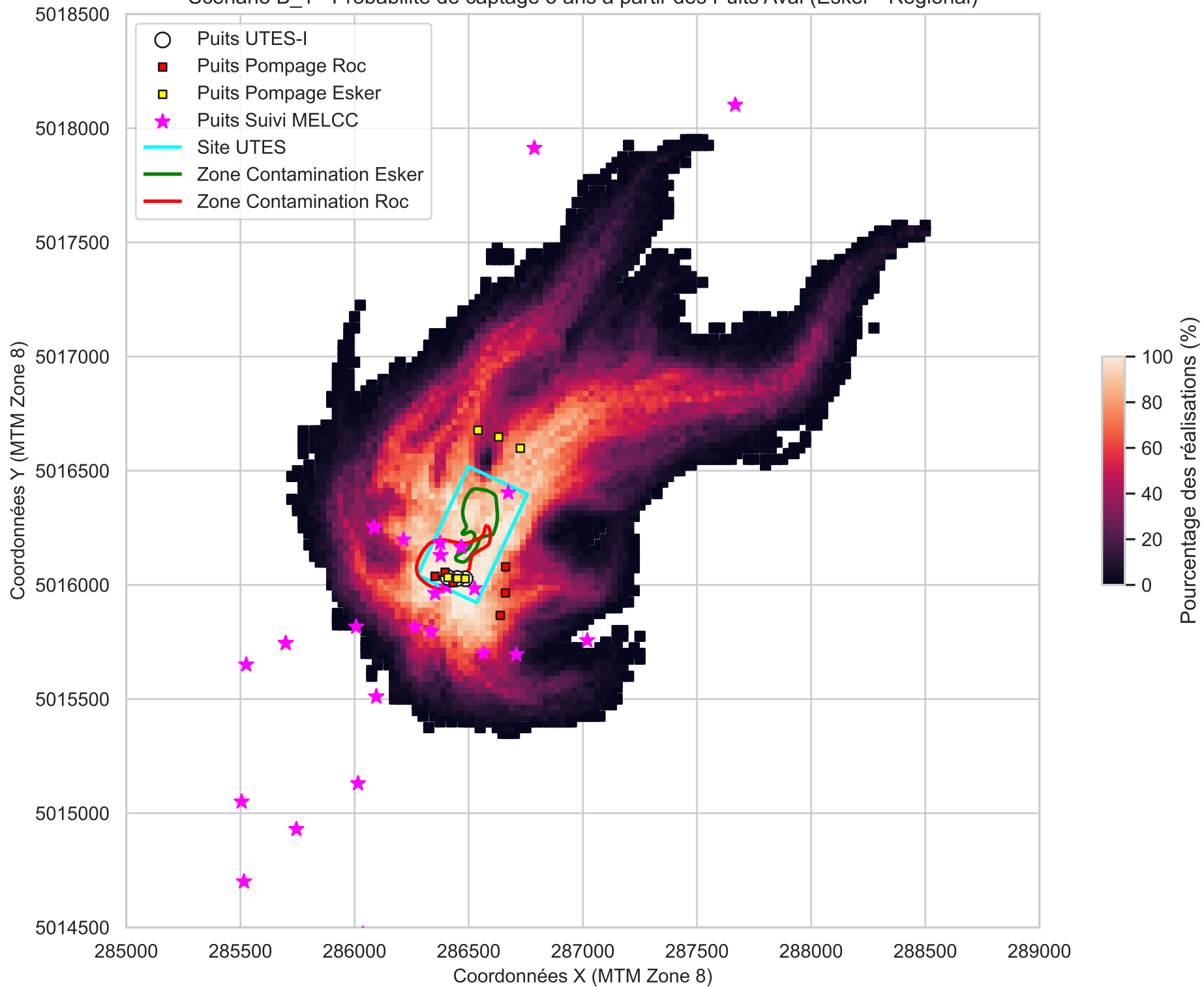


Figure B_1-7

Scénario B_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

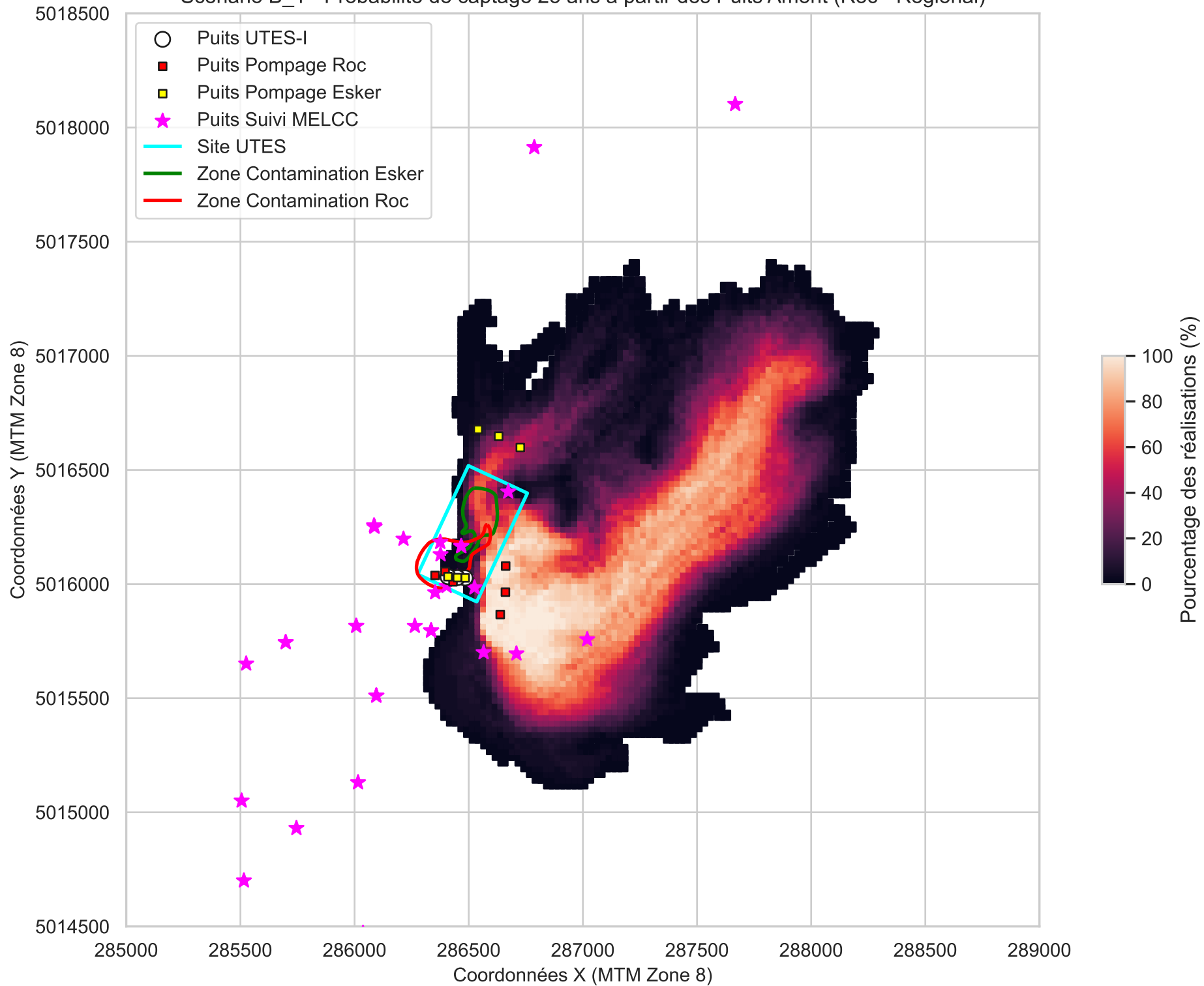


Figure B_1-8

Scénario B_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

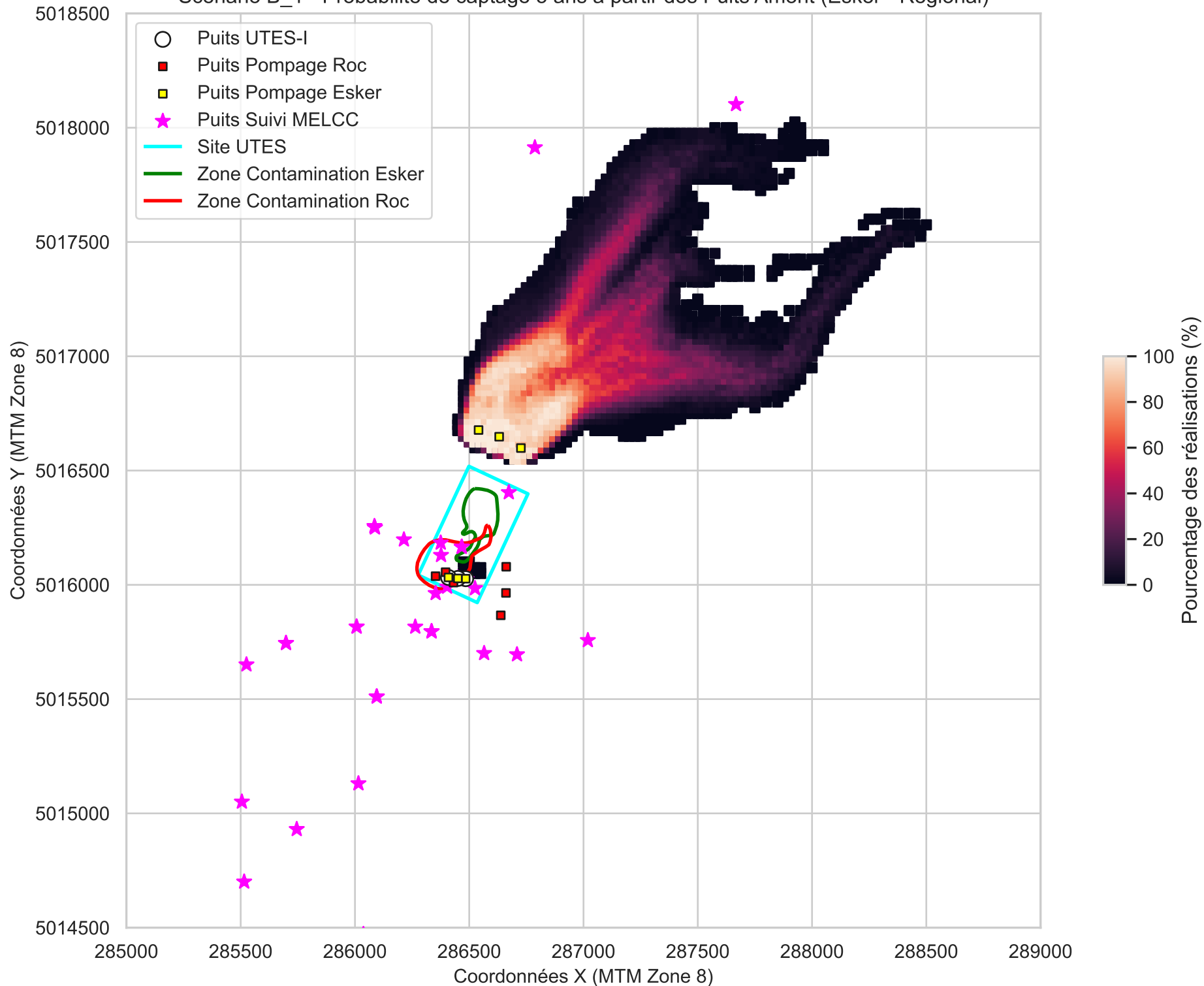


Figure B_1-9

Scénario B_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

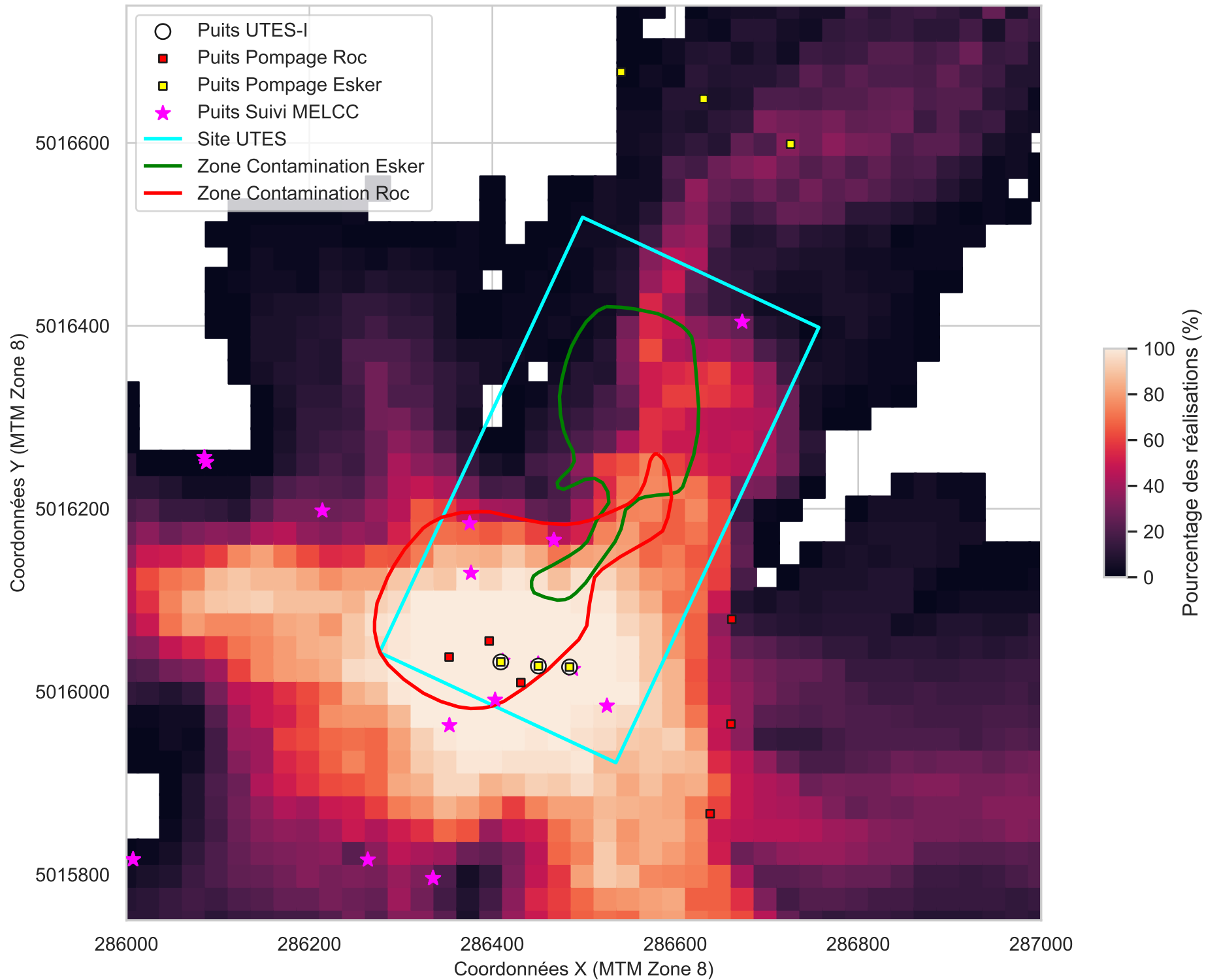


Figure B_1-10
Scénario B_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

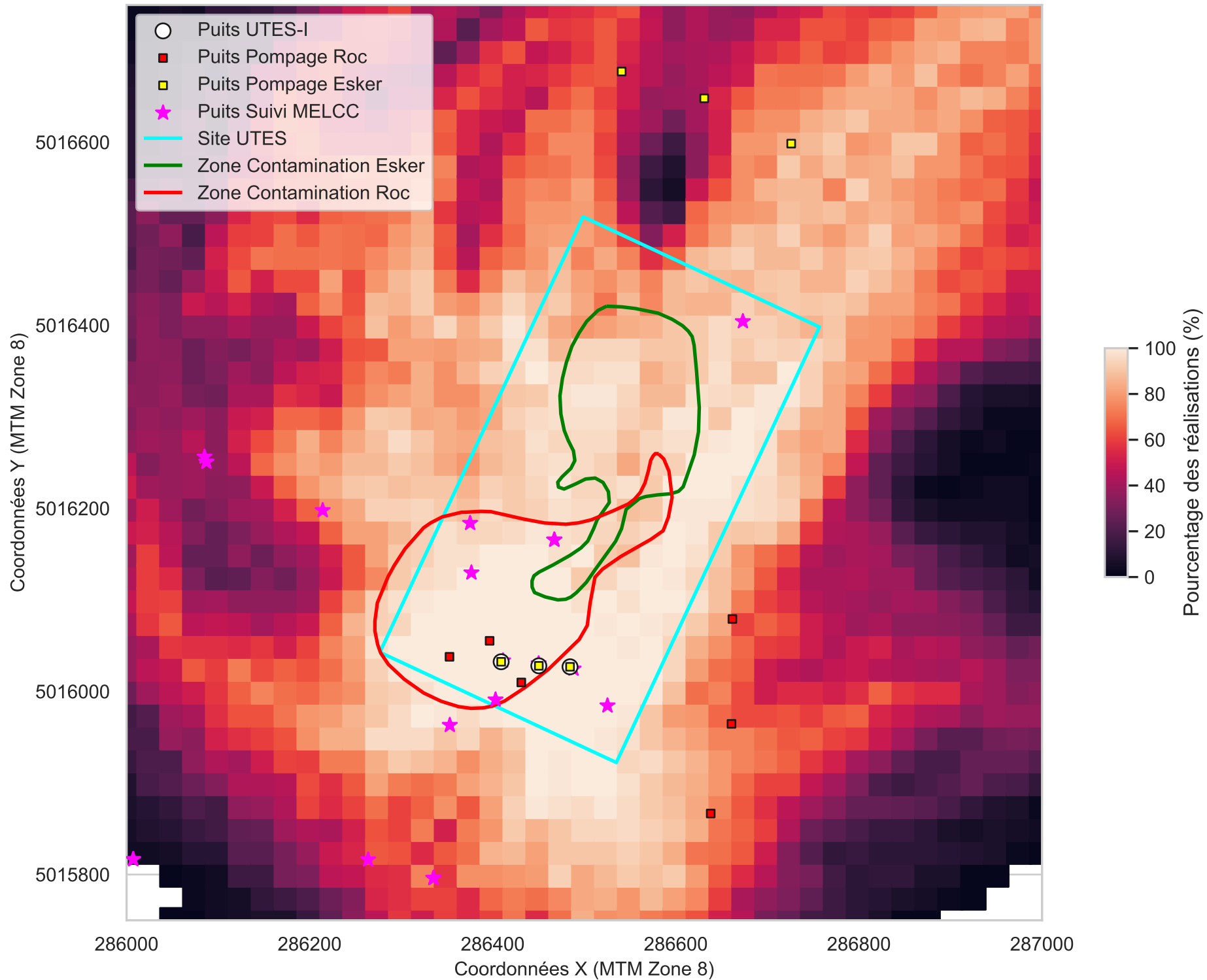


Figure B_1-11

Scénario B_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

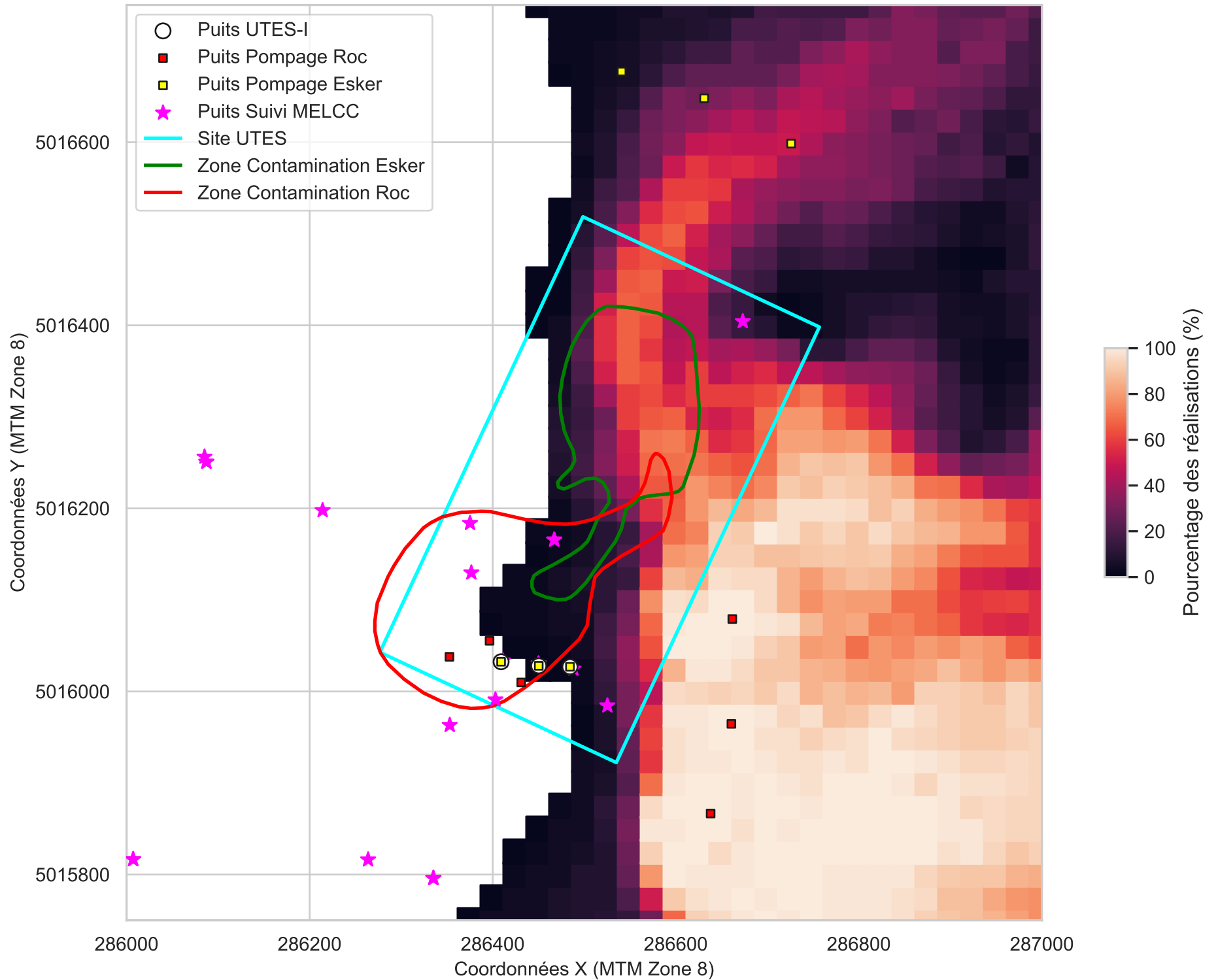


Figure B_1-12

Scénario B_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

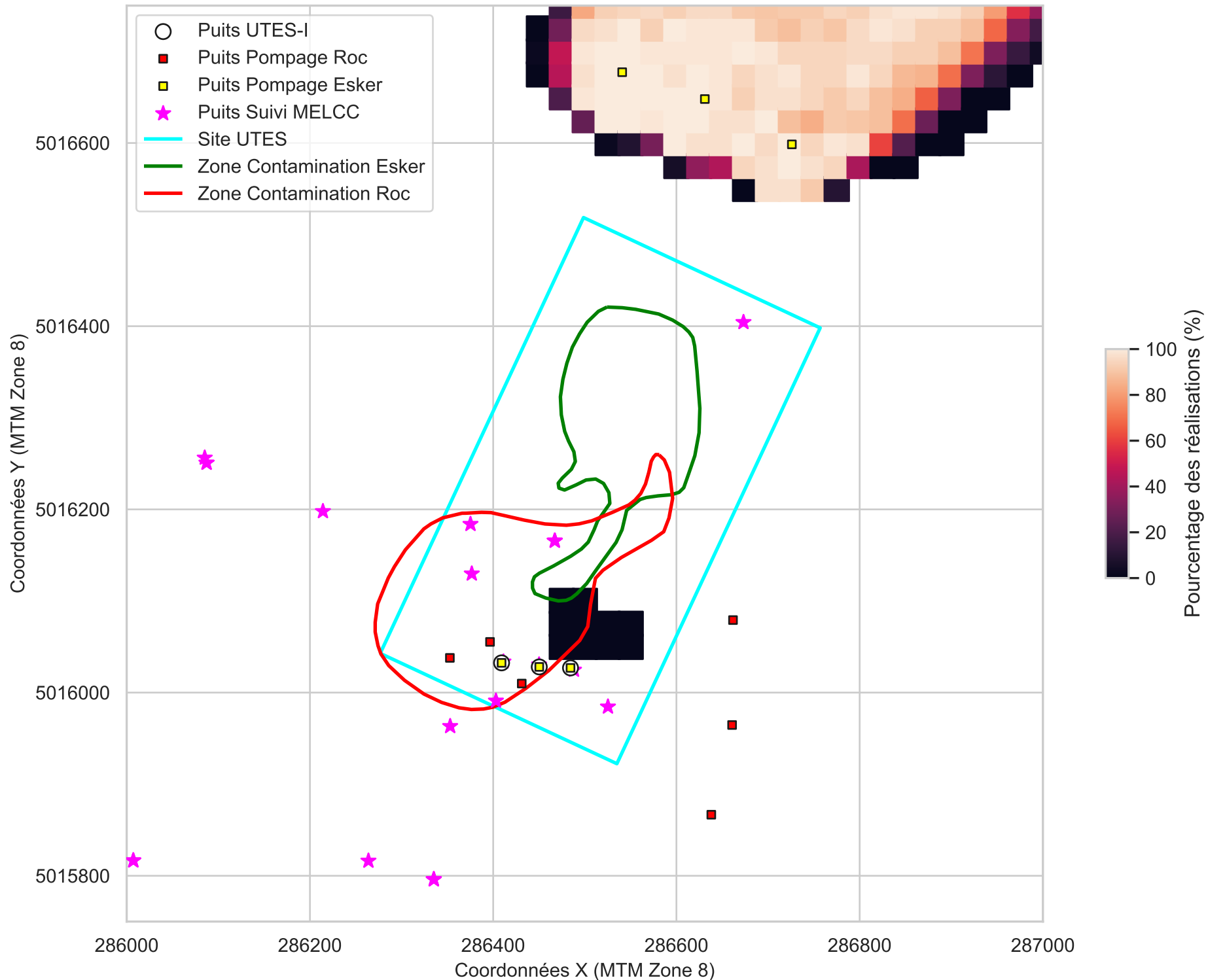


Figure B_1-13
Scénario B_1 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

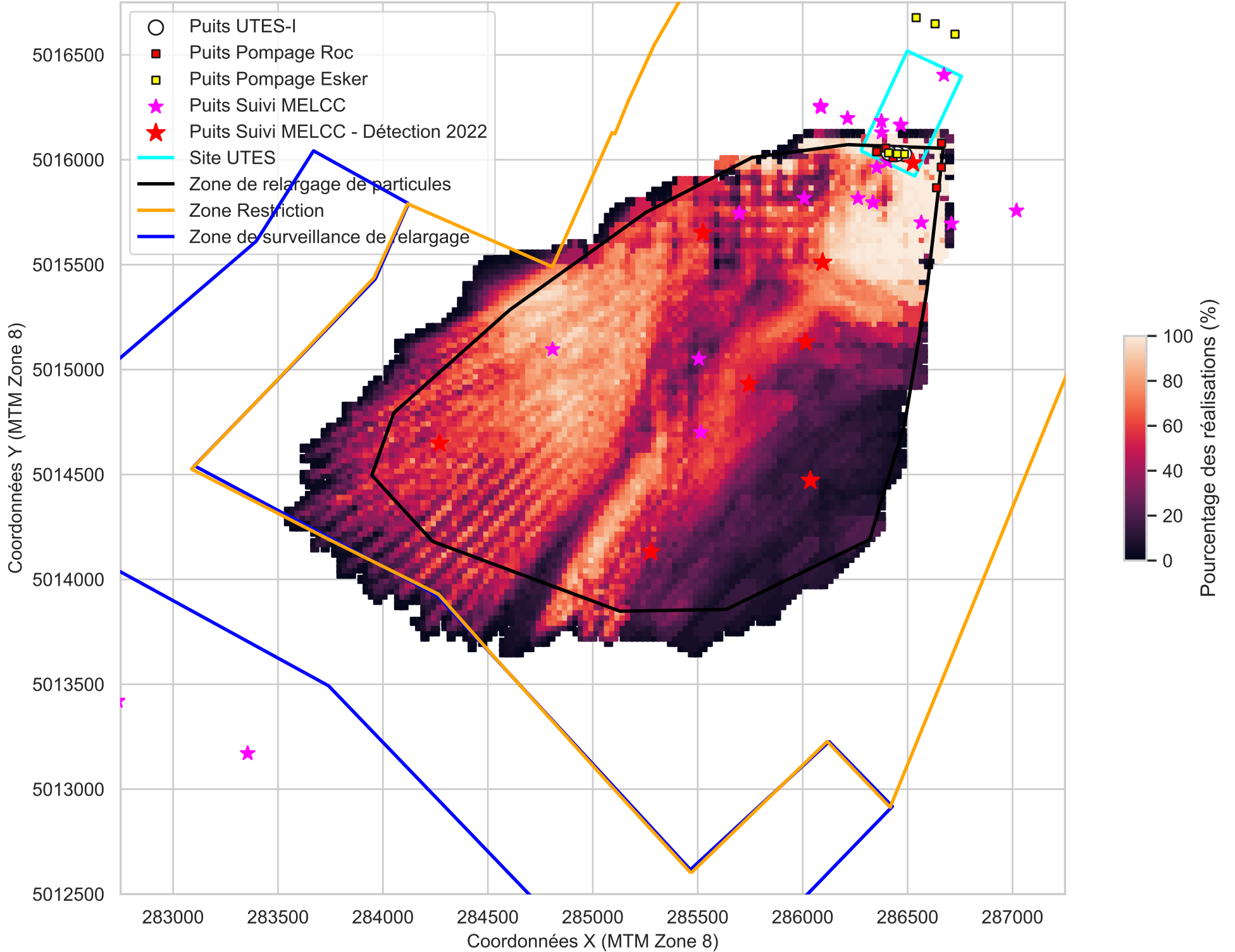
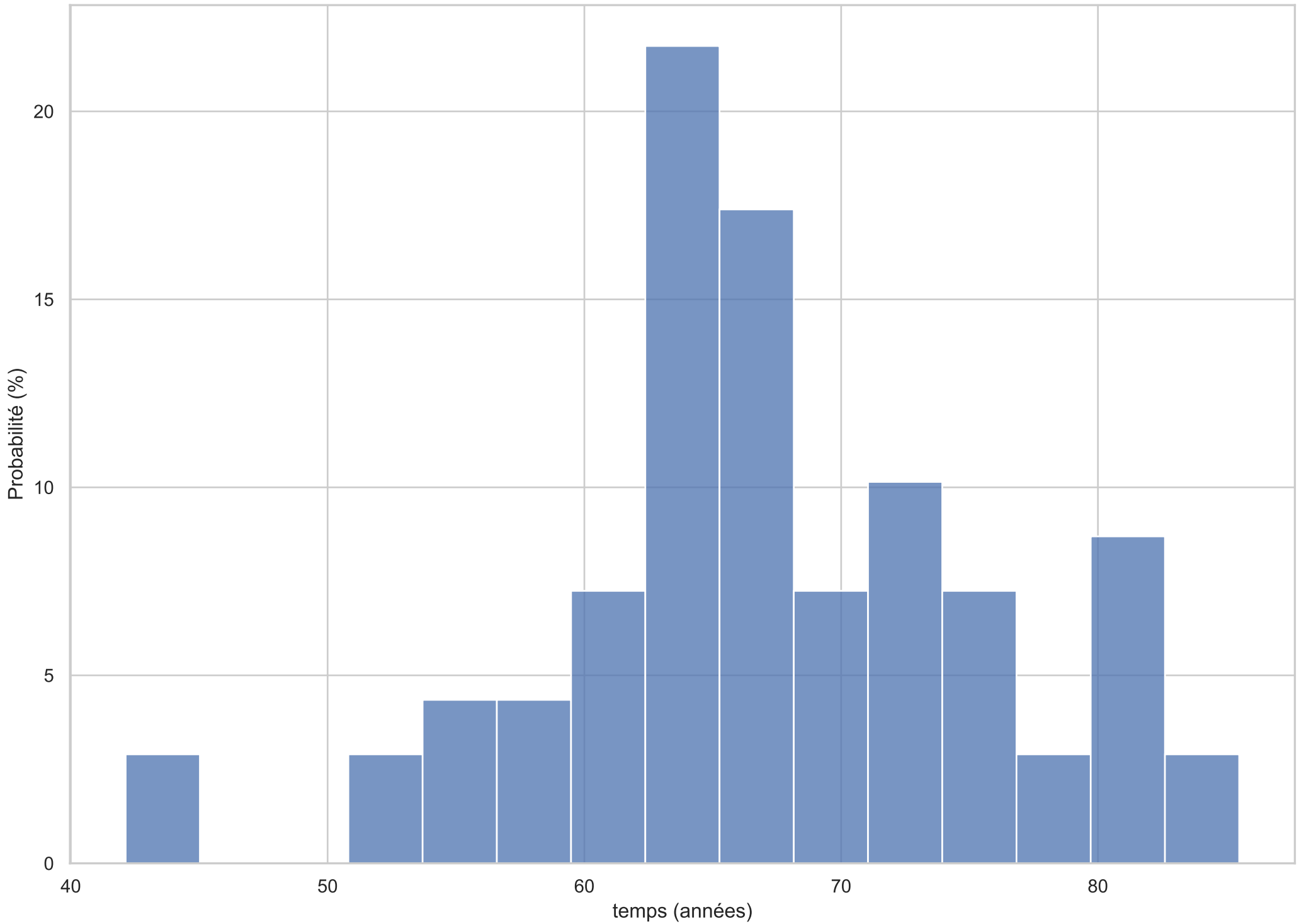


Figure B_1-14
Scénario B_1 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Scénario B_1 - Schéma Arrêt

Figure B_1-15
Scénario B_1 - Variation des gradients verticaux en fonction du temps après arrêt du pompage

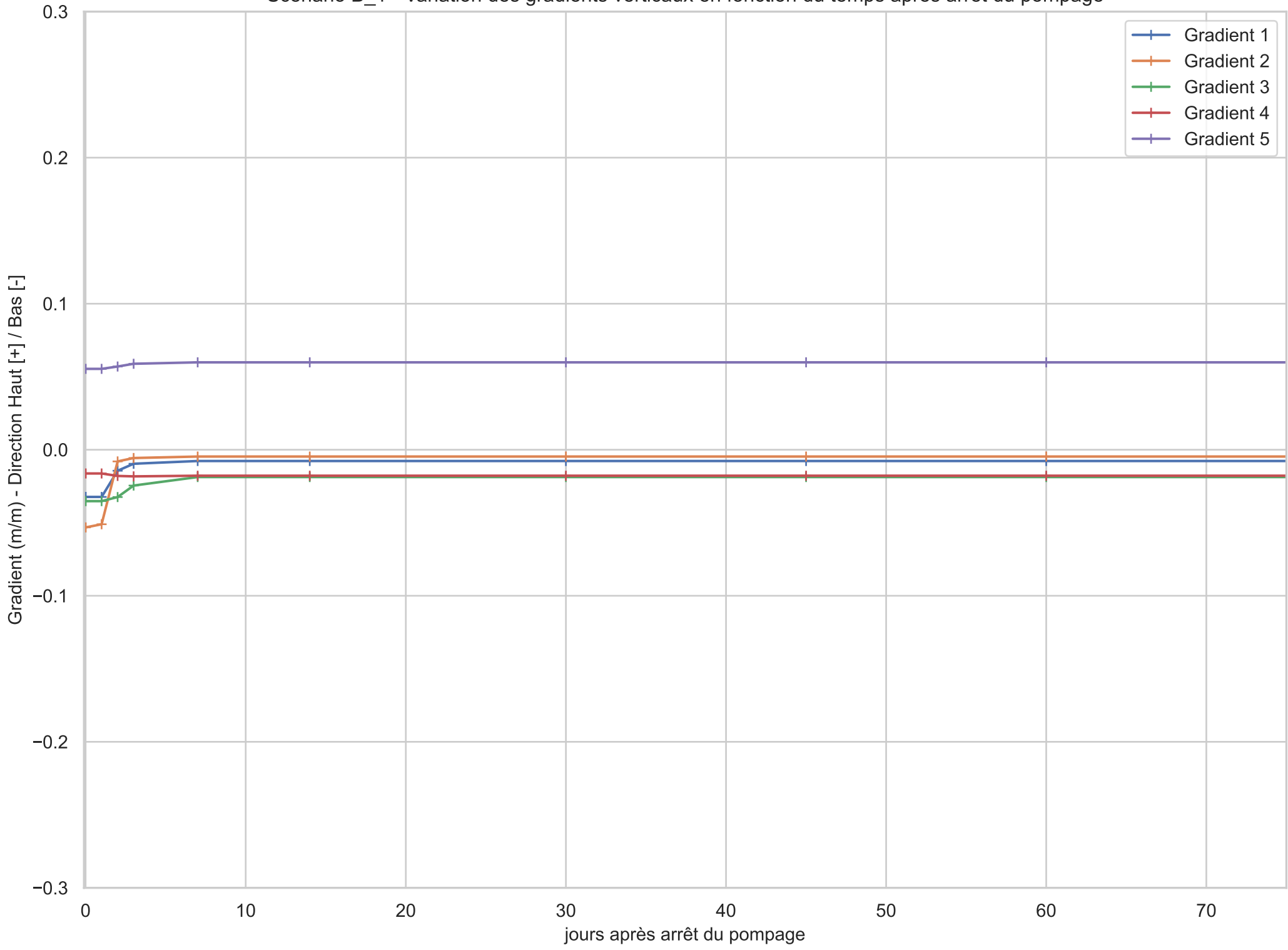


Figure B_1-16(1)

Scénario B_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

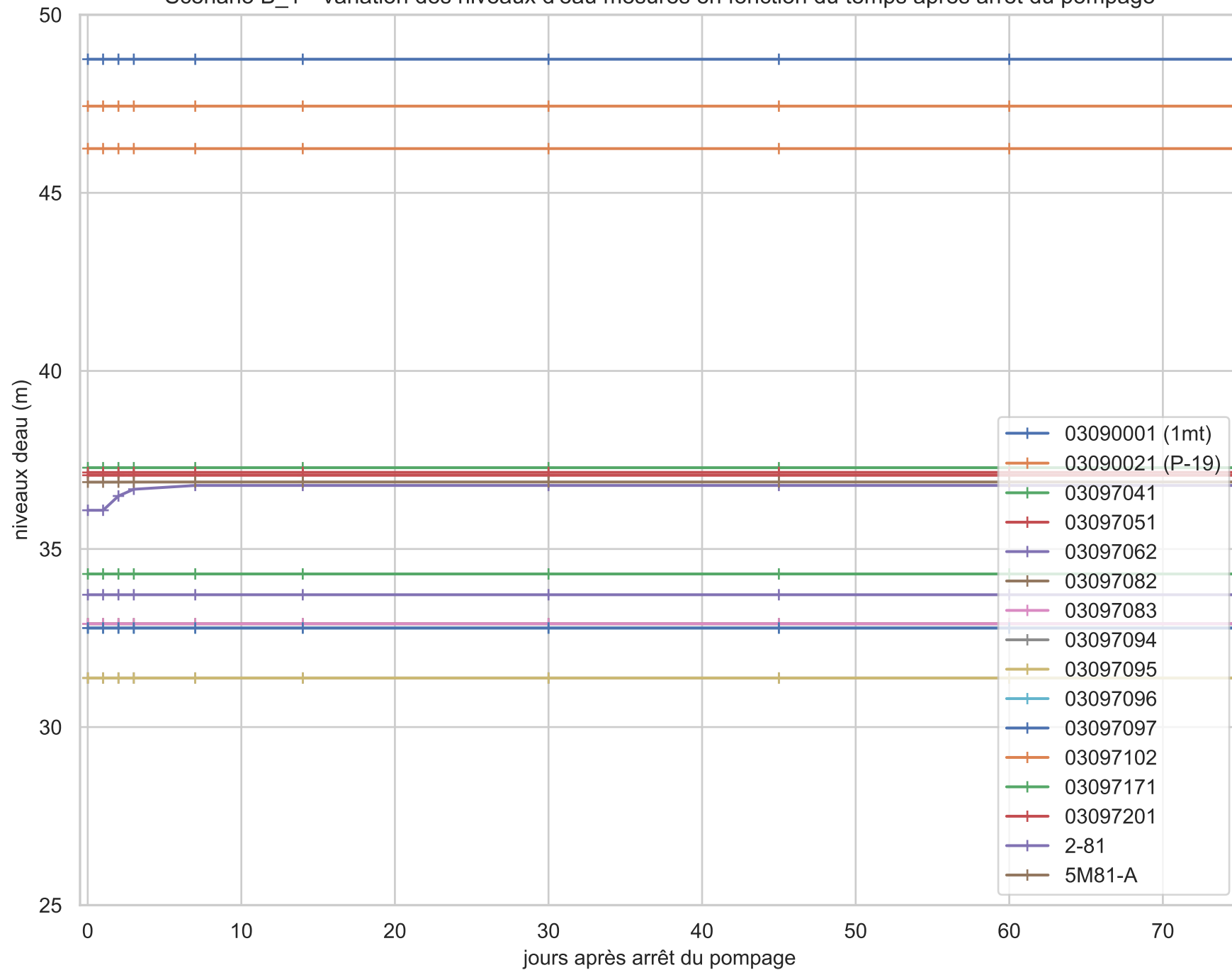


Figure B_1-16(4)

Scénario B_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

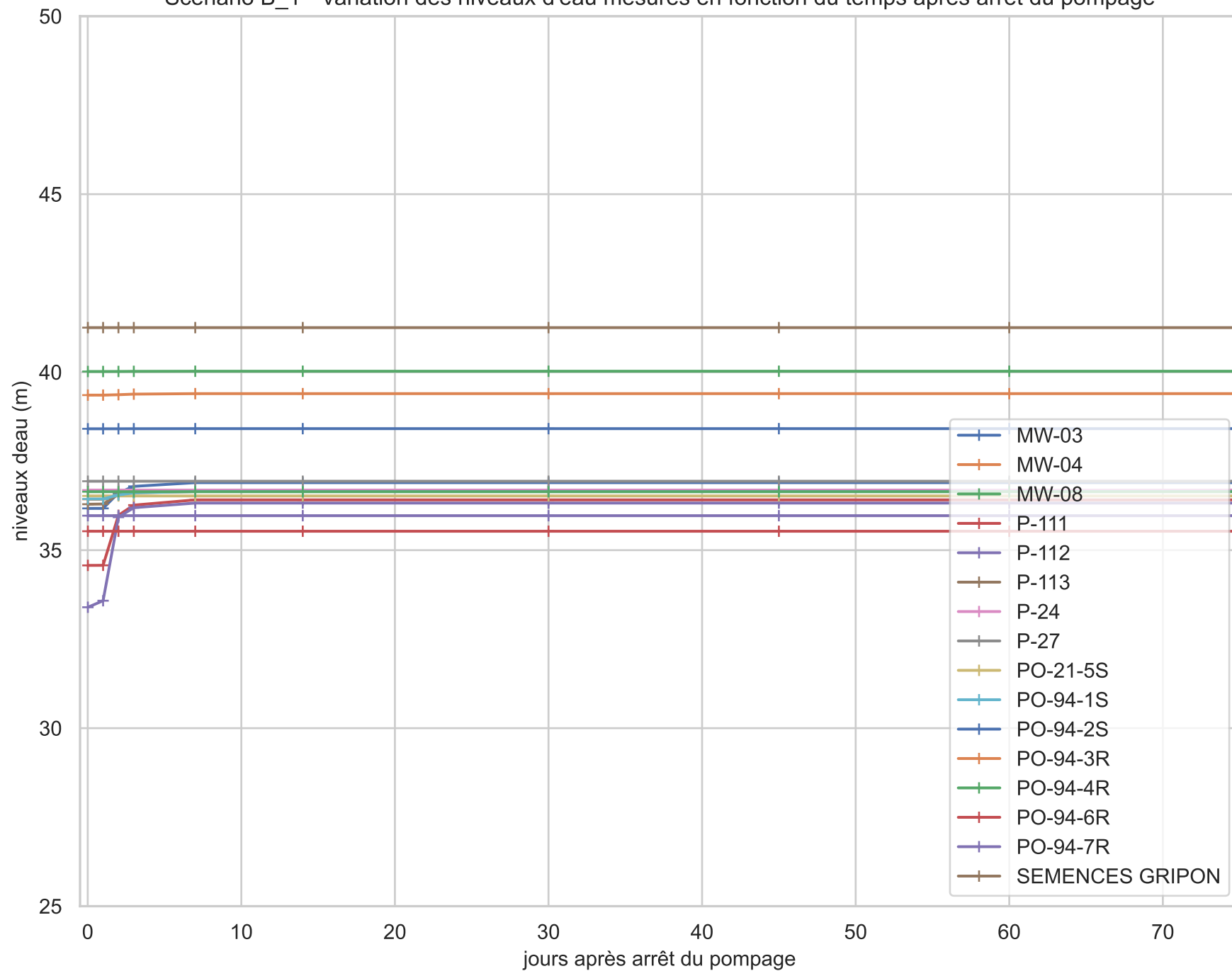
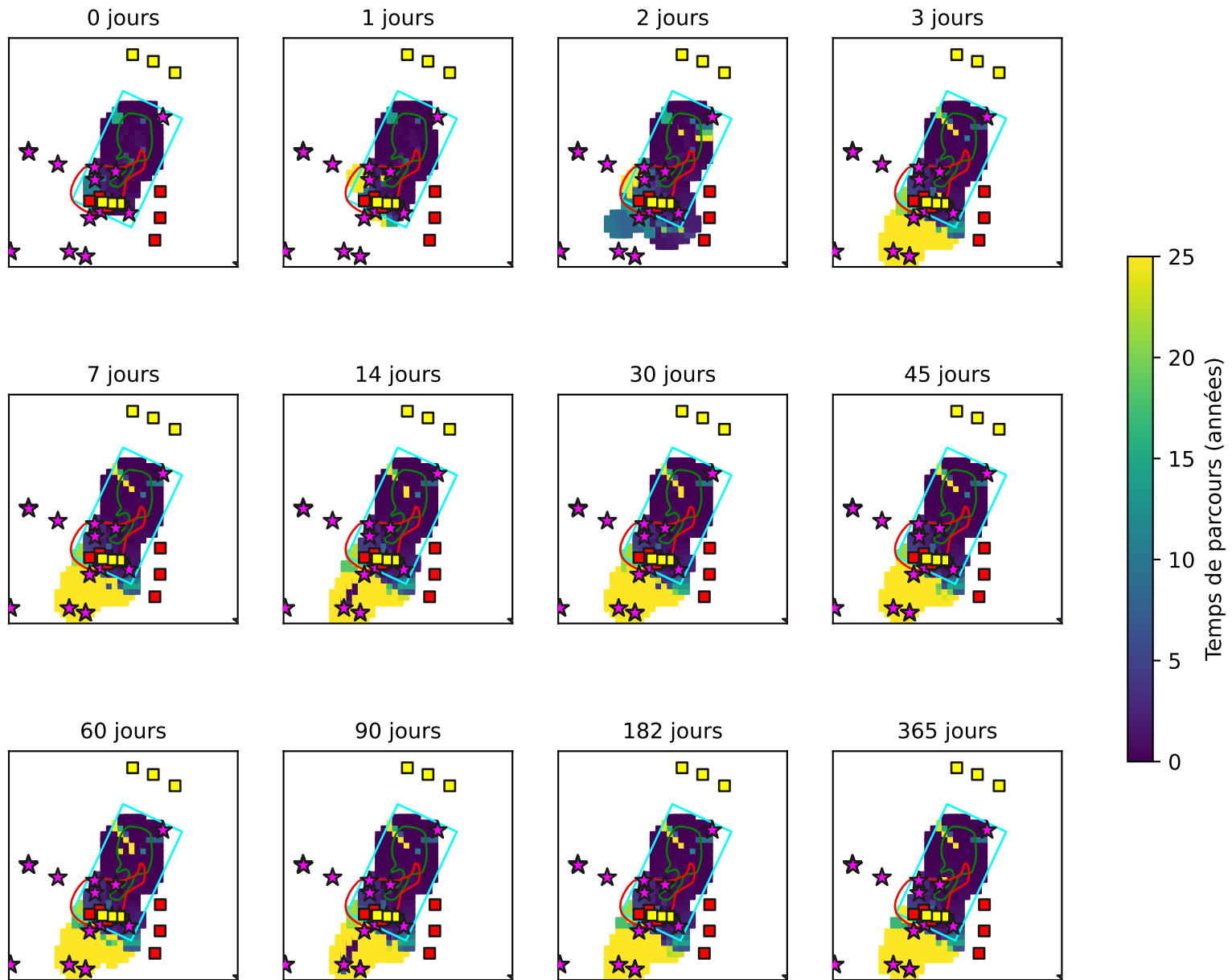


Figure B_1-17

Scenario B_1 - Migration de la zone contaminée de l'esker après arrêt du pompage



Scénario B_1 - Schéma Nord

Figure B_1-18
Scénario B_1 - Variation des gradients verticaux en fonction de la réalisation

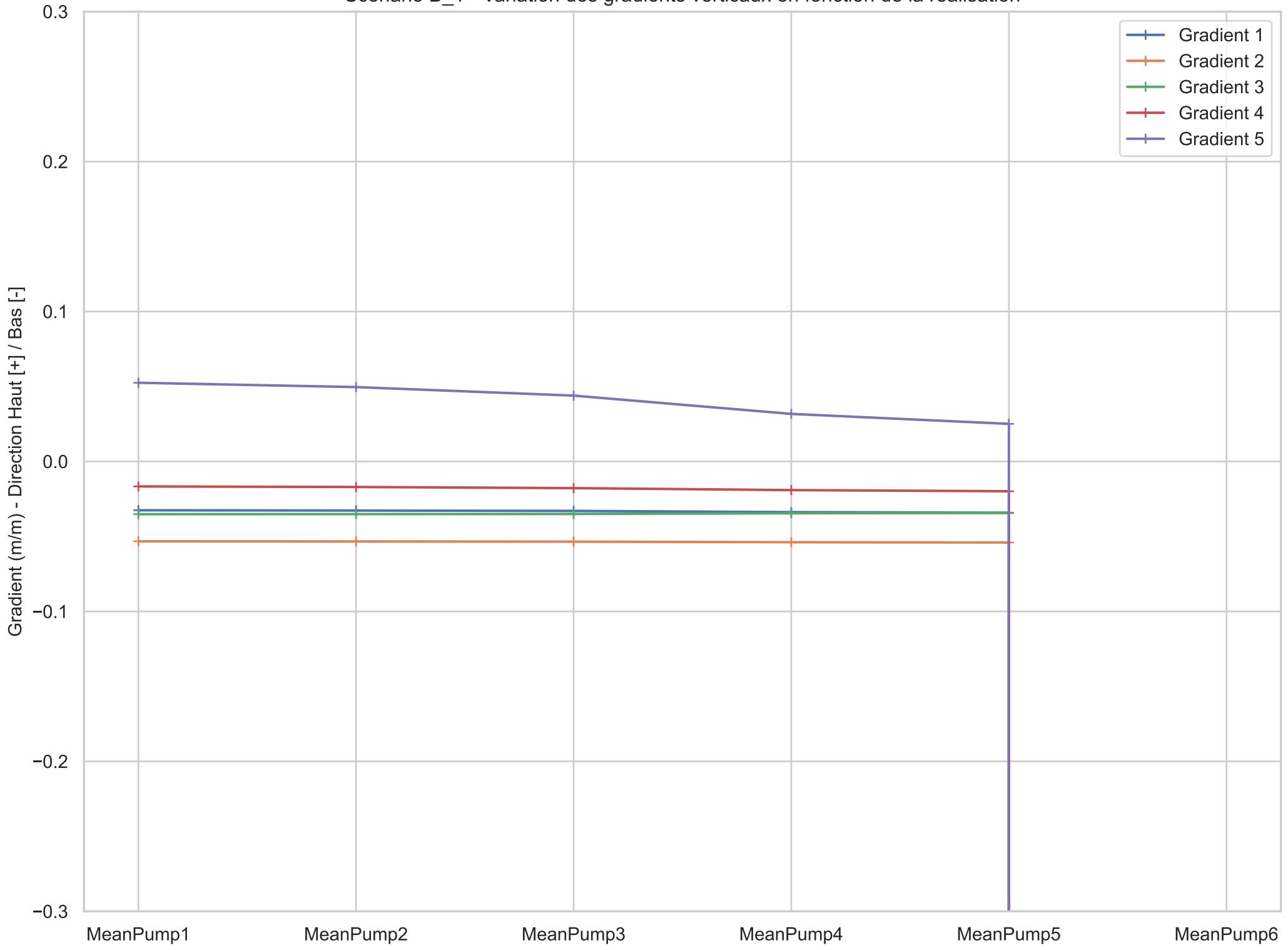


Figure B_1-19(1)
 Scénario B_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

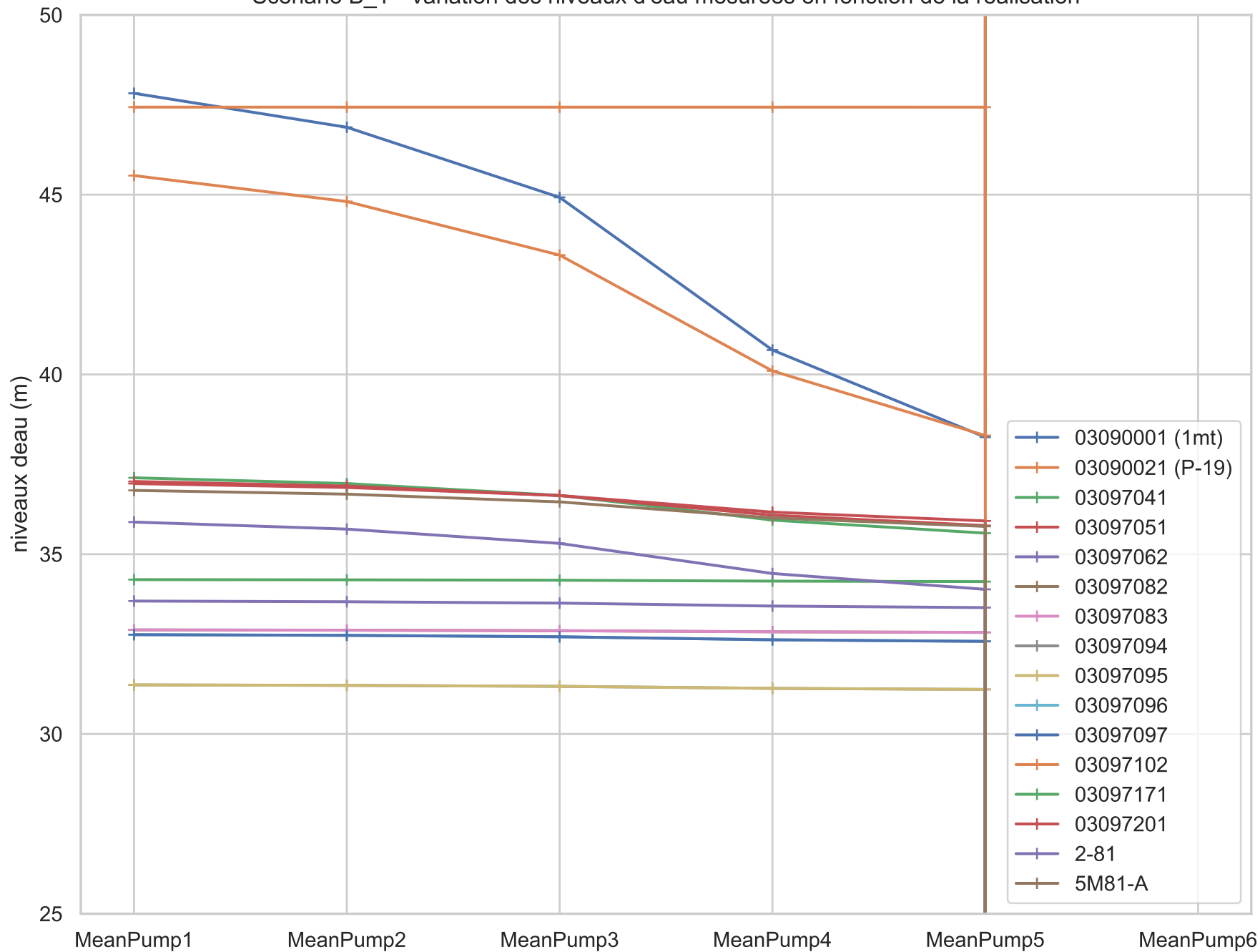


Figure B_1-19(2)
Scénario B_1 - Variation des niveaux d'eau mesurées en fonction de la réalisation

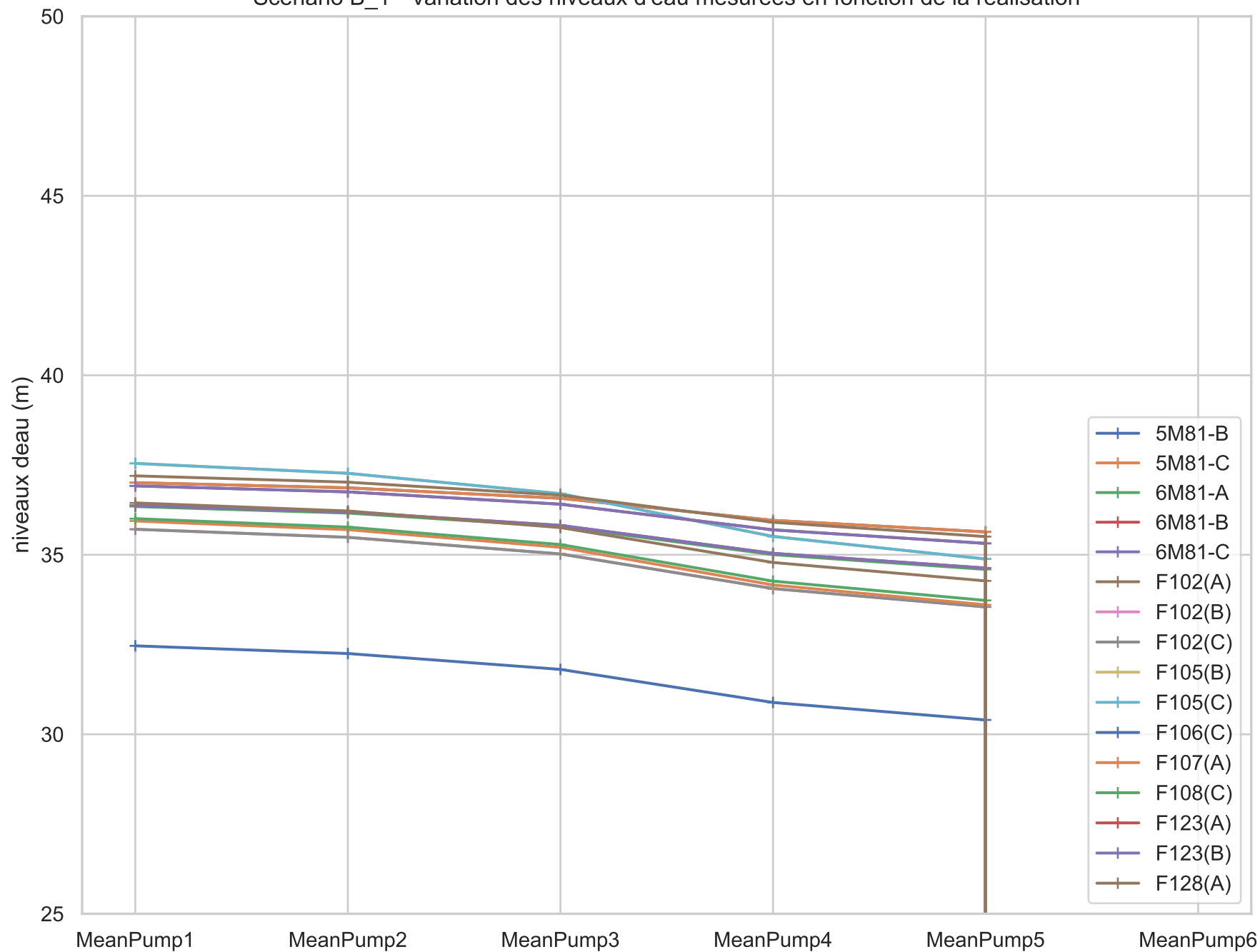


Figure B_1-19(3)
 Scénario B_1 - Variation des niveaux d'eau mesurées en fonction de la réalisation

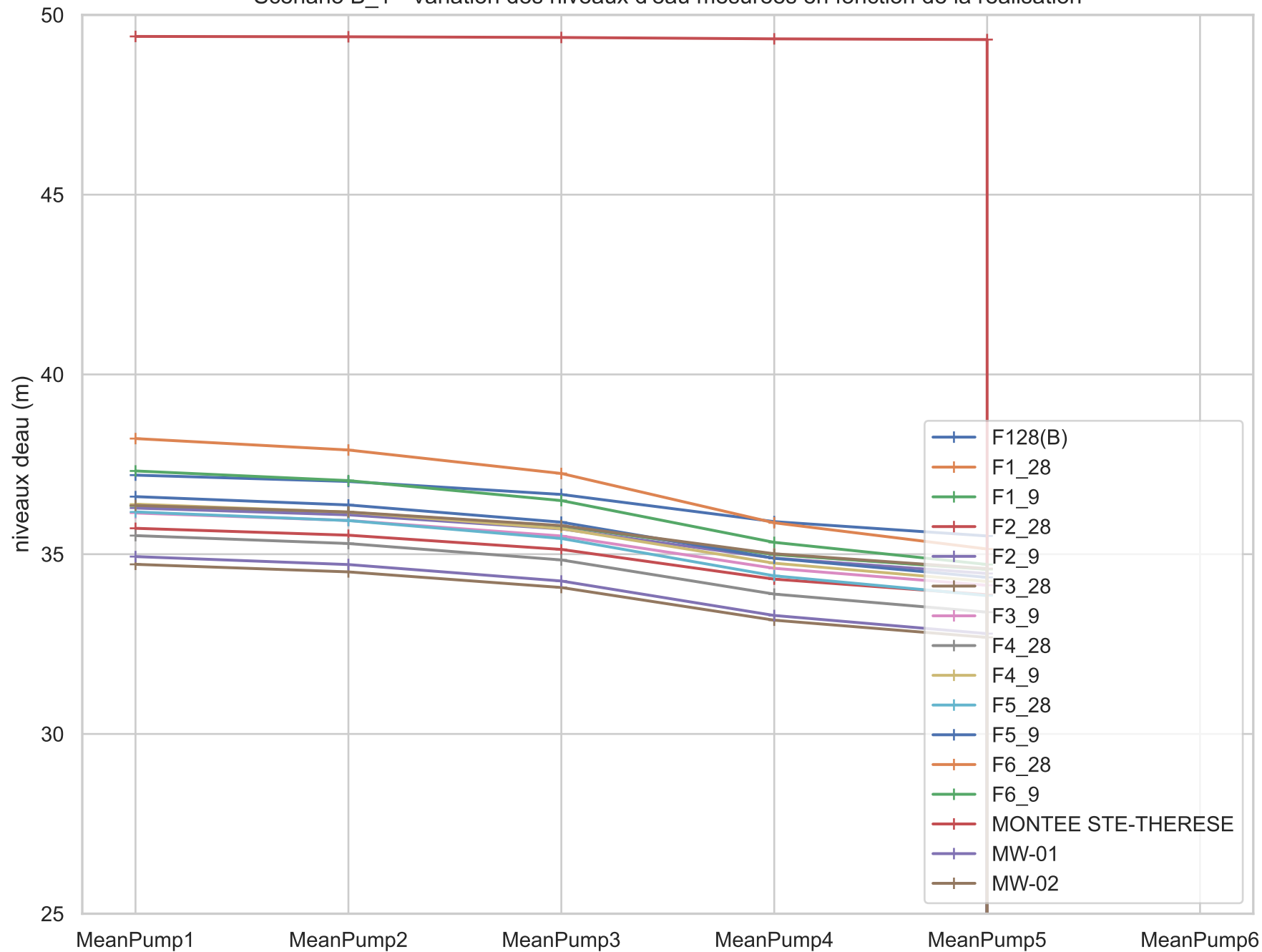


Figure B_1-19(4)
 Scénario B_1 - Variation des niveaux d'eau mesurées en fonction de la réalisation

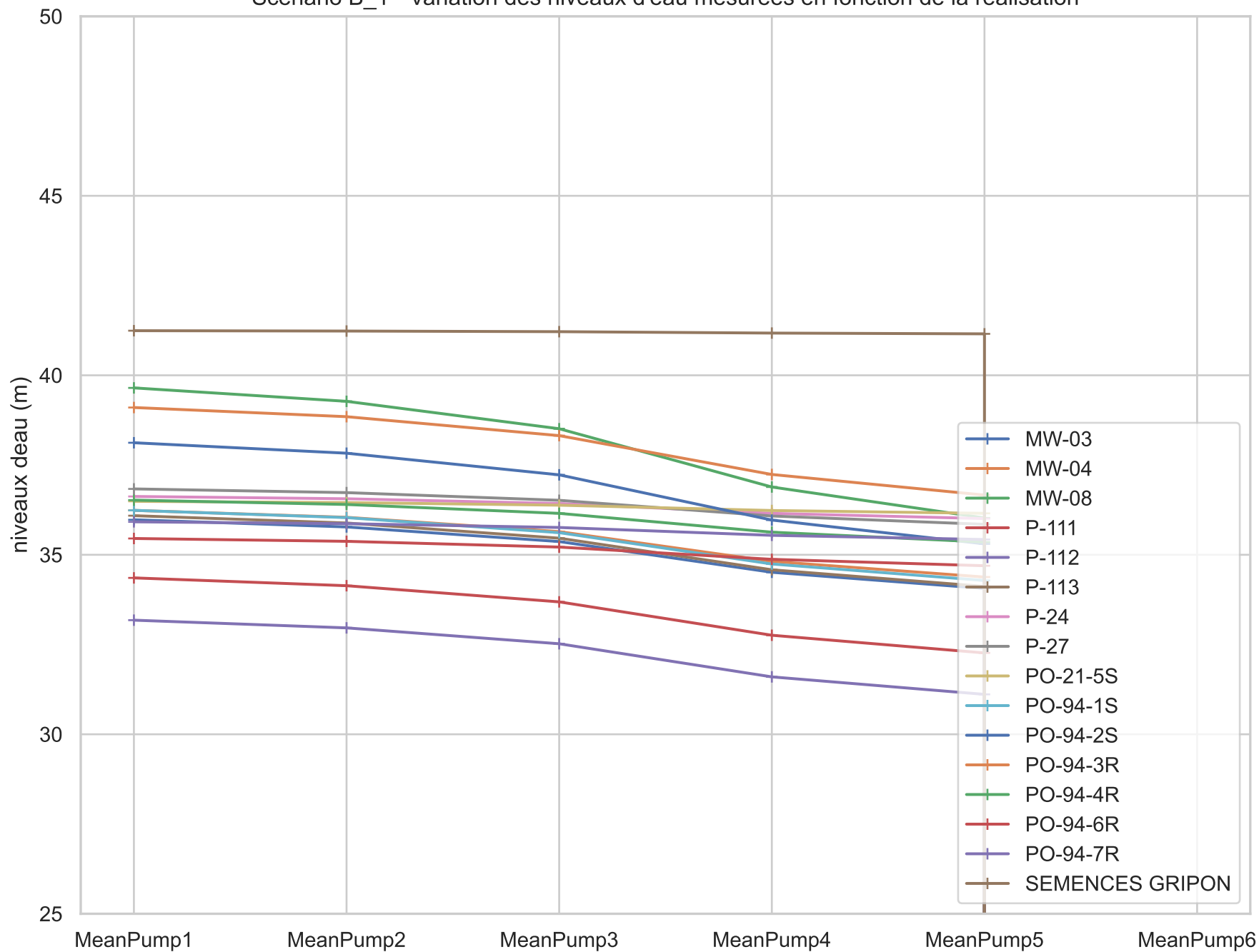


Figure B_1-20

Scénario B_1 - Traçage de particules dans l'esker à partir des puits Nord sur 25 ans

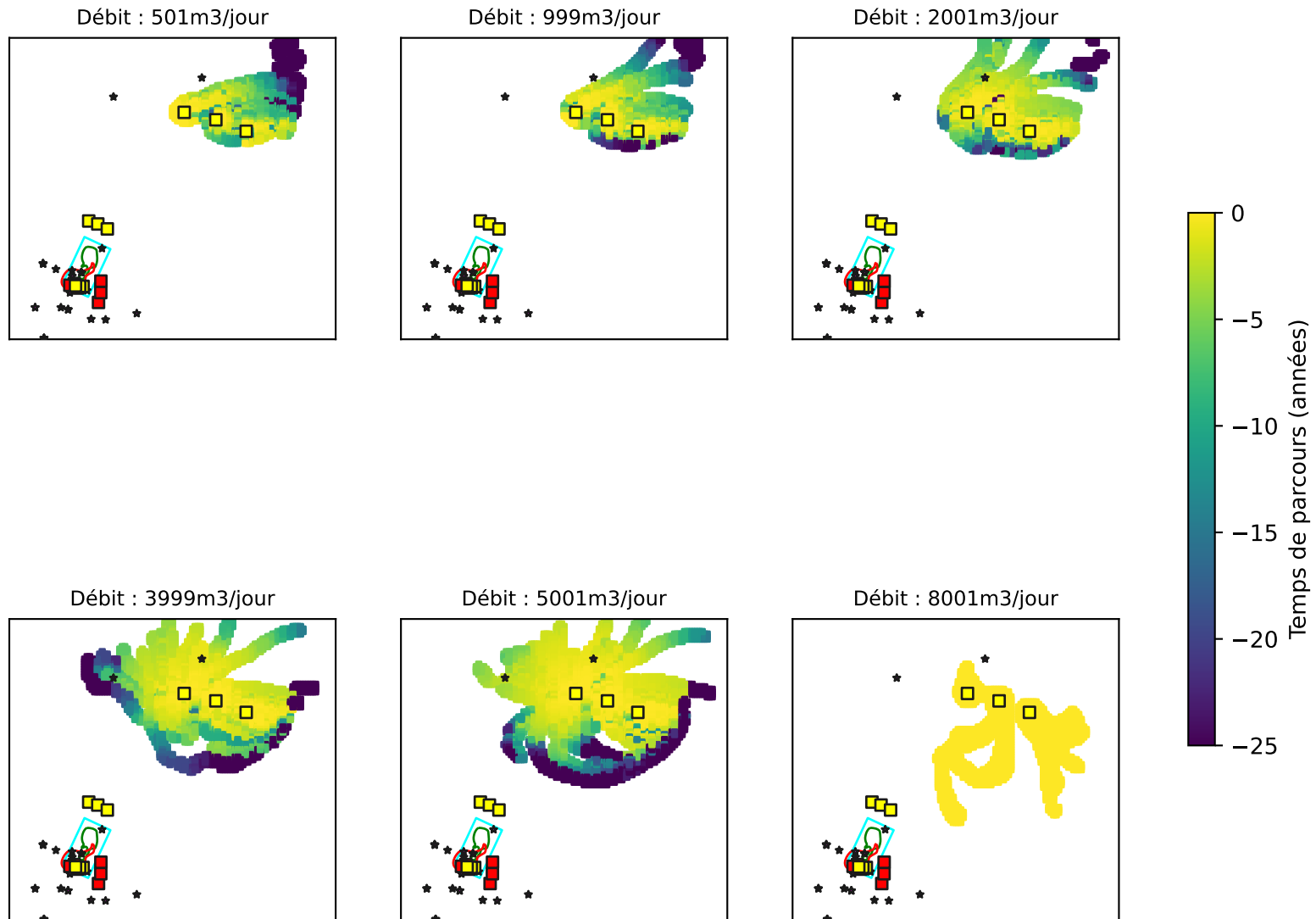


Figure B_1-21

Scénario B_1 - Traçage de particules au roc à partir des puits au Nord sur 25 ans

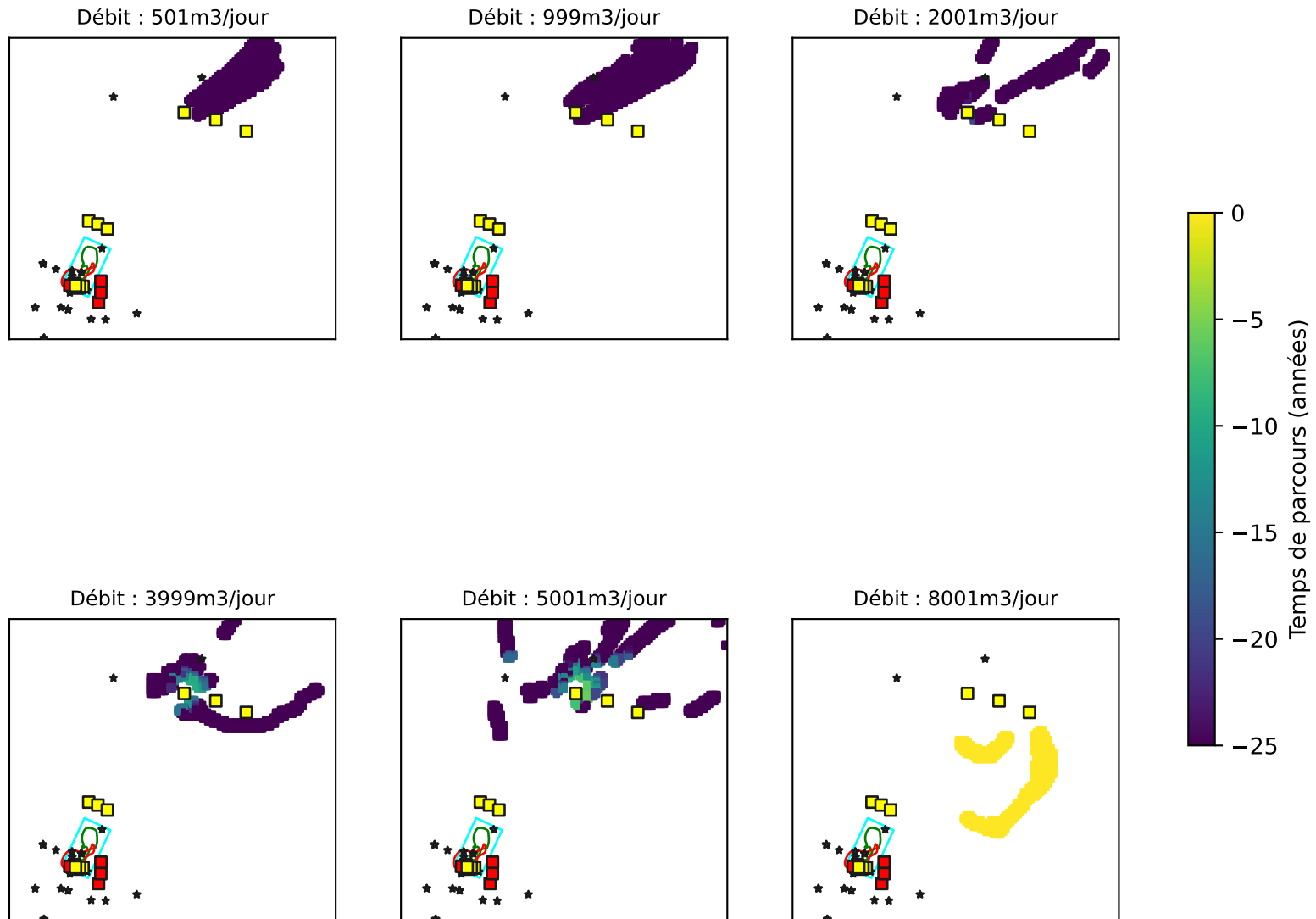
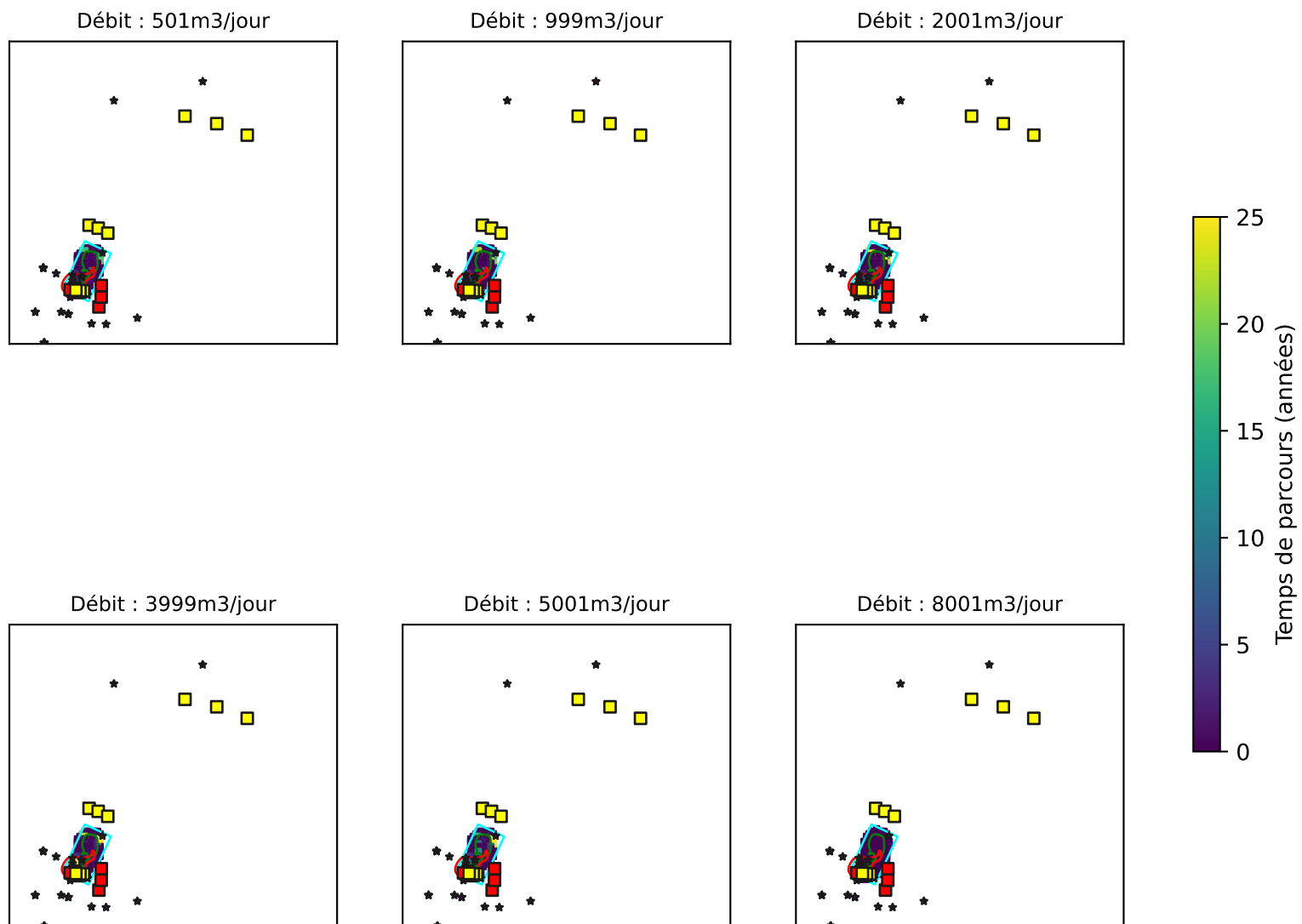


Figure B_1-22

Scénario B_1 - Traçage de particules à partir de la zone source de l'esker sur 25 ans



Scénario B_1_S3R3 - Schéma Climat

Figure B_1-23
Scénario B_1_S3R3 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

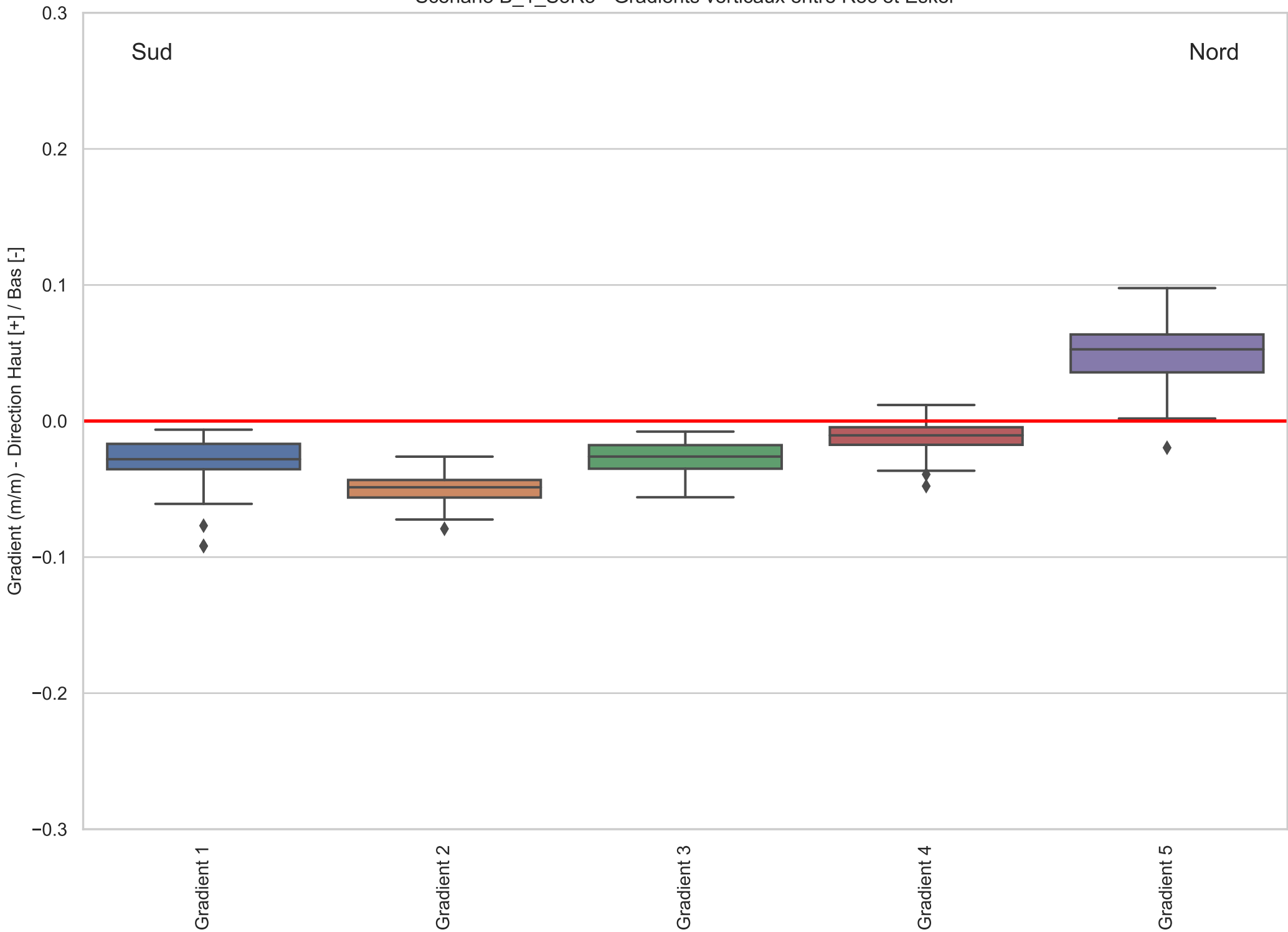


Figure B_1-24

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

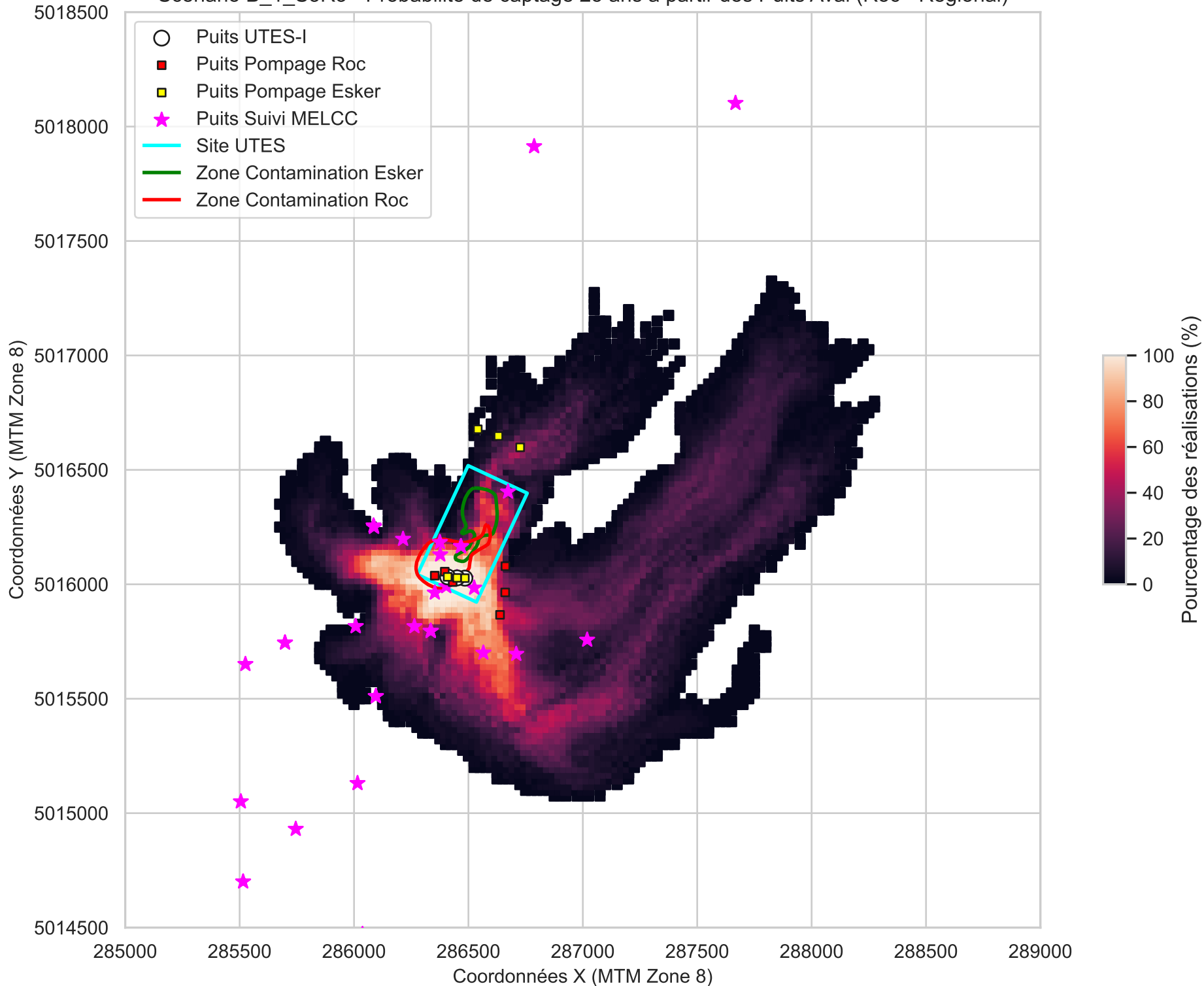


Figure B_1-25

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

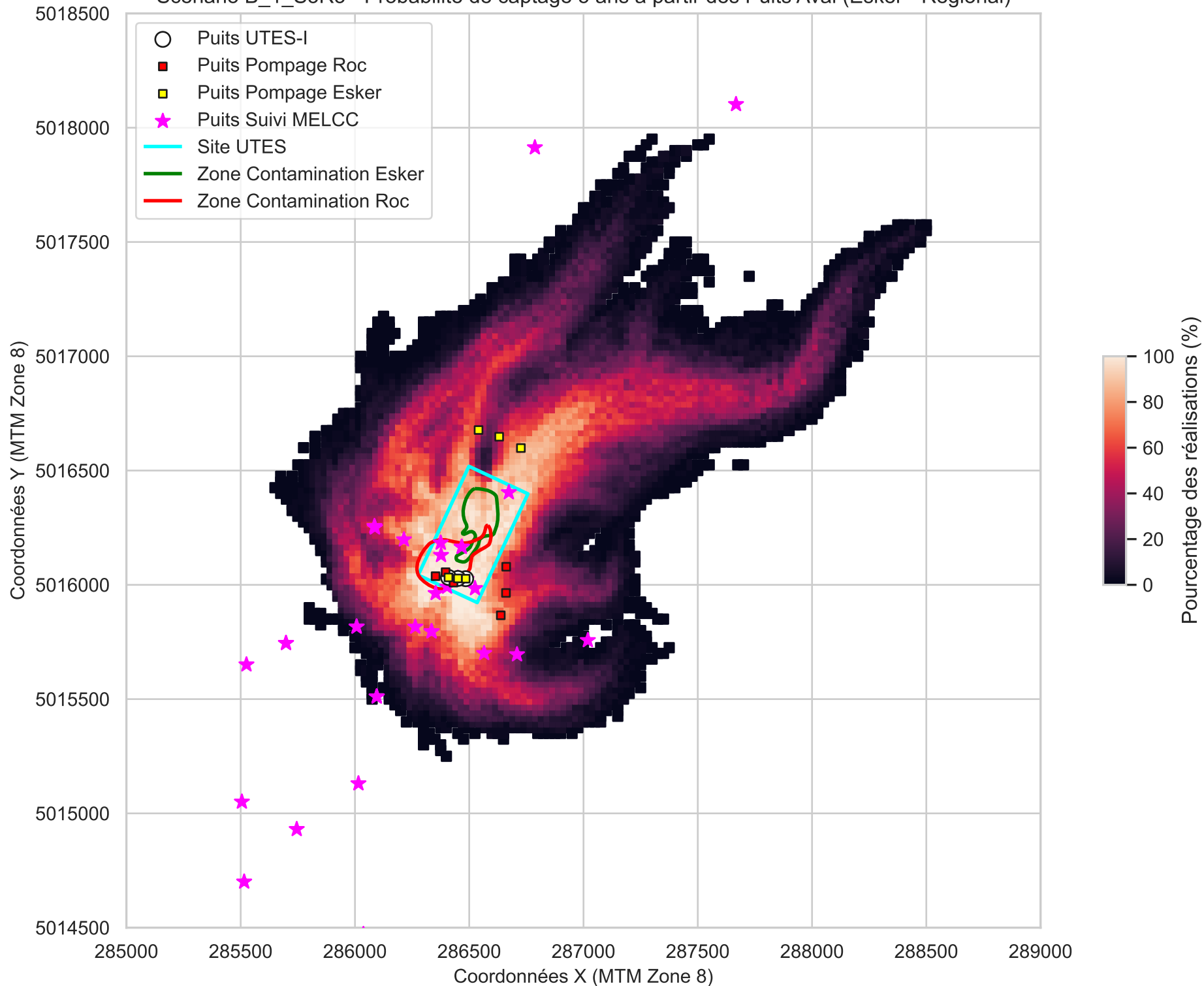


Figure B_1-26

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

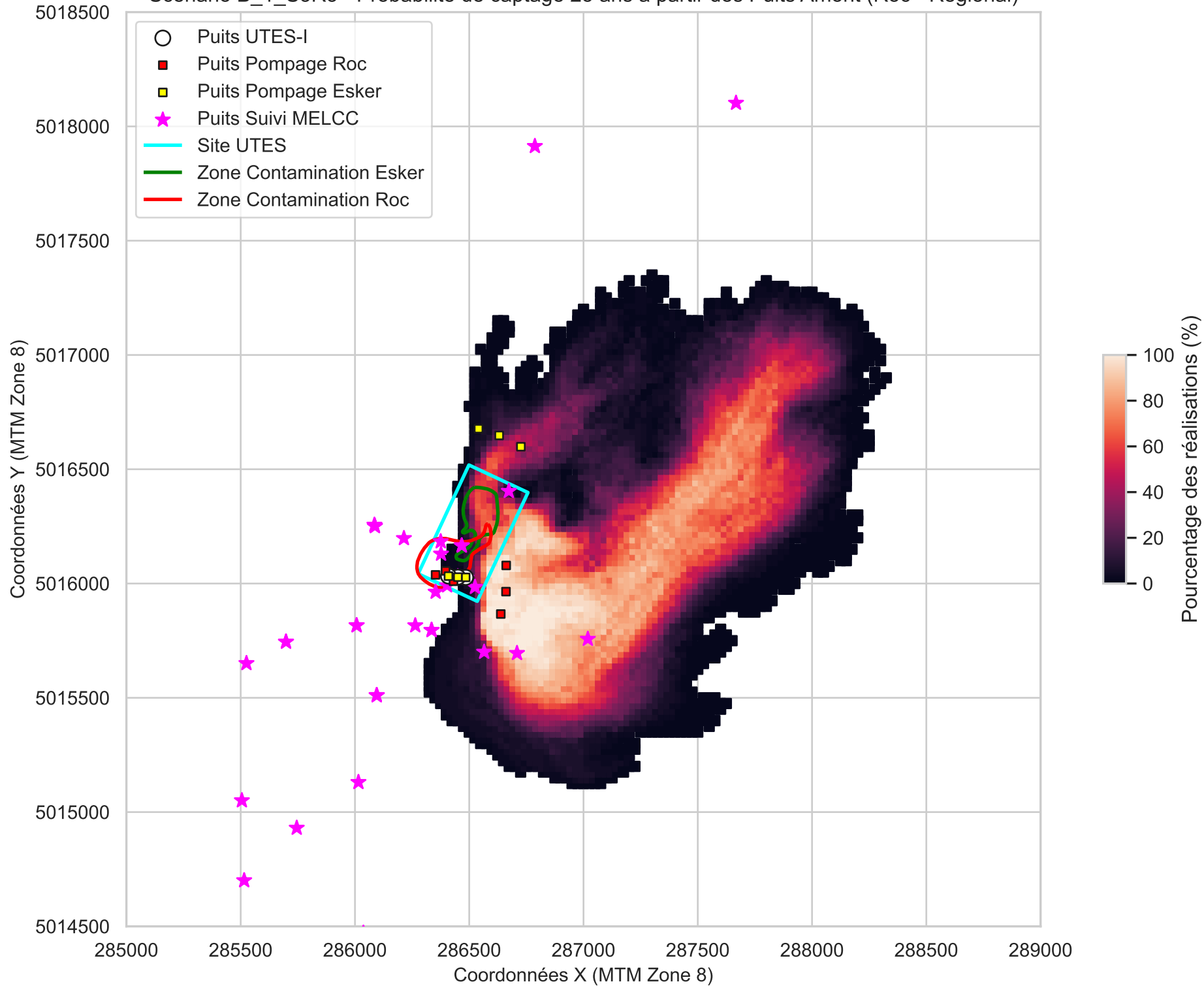


Figure B_1-27

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

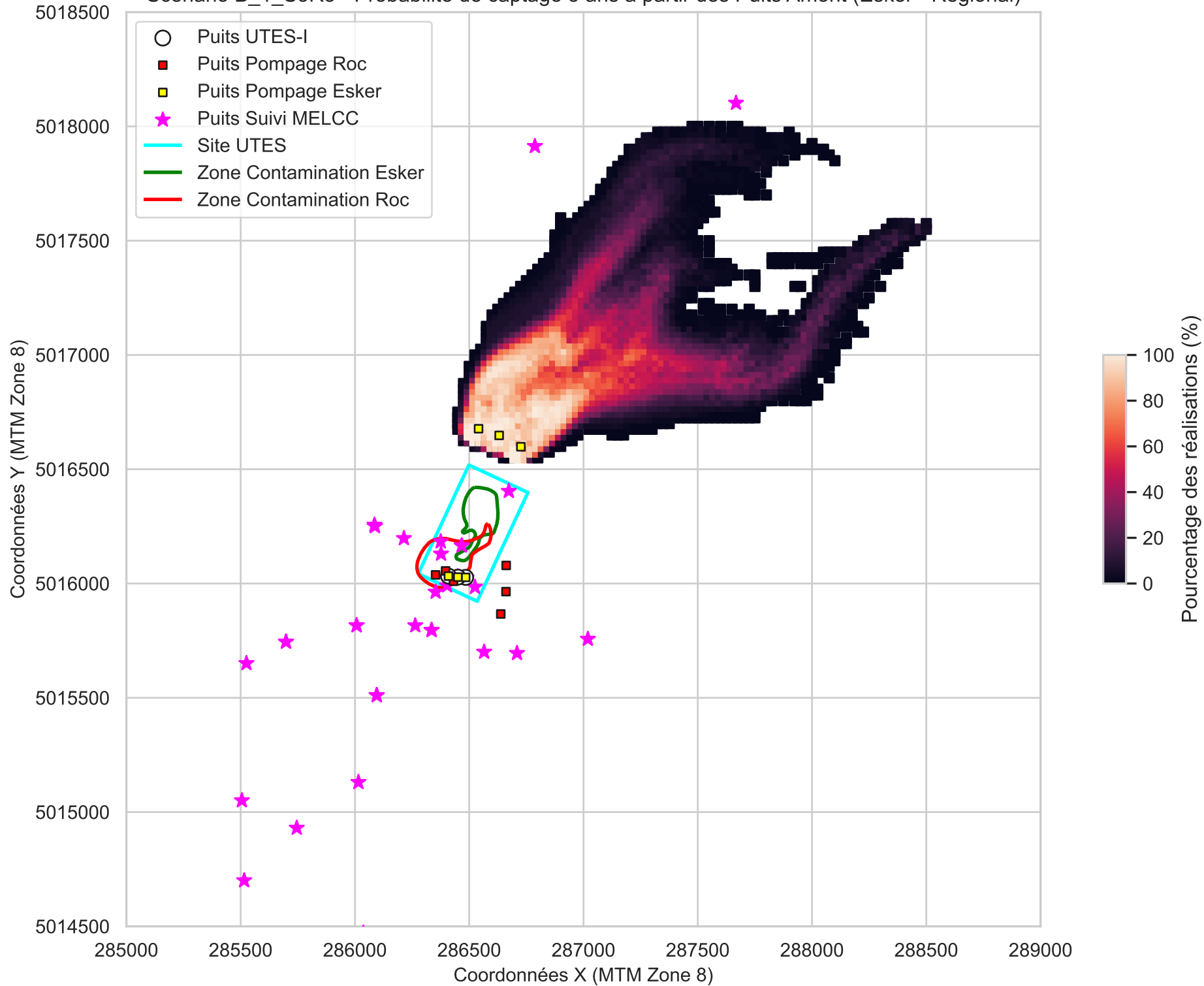


Figure B_1-28

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

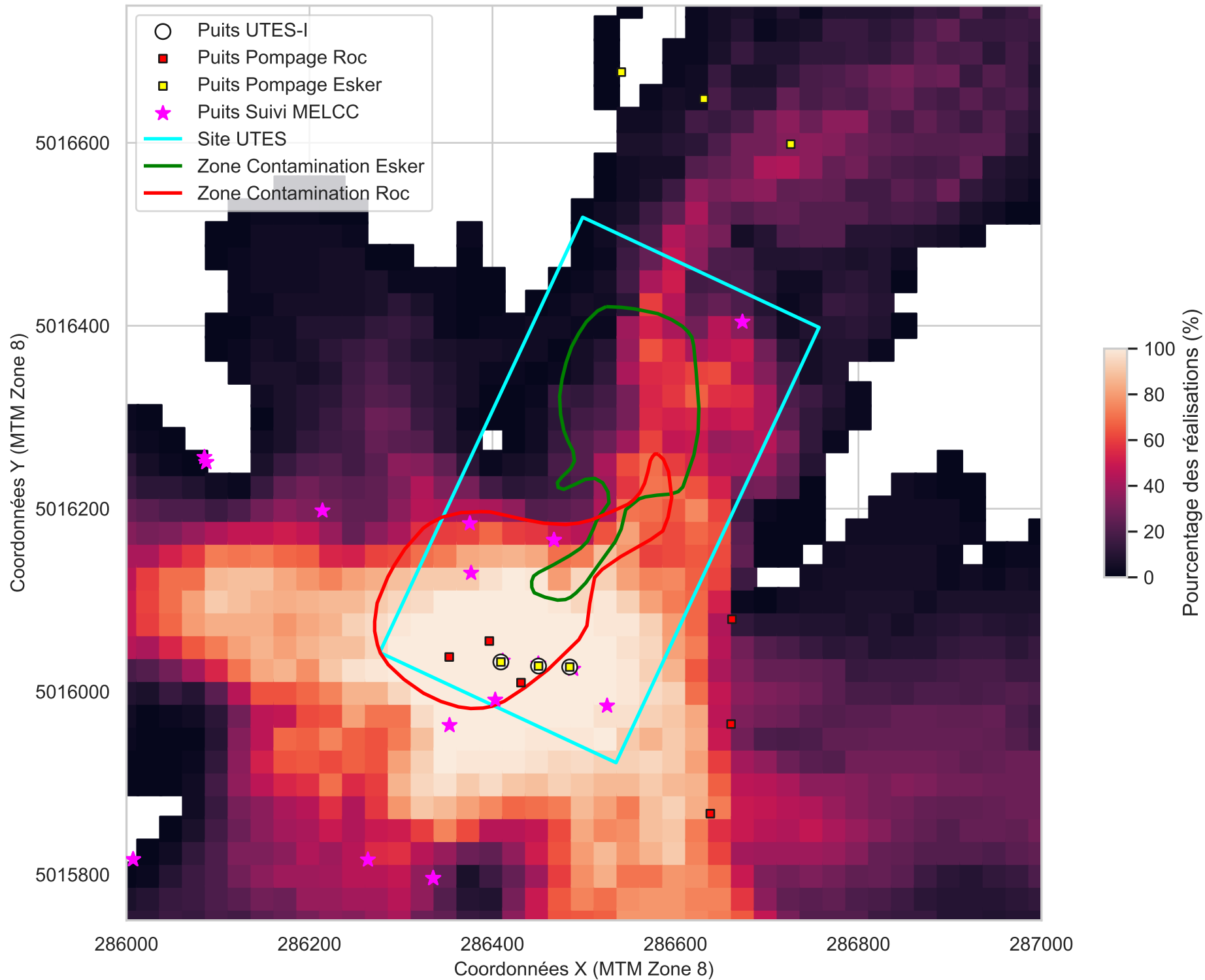


Figure B_1-29

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

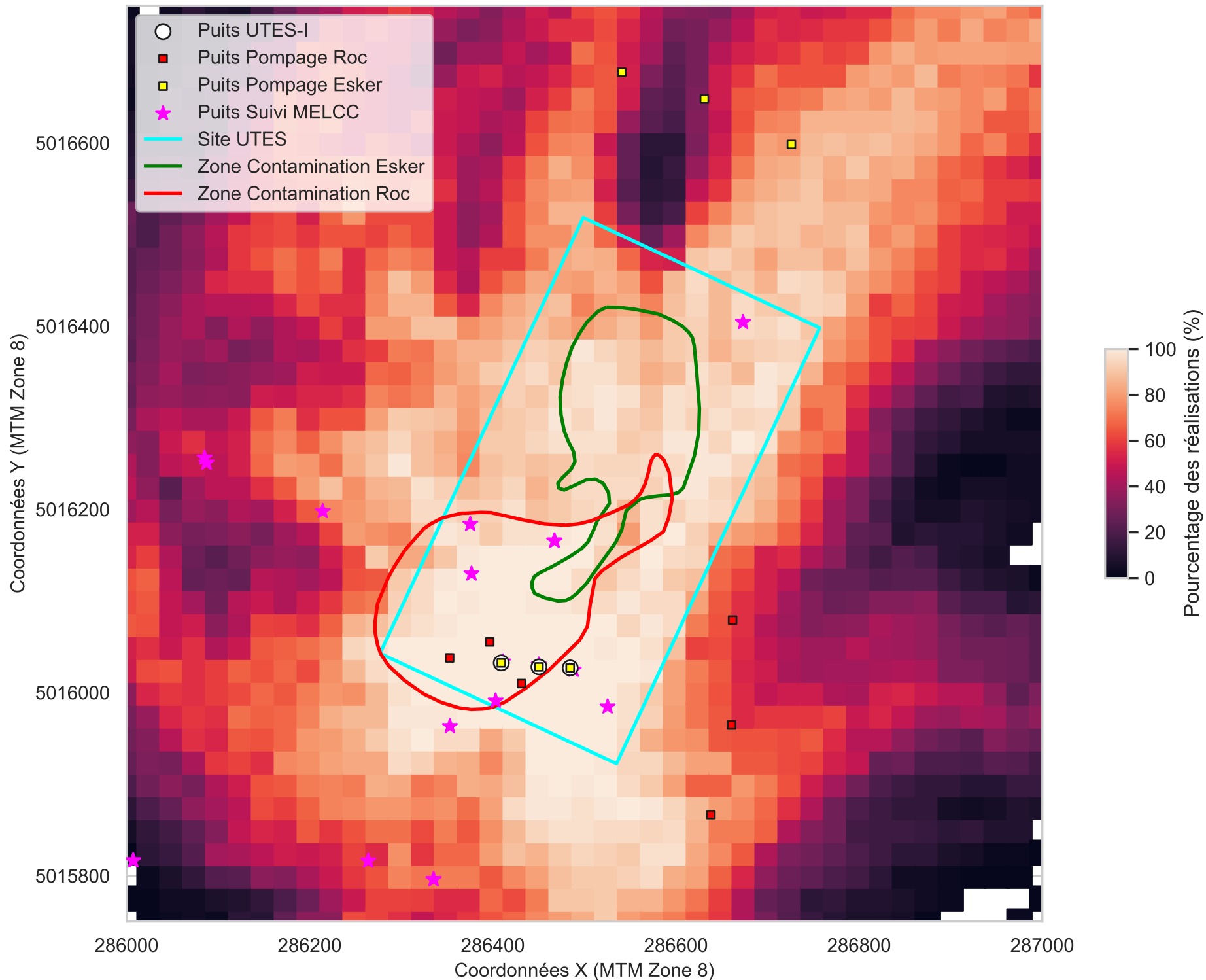


Figure B_1-30

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

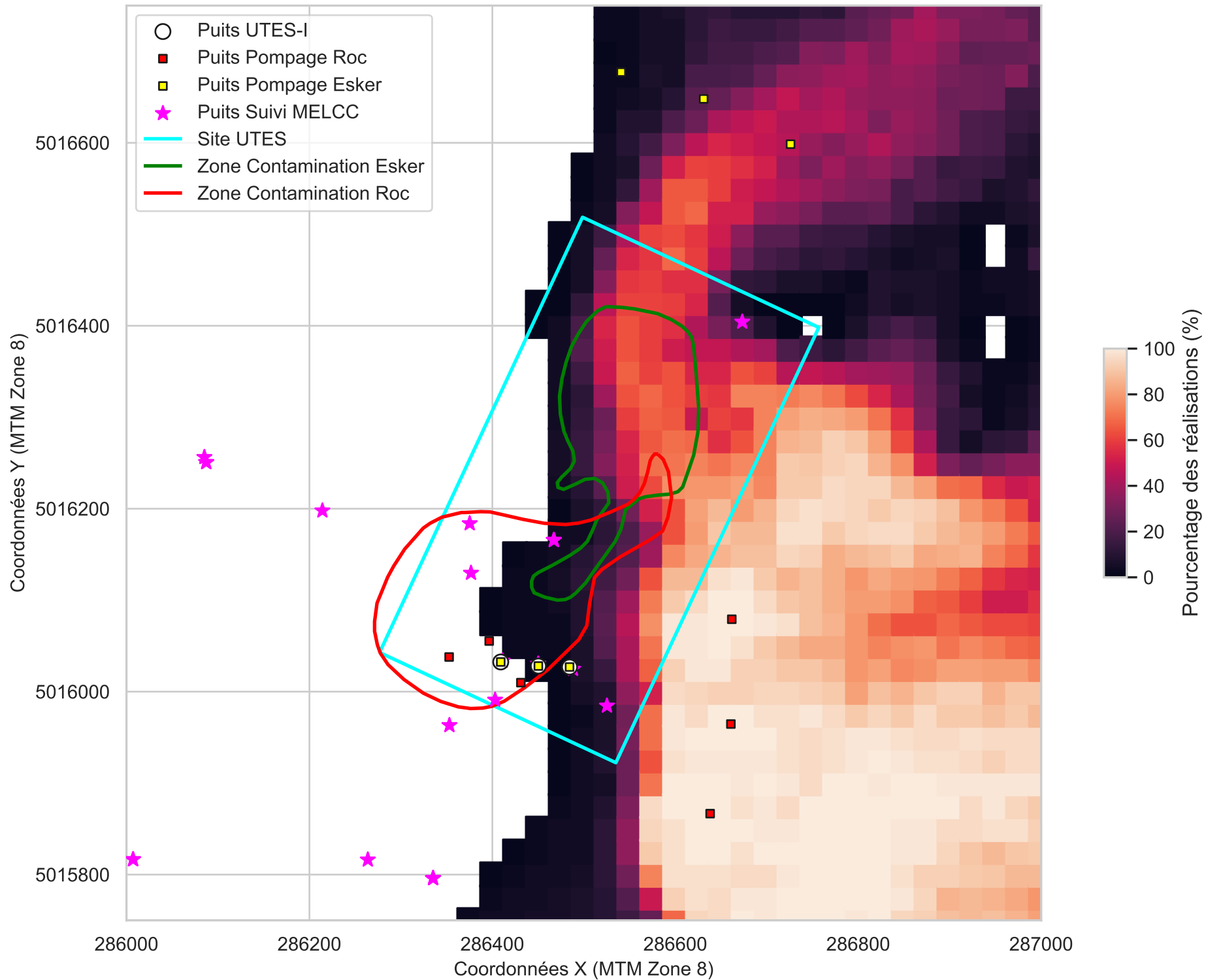


Figure B_1-31

Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

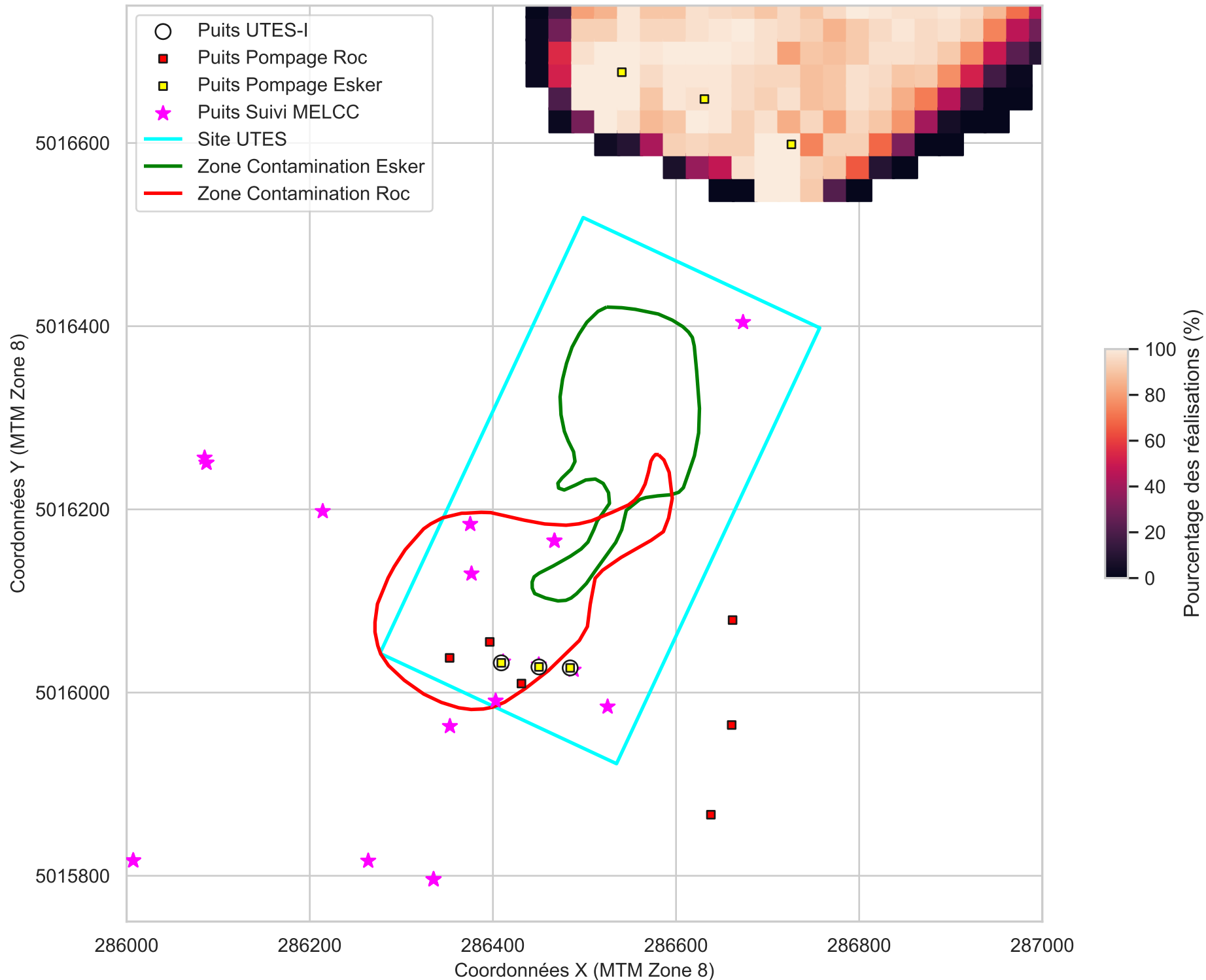


Figure B_1-32
Scénario B_1_S3R3 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

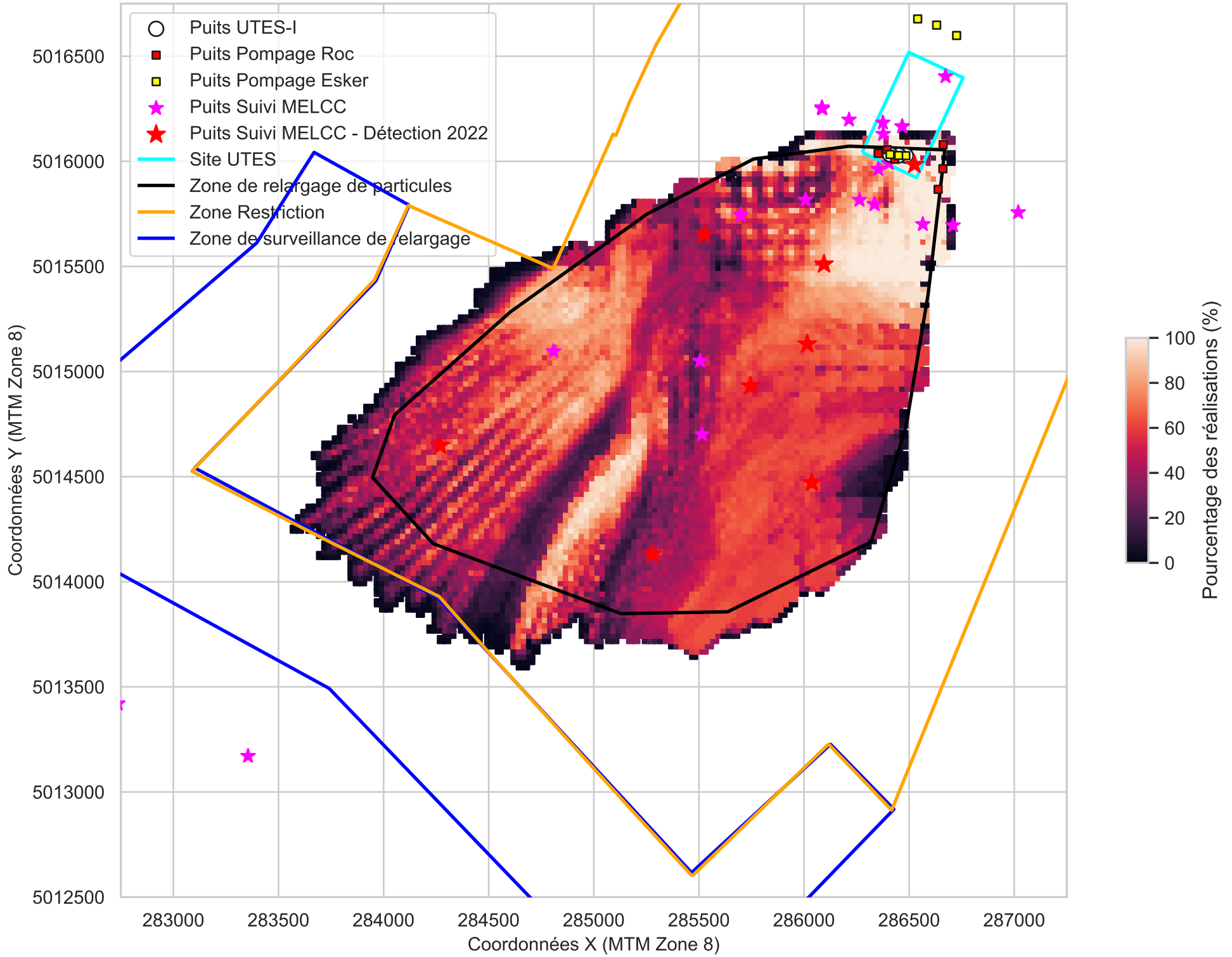
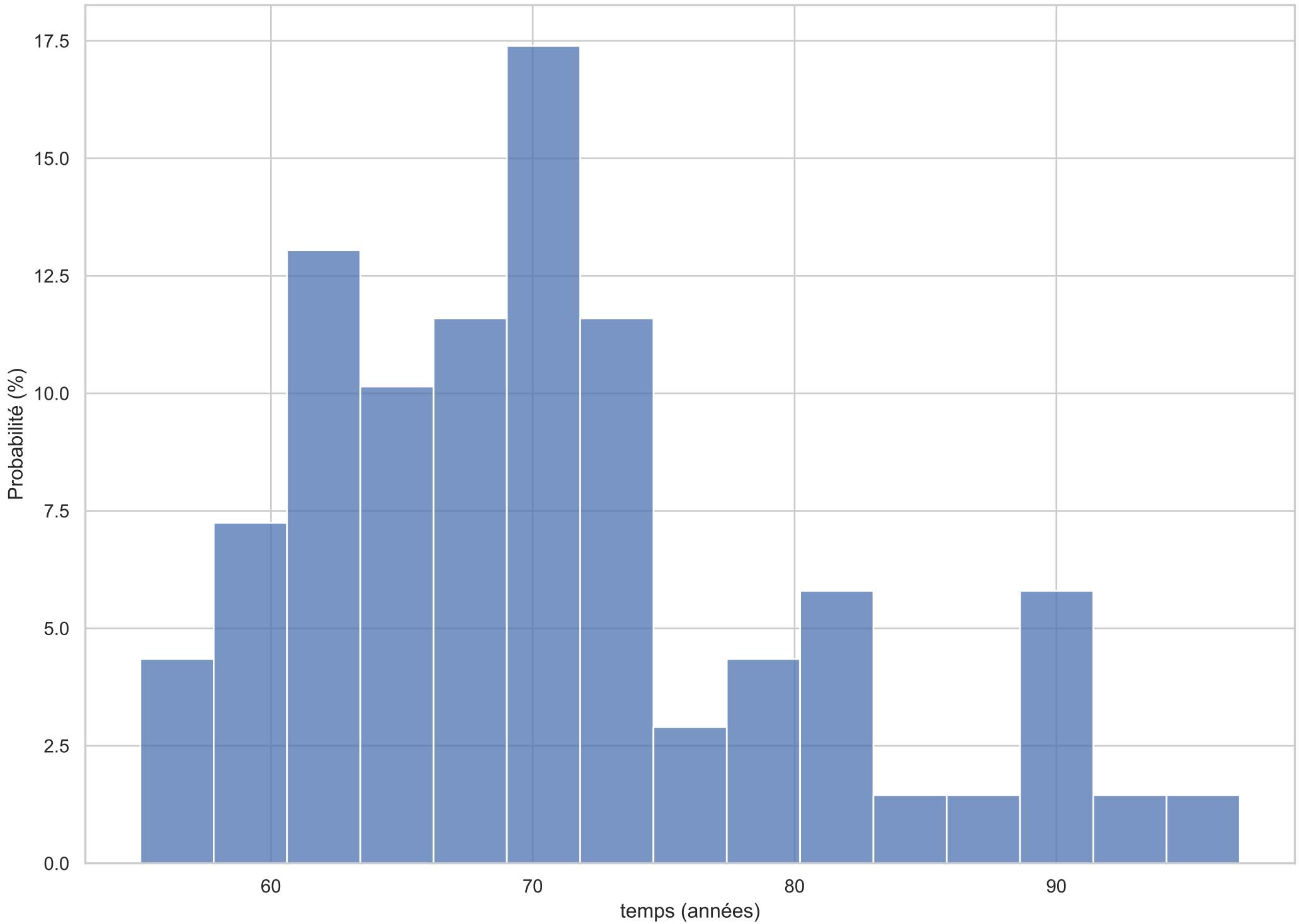


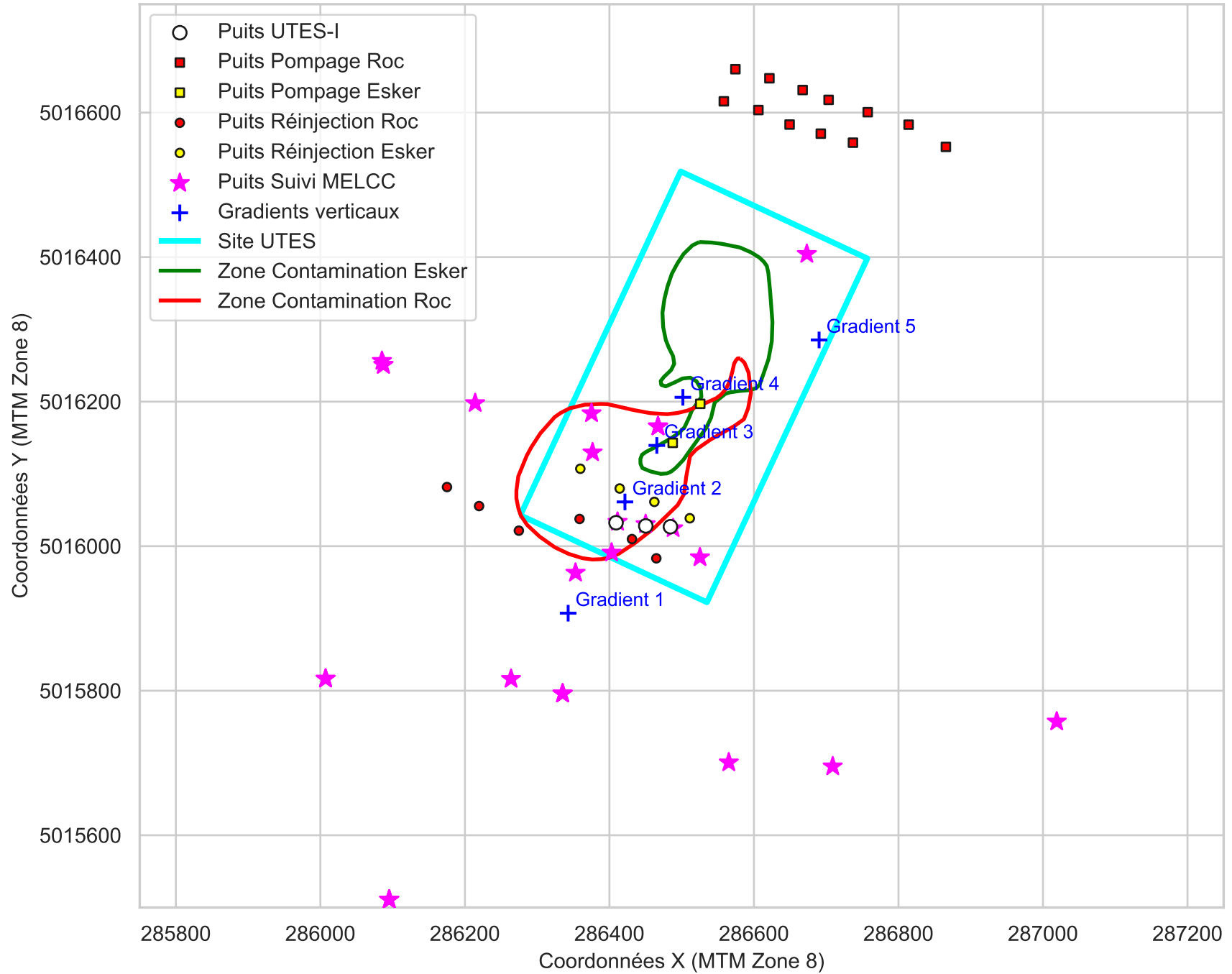
Figure B_1-33
Scénario B_1_S3R3 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Figures en support de l'évaluation des critères de décision

Scénario C

Figure C-1
Scénario C



Scénario C - Schéma Kxy moyen

Figure C-2
Scénario C - Gradients verticaux en fonction de la réalisation du schéma Kxy moyen

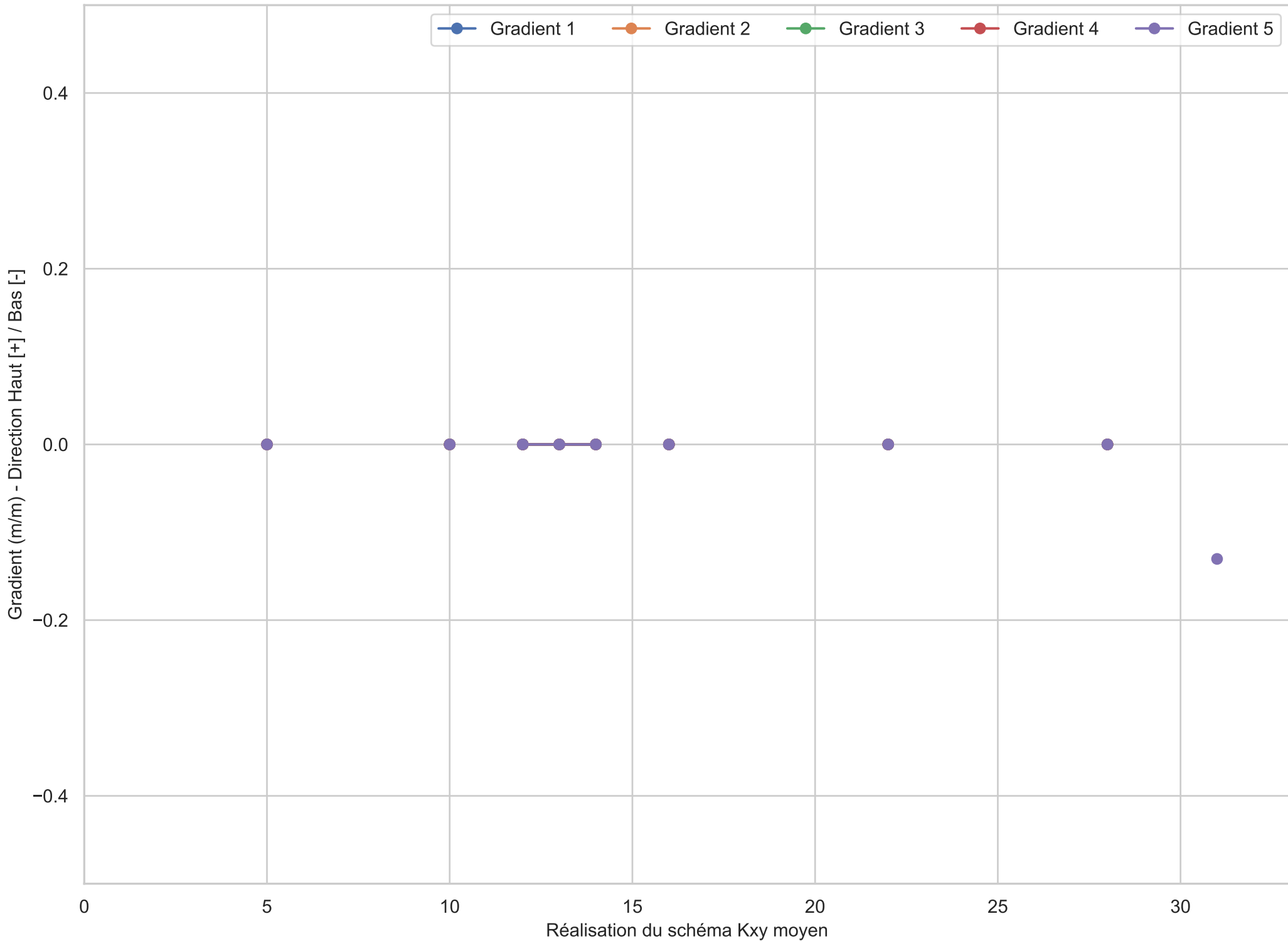
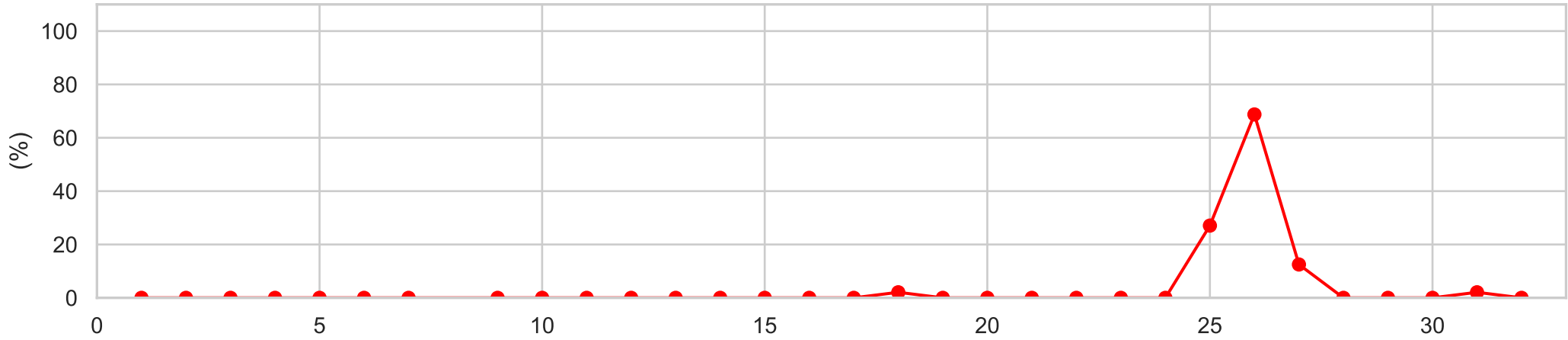
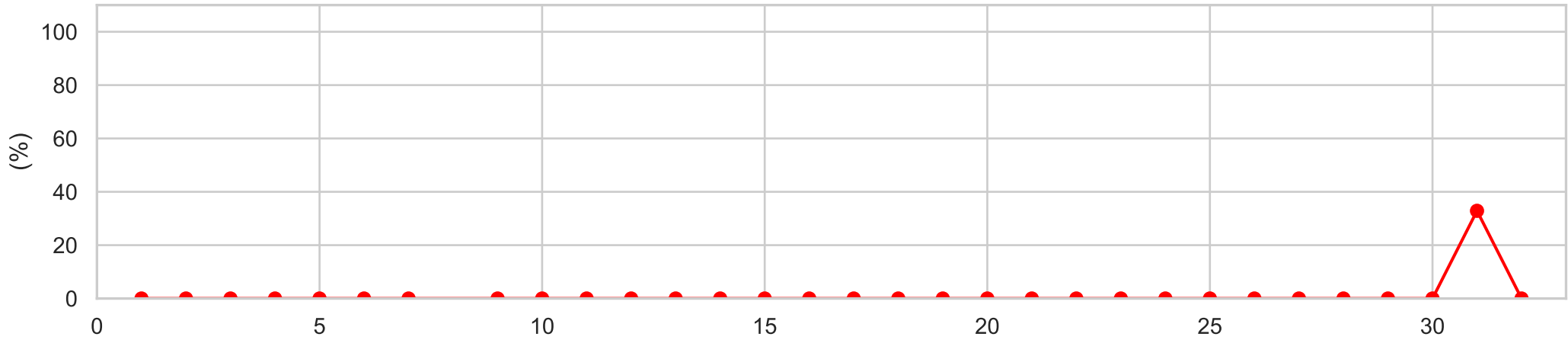


Figure C-3

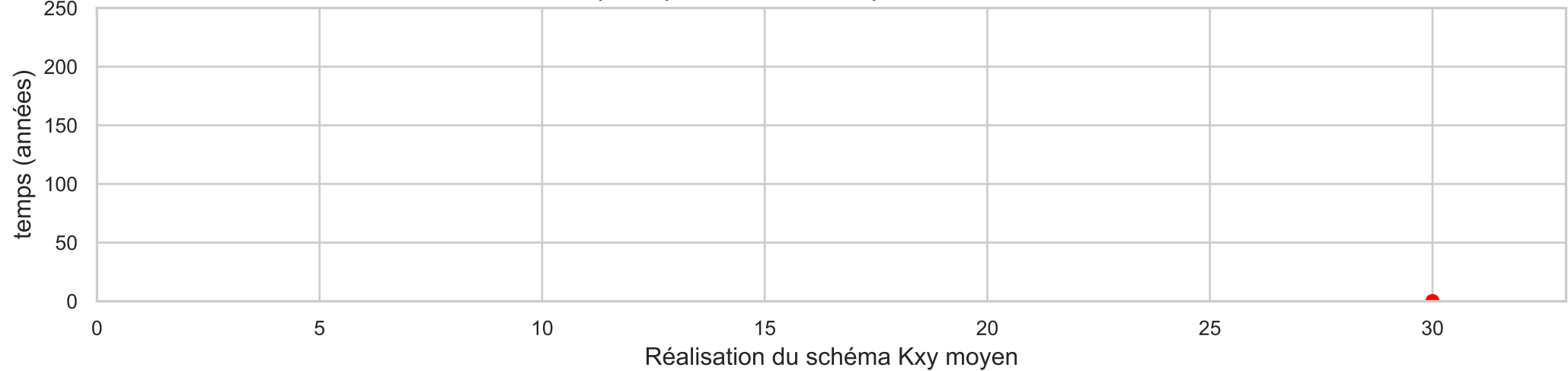
Scénario C - Proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années



Scénario C - Proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 ans



Scénario C - Temps de parcours minimum pour atteindre la zone de restriction



Figures en support de l'évaluation des critères de décision

Scénario C_1

Scénario C_1 - Schéma Kxy moyen

Figure C_1-2
Scénario C_1 - Gradients verticaux en fonction de la réalisation du schéma Kxy moyen

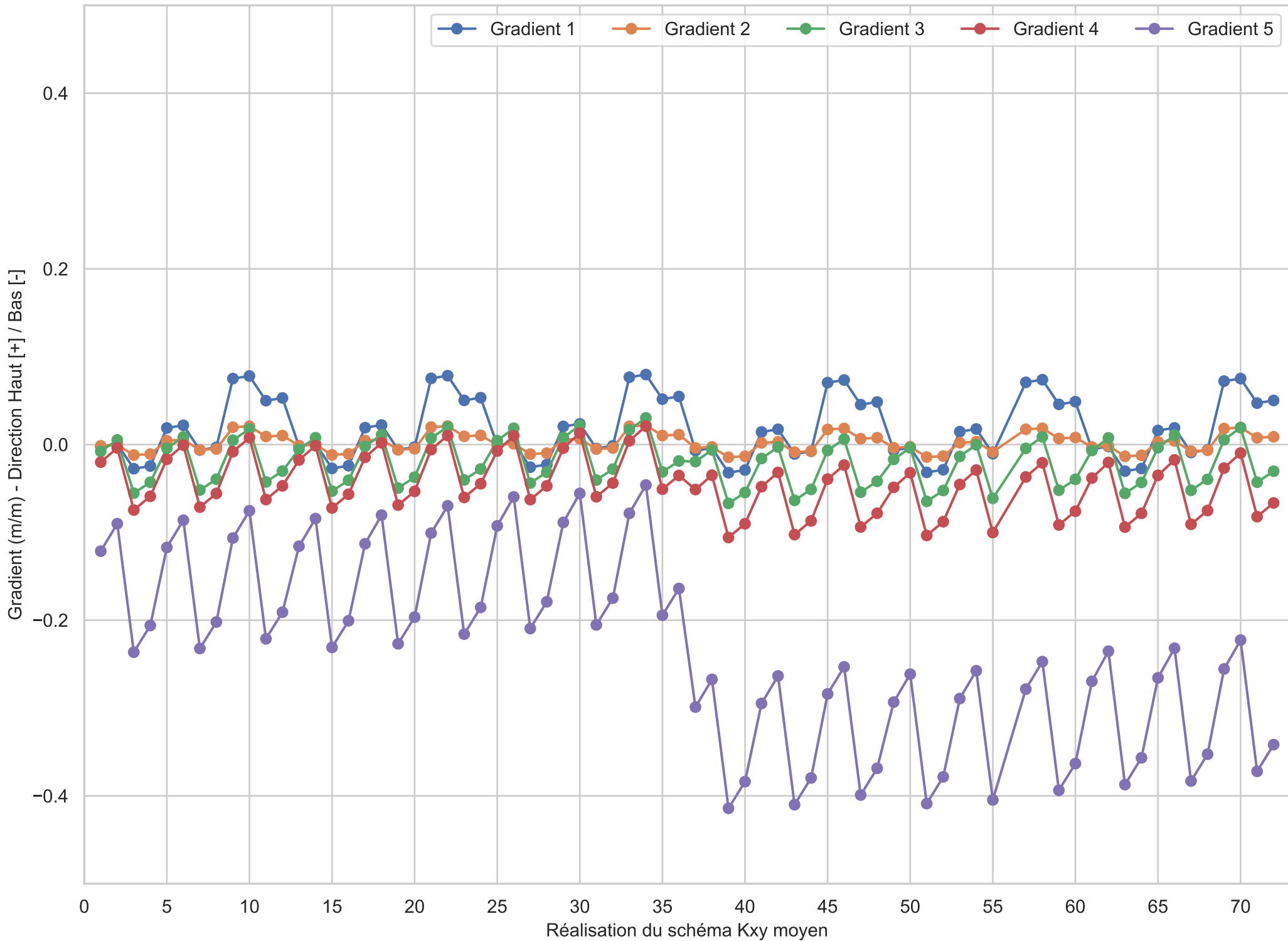
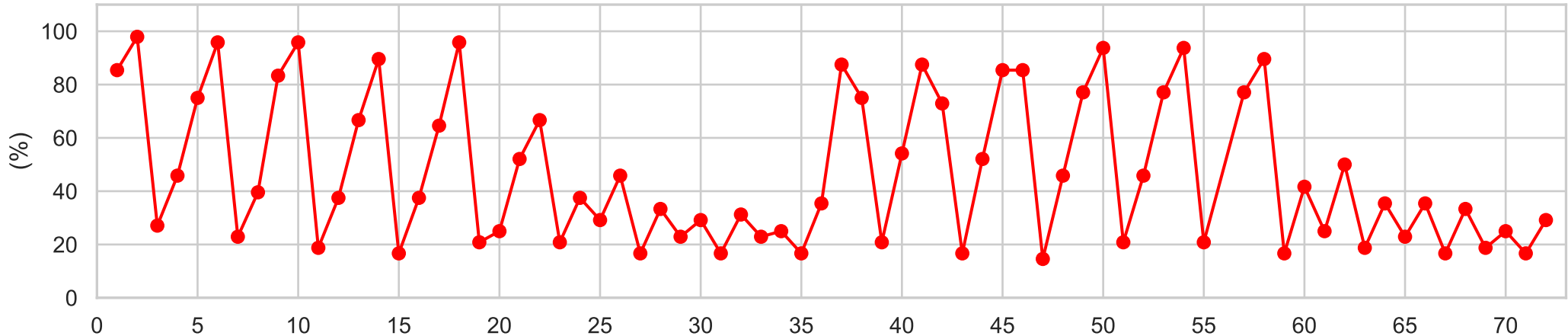
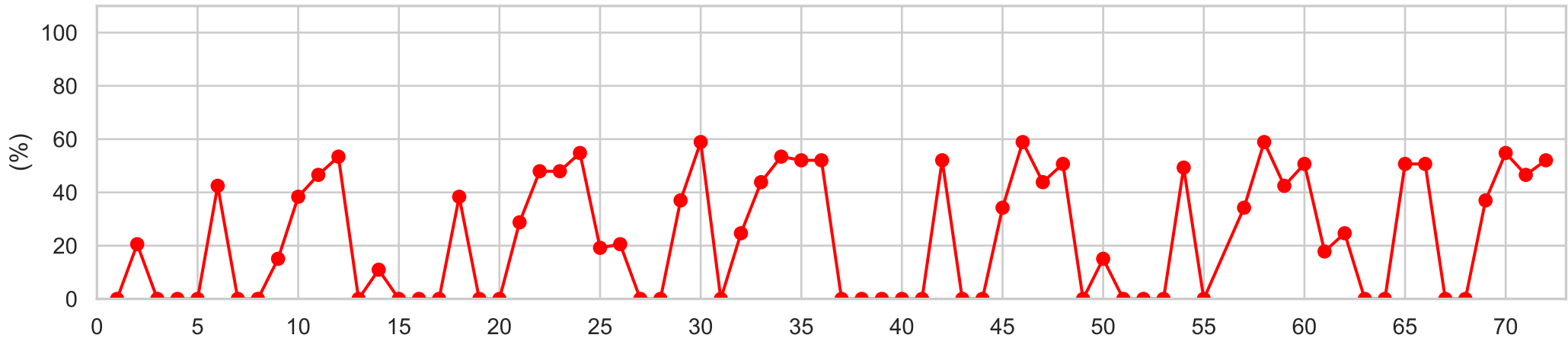


Figure C_1-3

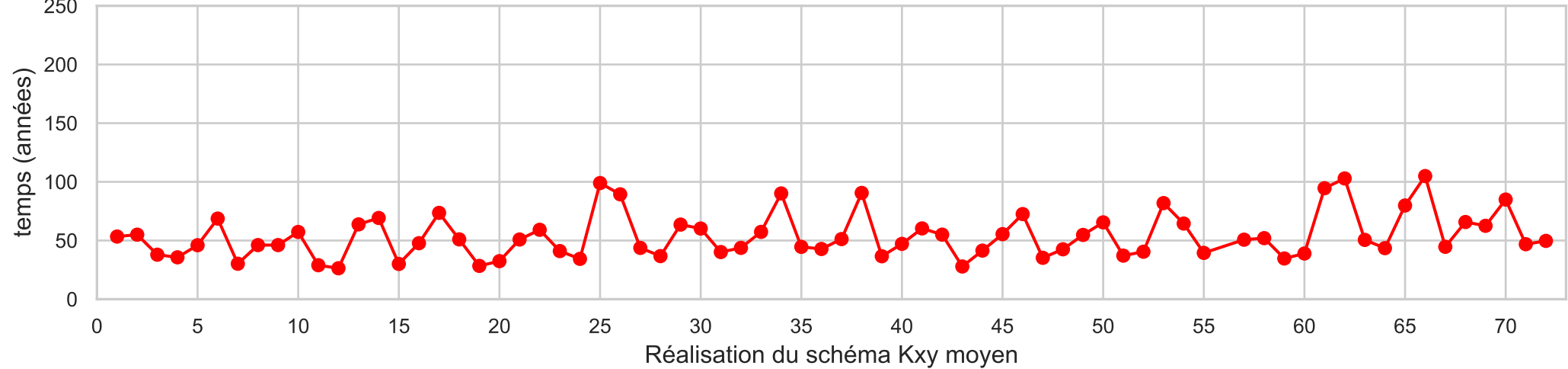
Scénario C_1 - Proportion de la zone contaminée de l'esker captée en moins de 5 années



Scénario C_1 - Proportion de la zone contaminée au roc captée en moins de 25 ans



Scénario C_1 - Temps de parcours minimum pour atteindre la zone de restriction



Scénario C_1 - Schéma Probabiliste

Figure C_1-4
Scénario C_1 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

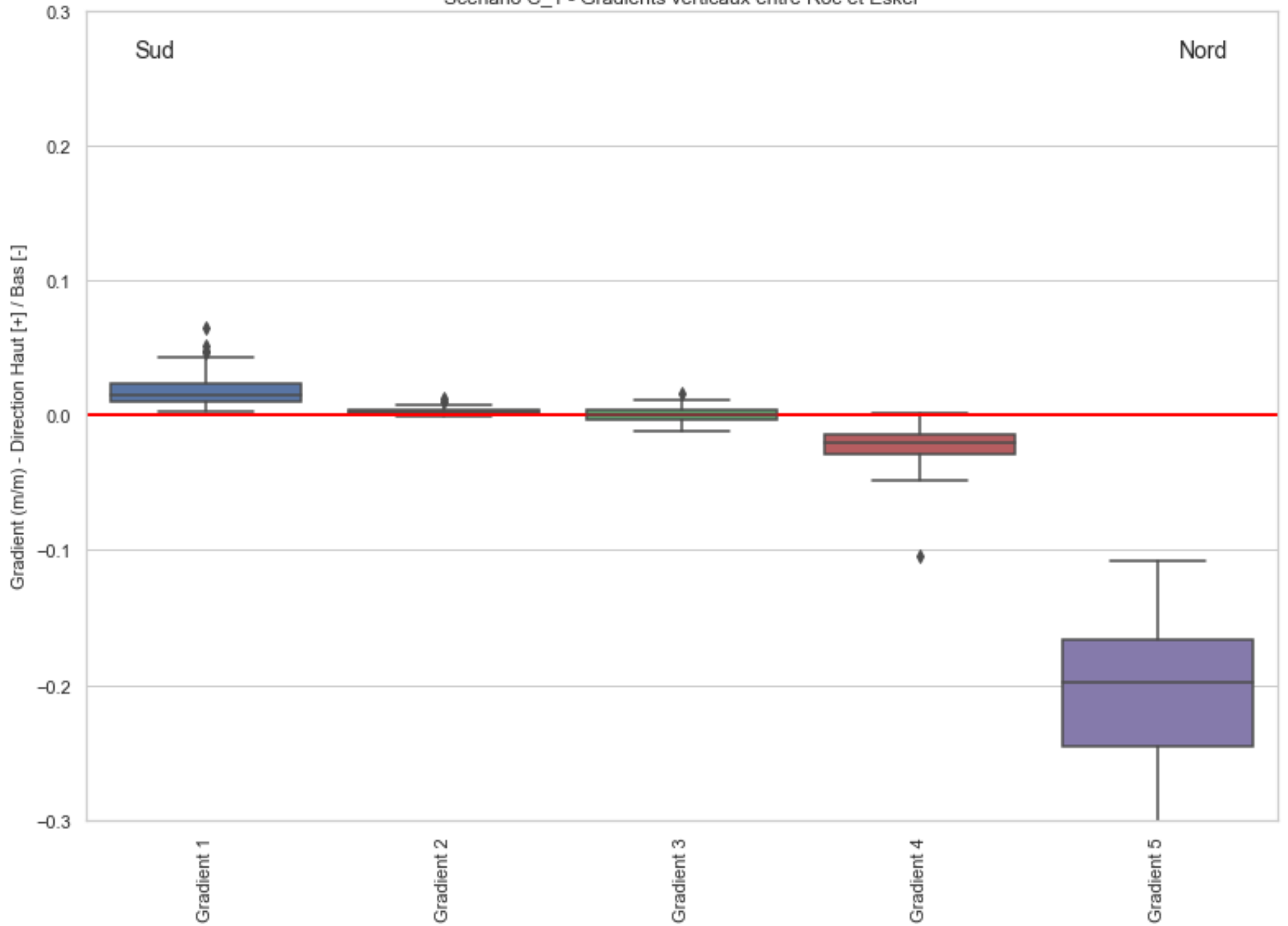


Figure C_1-5

Scénario C_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

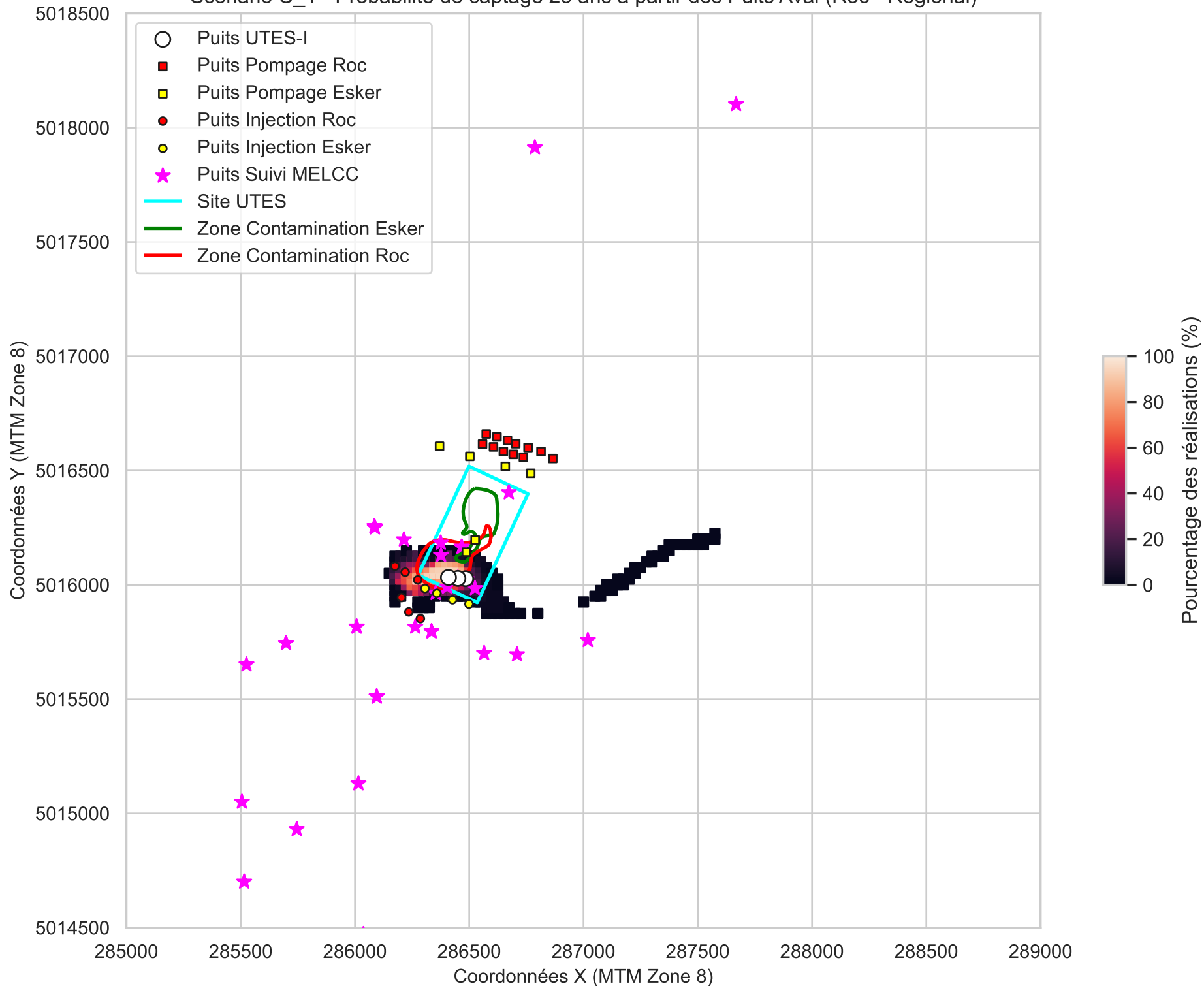


Figure C_1-6

Scénario C_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

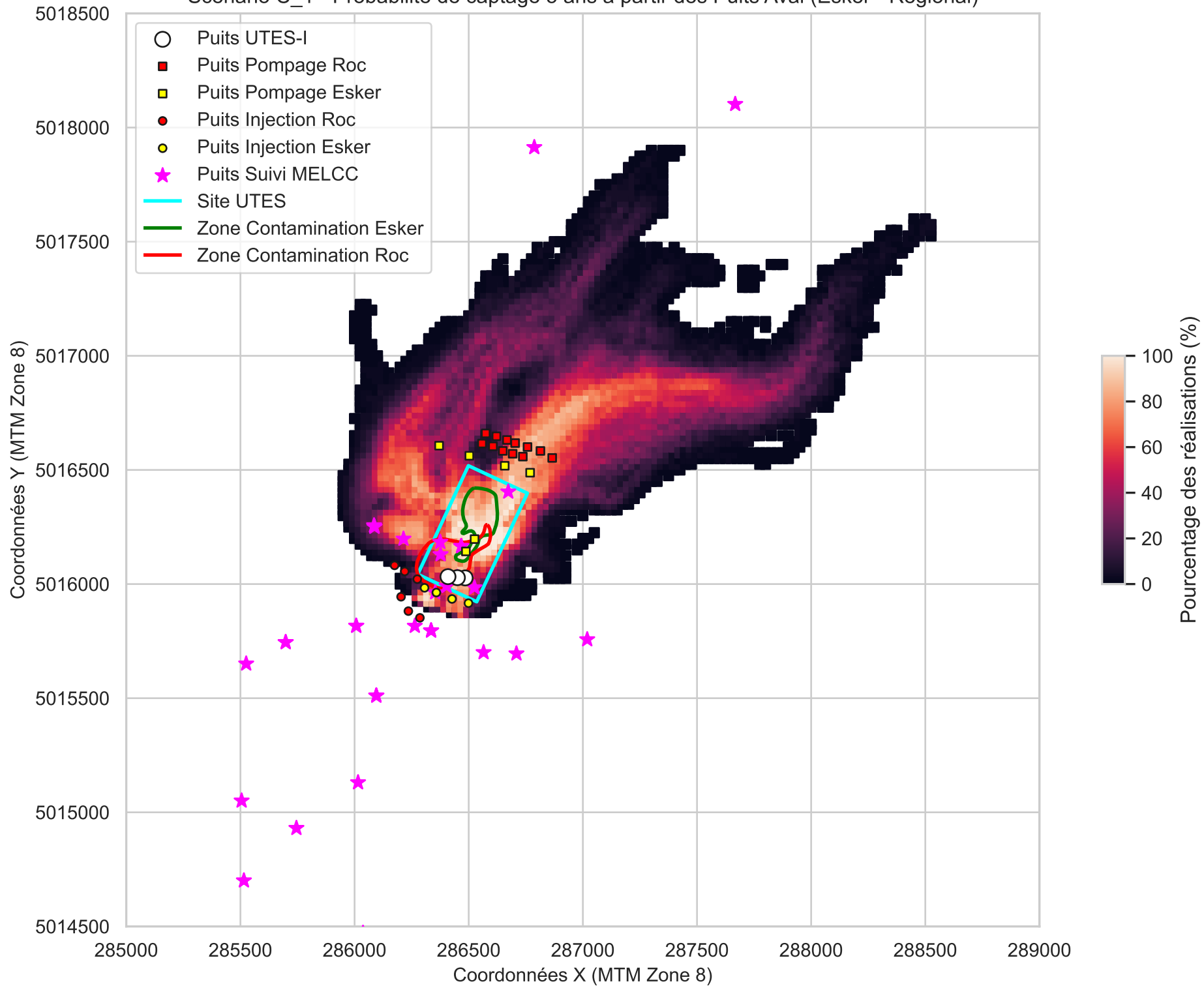


Figure C_1-7

Scénario C_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

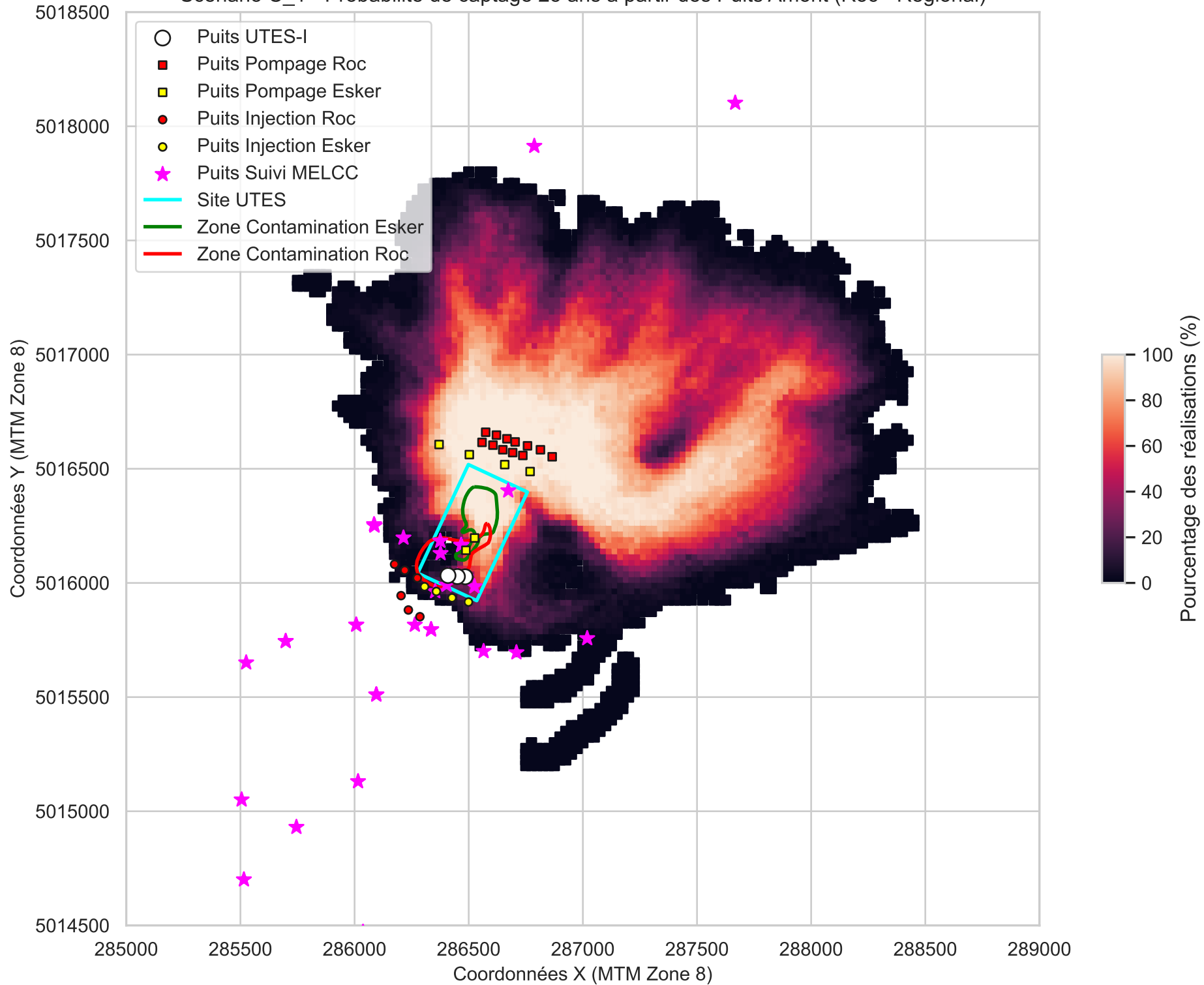


Figure C_1-8

Scénario C_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

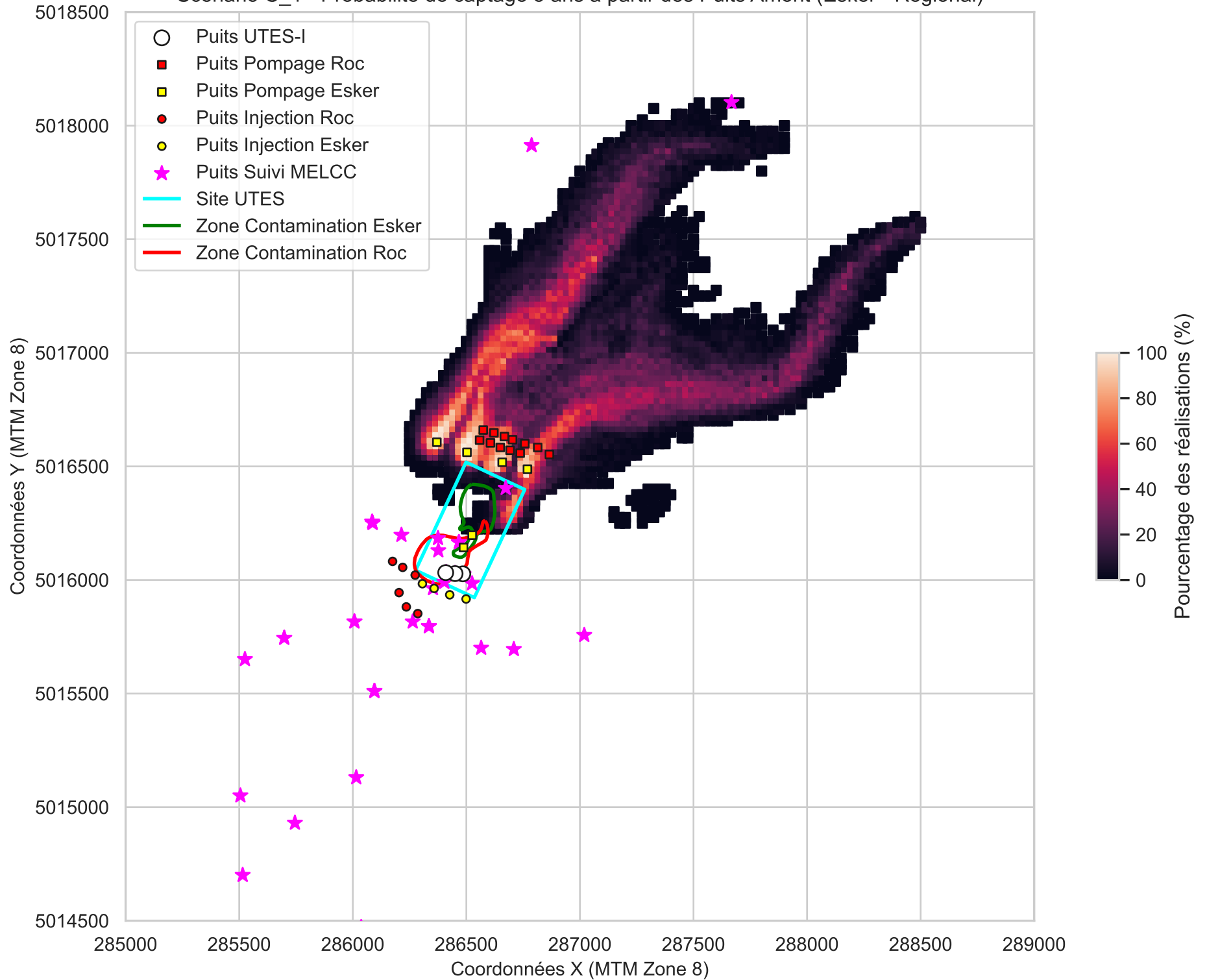


Figure C_1-9
Scénario C_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

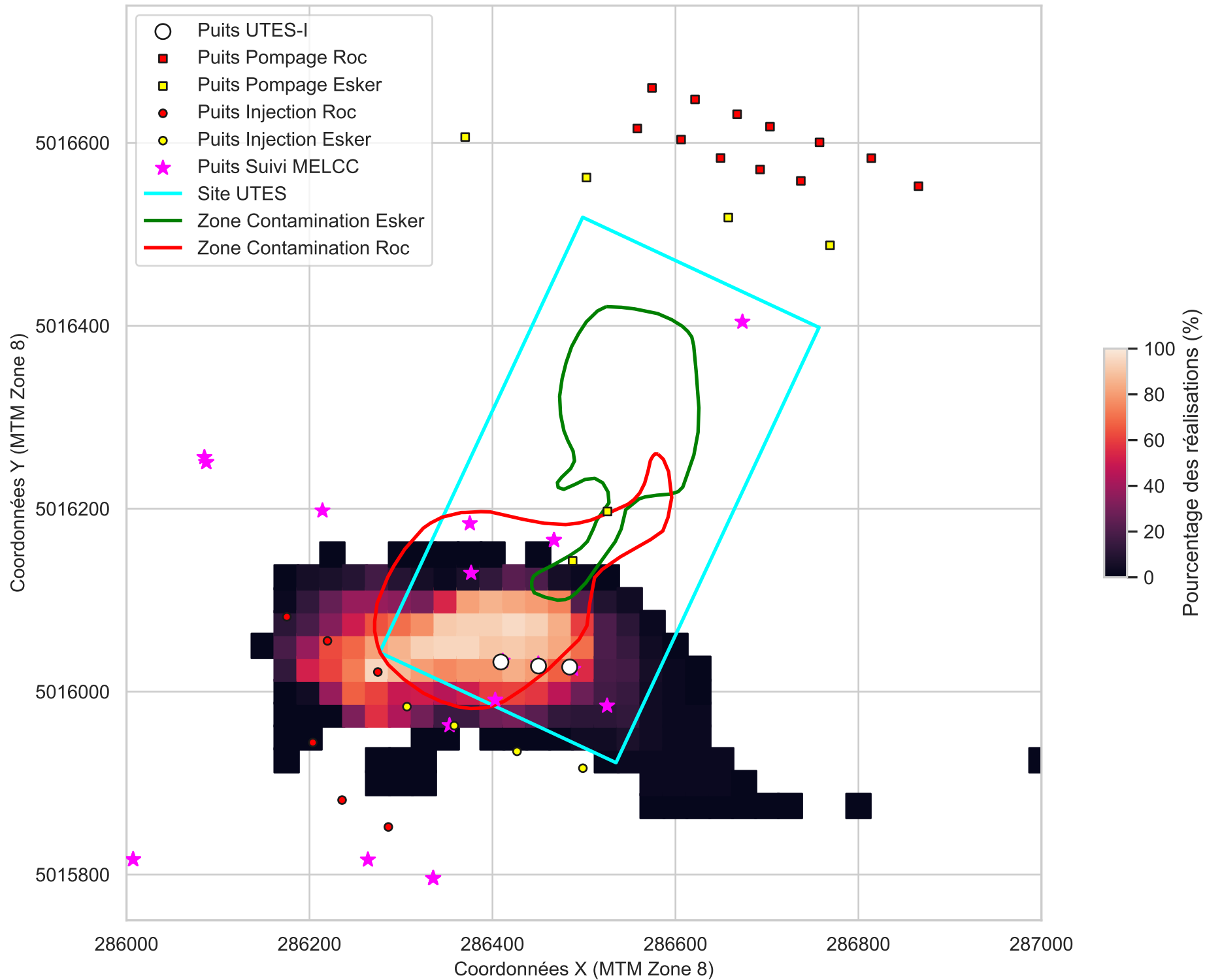


Figure C_1-10
Scénario C_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

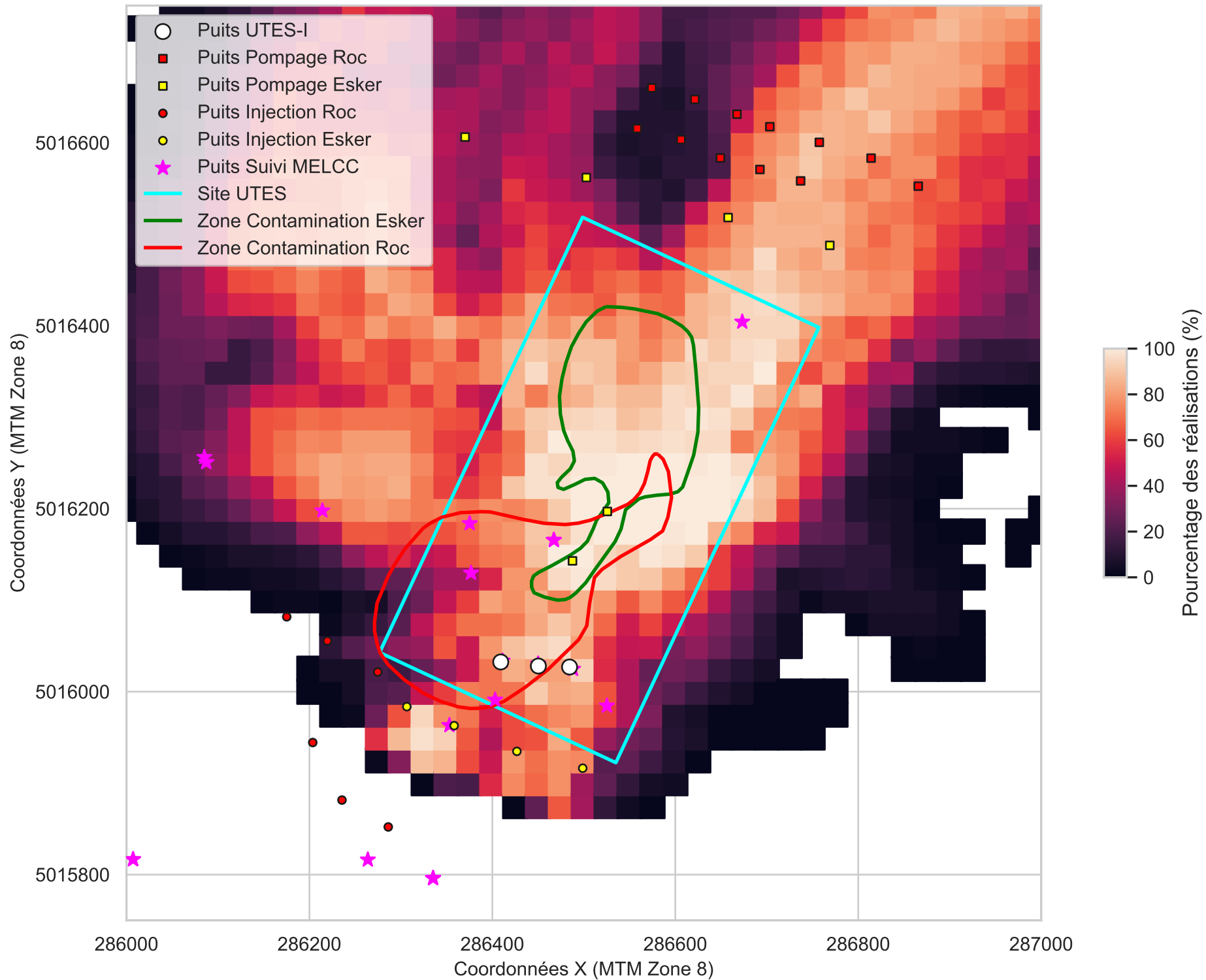


Figure C_1-11

Scénario C_1 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

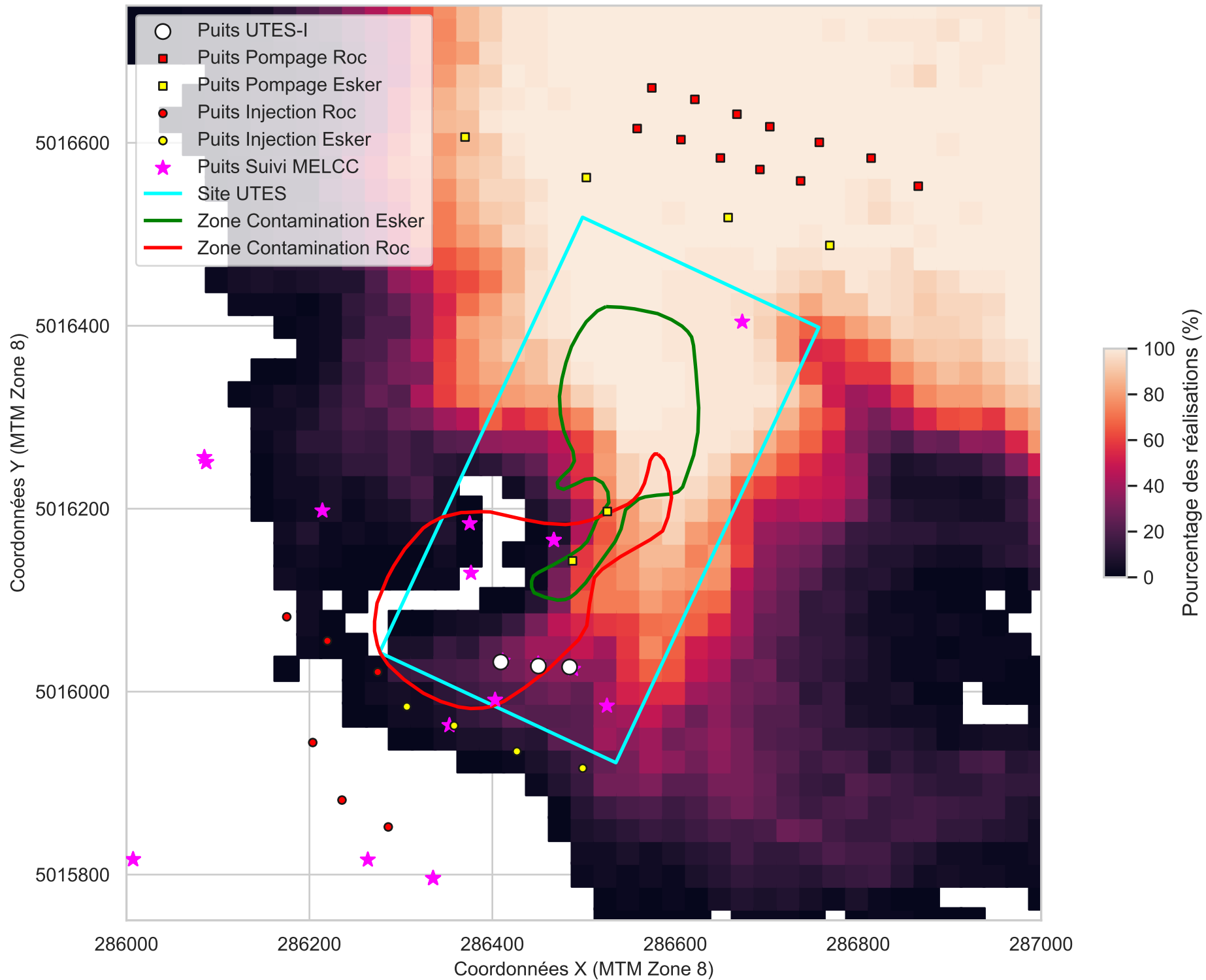


Figure C_1-12

Scénario C_1 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

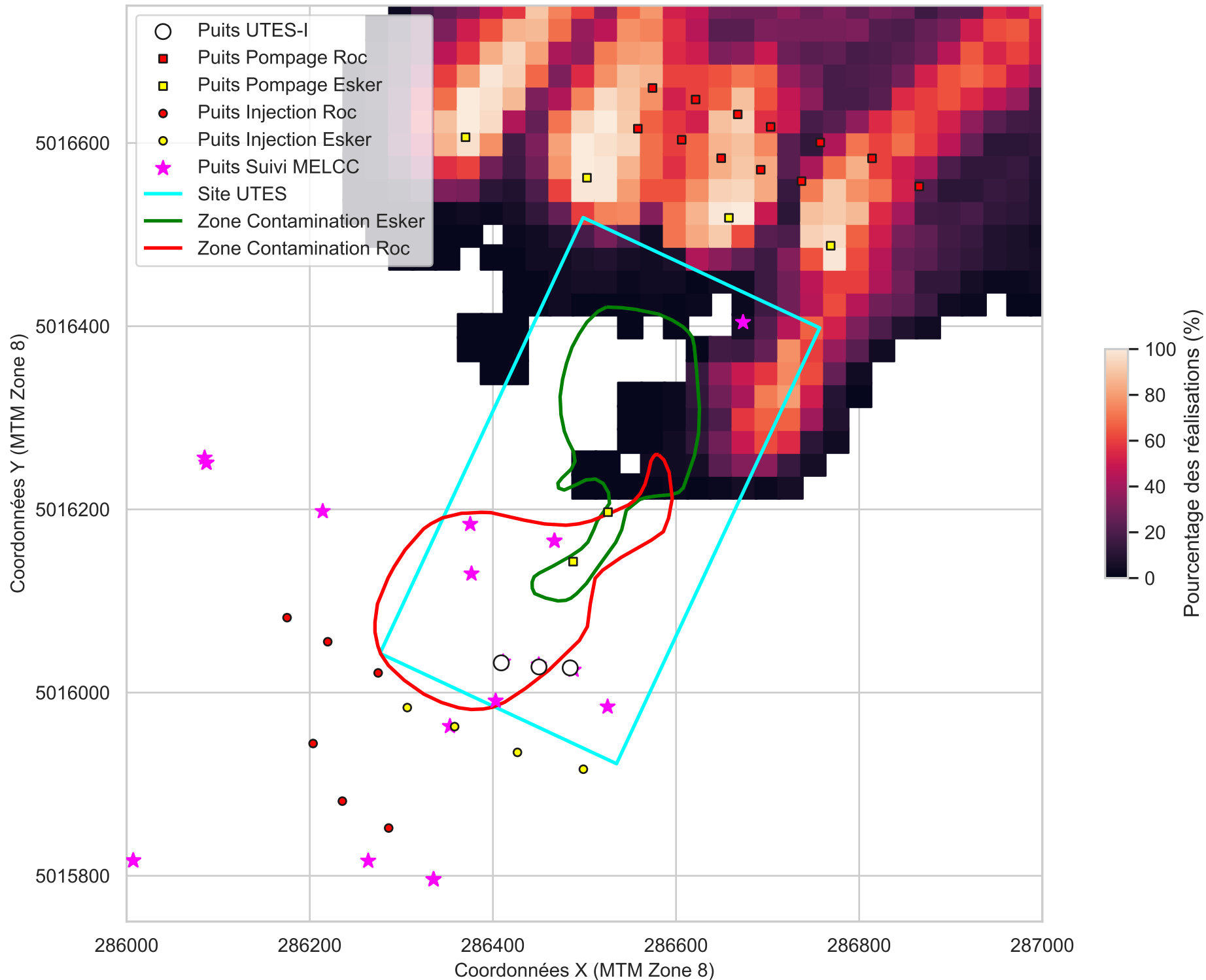


Figure C_1-13
Scénario C_1 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

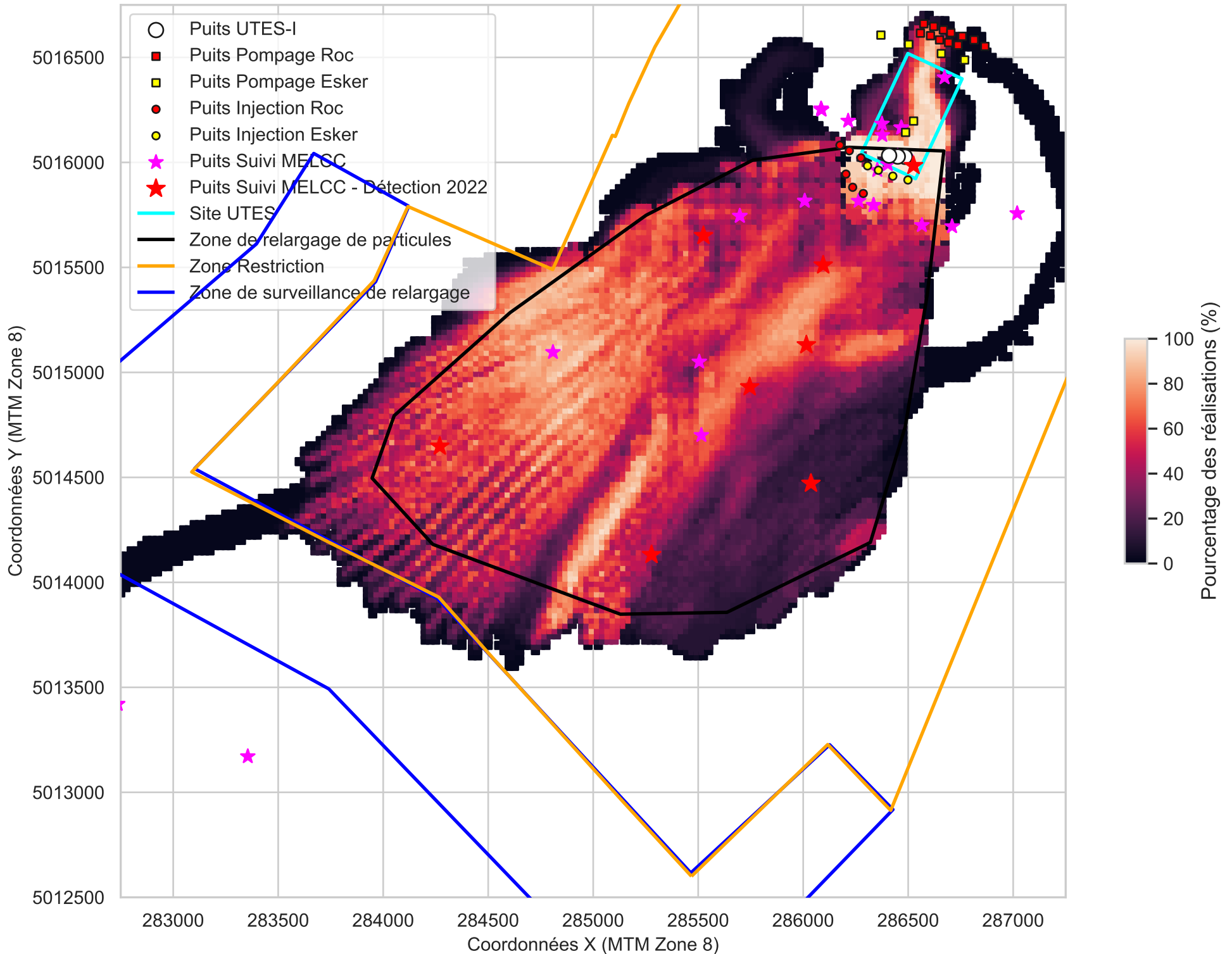
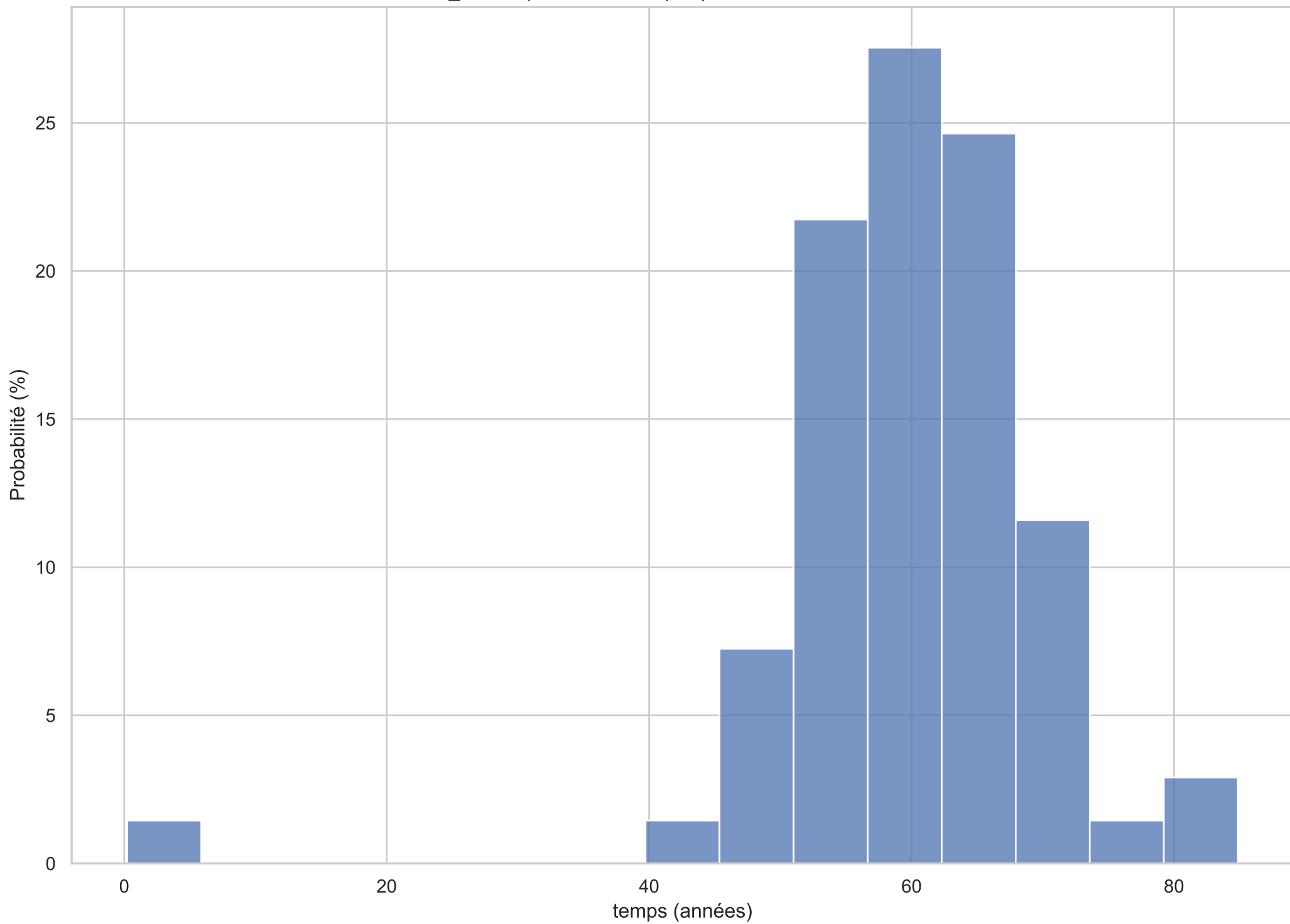


Figure C_1-14
Scénario C_1 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction



Scénario C_1 - Schéma Arrêt

Figure C_1-15
Scénario C_1 - Variation des gradients verticaux en fonction du temps après arrêt du pompage

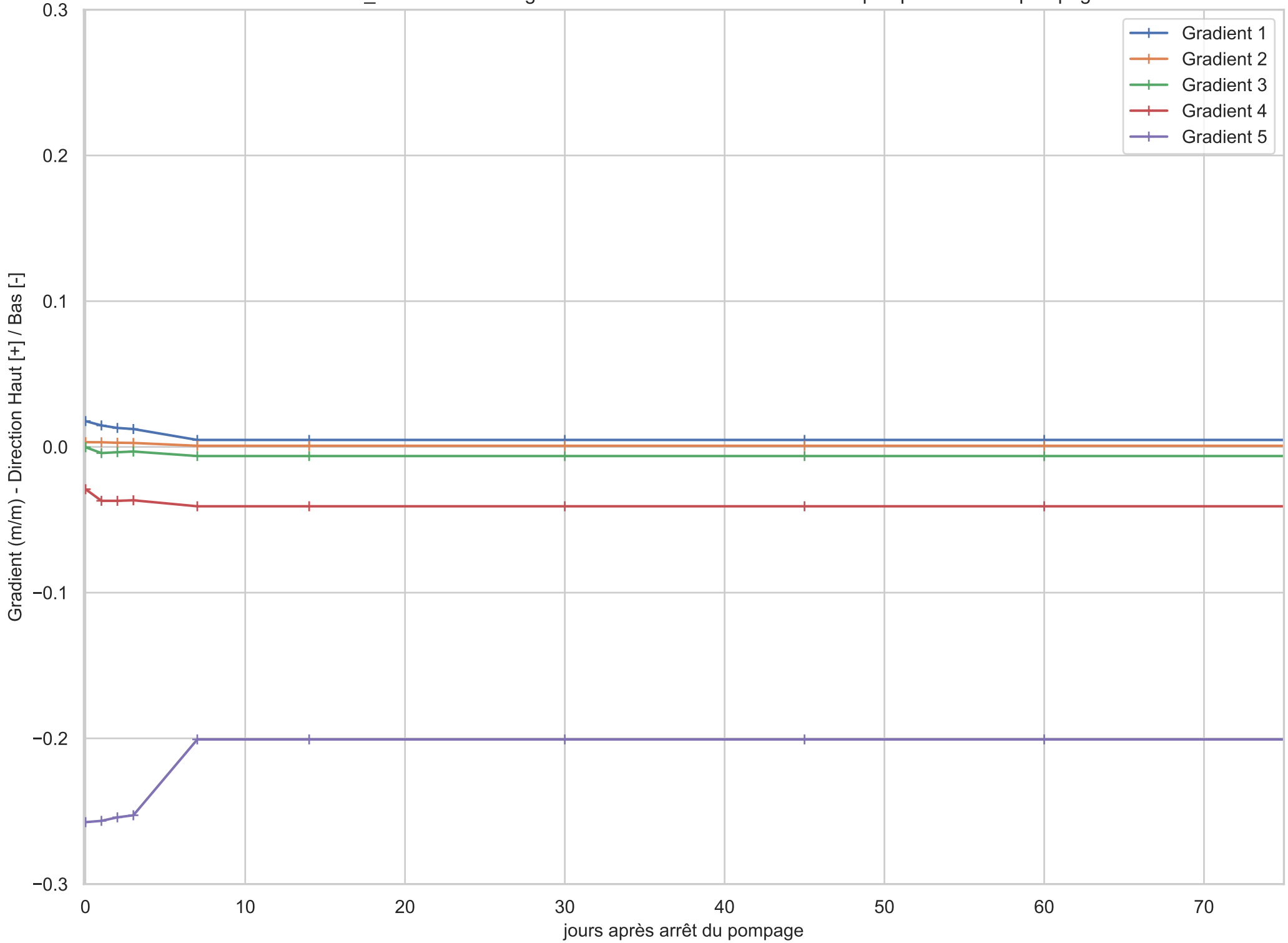


Figure C_1-16(1)

Scénario C_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction du temps après arrêt du pompage

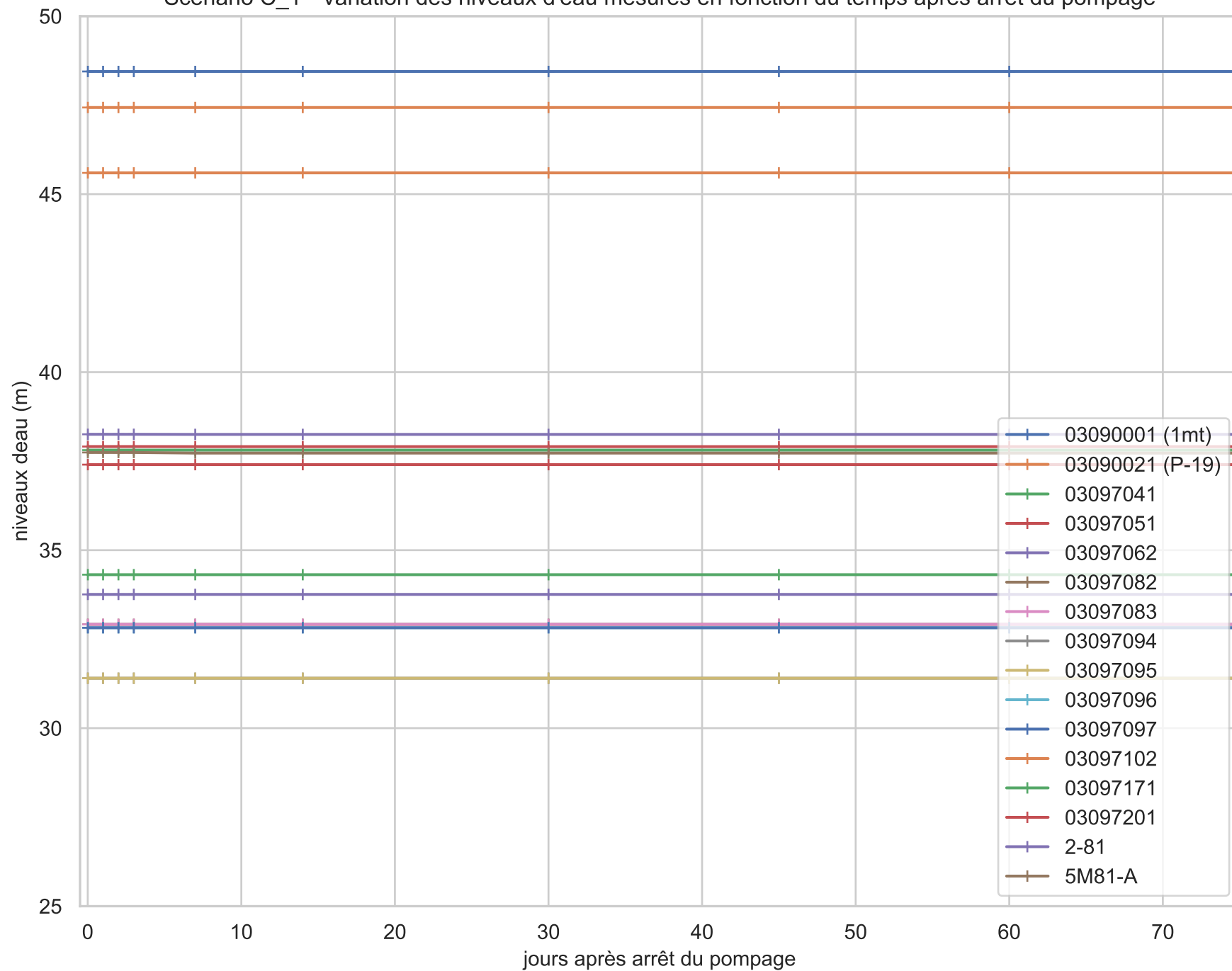
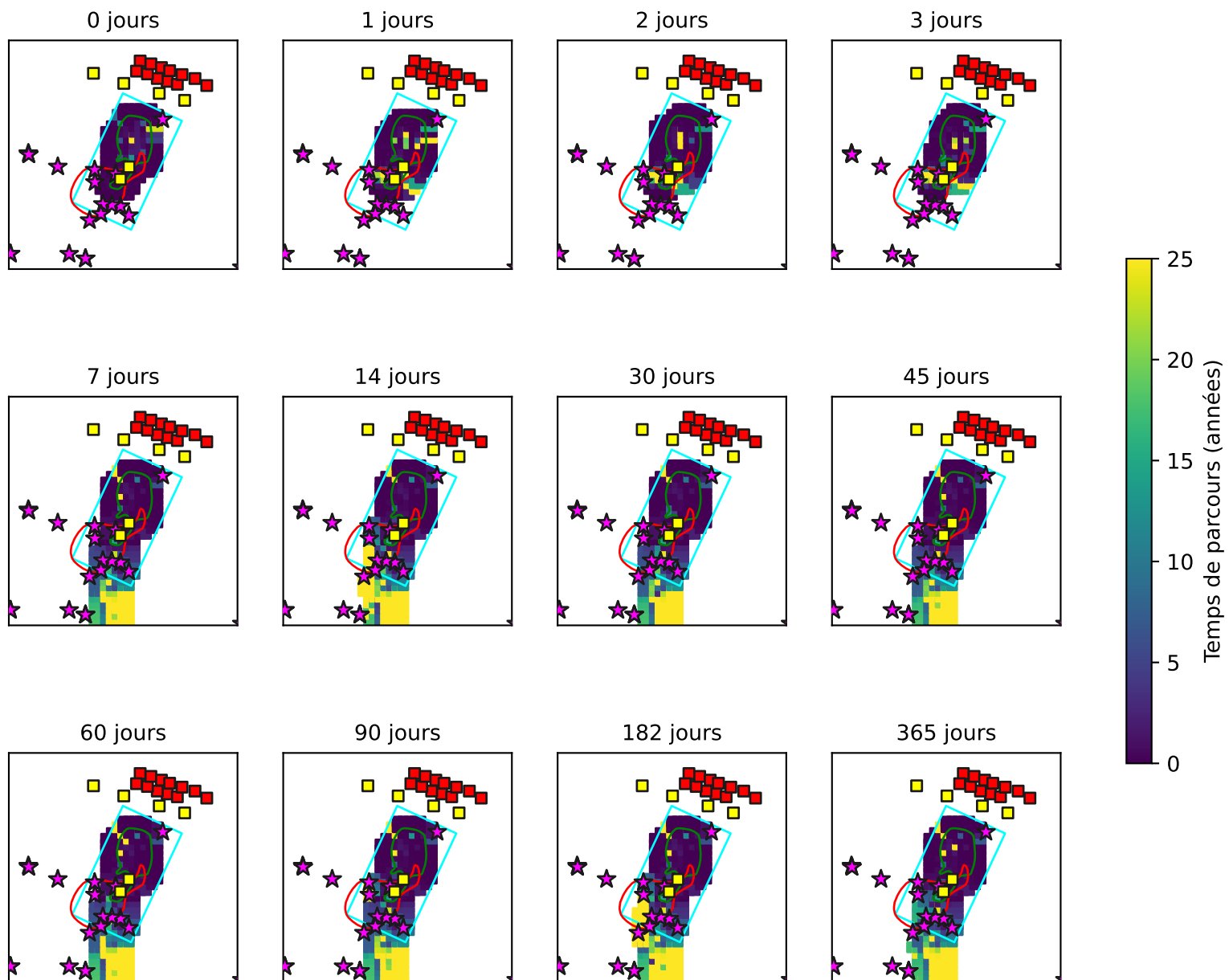


Figure C_1-17

Scenario C_1 - Migration de la zone contaminée de l'esker après arrêt du pompage



Scénario C_1 - Schéma Nord

Figure C_1-18
Scénario C_1 - Variation des gradients verticaux en fonction de la réalisation

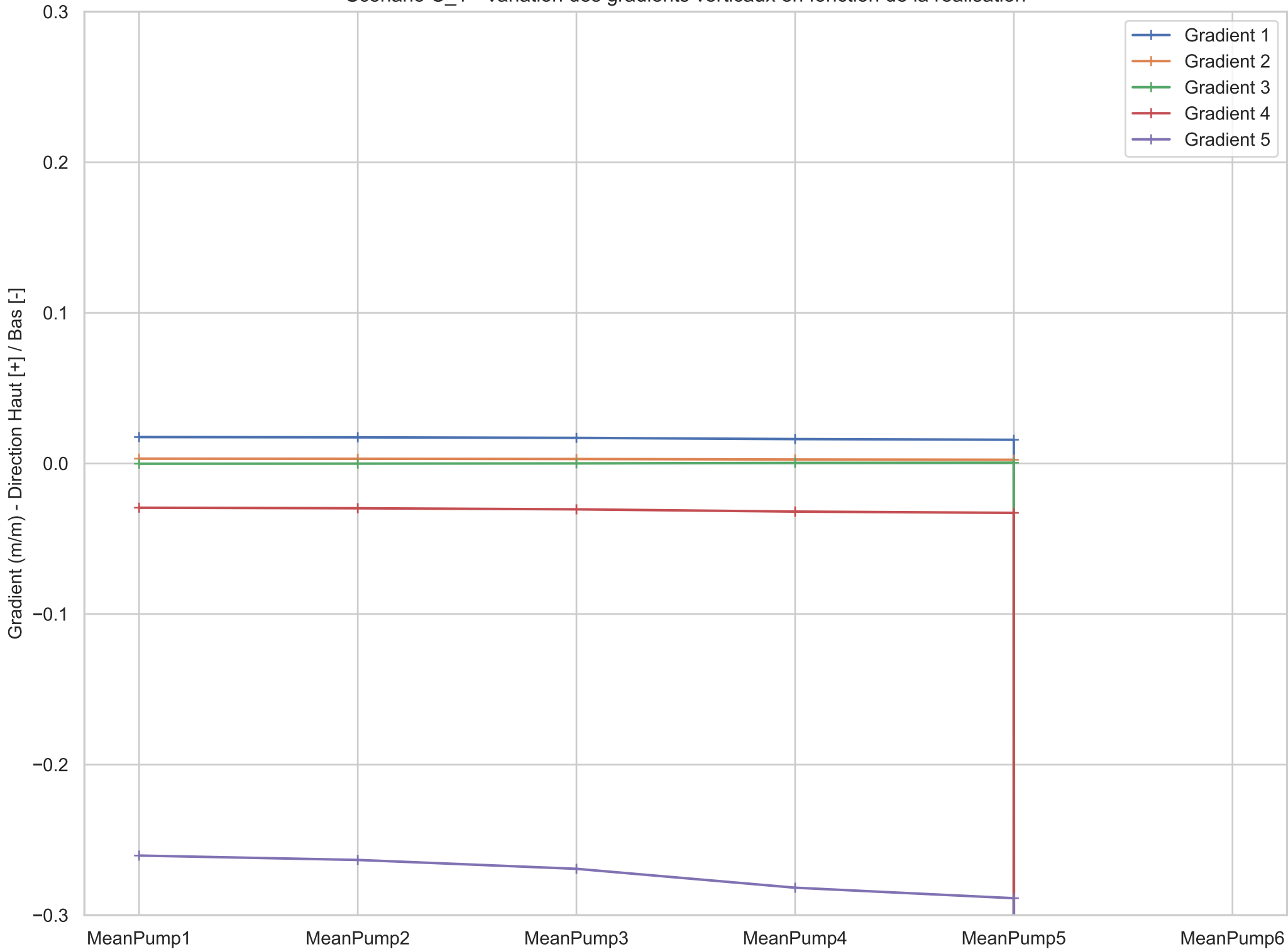


Figure C_1-19(1)
 Scénario C_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

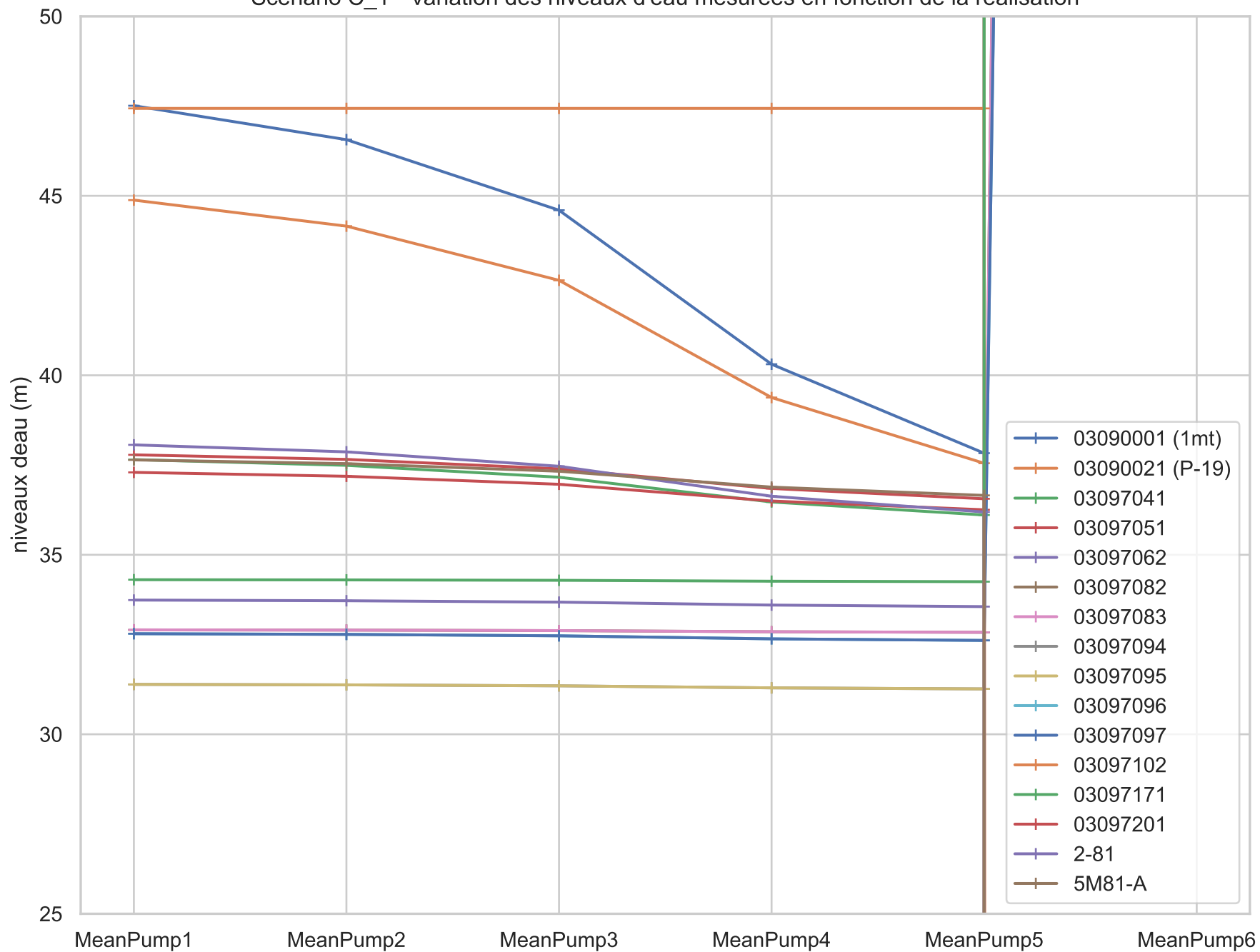


Figure C_1-19(2)
 Scénario C_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

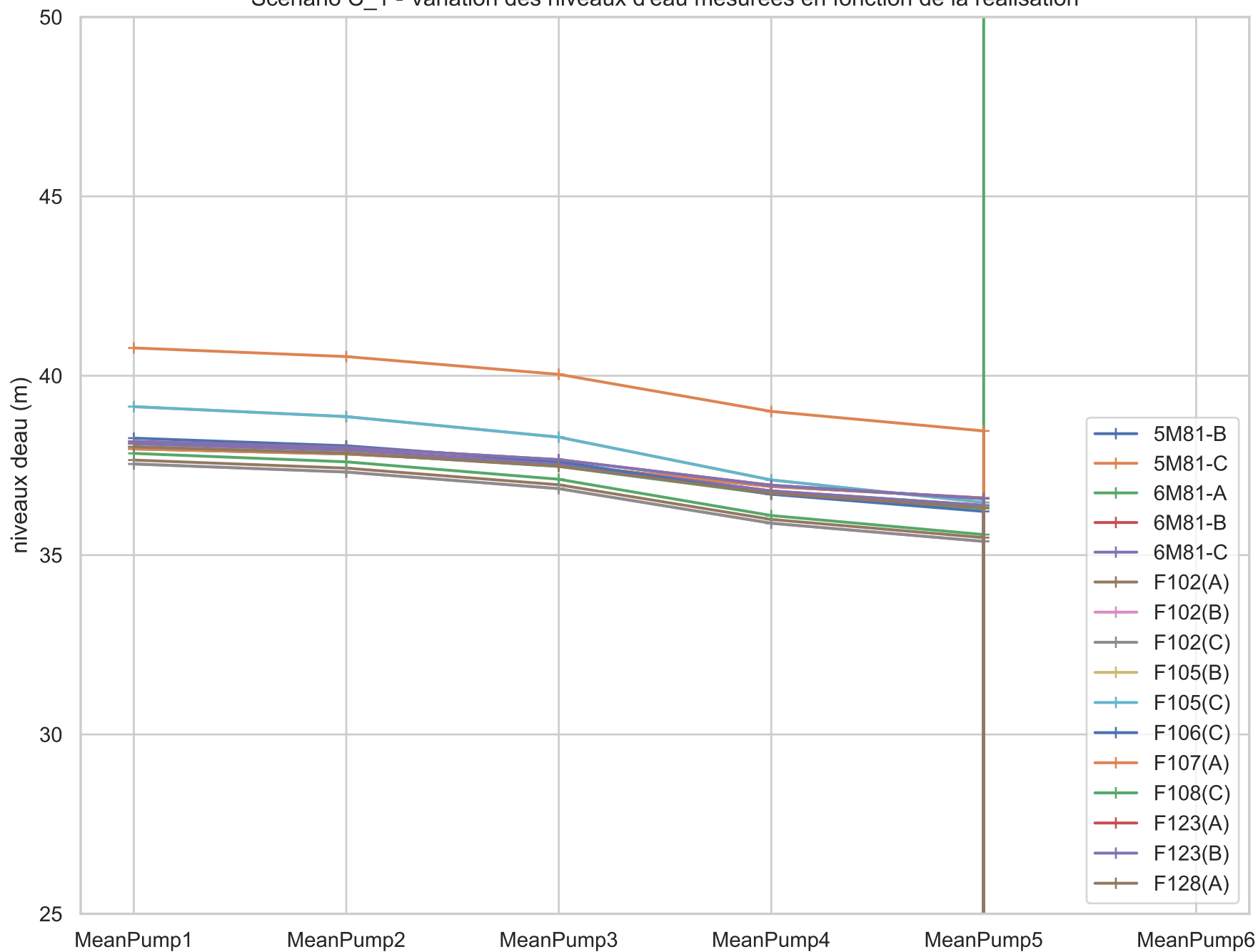


Figure C_1-19(3)
 Scénario C_1 - Variation des niveaux d'eau mesurées en fonction de la réalisation

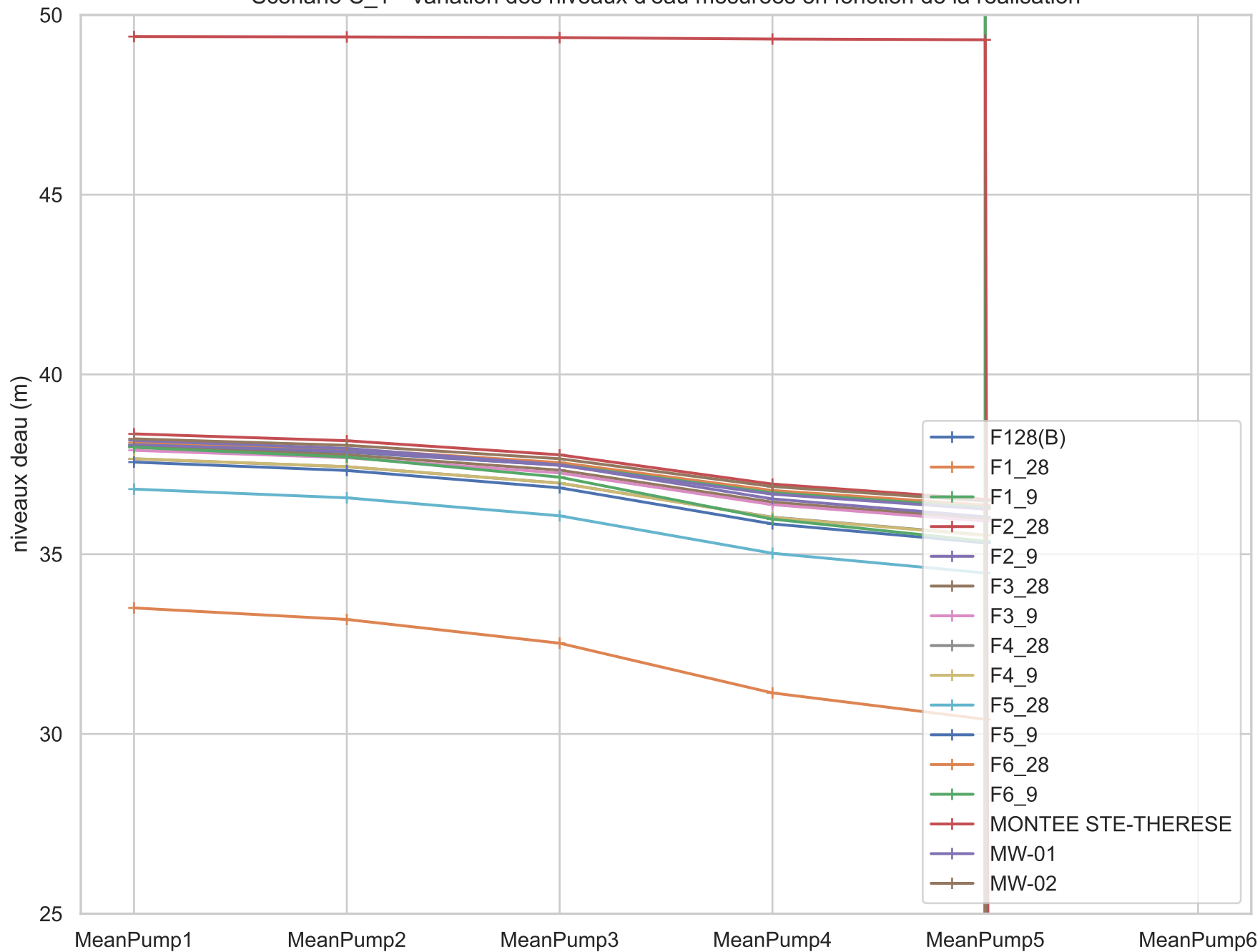


Figure C_1-19(4)
 Scénario C_1 - Variation des niveaux d'eau mesurés en fonction de la réalisation

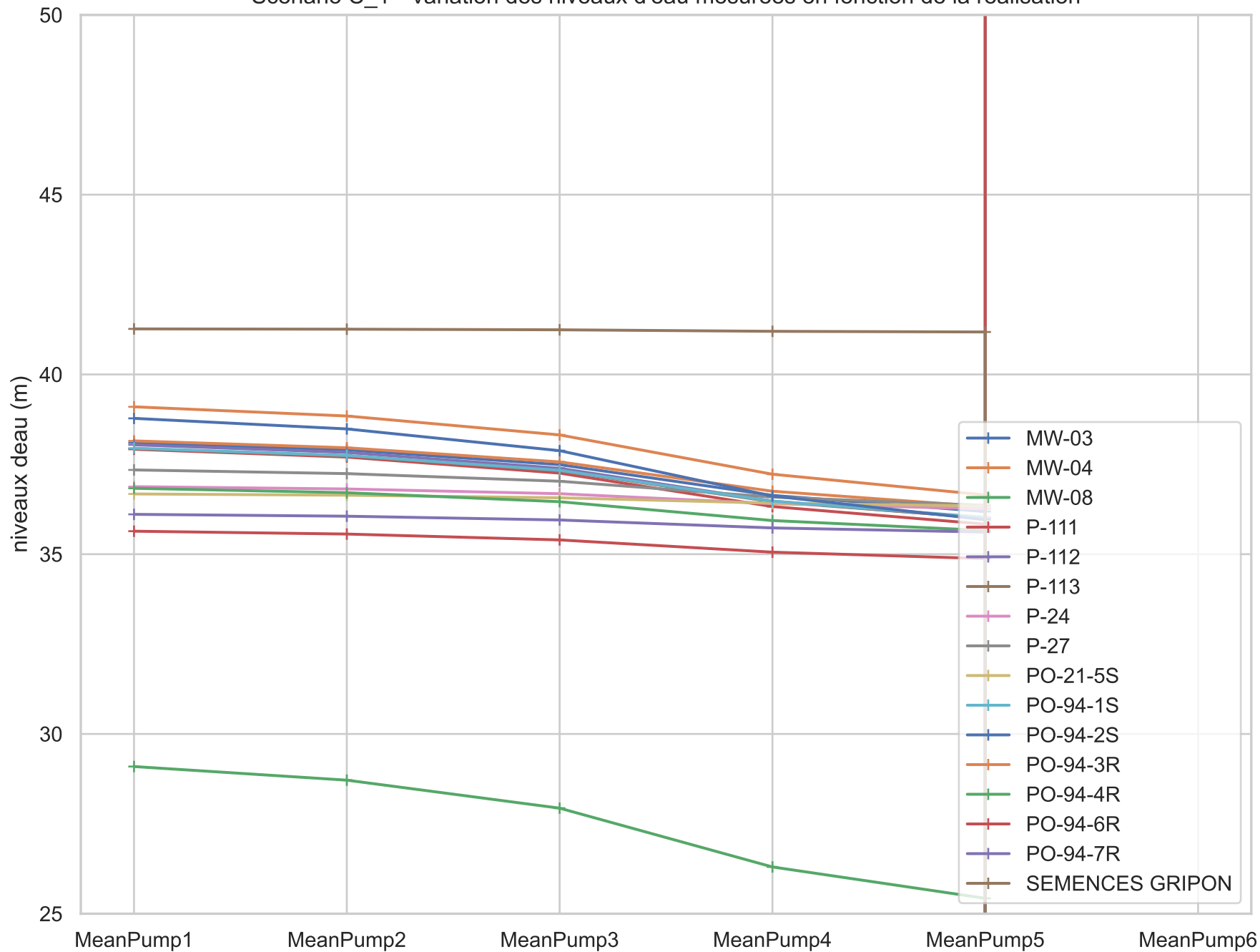


Figure C_1-20

Scénario C_1 - Traçage de particules dans l'esker à partir des puits Nord sur 25 ans

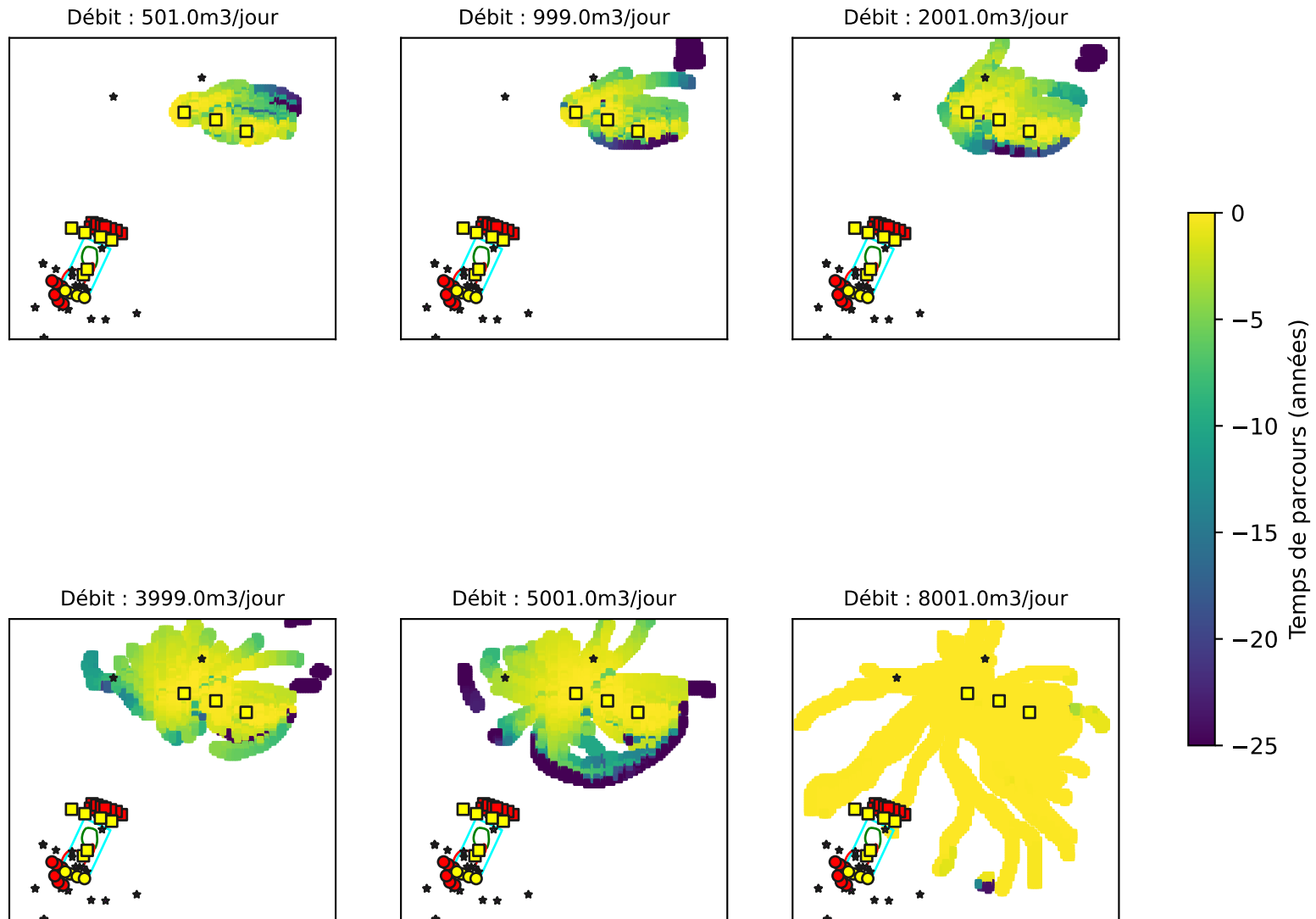


Figure C_1-21

Scénario C_1 - Traçage de particules au roc à partir des puits au Nord sur 25 ans

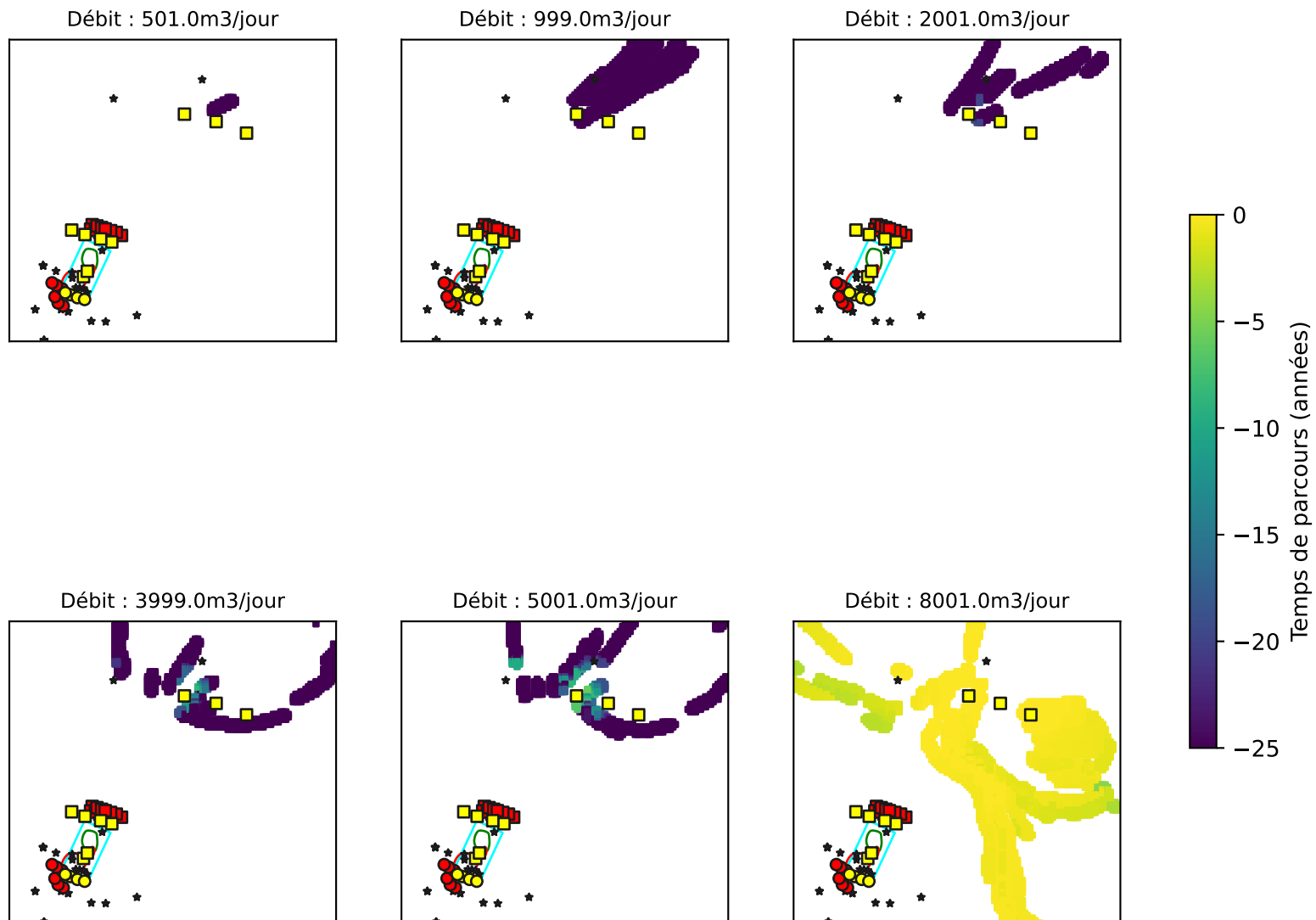
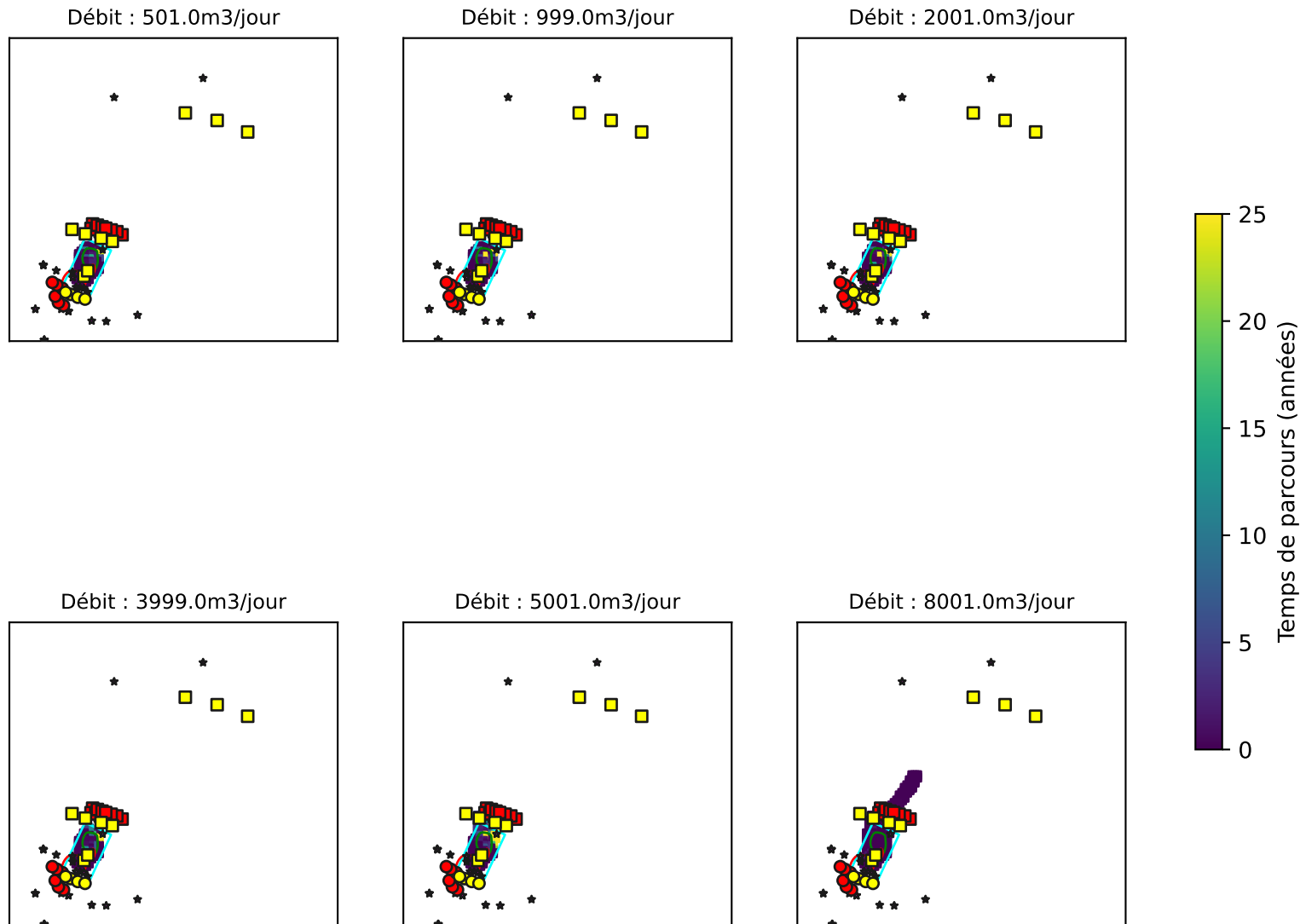


Figure C_1-22

Scénario C_1 - Traçage de particules à partir de la zone source de l'esker sur 25 ans



Scénario C_1_S3R3 - Schéma Climat

Figure C_1-23
Scénario C_1_S3R3 - Gradients verticaux entre Roc et Esker

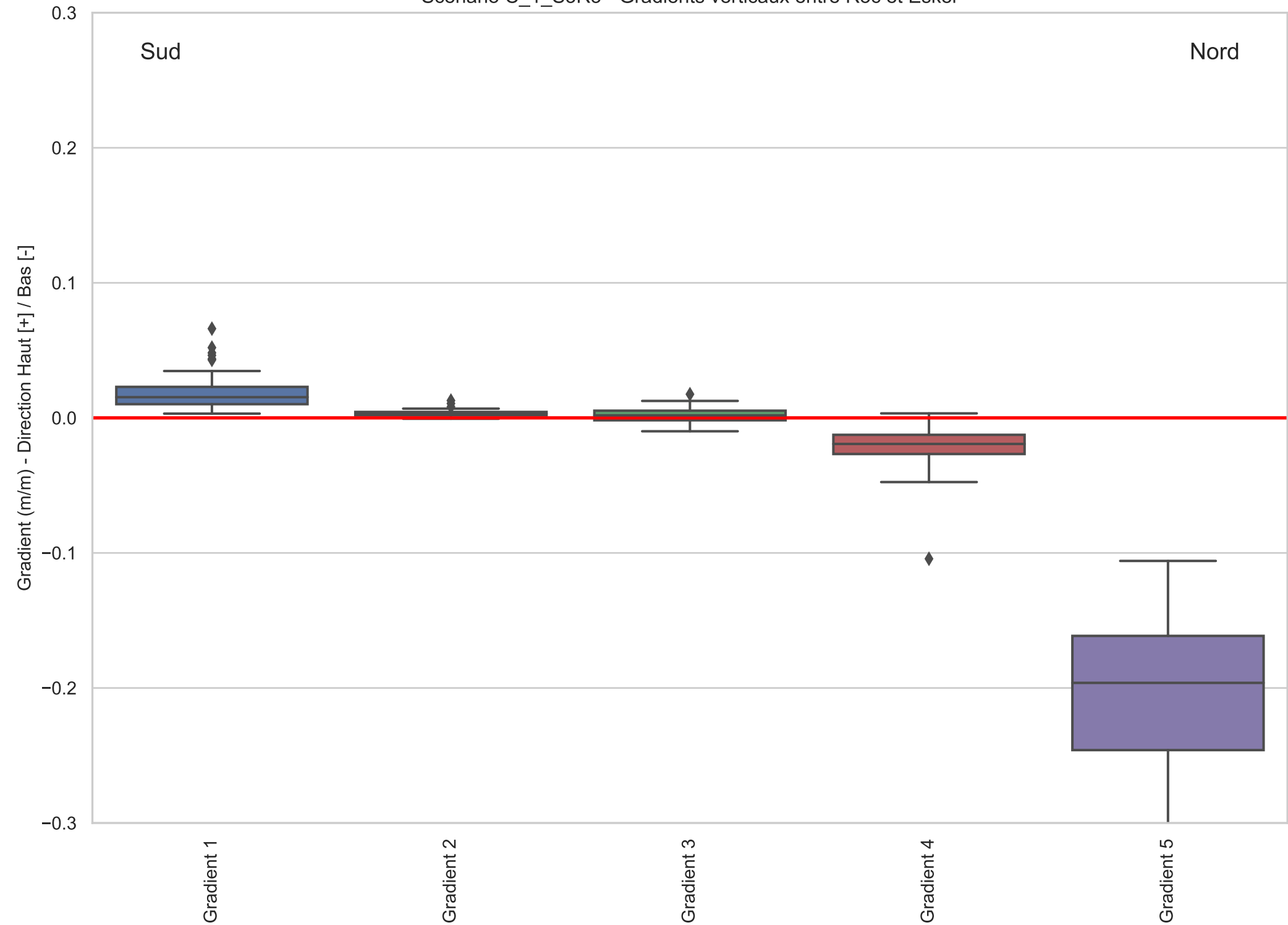


Figure C_1-24

Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Régional)

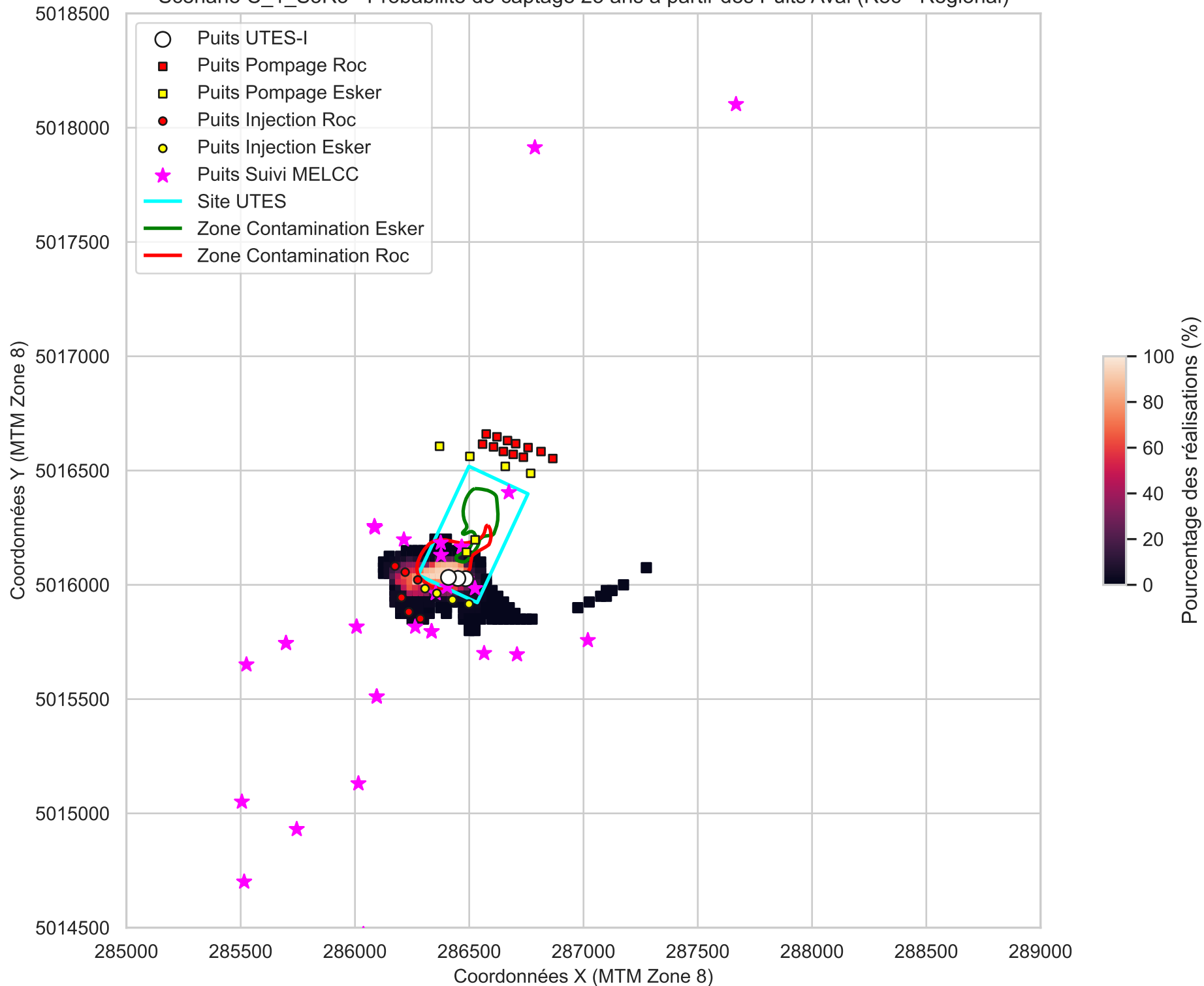


Figure C_1-25

Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Régional)

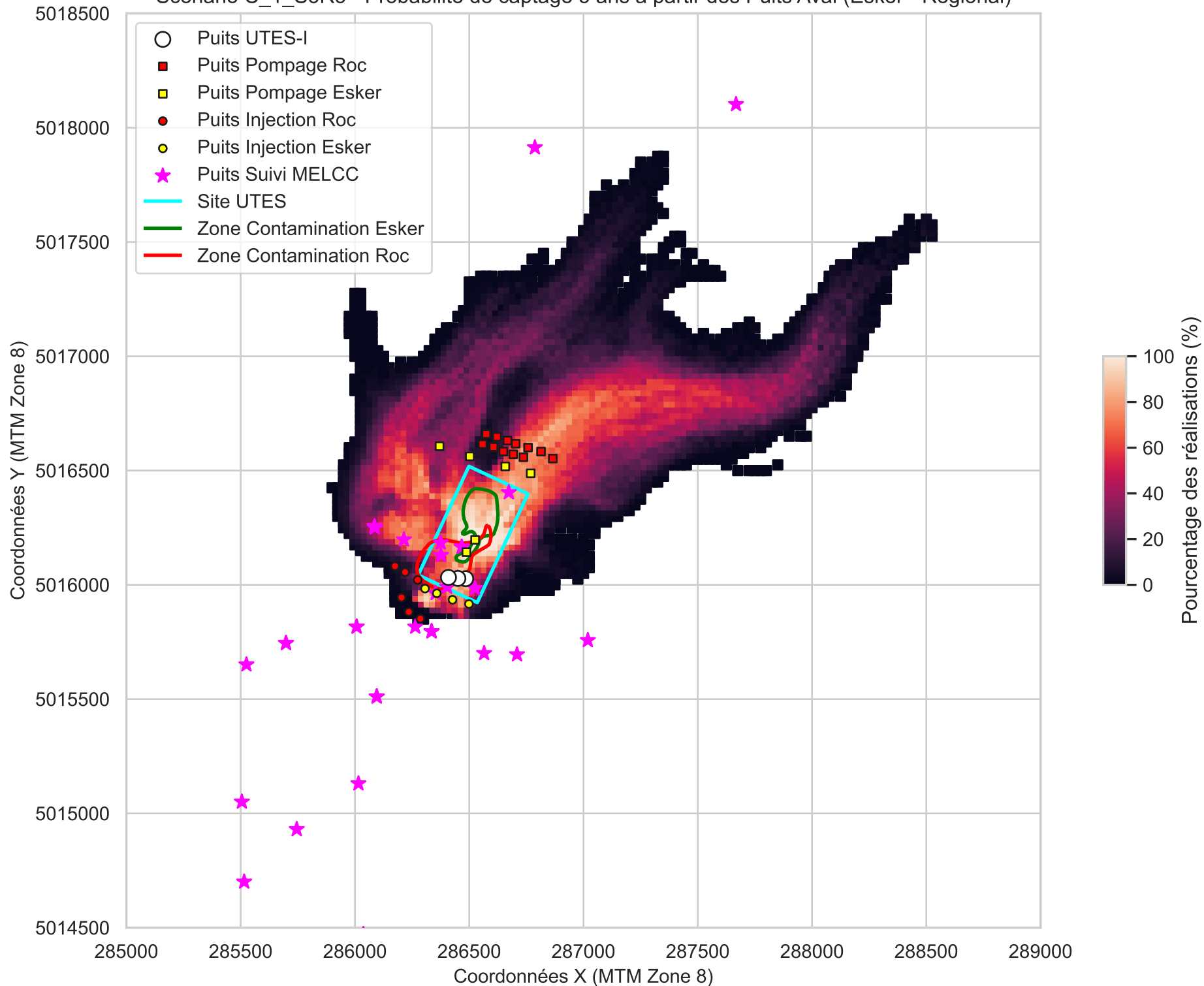


Figure C_1-26

Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Régional)

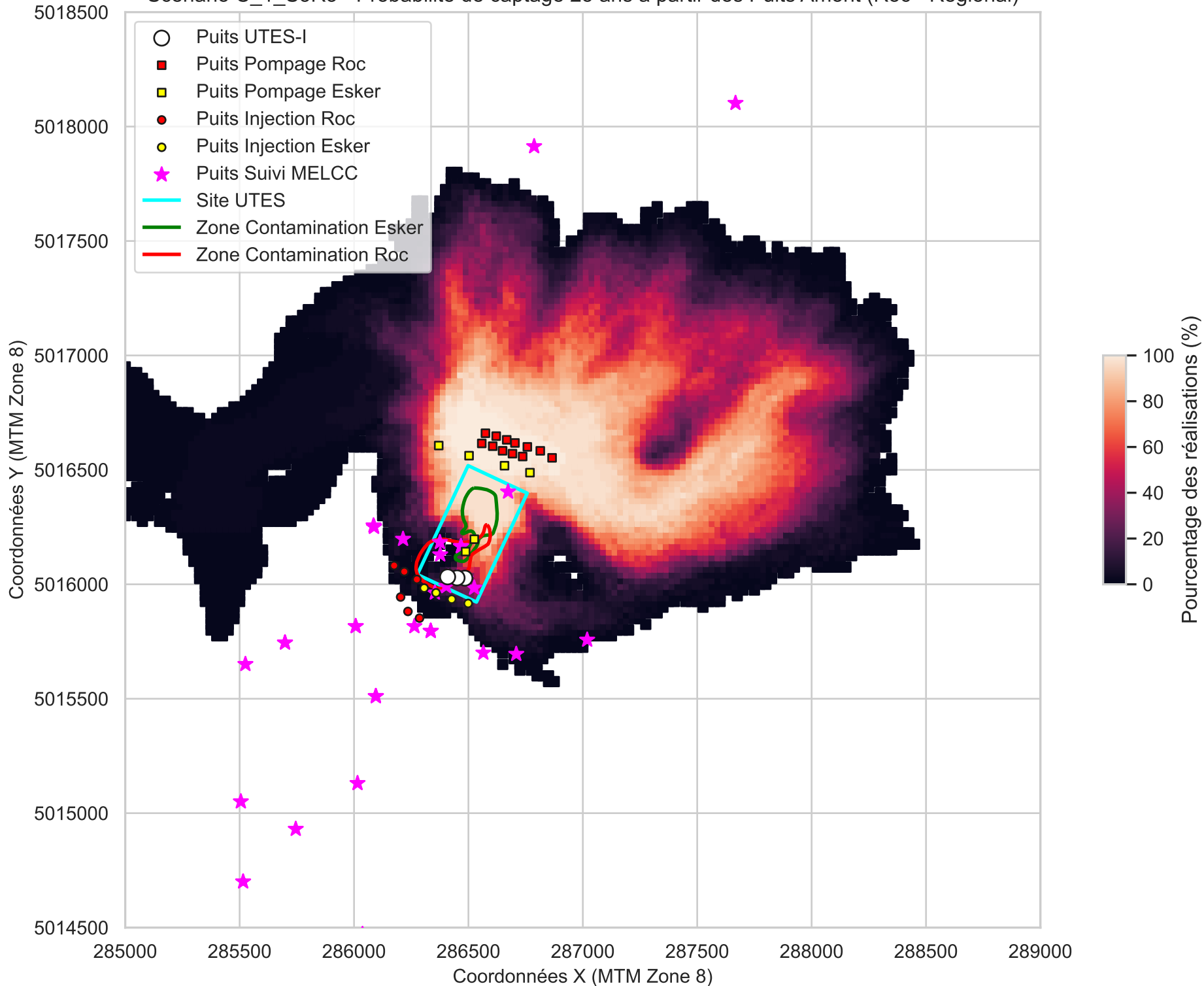


Figure C_1-27

Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Régional)

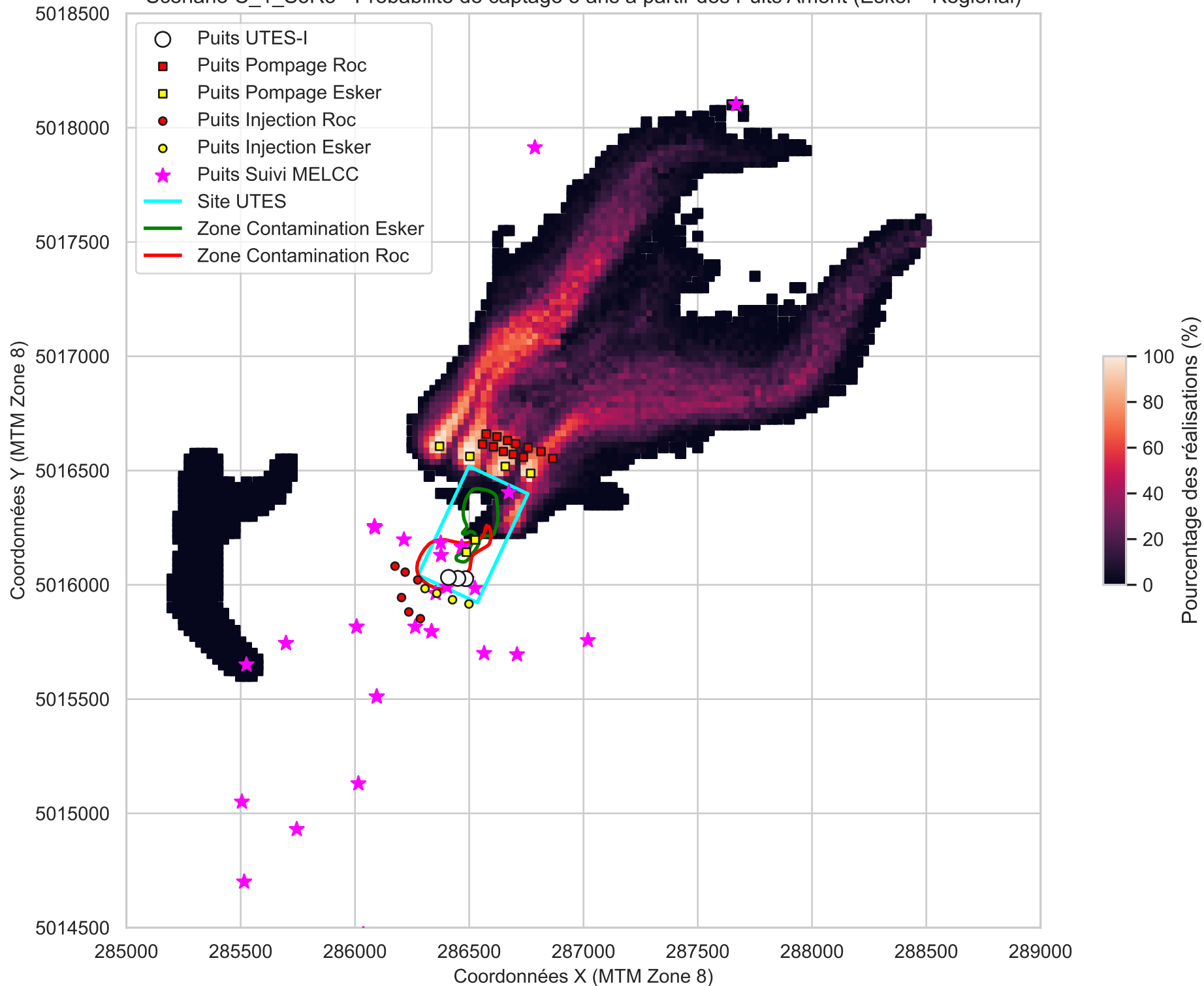


Figure C_1-28
Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Aval (Roc - Local)

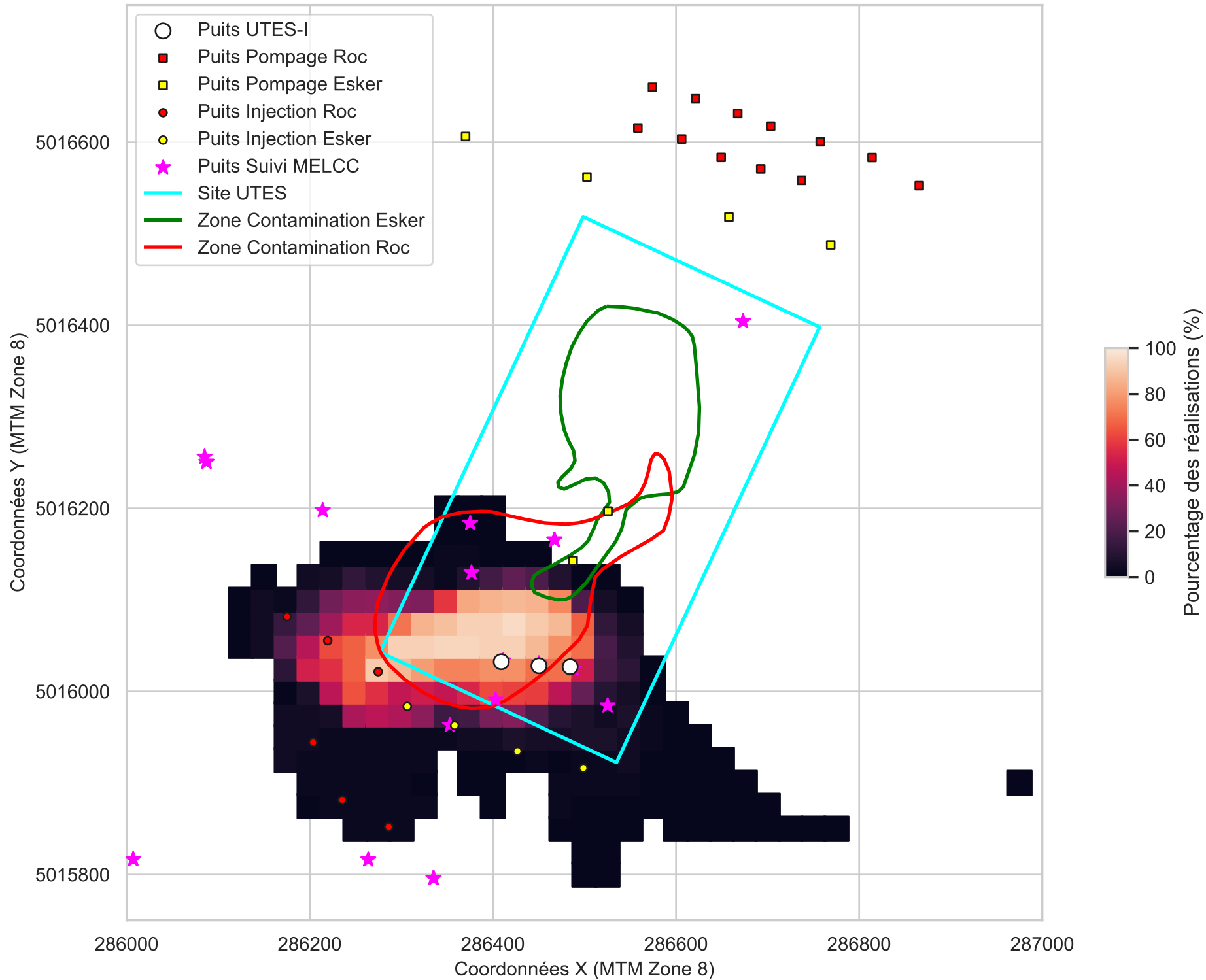


Figure C_1-29

Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Aval (Esker - Local)

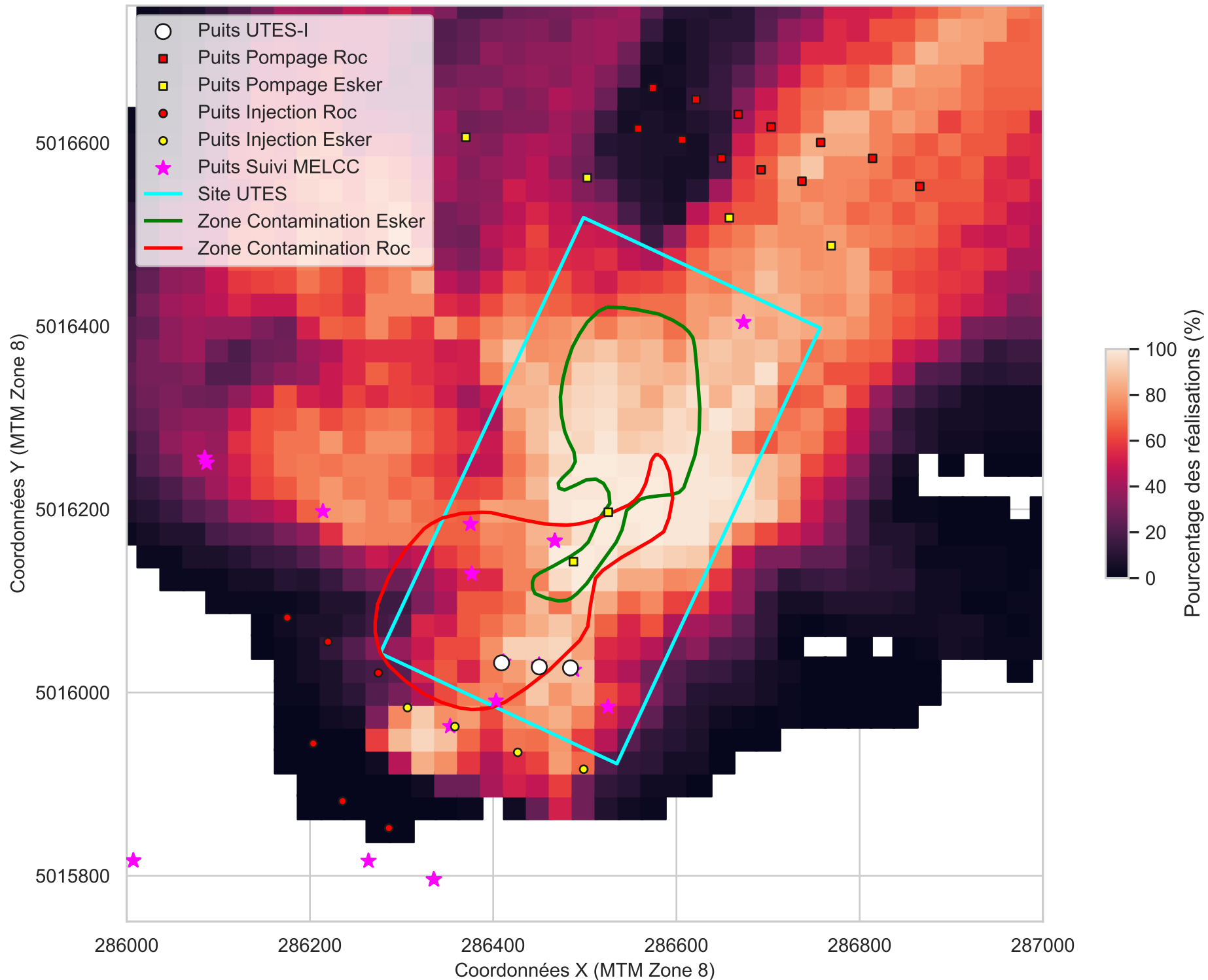


Figure C_1-30

Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 25 ans à partir des Puits Amont (Roc - Local)

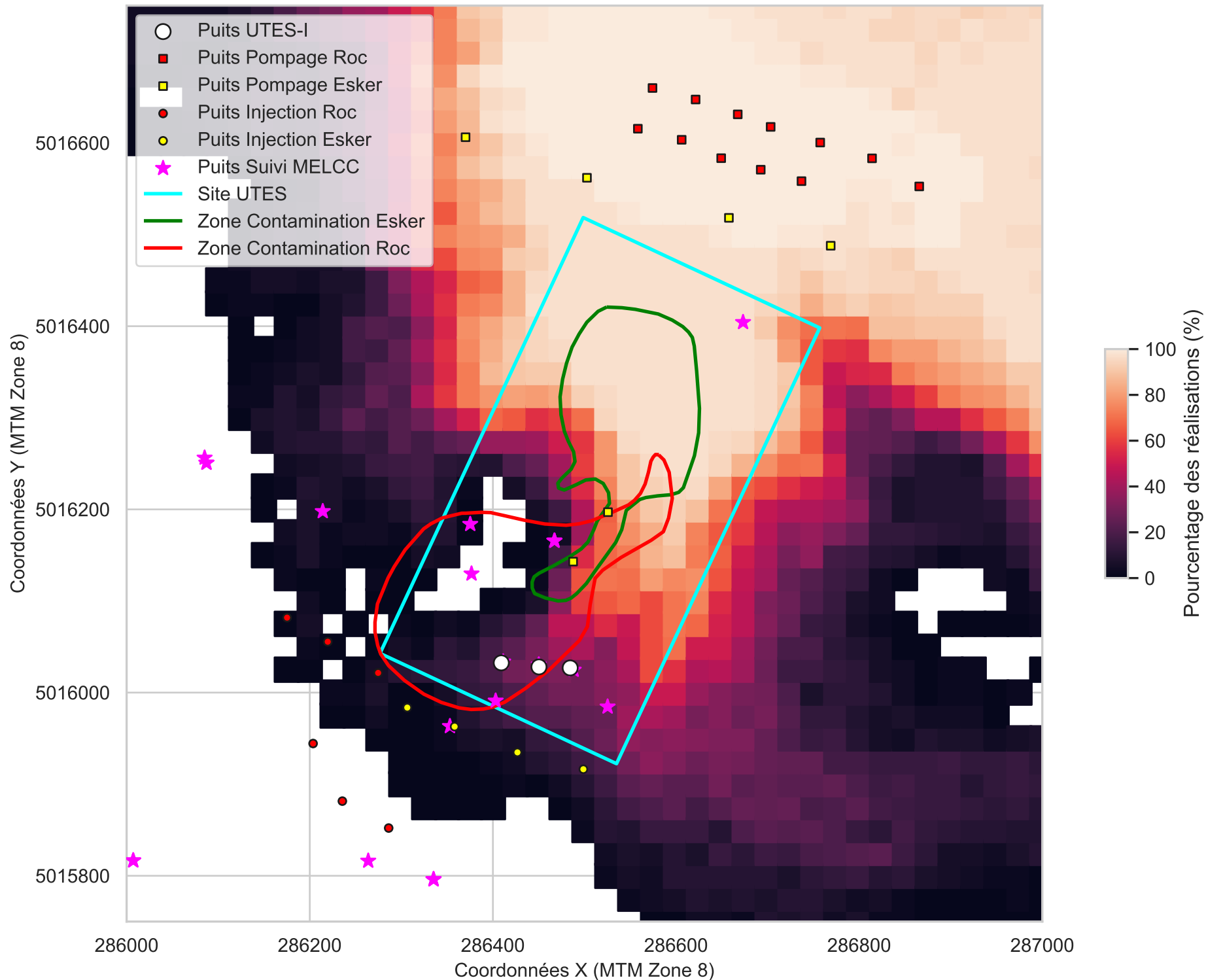


Figure C_1-31
Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de captage 5 ans à partir des Puits Amont (Esker - Local)

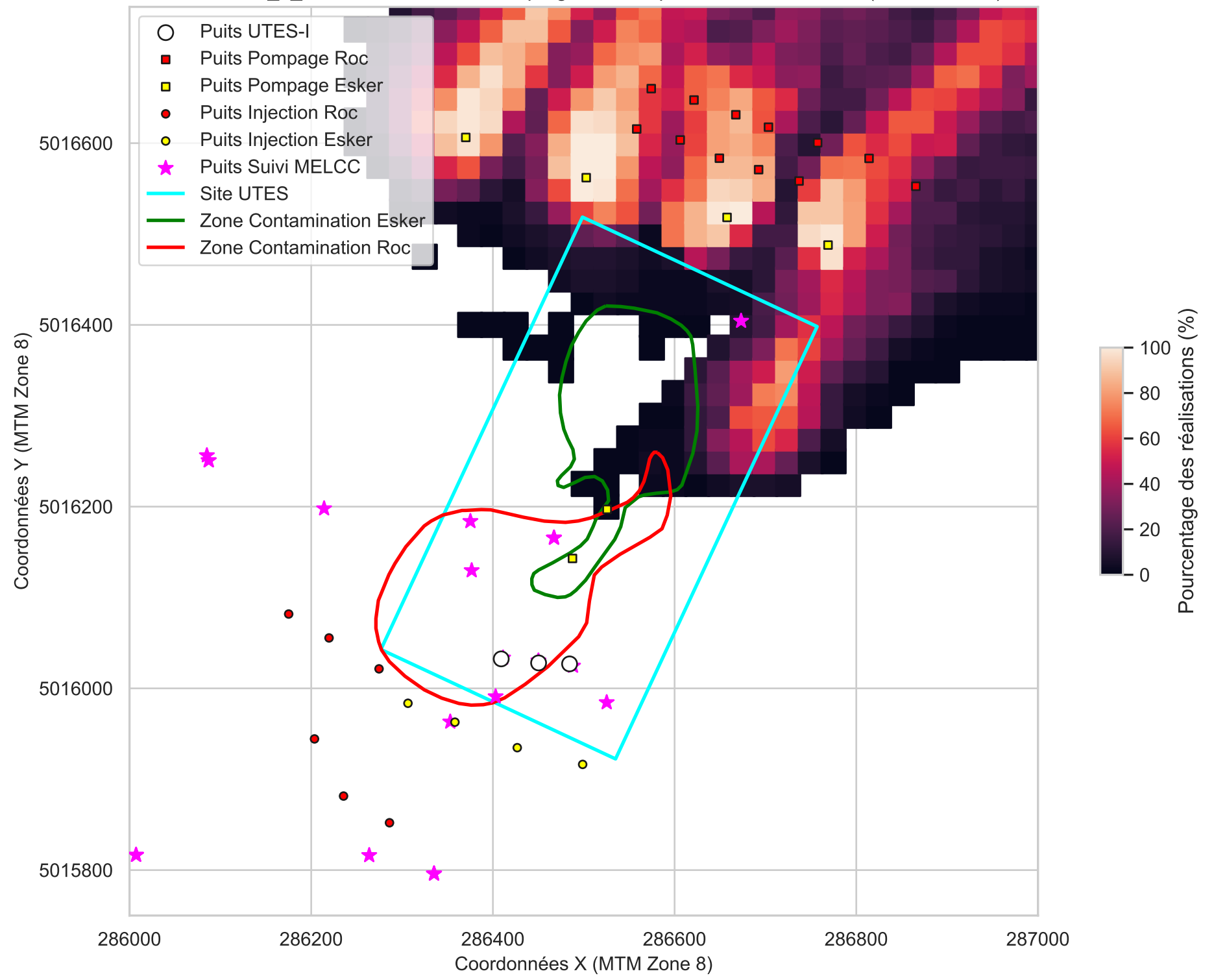


Figure C_1-32
Scénario C_1_S3R3 - Probabilité de relargage de particules 100 ans au roc

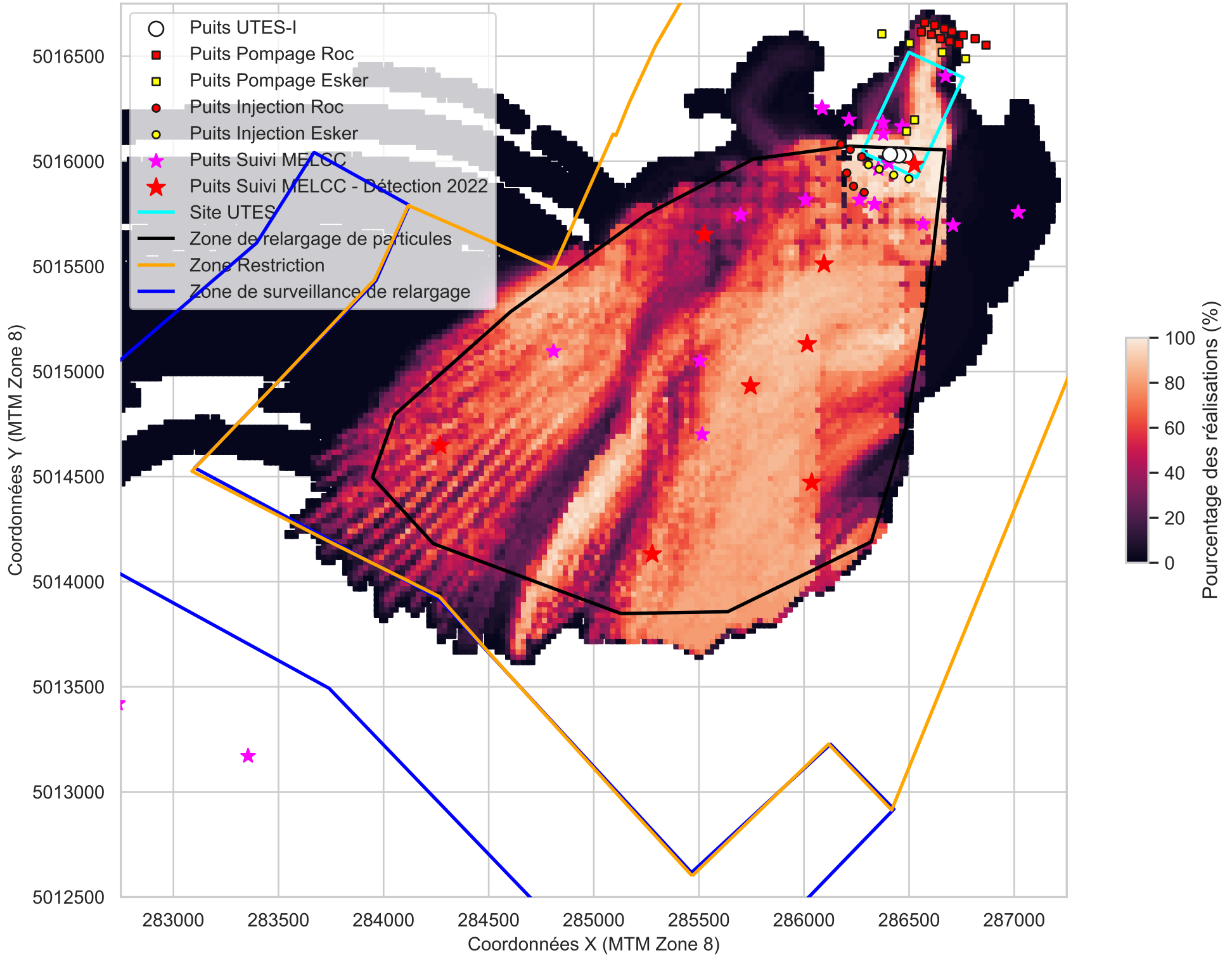


Figure C_1-33
Scénario C_1_S3R3 - Temps minimum requis pour atteindre la zone de restriction

