

MODREC 2

HYDROLOGIE

Laboratoire Vesdre : vers des
territoires d'innovation hydrologique



Aurore DEGRÉ, Lisa DI MAGGIO, Benjamin GUILLAUME, Marie HEYMANS,
Adrien MICHEZ, Adil THAMI, Camille WEZEL

TABLE DES MATIERES

Lexique.....	17
Avant-propos	19
PARTIE I – Bassin versant de la Vesdre	21
1. Objectifs	22
2. Contexte Biophysique	22
3. Modélisation	24
3.1. Données d’entrée du modèle	25
3.1.1. Domaine.....	25
3.1.2. Climat	26
3.1.3. Occupation du sol et végétation	27
3.1.4. Données hydrauliques de surfaces	28
3.1.5. Sols dans la zone saturée	29
3.1.6. Sols dans la zone non saturée	29
3.1.7. Rivière	34
3.2. Données de sortie du modèle	35
3.3. Calibration et validation du modèle	35
3.3.1. Débits observés	36
3.3.2. Débits reconstitués.....	37
3.3.3. Métriques de validation des débits.....	38
3.4. Analyse des résultats.....	39
4. Résultats et interprétations	40
4.1. Validation des débits	40
4.2. Coefficient d’écoulement	42
5. Synthèse	43
PARTIE II - Territoires d’Innovation Hydrologiques	45
1. Objectifs	46
2. Sélection et description des TIH.....	47
2.1. Manaiant-Ourcy	48
2.2. Pierreuchamps-Chawieumont	52
2.3. Statte	55

3.	Construction des scénarios	59
3.1.	Solutions fondées sur la nature	59
3.1.1.	Aménagements en contexte agricole.....	59
3.1.2.	Aménagements en contexte forestier	65
3.1.3.	Mise en place de ces aménagements	70
3.2.	Elaboration des scénarios théoriques	73
3.2.1.	Analyse cartographique	74
3.2.2.	Visites de terrain.....	75
3.2.3.	Lecture du paysage	75
3.3.	Concertation.....	76
3.3.1.	Manihant-Ourcy	76
3.3.2.	Pierreuchamps-Chawieumont	78
3.3.3.	Statte	79
4.	Modélisation	80
4.1.	Données d'entrée du modèle	81
4.1.1.	Domaine	81
4.1.2.	Climat.....	82
4.1.3.	Occupation du sol et végétation.....	83
4.1.4.	Données hydrauliques de surface	84
4.1.5.	Sols dans la zone saturée	85
4.1.6.	Sols dans la zone non saturée	85
4.1.7.	Rivière.....	90
4.2.	Données de sortie du modèle.....	90
4.3.	Calibration et validation des modèles	91
4.4.	Modélisation de la situation actuelle.....	91
4.4.1.	Topographie	91
4.4.2.	Drainage artificiel	92
4.4.3.	Infrastructures hydrauliques.....	93
4.5.	Modélisation des SFN dans MIKE SHE.....	93
4.5.1.	Principes.....	93
4.5.2.	Aménagements en contexte agricole.....	94
4.5.3.	Aménagements en contexte forestier	98
4.6.	Analyse des résultats de modélisation	101
4.6.1.	Bilans en eau.....	101

4.6.2. Hydrogrammes	103
4.6.3. Cartographies événementielles	104
4.6.4. Cartographies long terme	105
4.6.5. Efficacité des aménagements	106
5. Résultats.....	109
5.1. Contexte hydrologique du bassin versant de la Vesdre	109
5.2. Manaihan-Ourcy	110
5.2.1. Scénarios / Résultats concertations.....	110
5.2.2. Fonctionnement hydrologique	121
5.2.3. Synthèse	147
5.3. Pierreuchamps-Chawieumont	148
5.3.1. Scénarios / Résultats concertations.....	148
5.3.2. Fonctionnement hydrologique	150
5.3.3. Synthèse	167
5.4. Statte	168
5.4.1. Scénarios / Résultats concertations.....	168
5.4.2. Fonctionnement hydrologique	171
5.4.3. Synthèse	188
6. Conclusion.....	189
Travaux cités.....	193
Annexes.....	195
A. Paramétrisation du modèle.....	195
1. Occupation du sol et végétation	195
2. Données de surface	197
3. Sols dans la zone saturée	198
B. Résultats.....	199
1. Modèle Vesdre	199
2. Manaihan-Ourcy	201
3. Pierreuchamps-Chawieumont.....	202
4. Statte	205
C. Récapitulatif des rencontres.....	212
D. ModRec à Herve - Diagnostique initial	217

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Vesdre.	22
Figure 2 : Cartes des paramètres biophysiques du bassin versant de la Vesdre : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).	23
Figure 3 : Schéma des processus hydrologiques modélisés par MIKE SHE (DHI).	24
Figure 4 : Correction du tracé du bassin versant de la Vesdre (déviation Steinbach). ...	26
Figure 5 : Carte des géocodes à une résolution de 1 km.	29
Figure 6 : Schéma de la méthodologie de paramétrisation des sols dans MIKE SHE. ...	30
Figure 7 : Carte (résolution de 50 m) des teneurs en sable (50-2000 μm) dans l'horizon de surface (0-40 cm).	31
Figure 8 : Carte des classes de charge caillouteuse (résolution de 50 cm).	32
Figure 9 : Cartes des stations limnimétriques (données observées) dans le bassin versant de la Vesdre et localisation des points de débits reconstitués.	36
Figure 10 : Hydrogrammes des débits observés et simulés à la station limnimétrique de Polleur (événement du 29/04/2018 ; en haut) et à la station limnimétrique de Forêt (événement du 01/02/2020 ; en bas).	42
Figure 11 : Coefficients d'écoulement de la Vesdre (résolution de 124 m) pour l'évènement du 01/06/2018.	43
Figure 12 : Localisation des Territoires d'Innovation Hydrologique : Manihant-Ourcy, Pierreuchamps-Chawieumont et la Statte.	47
Figure 13 : Localisation du TIH de Manihant-Ourcy (Herve) et carte d'accumulation de flux. Les axes d'écoulement sont classés selon la surface contributive (ha).	48
Figure 14 : Cartes des paramètres biophysiques de Manihant-Ourcy (Herve) : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).	49
Figure 15 : Évolution de l'occupation du sol et de l'urbanisation du périmètre d'étude de Manihant-Ourcy entre 1777 et 2024.	50
Figure 16 : Carte d'accumulation de flux (ha ; à gauche) et plan des égouts existants du PASH (flèches bleues ; à droite) dans une zone de régime d'assainissement collectif (zone encadrée en noir).	51
Figure 17 : Localisation du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont (Theux) et carte d'accumulation de flux. Les axes d'écoulement sont classés selon la surface contributive (ha).	52

Figure 18 : Cartes des paramètres biophysiques du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).	53
Figure 19 : Évolution de l'occupation du sol et de l'urbanisation du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont entre 1777 et 2024.	54
Figure 20 : Localisation du TIH de Statte (Jalhay) et carte d'accumulation de flux. Les axes d'écoulement sont classés selon la surface contributive (ha).	55
Figure 21 : Cartes des paramètres biophysiques du TIH de la Statte : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).	56
Figure 22 : Évolution de l'occupation du sol et de l'urbanisation du TIH de la Statte entre 1777 et 2024.	57
Figure 23 : Carte des séries objectifs du DNF (2017) et des zones de conservation pour le TIH de la Statte.	58
Figure 24 : Haie large et diversifiée (à gauche ; © Sébastien Pirotte) et exemple d'intégration de haies dans le paysage agricole (à droite ; © Franck Barske).	59
Figure 25 : Noue agricole enherbée (à gauche ; © SPW) et noue urbaine (à droite ; © Yaël Haddad).	60
Figure 26 : Illustration du <i>keyline</i> design (à gauche ; Del Carmen Ponce-Rodríguez et al. (2021)) et exemple d'aménagement en fossé-buttée (à droite ; © Boris Hallier). F = fossé ; K = ligne de <i>keyline</i> avec plantation d'arbres ; A = zone en aval.	61
Figure 27 : Mares tampons aménagées le long d'un axe de ruissellement (à gauche ; © Michal Kravčík) et délimitation d'une zone tampon (jaune-rouge) autour d'une marre permanente (à droite ; © SPW).	62
Figure 28 : Zone de rétention avec ajutage (à gauche) et zone de rétention avec reméandration d'un cours d'eau (à droite). © ULiège-GxABT.	63
Figure 29 : Fissuration avec sous-soleuse en dents paraboliques/type Yeomans (à gauche ; © Fabian Feraux) et illustration des effets du sous-solage sur le sol et la végétation (à droite ; Mollison, 1988).	64
Figure 30 : Visualisation du réseau de drainage d'une exploitation sylvicole à partir d'un <i>hillshade</i> . © ULiège-GxABT.	66
Figure 31 : Photos avant (à gauche) et après (à droite) bouchage de réseau de drains. © Lucas Goosens.	67
Figure 32 : Représentation de deux modalités de déviations : à droite, des fossés bordiers et à gauche, déviations permanente. © Lucas Gossens	67
Figure 33 : Représentation de systèmes de redents dans un chenal : à gauche, une barrière en bois imitant les barrages des castors (© The Hadlow Estate, site internet), à	

droite, une succession de redents en béton (© l'eau, l'industrie, les nuisances, site internet).....	68
Figure 34 : A gauche : zone de dispersion des eaux (© Aurore Degré). A droite : zone de méandre et de déviation des écoulements (© Lisa Di Maggio).....	69
Figure 35 : Représentation des mares dans le contexte forestier. © Aurore Degré	70
Figure 36 : Visites de terrain à Manihant-Ourcy (à gauche), dans la Statte (à droite) et à Pierreuchamps-Chawieumont (en bas). © ULiège-GxABT.....	75
Figure 37 : Schéma des processus hydrologiques modélisés par MIKE SHE (DHI).	80
Figure 38 : Schéma de la méthodologie de paramétrisation des sols dans MIKE SHE...	85
Figure 39 : Carte des teneurs en sable (50-2000 μ m) dans l'horizon de surface (0-40 cm) sur Manihant-Ourcy (résolution de 50 m) : (a) données brutes, (b) données extrapolées.	87
Figure 40 : Carte des classes de charge caillouteuse sur Manihant-Ourcy (résolution de 50 m) : (a) données brutes selon la CSNW, (b) données extrapolées.	88
Figure 41 : Dessin d'une zone de rétention en suivant les courbes de niveaux (à gauche) et schéma de la conception d'un déversoir et ajoutage à l'aval d'une zone de rétention dans MIKE+ (à droite).	97
Figure 42 : Heatmap des précipitations (mm) et de l'évapotranspiration de référence (ET_0 , mm) dans le bassin versant de la Vesdre pour la période de 2005 à 2023.	109
Figure 43 : Réunion 2 avec les agriculteurs, les acteurs externes (DAFoR, GISER, Natagriwal, Gal Pays de Herve), ULiège-GxABT et Contrat de Rivière Vesdre.....	112
Figure 44 : Signalétique pour les aménagements proposés en milieu agricole lors de la deuxième réunion à Manihant-Ourcy.	113
Figure 45 : Trois scénarios intermédiaires réalisés lors du processus de co-construction avec les agriculteurs à Manihant-Ourcy dans l'ordre de gauche à droite : Scénario théorique, Scénario 1 Agri + ULiège, statut d'acceptabilité.	115
Figure 46 : Plan d'aménagement du « Scénario Agri 2 » pour le TIH de Manihant-Ourcy.	116
Figure 47 : Evènements organisés dans le cadre du projet ModRec 2–Hydrologie pour les habitant-es de Manihant-Ourcy. En haut : séance d'information pour les habitants (à gauche) ; flyers pour la balade de l'inondation. Au milieu : balade de l'eau de pluie à Manihant-Ourcy. En bas : soirée d'échange sur la thématique de la gestion de l'eau à la parcelle.	117
Figure 48 : Localisation des deux situations d'aménagement proposées à l'échelle parcellaire chez les habitants (WalOnMap et carte LIDAXE). Première situation à gauche ; Deuxième situation à droite.	118
Figure 49 : Scénario intermédiaire avec uniquement les noues urbaines v1.	119

Figure 50 : Visite de terrain à Manihant-Ourcy pour les aménagements en voirie. A gauche ; emplacement d'un futur ralentisseur et noue sur la Thier Martin. A droite : les 6 bacs à fleurs de la commune convertibles en noue pour la rue de Manihant.	120
Figure 51 : Plan des noues implémentées dans le scénario « Noues urbaines v2 ».....	121
Figure 52 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de Manihant-Ourcy par saison pour la situation actuelle et le scénario aménagé.	122
Figure 53 : Dépassements du seuil de débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) correspondant au quantile 99,9 % de la situation actuelle ($Q = 0,329 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$) sur la période du 01/01/2018 au 01/09/2024. Les graphiques situés en bas à gauche et à droite présentent respectivement la fréquence.	124
Figure 54 : Évolution des débits de pointe modélisés (Q_p) du TIH de Manihant-Ourcy dans le scénario aménagé, avec la droite de régression linéaire représentée en rouge.	124
Figure 55 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Manihant-Ourcy pour les événements pluvieux (1) et (2) (cf. Tableau 19). La figure compare la situation actuelle au scénario aménagé. Le débit retenu correspond à la différence de débit entre l'aval et l'amont de la zone de rétention.	126
Figure 56 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Manihant-Ourcy pour les événements pluvieux (3) et (4) (cf. Tableau 19). La figure compare la situation actuelle au scénario aménagé. Le débit retenu correspond à la différence de débit entre l'aval et l'amont de la zone de rétention.	127
Figure 57 : Localisation des zones de rétention numérotées au sein du TIH de Manihant-Ourcy.	128
Figure 58 : Évolution des débits de pointe modélisés (Q_p) du TIH de Manihant-Ourcy dans le scénario aménagé sans les quatre zones de rétention, avec la droite de régression linéaire représentée en rouge.	128
Figure 59 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (1) pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	131
Figure 60 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	132
Figure 61 : Evapotranspiration réelle (ETR) annuelle moyenne sur le TIH de Manihant-Ourcy pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de	

différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de *ETR* par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé). 136

Figure 62 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de Manihant-Ourcy pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (bas). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une diminution (vert) ou une augmentation (rose) du nombre de jours sous stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé). 137

Figure 63 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de Manihant-Ourcy pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) du nombre de jours où le sol est saturé par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé). 138

Figure 64 : Répartition des types d'aménagement en fonction de l'occupation du sol (LifeWatch 2022) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 139

Figure 65 : Répartition des types d'aménagements en fonction des pentes (%) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 140

Figure 66 : Répartition des types d'aménagement en fonction des types de sol (CNSW) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 140

Figure 67 : Répartition des types d'aménagement en fonction des classes de drainage (CNSW) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 'b', 'D', 'd', 'F', 'I' correspondent respectivement aux classes de drainage suivantes : drainage naturel légèrement excessif (textures Z) ou favorable (textures L, A, E, U, G) ; drainage modéré ou imparfait ; drainage naturel imparfait ; drainage pauvre ou assez pauvre et drainage pauvre ou assez pauvre à horizons réduits sur des textures L, A, E, U ou G. 141

Figure 68 : Répartition des types d'aménagement en fonction des charges caillouteuses (%) au sein du TIH Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 142

Figure 69 : Répartition des types d'aménagement en fonction des profondeurs de sol au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 142

Figure 70 : Comparaison des coefficients d'écoulement entre la situation actuelle et le scénario aménagé pour les événements pluvieux (2) et (4) en fonction des différents types d'aménagement. 144

Figure 71 : Modification des coefficients d'écoulement pour les pixels concernés par l'aménagement de haies en fonction du drainage naturel des sols, pour l'évènement de juillet 2021 (4). 145

Figure 72 : Modification des coefficients d'écoulement pour les pixels concernés par l'aménagement de noues urbaines en fonction de l'occupation initiale du sol, pour l'évènement de juillet 2021 (4).....	146
Figure 73 : Plan d'aménagement du scénario intermédiaire pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont.	149
Figure 74 : Plan d'aménagement du scénario théorique pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont.	150
Figure 75 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont par saison pour la situation actuelle et le scénario théorique complet.	151
Figure 76 : Dépassements du seuil de débit ($m^3 s^{-1}$) correspondant au quantile 99,9 % de la situation actuelle ($Q = 0,043 m^3 s^{-1}$) sur la période du 01/05/2005 au 01/09/2024. Les graphiques situés en bas à gauche et à droite présentent respectivement la fréquence annuelle et saisonnière des dépassements observés.	152
Figure 77 : Evolution des débits de pointe (Qp) modélisés du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour les scénarios intermédiaire (gauche) et théorique (droite).....	153
Figure 78 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour les événements pluvieux (1) et (2) (cf. Tableau 20). La figure compare la situation actuelle au scénario théorique complet, en distinguant les débits des routes de Pierreuchamps (orange) et de Chawieumont (vert).	154
Figure 79 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour les événements pluvieux (3) et (4) (cf. Tableau 20). La figure compare la situation actuelle au scénario théorique complet, en distinguant les débits des routes de Pierreuchamps (orange) et de Chawieumont (vert).	155
Figure 80 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	158
Figure 81 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (4) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	159
Figure 82 : Vue drone illustrant deux types de haies aux caractéristiques hydrologiques contrastées. En rouge, une haie vive mature, non soumise à une taille régulière, hydrologiquement fonctionnelle. En jaune, une haie entretenue, à faible impact hydrologique. © ULiège-GxABT.....	160

Figure 83 : Evapotranspiration réelle (ETR) annuelle moyenne sur le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de l' ETR par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de l' ETR pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	162
Figure 84 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	163
Figure 85 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	164
Figure 86 : Histogrammes comparatifs des coefficients d'écoulement (CE) entre la situation actuelle (en bleu) et le scénario théorique complet (en rouge). Les résultats sont présentés pour les pixels de haies (à gauche ; $n = 226$) et de fossés (à droite ; $n = 251$), lors des évènements 2 (en haut) et 4 (en bas).	166
Figure 87 : Plan d'aménagement du scénario DNF pour le TIH de la Statte.	169
Figure 88 : Plan d'aménagement du scénario théorique pour le TIH de la Statte.	169
Figure 89 : Plan d'aménagement du scénario théorique long-terme pour le TIH de la Statte.	170
Figure 90 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de la Statte par saison pour la situation actuelle et le scénario théorique.	171
Figure 91 : Dépassements du seuil de débit ($m^3 s^{-1}$) sur la période du 01/01/2012 au 01/09/2024. Les graphiques situés en bas à gauche et à droite présentent respectivement la fréquence annuelle et saisonnière des dépassements observés.	173
Figure 92 : Evolution des débits de pointe (Qp) modélisés du TIH de la Statte pour le scénario DNF.	174
Figure 93 : Evolution des débits de pointe (Qp) modélisés du TIH de la Statte pour les scénarios théorique (gauche) et théorique long terme (droite).	175
Figure 94 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de la Statte pour l'évènement pluvieux (1) (cf. Tableau 22). La figure compare la situation actuelle aux trois scénarios.	176

Figure 95 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de la Statte pour l'évènement pluvieux (2) (cf. Tableau 22). La figure compare la situation actuelle aux trois scénarios.177

Figure 96 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario DNF (milieu) sur le TIH de la Statte. La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).178

Figure 97 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu) du TIH de la Statte. La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique long terme induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).180

Figure 98 : Evapotranspiration réelle (ETR) annuelle moyenne pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de l' ETR par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de l' ETR pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).183

Figure 99 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).184

Figure 100 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario DNF (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario DNF induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).185

Figure 101 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique long terme induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).186

Figure 102 : Représentation de la dynamique temporelle annuelle des paramètres des classes de végétation.196

Figure 103 : Comparaison des coefficients d'écoulement entre la situation actuelle et le scénario aménagé pour les événements pluvieux (1) et (3) dans la Section 5.2.2.2 en fonction des différents types d'aménagement.	201
Figure 104 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont par saison pour la situation actuelle et le scénario intermédiaire.	202
Figure 105 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (1) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	203
Figure 106 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (3) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	204
Figure 107 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de la Statte par saison pour la situation actuelle et le scénario DNF.	205
Figure 108 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de la Statte par saison pour la situation actuelle et le scénario théorique long terme.	206
Figure 109 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (1) (cf. Tableau 22) pour la situation actuelle (haut), le scénario théorique long terme (milieu) et leur différence (bas) sur le TIH de la Statte. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique long terme induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	207
Figure 110 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) (cf. Tableau 22) pour la situation actuelle (haut), le scénario théorique (milieu) et leur différence (bas) sur le TIH de la Statte. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	208
Figure 111 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle et le scénario DNF. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).	209

Figure 112 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle et le scénario théorique. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).210

Figure 113 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle et le scénario théorique. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).211

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Correspondance entre la classification LifeWatch et la classification hydrologique utilisée dans le modèle global de la Vesdre. 28

Tableau 2 : Classes de charge en éléments grossiers et fractions volumiques (-) associées en fonction de la profondeur (SUR : 0-40 cm, PR1 : 40-80 cm, PR2 : 80-120 cm). 33

Tableau 3 : Périodes reprises pour les stations limnimétriques..... 37

Tableau 4 : Analyse des débits observés et simulés des cours d'eau de la Vesdre sur la période du 01/01/2005 au 31/08/2024. 40

Tableau 5 : Montant des aides pour les aménagements en zone agricole. 72

Tableau 6 : Coûts des aménagements en milieu forestier..... 73

Tableau 7 : Caractéristiques des domaines de modélisation par TIH..... 81

Tableau 8 : Correspondance entre la classification LifeWatch et la classification hydrologique utilisée dans la modélisation des TIH..... 84

Tableau 9 : Classes de charge en éléments grossiers et fractions volumiques (-) associées en fonction de la profondeur (SUR : 0-40 cm, PR1 : 40-80 cm, PR2 : 80-120 cm). 88

Tableau 10 : Paramètres de drainage artificiel dans la zone saturée pour les TIH de Manihant-Ourcy et de la Statte. 93

Tableau 11 : Modification des paramètres dans MIKE SHE pour les différents aménagements en contexte agricole. 98

Tableau 12 : Dimensions et implémentations des mares forestières dans MIKE SHE... 99

Tableau 13 : Modification des paramètres hydrodynamiques des sols pour le décompactage dans MIKE SHE.....	100
Tableau 14 : Modification des paramètres de végétation et de surface pour la diversification des peuplements dans MIKE SHE.	101
Tableau 15 : Description des flux selon le compartiment de la balance hydrique dans le modèle MIKE SHE.....	102
Tableau 16 : Réunions de co-construction, présences et surfaces de prairie concernée.	111
Tableau 17 : Scénarios et typologies d'aménagement (emprise surfacique (m ²) et linéaire (km))......	115
Tableau 18 : Evènements et participations des habitants de Manihant-Ourcy.	116
Tableau 19 : Caractéristiques des quatre évènements pluvieux sélectionnés pour l'analyse approfondie.	125
Tableau 20 : Caractéristiques des quatre évènements pluvieux sélectionnés pour l'analyse approfondie.	153
Tableau 21 : Description des aménagements pour chaque scénario sur la Statte.	170
Tableau 22 : Caractéristiques des deux évènements pluvieux sélectionnés pour l'analyse approfondie pour le TIH de la Statte.....	175
Tableau 23 : Paramètres de dynamique annuelle des variables biophysiques pour chaque classe de végétation.....	195
Tableau 24 : Valeur du coefficient de Manning (m ^{1/3} s ⁻¹) et du stock de rétention superficielle (mm) pour les classes d'occupation du sol.	197
Tableau 25 : Conductivités hydrauliques à saturation verticale (<i>Ks, Vsurface, Ks, Vprofond</i>) et horizontales <i>Ks, Hprofond</i> associées à chaque géocode. Les propriétés de surface et de profondeur se situent respectivement au-dessus et en dessous de la profondeur limite.....	198
Tableau 26 : Rencontres avec les structures externes pour des sujets transversaux...	212
Tableau 27 : Rencontres avec les autorités communales.	213
Tableau 28 : Rencontres spécifiques pour Manihant-Ourcy.	214
Tableau 29 : Rencontres spécifiques pour Pierreuchamps-Chawieumont.	216
Tableau 30 : Rencontres spécifiques pour la Statte.....	216

LEXIQUE

CE : Coefficient d'écoulement

CNSW : Carte numérique des sols de Wallonie

CRV : Contrat de rivière Vesdre

DAFoR : Direction de l'Aménagement foncier rural

ET_R : Évapotranspiration réelle

GISER : Gestion intégrée sol érosion ruissellement

IRM : Institut royal météorologique de Belgique

MIKE SHE : MIKE Système hydrologique européen

MNT : Modèle numérique de terrain

ModRec : Modélisation de la reconstruction de la vallée de la Vesdre

PASH : Plan d'assainissement par sous-bassin hydrographique

POT : *Peak over threshold*

SFN : Solutions fondées sur la nature

SIGEC : Système intégré de gestion et de contrôle

SPGE : Société publique de gestion de l'eau

SPW : Service public de Wallonie

SSV : Schéma stratégique Vesdre

TIH : Territoire d'innovation hydrologique

ULiège-GxABT : Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech

AVANT-PROPOS

Dans le cadre du projet ModRec-Vesdre (Degré et al., 2024) une première modélisation hydrologique sur le bassin versant de la Vesdre a permis d'évaluer l'efficacité hydrologique globale de différentes mesures de gestion agricole, forestière et de restauration, telles que proposées dans le Schéma Stratégique Vesdre (SSV). Cette première phase a mis en évidence des pistes d'amélioration significatives de la gestion hydrologique du territoire, notamment en lien avec les zones agricoles et forestières, et a souligné l'importance d'une meilleure compréhension spatiale des processus de ruissellement et d'infiltration.

Le présent rapport s'inscrit dans la continuité de ces travaux, dans le cadre du projet ModRec 2-Hydrologie, mené conjointement par le Contrat de Rivière Vesdre (CRV), l'Université de Liège (ULiège, Gembloux Agro-Bio Tech) et le Service public de Wallonie (SPW). Les objectifs principaux de cette deuxième phase sont :

- I. La localisation des zones à privilégier pour des ouvrages de rétention sur base d'un screening des zones les plus productrices du ruissellement à l'échelle du bassin versant de la Vesdre.
- II. La co-construction d'un plan d'aménagement sur un bassin versant agricole et un bassin versant forestier (de 1 à 4 km²) avec toutes les parties prenantes et l'évaluation de son efficacité.

Cette seconde phase du projet vise ainsi à fournir des éléments opérationnels permettant de soutenir la gestion intégrée du bassin versant, dans une optique de résilience hydrologique. A cette fin, les bassins versants sélectionnés sont appelés des Territoires d'Innovation Hydrologique (TIH). Ils pourront devenir des sites-écoles pour exemplifier et reproduire la démarche de ModRec 2-Hydrologie. Un monitoring peut être envisagé afin de mesurer les effets des mesures mises en place et motiver de futures initiatives.

Une approche à l'échelle du bassin versant est essentielle. Elle doit impliquer l'ensemble des acteurs concernés (agriculteurs, riverains, administrations, industries, etc.) et intégrer une réflexion sur la localisation des aménagements proposés, dans une logique de solidarité entre l'amont et l'aval. Les aménagements apportés font partie des Solutions Fondées sur la Nature (SFN) déjà connues et répandues (haies, mares tampons, noues, etc.), mais également innovantes (*keyline design*, redessin parcellaire).

Le présent rapport est composé de deux parties, se référant aux deux objectifs du projet. Les deux parties peuvent être lues séparément. Ceci explique la présence de quelques répétitions méthodologiques. Pour des raisons d'ergonomie de lecture, ce compte-rendu n'est pas rédigé en écriture inclusive mais il s'adresse néanmoins tant aux hommes qu'aux femmes, ainsi qu'aux personnes non-binaires.

PARTIE I

BASSIN VERSANT DE LA VESDRE



1. OBJECTIFS

Dans cette première partie du projet ModRec 2-Hydrologie, l'objectif est de cartographier les dynamiques d'écoulement afin d'identifier et de quantifier les zones contribuant le plus au ruissellement. Ces secteurs constituent des emplacements prioritaires pour l'implantation future d'ouvrages fondés sur les principes de l'hydrologie régénérative ou d'ouvrages de rétention plus généralement. Cette analyse spatiale fournit ainsi un outil d'aide à la décision pour orienter les stratégies d'aménagement du bassin versant et préparer des études plus détaillées.

À l'échelle du bassin de la Vesdre, la résolution spatiale du modèle demeure toutefois trop grossière pour représenter explicitement ces aménagements locaux. Dès lors, l'évaluation de l'efficacité des futurs ouvrages et des mesures devra être réalisée à une résolution plus fine et dans une approche systémique, à l'échelle de sous-bassins pilotes. Cette approche est au cœur de la seconde partie du présent rapport.

2. CONTEXTE BIOPHYSIQUE

Le bassin versant de la Vesdre s'étend sur environ 710 km² et se situe principalement en Région wallonne (Figure 1). La Vesdre prend sa source à proximité du Signal de Botrange, dans les Hautes Fagnes, et rejoint l'Ourthe à Chênée, après un parcours d'environ 70 km. Le bassin de la Vesdre comprend plusieurs sous-bassins d'importance hydrologique majeure, comme la Gileppe, la Hoëgne, la Helle, la Soor et la Getzbach. Certains de ces sous-bassins sont régulés par des infrastructures de retenue, comme les barrages de la Gileppe et d'Eupen. Ces aménagements jouent un rôle central dans la régulation des débits.

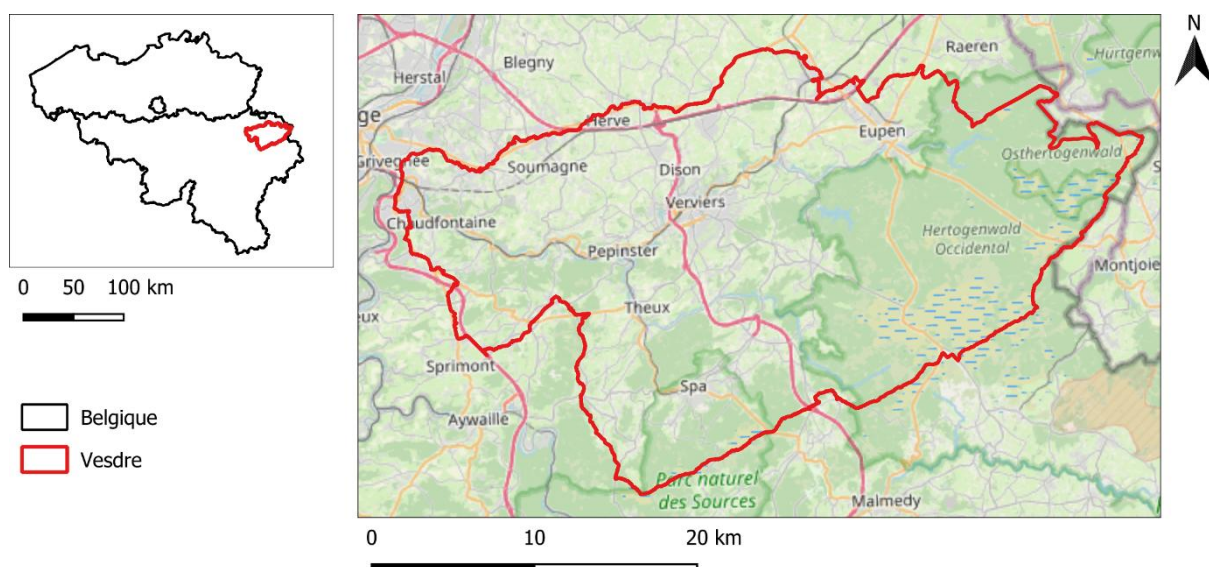


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Vesdre.

Le bassin présente une forte hétérogénéité spatiale, tant sur le plan géologique que pédologique et hydrologique (Figure 2). Les formations schisto-gréseuses du massif ardennais, peu perméables, contrastent avec les zones plus alluviales situées en aval. Cette diversité se reflète également dans les usages du sol, dominés par les milieux forestiers et semi-naturels dans la partie amont, et par des zones agricoles et urbanisées dans les vallées.

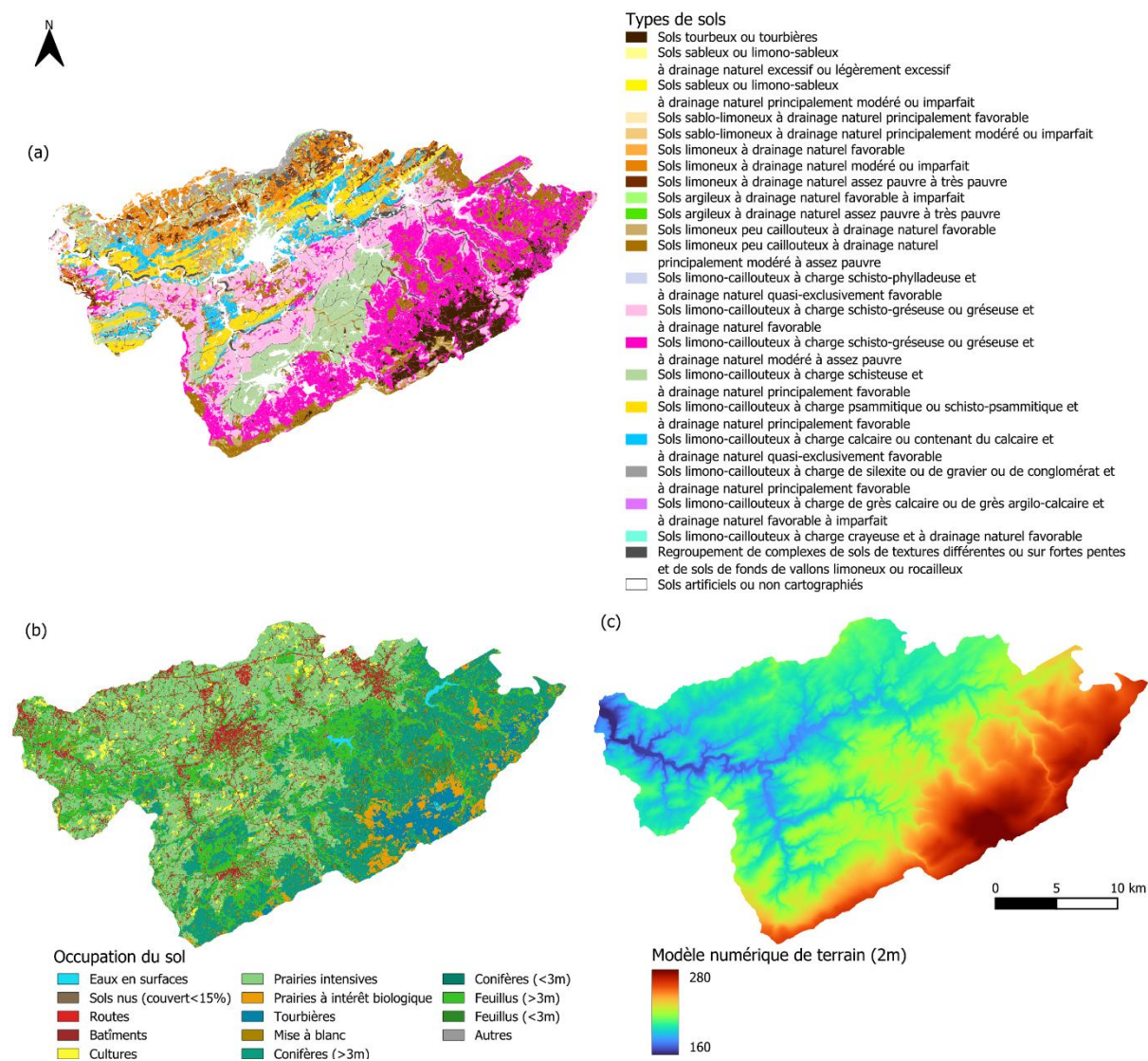


Figure 2 : Cartes des paramètres biophysiques du bassin versant de la Vesdre : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).

3. MODÉLISATION

L'analyse s'appuie sur une modélisation hydrologique de l'ensemble du bassin versant de la Vesdre réalisée à l'aide du modèle MIKE SHE, développé par l'Institut hydraulique danois (DHI). MIKE SHE est un modèle hydrologique intégré, physiquement basé et entièrement distribué. À partir de données d'entrée spatio-temporelles décrivant le climat, la topographie, l'occupation du sol, les sols et la géologie, le modèle simule les principaux processus du cycle hydrologique, tels que l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration, les écoulements souterrains et les écoulements de surface. Cette approche permet de représenter la variabilité spatiale des processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant et d'analyser leurs interactions (Figure 3).

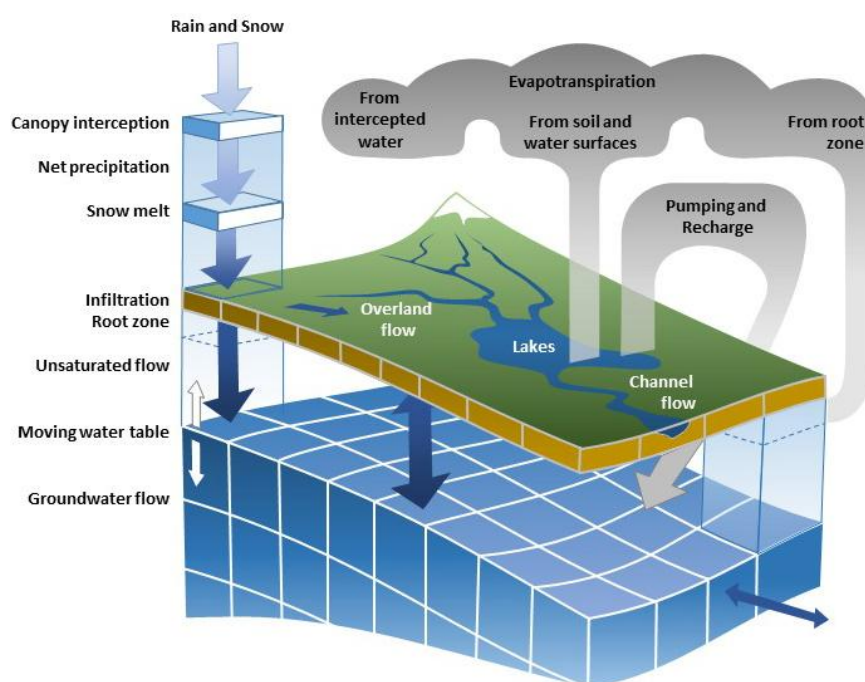


Figure 3 : Schéma des processus hydrologiques modélisés par MIKE SHE (DHI).

Le caractère distribué du modèle permet également d'évaluer l'impact de modifications des conditions du bassin versant au travers de différents scénarios portant sur le climat ou l'aménagement du territoire. Cette capacité est notamment exploitée dans la seconde partie du rapport consacrée aux Territoires d'Innovation Hydrologique (TIH).

Toutefois, la résolution spatiale retenue à l'échelle du bassin versant impose un niveau de simplification qui ne permet pas de représenter explicitement des aménagements locaux de faible emprise, tels que des ouvrages de rétention, des modifications topographiques ponctuelles ou des éléments linéaires comme les haies. Les résultats présentés dans cette première partie doivent dès lors être interprétés comme une analyse à

l'échelle du bassin versant, destinée à caractériser les dynamiques hydrologiques dominantes et à soutenir l'identification de secteurs nécessitant des investigations complémentaires à plus haute résolution.

3.1. Données d'entrée du modèle

Cette partie présente la constitution des données d'entrée du modèle, organisée selon ses différents modules : domaine (topographie et emprise), climat, végétation, surface, rivière, sols et sous-sols. Les données spatiales collectées, de résolutions initiales variables, ont été agrégées ou rééchantillonnées pour correspondre à la maille finale de 124 m. Le modèle fonctionne avec un pas de temps horaire.

3.1.1. Domaine

Le domaine MIKE SHE est représenté par une grille de mailles carrées dont l'emprise et la résolution doivent être définies. L'emprise est déterminée par les contours du bassin versant, tracés à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) et de la position d'un exutoire. La résolution spatiale est déterminée en fonction de la finesse souhaitée pour la description des processus hydrologiques et influence les temps de calcul des simulations numériques. Cette section détaille la génération de la carte topographique ainsi que les ajustements réalisés sur l'emprise du bassin versant.

Topographie

Dans le cadre de ce projet, deux sources de données topographiques sont utilisées :

- Le MNT LIDAXES (version 2) : un modèle numérique de terrain hydrologiquement corrigé, à une résolution de 2 m, issu du produit « [LIDAXES \(version 2\) - MNT](#) » ;
- Le MNT LiDAR 2013-2014 : un modèle numérique de terrain à haute résolution (1 m), issu du produit « [Relief de la Wallonie – Modèle Numérique de Terrain \(MNT\) 2013–2014](#) ».

Ces deux jeux de données sont combinés afin de corriger les discontinuités présentes dans les données MNT LIDAXES, notamment dans les zones où l'écoulement est interrompu (zones karstiques, carrières, etc.). Les lacunes sont comblées à l'aide des valeurs issues du MNT LiDAR 2013-2014. Le résultat est un MNT continu, cohérent sur le plan hydrologique et couvrant l'ensemble du bassin versant de la Vesdre, avec une résolution finale de 2 m.

Les données topographiques sont ensuite rééchantillonnées. Ce rééchantillonnage repose sur une fonction d'agrégation qui sélectionne la valeur d'altitude minimale au sein de chaque fenêtre de calcul. Cette méthode permet de préserver au maximum les corrections hydrologiques intégrées au MNT LIDAXES, garantissant ainsi la cohérence hydraulique des MNT.

Délimitation du bassin versant

L'emprise du bassin versant a été déterminée à partir du MNT à l'aide des outils disponibles dans ArcGIS Pro. Toutefois, la partie amont du bassin inclut une zone transfrontalière, située en Allemagne, qui ne contribue plus directement aux écoulements dans la Vesdre en raison de la présence d'un canal de dérivation. Ce canal modifie le réseau hydrographique naturel en déviant une portion des écoulements hors du bassin.

Sur base des plans disponibles intégrant cette infrastructure, un contour actualisé du bassin versant a été réalisé, reflétant les conditions hydrologiques effectives (Figure 4). Ce contour constitue la référence pour les traitements et modélisations hydrologiques ultérieurs.

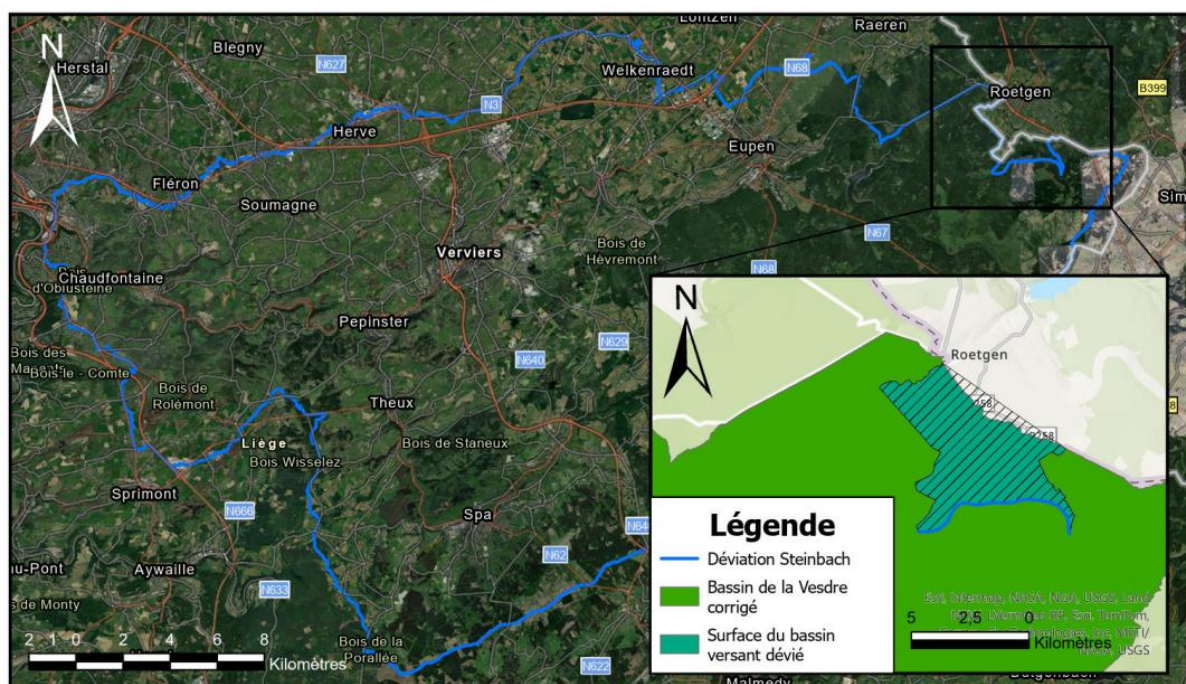


Figure 4 : Correction du tracé du bassin versant de la Vesdre (déviation Steinbach).

3.1.2. Climat

Les données climatiques d'entrée du modèle comprennent les précipitations horaires (mm h⁻¹) et l'évapotranspiration de référence au pas de temps journalier (mm j⁻¹).

Précipitations

Les données de précipitations proviennent de la combinaison de deux sources :

- Les précipitations journalières de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) d'une résolution de 5 km, issus du produit « [Gridded observational data](#) » ;
- Les enregistrements horaires du réseau de surveillance pluviométrique du Service public de Wallonie (SPW), issus du produit « [L'Hydrométrie en Wallonie](#) ».

Cette combinaison permet de désagréger les précipitations journalières de l'IRM à un pas de temps horaire, en s'appuyant sur les dynamiques horaires mesurées par les stations du SPW. Les données ainsi reconstruites couvrent la période allant du 1^{er} janvier 2002 (début du suivi contrôlé par le SPW) au 1^{er} septembre 2024. Pour chaque maille IRM, un ou plusieurs pluviomètres du SPW sont associés selon une grille de répartition spatiale construite par polygonalement de Thiessen. Cette grille évolue dans le temps pour refléter les modifications du réseau de pluviographes du SPW.

L'Equation (1) synthétise le principe de calcul de la précipitation horaire au sein d'une maille i de la grille IRM, à partir d'un pluviomètre j du réseau du SPW. La précipitation à l'heure H ($PIRM_{i,d,h}$) est donc la précipitation journalière (jour d) telle que fournie par l'IRM ($PIRM_{i,d}$), multipliée par la précipitation observée à l'heure h par le pluviomètre j du SPW ($P_{j,h}$), puis divisée par la somme de la précipitation journalière observée ce même jour par le pluviographe du SPW. Si plusieurs polygones de Thiessen recouvrent une même maille IRM, une pondération est appliquée selon leur emprise relative.

$$PIRM_{i,d,h} = \frac{P_{j,h}}{\sum_{h=24}^{h=0} P_{j,h}} * PIRM_{i,d} \quad (1)$$

Evapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est directement fournie par l'IRM. Elle est estimée à l'aide de l'équation de Penman–Monteith, à partir des observations météorologiques du réseau de mesure (température, humidité, vitesse du vent et rayonnement). Initialement disponibles au pas de temps journalier et à une résolution spatiale de 5 km, ces données sont ensuite rééchantillonnées au pas de temps horaire et à la résolution de 124 m du modèle.

3.1.3. Occupation du sol et végétation

L'occupation du sol est utilisée pour représenter la variabilité spatiale de la végétation dans les modèles. Trois paramètres biophysiques liés à la végétation sont décrits :

- L'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index – LAI*) ;
- Le coefficient cultural (K_c) ;
- La profondeur racinaire (R_d).

Ces paramètres varient au cours de l'année et permettent de convertir l'évapotranspiration de référence en évapotranspiration maximale réelle, selon l'approche de Kristensen et Jensen (1975).

Les données d'occupation du sol proviennent du produit « [LifeWatch - Land Cover 2022](#) ». Il s'agit d'un raster de 2 m de résolution (Figure 2.b), dont les 13 classes d'occupation du

sol initiales (2022) ont été regroupées en 7 classes de végétation (Tableau 1). Chaque type de végétation se voit attribuer une dynamique annuelle des paramètres biophysiques (Tableau 23 ; Figure 102, Annexe A.1). Ces trajectoires permettent de modéliser de manière réaliste l'évolution saisonnière de la végétation. Les valeurs de classes sont ensuite rééchantillonnées spatialement à la résolution finale du modèle via la plus grande fréquence à laquelle on retrouve une classe par maille.

Tableau 1 : Correspondance entre la classification LifeWatch et la classification hydrologique utilisée dans le modèle global de la Vesdre.

Classification LifeWatch	Classification hydrologique
Eau de surface	Pas de végétation
Surfaces naturelles minérales avec couverture végétale < 10 %	Pas de végétation
Surfaces artificiellement imperméabilisées	Pas de végétation
Bâtiments, structures et infrastructures spécifiques	Pas de végétation
Formations herbacées en rotation annuelle (e.g., cultures)	Cultures
Prairies à gestion intensive	Prairies intensives
Prairies et fourrés d'intérêt biologique	Prairies biologiques
Végétation de zones récemment perturbées (e.g., coupe rase)	Prairies biologiques
Prairies inondables et fourrés d'intérêt biologique	Zones humides
Peuplements résineux adultes (≥ 3 m)	Conifères
Jeunes peuplements résineux (< 3 m)	Conifères
Peuplements feuillus adultes (≥ 3 m)	Feuillus
Jeunes peuplements feuillus (< 3 m) et arbustes	Feuillus

3.1.4. Données hydrauliques de surfaces

Le modèle MIKE SHE requiert l'implémentation de deux paramètres hydrauliques liés à la surface :

- Le coefficient de rugosité de Manning (n , $m^{1/3} s^{-1}$) ;
- Le stock de rétention superficielle (mm).

Le premier correspond à la rugosité de surface et détermine la résistance à l'écoulement de l'eau. Le second correspond à la hauteur d'eau maximale que la rugosité de surface peut retenir au début d'une pluie, avant le début de l'écoulement. Ces deux paramètres sont spatialisés à partir de la carte d'occupation du sol LifeWatch 2022, en attribuant des

valeurs propres à chacune des 13 classes de couverture (Tableau 24). Les valeurs ainsi obtenues sont ensuite rééchantillonnées à la résolution finale du modèle, en calculant la moyenne spatiale pour chaque maille.

3.1.5. Sols dans la zone saturée

Les écoulements saturés sont modélisés à l'aide de l'équation de Darcy en 3D. Pour cela, il est nécessaire de définir les valeurs de conductivité hydraulique verticale ($K_{s,v}$) et horizontale ($K_{s,h}$) du sous-sol. Dans ce projet, le sous-sol est représenté par une couche unique dont les propriétés de conductivité verticale et horizontale peuvent varier en fonction de la nature géologique. Chaque unité homogène du sous-sol se voit attribuer un code spécifique, appelé « géocode ». La donnée est à une résolution de 1 km (Figure 5), puis rééchantillonnée à 124 m. Ces données cartographiques du socle rocheux ont été établies dans le cadre du projet de cartographie hydrogéologique de la Wallonie, notamment pour le développement du modèle EPICgrid (GxABT-SPW). Les propriétés hydrauliques associées à chaque géocode sont définies en annexe, dans le Tableau 25. Ces valeurs ont été ajustées dans le cadre du projet ModRec – Vesdre (Degré et al., 2024).

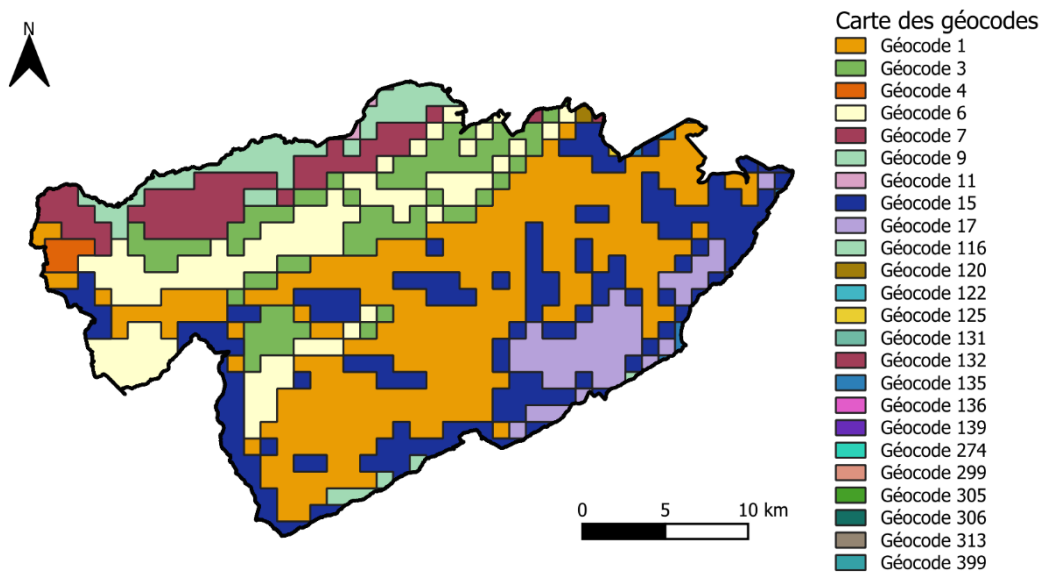


Figure 5 : Carte des géocodes à une résolution de 1 km.

3.1.6. Sols dans la zone non saturée

Les écoulements dans la zone non saturée sont formalisés par l'équation de Richards en 1D (Richards, 1931), couplée au modèle de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980; Mualem, 1986) pour la représentation explicite des propriétés hydrauliques des sols. La configuration de ce module repose sur trois étapes illustrées à la Figure 6 :

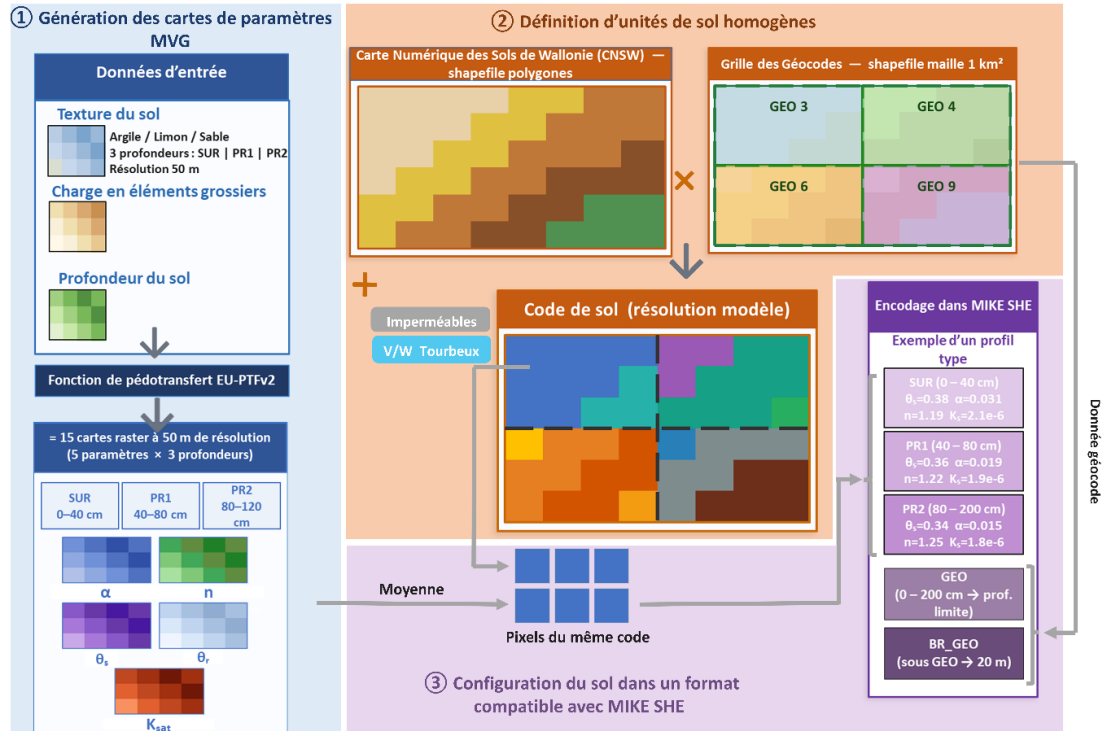


Figure 6 : Schéma de la méthodologie de paramétrisation des sols dans MIKE SHE.

3.1.6.1. Génération des cartes des propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques du sol, i.e., la courbe de rétention du sol ($\theta(h)$) et la courbe de conductivité hydraulique du sol ($K(h)$ ou $K(S_e)$), sont définies selon le modèle de van Genuchten-Mualem (MVG) (van Genuchten, 1980; Mualem, 1986) :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

où h désigne la charge matricielle (cm), θ_s et θ_r sont, respectivement, les teneurs en eau à saturation et résiduelle (-), α est un paramètre lié à l'inverse du point d'entrée d'air (cm^{-1}), n caractérise la distribution de la taille des pores (-), et m définit la forme de la courbe de rétention ($m = 1 - \frac{1}{n}$), K_s est la conductivité hydraulique à saturation (cm jour^{-1}), et S_e désigne la saturation effective (-).

Les propriétés hydrauliques ont été estimées via la fonction de pédotransfert EU-PTFv2 (Szabó et al., 2021), en utilisant les fractions texturales et la profondeur comme prédicteurs (étape 1 de la Figure 6). Cette fonction de pédotransfert est intégrée dans une librairie R nommée [eupf2](#).

Texture du sol

Les données texturales proviennent de la carte « [Textures et fractions granulométriques de référence des sols de Wallonie](#) », qui fournit les teneurs en argile (0-2 µm), en limon (2-50 µm) et en sable (50-2000 µm) à trois profondeurs (surface, 40-80 cm et 80-120 cm), avec une résolution de 50 m (Figure 7). Les discontinuités spatiales sont comblées par une interpolation selon la méthode de pondération inverse à la distance (PID) :

$$V(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{V_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i^p}}, \quad (5)$$

où $V(x_0)$ est la valeur interpolée au point de coordonnées x_0 , k représente le nombre de points connus utilisés pour l'interpolation (fixé à 8), V_i est la valeur mesurée au point i , et d_i est la distance entre le point inconnu x_0 et le point i . Le paramètre p contrôle l'influence relative des points voisins i sur x_0 : pour $p=1$, l'influence d'un point est inversement proportionnelle à sa distance d_i , tandis que pour $p=2$, l'influence est inversement proportionnelle au carré de cette distance. Dans ce travail, le paramètre p est fixé à 1.

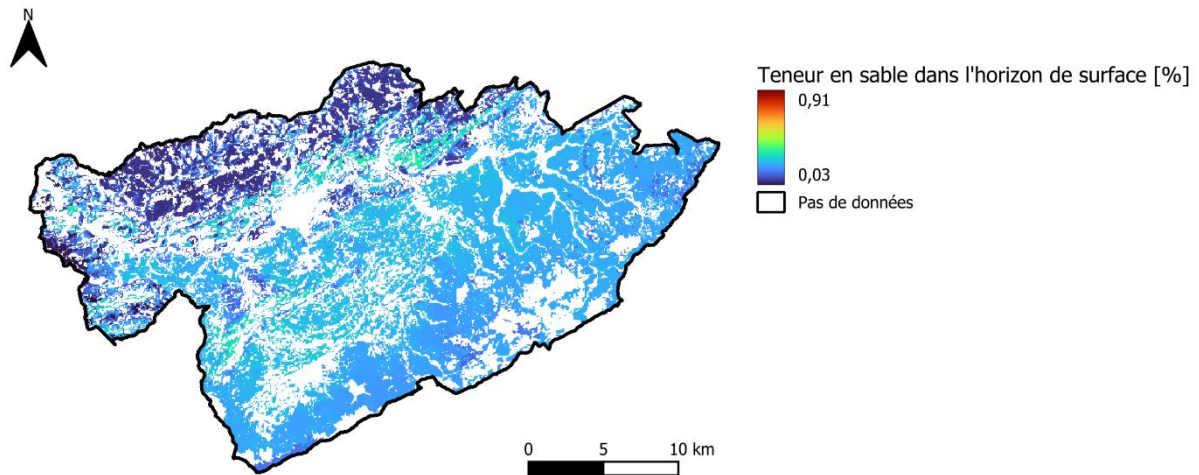


Figure 7 : Carte (résolution de 50 m) des teneurs en sable (50-2000 µm) dans l'horizon de surface (0-40 cm).

Charge en éléments grossiers

La charge en éléments grossiers (>2000 μm) n'est pas reprise dans la carte des textures, et n'est pas explicitement prise en compte dans la fonction de pédotransfert EU-PTFv2. Or, celle-ci influence directement la porosité effective du sol. Les valeurs obtenues de θ_s sont donc ajustées ($\theta_{s,corr}$) selon la relation suivante :

$$\theta_{s,corr} = \theta_s (1 - C) \quad (6)$$

où θ_s est la teneur en eau à saturation non corrigée, et C est la fraction volumique d'éléments grossiers (comprise entre 0 et 1).

Cette information est déduite de la légende de la « [Carte Numérique des Sols de Wallonie](#) » (CNSW), qui distingue quatre classes de charge caillouteuse :

- 0 : non caillouteux (0-5 %)
- 1 : peu caillouteux (5-15 %)
- 2 : caillouteux (15-50 %)
- 3 : très caillouteux (> 50 %)

Les polygones de la CNSW sont rééchantillonnés sur la même grille que la carte des textures par agrégation, en attribuant à chaque maille la classe majoritaire (Figure 8). Une interpolation spatiale est ensuite appliquée via l'algorithme PID ($p = 1$; Équation (5)). À chaque classe est associée une fraction volumique spécifique dépendant de la profondeur (Tableau 2) sous l'hypothèse d'une augmentation de la charge caillouteuse avec la profondeur.

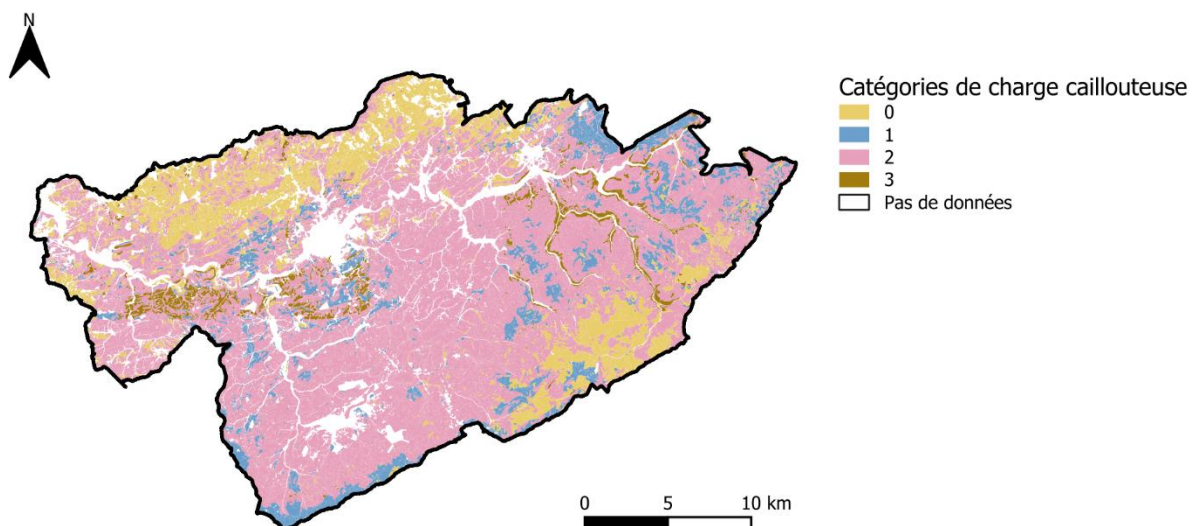


Figure 8 : Carte des classes de charge caillouteuse (résolution de 50 cm).

Tableau 2 : Classes de charge en éléments grossiers et fractions volumiques (-) associées en fonction de la profondeur (SUR : 0-40 cm, PR1 : 40-80 cm, PR2 : 80-120 cm).

Profondeur (cm)	Fraction volumique (-)			
	Classes de charge caillouteuse			
	0	1	2	3
0-40 (SUR)	0,00	0,05	0,20	0,50
40-80 (PR1)	0,00	0,10	0,30	0,60
80-120 (PR2)	0,00	0,15	0,40	0,70

3.1.6.2. Configuration des profils de sol dans MIKE SHE

Le module de la zone non saturée nécessite l'attribution d'un profil vertical de propriétés hydrauliques à des unités de sol homogènes dans le domaine modélisé, jusqu'à une profondeur de 20 m.

Définition des unités de sol homogènes

La définition des unités de sol homogènes repose sur le croisement spatial entre les polygones rastérisés de la CNSW et les géocodes (étape 2 de la Figure 6). Un traitement spécifique est appliqué aux sols tourbeux, correspondant aux textures V (tourbe inactive) et W (tourbe active), ainsi qu'aux surfaces imperméabilisées identifiées à partir de la carte d'occupation du sol, qui sont considérés comme des unités distinctes.

Chaque combinaison unique entre un type de sol et un géocode se voit attribuer un code spécifique (unité de sol homogène). La carte ainsi obtenue est ensuite rééchantillonnée sur la grille finale du modèle à l'aide d'une agrégation majoritaire, qui attribue à chaque maille du modèle le code le plus représenté au sein de celle-ci.

Agrégation des propriétés hydrauliques du sol

Une fois les unités de sol homogènes définies, un profil de sol aux propriétés hydrauliques uniques est construit pour chacune d'elles (étape 3 de la Figure 6). Les propriétés hydrauliques des horizons superficiels (0–2 m) sont issues des cartes distribuées des paramètres de van Genuchten-Mualem générées à partir des données pédologiques, tandis que les horizons plus profonds (2–20 m) sont décrits à partir des géocodes. Pour chacun des horizons du profil, une moyenne spatiale des paramètres est calculée sur l'ensemble des pixels appartenant à une même unité de sol homogène. Ainsi, toutes les mailles d'une même unité sont caractérisées par un profil vertical identique. Cette construction suppose toutefois que le sol soit suffisamment profond pour atteindre 2 m : lorsque ce n'est pas le cas (sols de moins de 40 cm ou entre 40 et 80 cm de profondeur), le profil pédologique est tronqué et le géocode prend le relais jusqu'en bas du profil.

3.1.6.3. Cas particuliers

Sols tourbeux

Les sols tourbeux (V et W) font l'objet d'une paramétrisation spécifique. Les fonctions de pédotransfert classiques étant inadaptées aux sols organiques, les propriétés hydrauliques ont été déterminées à partir de mesures de terrain et de données bibliographiques.

Les propriétés de la courbe de rétention ont été caractérisées à partir de mesures réalisées entre 2012 et 2014 dans les tourbières des bassins versants de Deux-Séries et de Cléfaye, dans le cadre du projet « Recherche d'intérêt général portant sur la mise en place d'un système d'évaluation des mesures de restauration hydrique dans les tourbières hautes de Haute Ardenne et de leurs impacts sur la prévention des inondations (plan P.L.U.I.E.S. ; Service public de Wallonie, 2003) ». La conductivité hydraulique à saturation a quant à elle été estimée à partir des valeurs synthétisées par Morris et al. (2022) pour les tourbières de l'hémisphère nord, en suivant un gradient décroissant avec la profondeur.

Sols imperméabilisés

La paramétrisation des unités de sol homogènes correspondant aux surfaces artificialisées repose sur les hypothèses suivantes : une conductivité hydraulique quasi nulle et une très faible porosité sur les deux premiers mètres sous la surface.

3.1.7. Rivière

Le modèle hydrologique MIKE SHE est couplé au modèle hydraulique instationnaire 1D MIKE+ afin de représenter les écoulements au sein du réseau hydrographique. Bien que ce module ne constitue pas l'objet principal de l'étude, il est nécessaire pour assurer le transfert des écoulements de surface vers l'exutoire du bassin versant, dont la représentation devient particulièrement délicate à la résolution de 124 m.

Le réseau hydrographique a été intégré jusqu'à une aire contributive de 12 400 ha. Il est représenté par une succession de tronçons de cours d'eau auxquels sont associées des sections transversales générées automatiquement à partir du MNT, avec un espacement moyen d'environ 125 m. Une valeur uniforme du coefficient de Manning ($n = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) a été attribuée à l'ensemble du réseau hydrographique.

Aucune donnée topo-bathymétrique détaillée n'a été utilisée pour la définition des sections. Ce choix s'explique par l'objectif du modèle, qui vise principalement à assurer un routage cohérent des écoulements et non à reproduire précisément les niveaux d'eau dans les chenaux.

3.2. Données de sortie du modèle

Les résultats produits par le modèle couvrent un large éventail de variables hydrologiques, parmi lesquelles :

- Les débits simulés aux exutoires et aux points de contrôle internes, utilisés pour la validation du modèle ;
- Les niveaux piézométriques et les teneurs en eau du sol, qui permettent d'évaluer la dynamique des échanges entre les compartiments de surface et souterrains ;
- Les composantes du bilan hydrique (précipitations, évapotranspiration, infiltration, ruissellement, recharge de nappe), disponibles à des pas de temps et des résolutions spatiales définis par l'utilisateur ;
- Des cartes spatialisées illustrant la distribution des variables clés (infiltration, humidité, écoulement de surface, etc.), essentielles pour identifier les zones à fort potentiel d'infiltration ou, au contraire, sujettes au ruissellement.

3.3. Calibration et validation du modèle

La calibration du modèle MIKE SHE repose sur un ajustement manuel des paramètres du modèle par une approche itérative de type essai-erreur. Dans le cadre de ce projet, cette étape s'est limitée à l'ajustement des paramètres associés au socle hydrogéologique, ceux-ci exerçant une influence déterminante sur les échanges entre les eaux souterraines et le réseau hydrographique.

La validation du modèle hydrologique repose classiquement sur la comparaison entre les débits simulés et les débits observés aux exutoires des bassins versants, à partir des mesures issues des stations limnimétriques. Cette approche permet d'évaluer la cohérence globale du comportement hydrologique simulé. Elle présente toutefois certaines limites, dans la mesure où les débits observés à l'exutoire résultent de l'intégration de l'ensemble des processus hydrologiques intervenant au sein du bassin versant. Des erreurs de représentation de certains processus peuvent ainsi être compensées par d'autres, conduisant à une bonne reproduction des débits sans pour autant garantir une représentation réaliste des dynamiques internes.

Dans le cadre de ce projet, dont l'objectif principal est l'identification de zones favorables à l'infiltration dans une perspective de réduction des risques d'inondation et de sécheresse, la validation ne se limite pas à l'analyse des débits à l'exutoire. Une attention particulière est également portée à la cohérence spatiale des processus simulés au sein du bassin versant, notamment en ce qui concerne la répartition des écoulements, les zones de saturation et les dynamiques d'infiltration.

Deux types de données sont mobilisés pour la validation globale (Figure 9) :

- Des débits mesurés directement par les stations limnimétriques (données observées) ;
- Des débits reconstitués à partir d’hypothèses hydrauliques (données reconstituées), notamment dans les secteurs traversés par des tunnels ou des canaux enterrés.

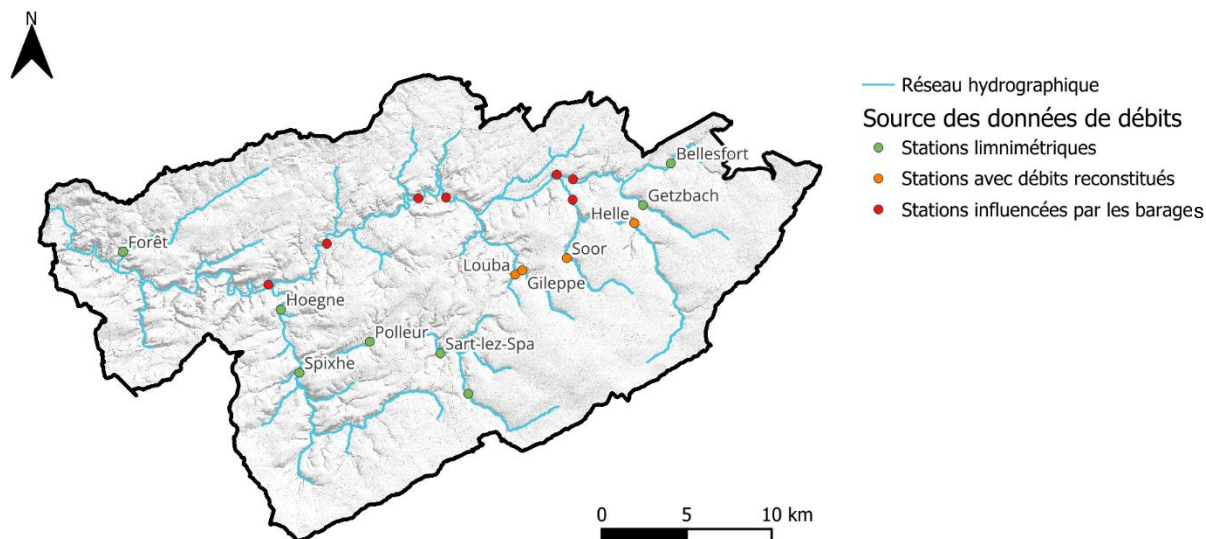


Figure 9 : Cartes des stations limnimétriques (données observées) dans le bassin versant de la Vesdre et localisation des points de débits reconstitués.

3.3.1. Débits observés

Les séries de débits utilisées pour la validation proviennent de différentes bases de données hydrologiques gérées par le SPW. Trois organismes principaux contribuent à la mise à disposition de ces données :

- DCENN (Direction des Cours d’Eau Non Navigables) : responsable du suivi et de la gestion des petits cours d’eau, elle fournit les données issues des stations de la Hoëgne, de Spixhe, de Forêt et de Sart-lez-Spa.
- DGH (Direction de la Gestion Hydrologique) : en charge de l’observation et de la centralisation du réseau hydrométrique wallon, elle alimente les séries mesurées aux stations d’Eupen Hütte, de Polleur et de Belleheid.
- DBR (Direction des Barrages-Réservoirs) : gestionnaire des infrastructures de retenue et des données associées, elle fournit les observations relatives aux stations de Bellefort, Getzbach et Helle.

Ces stations offrent ainsi une couverture globale du bassin étudié, permettant d'intégrer les dynamiques des cours d'eau non navigables. Les données des stations limnimétriques s'étendent sur les périodes reprises dans le Tableau 3. Les stations limnimétriques en aval des barrages ne sont pas analysées étant donné que le fonctionnement hydraulique des barrages n'est pas représenté dans le modèle.

Tableau 3 : Périodes reprises pour les stations limnimétriques.

Station	Début des mesures	Types de données	Source
Forêt	11/05/2011	Débits observés	DCENN
Hoegne	19/11/2021	Débits observés	DCENN
Spixhe	29/03/2002	Débits observés	DCENN
Sart-lez-Spa	20/08/2022	Débits observés	DCENN
Polleur	01/12/2015	Débits observés	DGH
Belleheid	01/01/2000	Débits observés	DGH
Getzbach	01/01/1995	Débits observés	DBR
Bellesfort	01/01/1995	Débits observés	DBR
Helle	01/01/1993	Débits reconstitués	DBR
Gileppe	01/01/1993	Débits reconstitués	/
Louba	01/01/2010	Débits reconstitués	/
Soor	01/01/2003	Débits reconstitués	/

3.3.2. Débits reconstitués

La présence d'infrastructures hydrauliques sur le bassin nécessite de reconstituer les débits naturels de plusieurs cours d'eau. Cette reconstitution s'effectue selon les méthodes suivantes :

- **La Helle** : Son débit naturel est obtenu en additionnant le débit mesuré en aval de sa dérivation et celui transitant par le tunnel vers le barrage d'Eupen. Aucun décalage temporel n'est appliqué, le temps de parcours de l'eau dans le tunnel étant considéré comme négligeable par rapport au pas de temps de la modélisation (1 h).
- **La Louba et la Gileppe** : Leurs séries de débits sont reconstituées selon la méthodologie détaillée dans le premier rapport ModRec (Degré et al., 2024). Ces cours d'eau étant équipés d'un double déversoir, la relation hauteur-débit appliquée dépend du niveau d'eau mesuré : si la hauteur aval est inférieure à 0.5 m, le débit

correspond au débit aval ; dans le cas contraire, c'est la valeur du débit amont qui est retenue.

- La Soor : Son débit naturel est reconstruit à partir des données du tunnel de dérivation vers le barrage de la Gileppe. La série temporelle a été spécifiquement corrigée pour intégrer un débit de fuite mesuré à la sortie du tunnel. Cette correction s'appuie sur la hauteur d'eau enregistrée au limnimètre situé en aval de la rivière.

3.3.3. Métriques de validation des débits

Une analyse des hydrogrammes modélisés (Q_{mod}) a été réalisée par comparaison avec les hydrogrammes observés (Q_{obs}) aux différentes stations de suivi situées aux exutoires et dans les sous-bassins versants. La période de validation dépend des données disponibles. Différentes métriques sont calculées.

Afin d'évaluer les performances du modèle, les métriques suivantes ont été calculées. Dans les équations ci-dessous, Q_{obs}^t et Q_{mod}^t représentent respectivement le débit observé et le débit modélisé au pas de temps t , n correspond au nombre total d'observations, et $\bar{Q}$ désigne la moyenne des débits sur la période considérée.

- L'erreur moyenne (ME) évalue le biais global du modèle :

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Q_{mod}^t - Q_{obs}^t \quad (7)$$

- L'erreur moyenne absolue (MAE) quantifie l'ampleur moyenne des erreurs :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Q_{mod}^t - Q_{obs}^t| \quad (8)$$

- La racine de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) pénalise plus fortement les écarts importants :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{mod}^t - Q_{obs}^t)^2} \quad (9)$$

- L'écart type des résidus (σ_{res}) mesure la dispersion des erreurs autour de l'erreur moyenne (ME) :

$$\sigma_{res} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n [(Q_{mod}^t - Q_{obs}^t) - ME]^2} \quad (10)$$

- Le coefficient de corrélation de Pearson (r) s'intéresse à la dynamique temporelle des débits :

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs}) (Q_{mod}^t - \bar{Q}_{mod})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{mod}^t - \bar{Q}_{mod})^2}} \quad (11)$$

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) évalue l'efficacité prédictive globale :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{mod}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (12)$$

Selon la nature de la métrique employée, le résultat attendu doit idéalement tendre vers zéro lorsqu'il s'agit d'une erreur (ME , MAE , $RMSE$, σ_{res}), indiquant une parfaite adéquation avec les observations, ou se rapprocher de 1 lorsqu'il s'agit d'un indice de corrélation ou de performance (r , NSE), validant ainsi la robustesse du modèle à reproduire la dynamique des débits.

3.4. Analyse des résultats

Le coefficient d'écoulement correspond au rapport entre le ruissellement et la précipitation. Cet indicateur est évalué sur plusieurs cycles hydrologiques et son calcul s'effectue comme suit :

$$CE = \frac{\sum_{x=i}^{x=j} R_x}{\sum_{x=i}^{x=j} P_x} \quad (13)$$

$$R = P - (E_{interception} + E_{surface}) - (\Delta I_{interception} + I_{UZ} + I_{SZ}) + SZ_O - \Delta OL \quad (14)$$

où R est l'approximation des écoulements de surface, P est la pluie, i et j les jours de début et de fin de la période, $E_{interception}$ est l'évaporation de l'eau interceptée par la végétation, $E_{surface}$ est l'évaporation de l'eau stagnant à la surface du sol, $\Delta I_{interception}$ est la variation du stock de l'eau intercepté, I_{UZ} l'infiltration vers la zone insaturée, I_{SZ} l'infiltration vers la zone saturée, SZ_O le flux de la zone insaturée vers l'atmosphère et ΔOL la variation du stock d'eau à la surface. Le coefficient d'écoulement (CE) est égal à 0 quand l'entièreté du volume de pluie tombant sur un pixel est intercepté par le milieu, et est égal à 1 quand l'entièreté du volume d'eau ruisselle.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1. Validation des débits

Dans le cadre de la modélisation sur l'ensemble du bassin versant de la Vesdre, la validation se réalise sur base de 12 stations (Tableau 4). Ces stations comprennent à la fois des mesures directes de débit et des débits reconstitués afin de tenir compte de l'influence des infrastructures hydrauliques présentes sur le bassin.

Tableau 4 : Analyse des débits observés et simulés des cours d'eau de la Vesdre sur la période du 01/01/2005 au 31/08/2024.

Cours d'eau	$\bar{Q}_{mod}$	$\bar{Q}_{obs}$	ME	MAE	$RMSE$	$Pbias$	σ_{res}	r	NSE
Forêt	0,14	0,54	-0,40	0,41	0,85	-74,28	0,75	0,65	0,16
Getzbach	0,42	0,52	-0,10	0,35	1,07	-19,52	1,07	0,57	0,19
Helle	0,87	1,22	-0,35	0,76	1,58	-28,34	1,54	0,69	0,22
Bellesfort	0,27	0,79	-0,52	0,56	1,72	-65,83	1,64	0,65	0,24
Soor	0,42	0,31	0,11	0,26	0,71	37,14	0,70	0,76	0,24
Gileppe	0,35	0,46	-0,12	0,32	0,99	-25,27	0,98	0,64	0,39
Hoëgne	3,43	3,71	-0,28	1,87	3,62	-7,53	3,61	0,82	0,37
Spixhe	1,35	1,40	-0,05	0,79	1,80	-3,32	1,79	0,80	0,38
Belleheid	0,46	0,52	-0,06	0,31	0,72	-11,99	0,72	0,80	0,51
Louba	0,13	0,20	-0,07	0,12	0,23	-33,95	0,22	0,78	0,53
Sart-lez-Spa	1,02	1,15	-0,13	0,58	1,12	-11,12	1,11	0,84	0,63
Polleur	1,46	1,51	-0,05	0,78	1,88	-3,18	1,88	0,84	0,67

Sur l'ensemble de la période de validation, le modèle reproduit de manière satisfaisante la dynamique des écoulements observés. Les coefficients de corrélation de Pearson (r) varient entre 0,57 et 0,84 selon les stations, traduisant une bonne concordance temporelle entre les hydrogrammes simulés et observés. Les meilleures performances sont obtenues aux stations de Polleur et de Sart-lez-Spa ($r = 0,84$), ainsi qu'à Belleheid, Spixhe et la Hoëgne ($r \geq 0,80$). Les coefficients de Nash-Sutcliffe restent globalement positifs et atteignent des valeurs comprises entre 0,51 et 0,67 sur plusieurs stations, indiquant une capacité satisfaisante du modèle à reproduire la variabilité des débits.

L'analyse des biais montre néanmoins une tendance générale à la sous-estimation des volumes écoulés. Cette sous-estimation est particulièrement marquée aux stations de Forêt et de Bellesfort, où les valeurs de $Pbias$ atteignent respectivement -74 % et -66 %.

À l'inverse, la station de la Soor présente une légère surestimation des débits (+37 %). Pour les stations situées sur les principaux cours d'eau du bassin, notamment la Hoëgne, Spixhe, Belleheid, Sart-lez-Spa et Polleur, les biais restent limités, avec des valeurs de Pbias généralement inférieures à ± 15 %.

De manière générale, les résultats obtenus mettent en évidence une représentation cohérente des écoulements sur l'ensemble du bassin versant. Les performances les plus élevées sont observées sur les bassins de taille intermédiaire à importante, tandis que les écarts les plus marqués concernent certains petits sous-bassins ou des stations associées à des débits reconstitués. Malgré ces différences locales, les indicateurs de performance confirment la capacité du modèle à reproduire les principales dynamiques hydrologiques observées sur le bassin de la Vesdre.

Des nuages de points sont réalisés par station, sur les débits maximums par événements pluvieux. Ils se trouvent en Annexe B.1. La sélection prend en compte un événement dont le débit est 5 fois supérieur au débit de base. La dynamique des crues est également analysée sur les stations, en calculant le volume total observé et le volume total simulé sur l'événement pluvieux, ainsi que la différence de volume de ceux-ci. L'événement s'étend jusqu'à ce que le débit de base du cours d'eau revienne. Ces hydrogrammes permettent une validation visuelle de la capacité du modèle à reproduire la dynamique de crue et ce par station.

La Figure 10, correspondant à la station de Polleur, montre que le modèle reproduit correctement la dynamique générale de l'événement observé. Les variations de débit et l'évolution de la crue sont globalement bien représentées, bien qu'un décalage temporel d'environ trois heures soit observé au niveau du pic de crue. Par ailleurs, le volume écoulé sur l'ensemble de l'événement est sous-estimé de 11 % par rapport aux observations. À la station de Forêt (Figure 10), le modèle reproduit correctement la forme de l'hydrogramme et la dynamique des écoulements. Toutefois, une sous-estimation systématique des débits est observée sur l'ensemble de l'événement, suggérant un biais négatif dans la représentation des volumes écoulés à cette station. Cette tendance explique les indicateurs de performance légèrement moins favorables obtenus pour ce bassin versant.

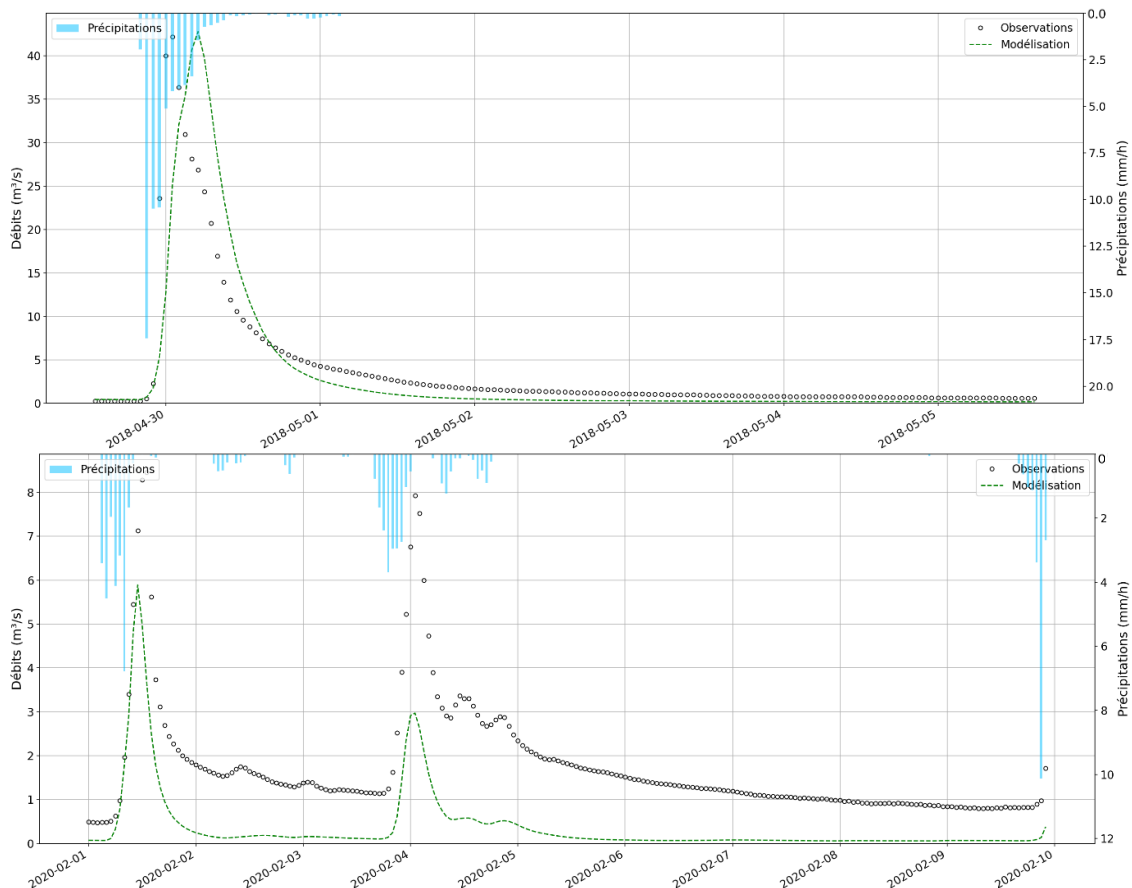


Figure 10 : Hydrogrammes des débits observés et simulés à la station limnimétrique de Polleur (évènement du 29/04/2018 ; en haut) et à la station limnimétrique de Forêt (évènement du 01/02/2020 ; en bas).

4.2. Coefficient d'écoulement

Le CE calculé sur l'évènement du 1er juin 2018 est présenté dans la Figure 11. Les valeurs les plus élevées (proches de 1) se concentrent principalement le long du réseau hydrographique et dans les zones à engorgement temporaire ou permanent. Dans ces secteurs (fonds de vallées et zones hydromorphes), les conditions de drainage limitées et l'affleurement de la nappe phréatique entravent fortement l'infiltration. Les zones urbanisées, telles que Verviers au centre du bassin et Eupen au nord-est, affichent également des CE importants (en bleu foncé), traduisant un écoulement important lié à l'imperméabilisation des sols. De même, sur le plateau des Hautes Fagnes au sud-est, les CE élevés s'expliquent par la prédominance de sols tourbeux et para-tourbeux. Naturellement saturés et peu perméables, ces milieux contribuent massivement au ruissellement de surface, surtout en période de fortes pluies lorsque leur capacité de stockage est rapidement dépassée. À l'inverse, les secteurs forestiers ou à végétation dense présentent globalement des CE plus faibles, indiquant une meilleure capacité d'infiltration et de rétention hydrique.

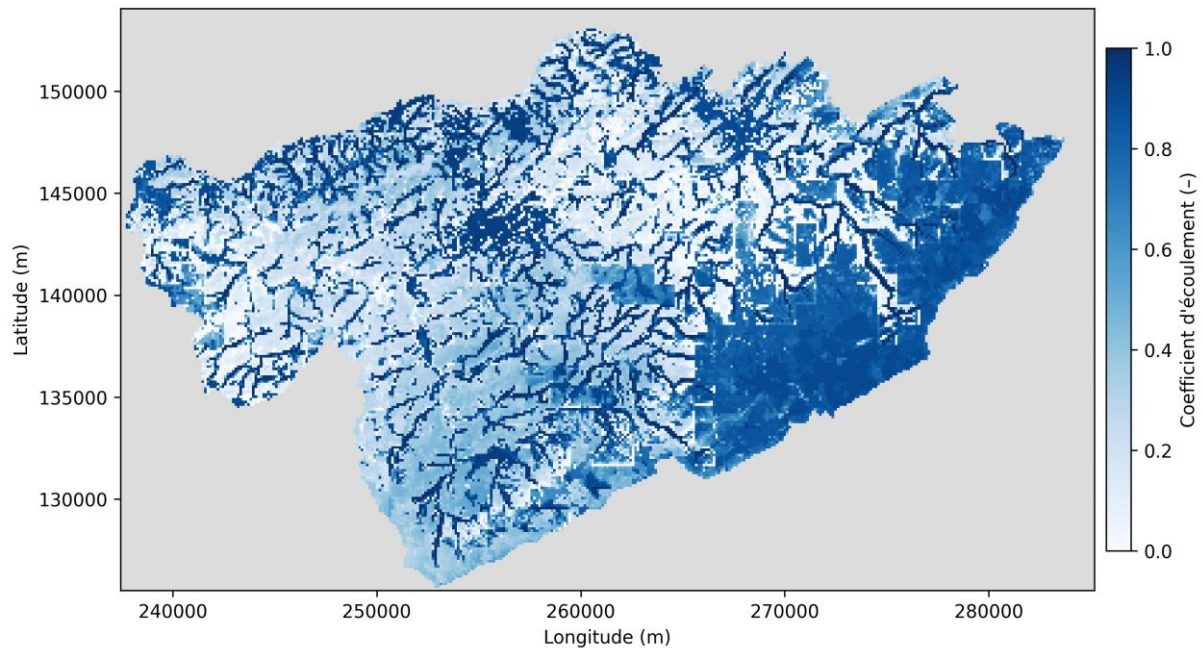


Figure 11 : Coefficients d'écoulement de la Vesdre (résolution de 124 m) pour l'évènement du 01/06/2018.

En bordure des zones moins drainantes, on observe par ailleurs une fine bande plus claire matérialisant une zone d'infiltration accrue. Celle-ci illustre la transition entre un substrat géologique faiblement perméable et des formations plus drainantes, où l'eau de ruissellement provenant de l'amont s'infiltrerait préférentiellement. Cette discontinuité spatiale (alternance de pixels sombres et clairs) révèle l'impact de la forte différence de résolution entre la carte hydrogéologique et les autres bases de données intégrées au modèle. Une piste d'amélioration pour les futures modélisations consisterait à affiner la résolution de l'hydrogéologie.

5. SYNTHÈSE

La modélisation hydrologique globale du bassin versant de la Vesdre a été réalisée et est disponible pour tout usage de gestion hydrologique à large échelle. L'approche locale qui en découlerait doit rester prudente et garder en tête la résolution de 124 m qui a induit différentes agrégations spatiales des propriétés biophysiques du territoire. Toutefois, complétée par des approches plus locales, telles que celles menées dans les projets ModRec-Vesdre et ModRec 2-Hydrologie, ce modèle permet de hiérarchiser les interventions sur le territoire et d'identifier les zones à préserver.



PARTIE II

TERRITOIRES D'INNOVATION HYDROLOGIQUES

1. OBJECTIFS

Cette deuxième partie du projet ModRec 2-Hydrologie est consacrée au développement et à la modélisation des Territoires d'Innovation Hydrologique (TIH). Les TIH sont définis comme des micro-bassins versants pilotes, d'une superficie comprise entre 1 et 4 km², au sein desquels sont conçues et testées des stratégies d'aménagement visant à restaurer les fonctionnalités naturelles du cycle de l'eau, selon le cadre de l'hydrologie régénérative. Ces approches cherchent à régénérer le/les cycle(s) de l'eau dans une logique d'adaptions aux extrêmes climatiques (inondations et sécheresses), notamment en favorisant l'infiltration et l'évapotranspiration, en ralentissant les écoulements en surface et en accroissant le stockage temporaire de l'eau dans le paysage.

Les analyses présentées s'appuient sur des simulations hydrologiques à haute résolution spatio-temporelle, intégrant des scénarios d'aménagement élaborés dans le cadre d'une démarche de co-construction avec les acteurs locaux du territoire. L'objectif est d'estimer les effets potentiels d'interventions déployées de manière systémique à l'échelle de ces territoires, qu'il s'agisse de restructurations parcellaires, de solutions fondées sur la nature ou d'adaptations des pratiques agricoles et sylvicoles. Les résultats obtenus visent à fournir une évaluation quantitative de l'efficacité hydrologique de ces stratégies, à appuyer leur validation technique et à orienter leur mise en œuvre opérationnelle sur les sites pilotes.

2. SÉLECTION ET DESCRIPTION DES TIH

La volonté initiale a été de travailler dans les contextes agricole et forestier, respectivement dans la Magne et la Hoëgne, deux bassins versants étudiés dans le cadre du premier volet de ModRec (Degré et al., 2024). La recherche de TIH a débuté par une prise de contact avec le Contrat de rivière Vesdre (CRV) et plusieurs communes potentiellement intéressées par le projet. Les communes de Soumagne et de Herve (contexte agricole) ainsi que celle de Jalhay (contexte forestier) ont été contactées, tandis que la commune de Theux a manifesté son intérêt de manière spontanée. Les critères de sélection des sous-bassins versants (superficie comprise entre 1 et 4 km²) au sein de ces communes ont été définis en fonction du contexte. Ainsi, trois TIH ont été sélectionnés (Figure 12).

Contexte agricole

- Aptitude des sols : présence de profils favorisant l'infiltration.
- Facilité de concertation : nombre restreint d'exploitants agricoles pour simplifier le dialogue et la gestion.

Contexte forestier

- Nature des sols : évitement des zones hydromorphes, e.g., sols (para-)tourbeux.
- Contexte de gestion : présence de propriétaires et gestionnaires forestiers publics et privés, considération des travaux forestiers planifiés.

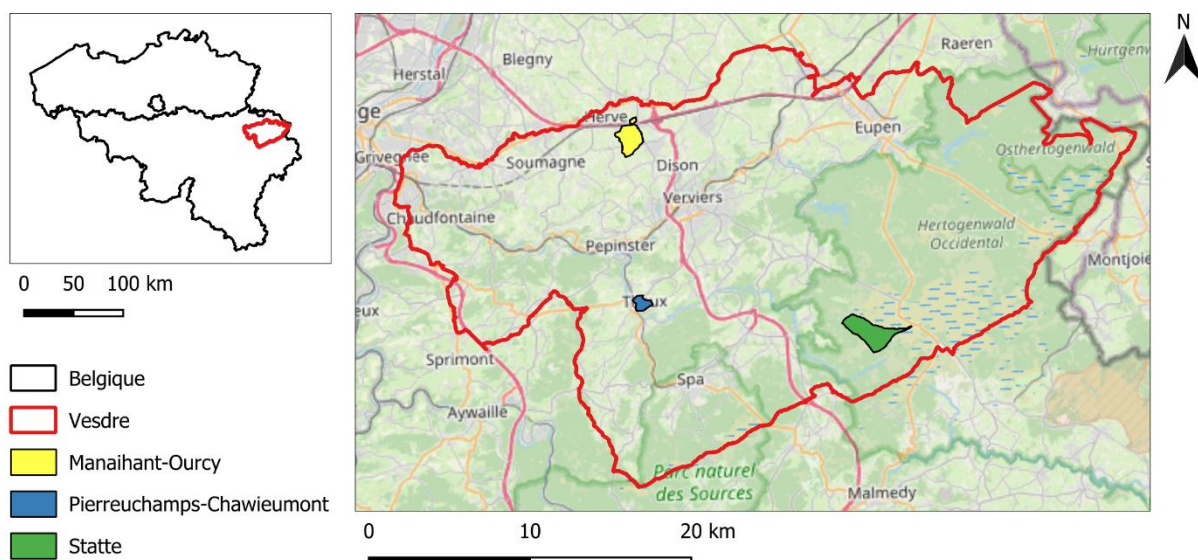


Figure 12 : Localisation des Territoires d'Innovation Hydrologique : Manaiant-Ourcy, Pierreuchamps-Chawieumont et la Statte.

2.1. Manihant-Ourcy

Parmi les différents sous-bassins versants de la Magne dans la commune de Herve, le territoire de Manihant-Ourcy a été choisi (Figure 13). Le nom Manihant-Ourcy vient des deux cours d'eau non classés dont il est issu. L'exutoire du bassin se trouve au début du cours d'eau de 3ème catégorie nommé le Hacq. Le réseau hydrographique présente la particularité d'alterner entre des tronçons maintenus à ciel ouvert et des sections artificiellement canalisées en souterrain.

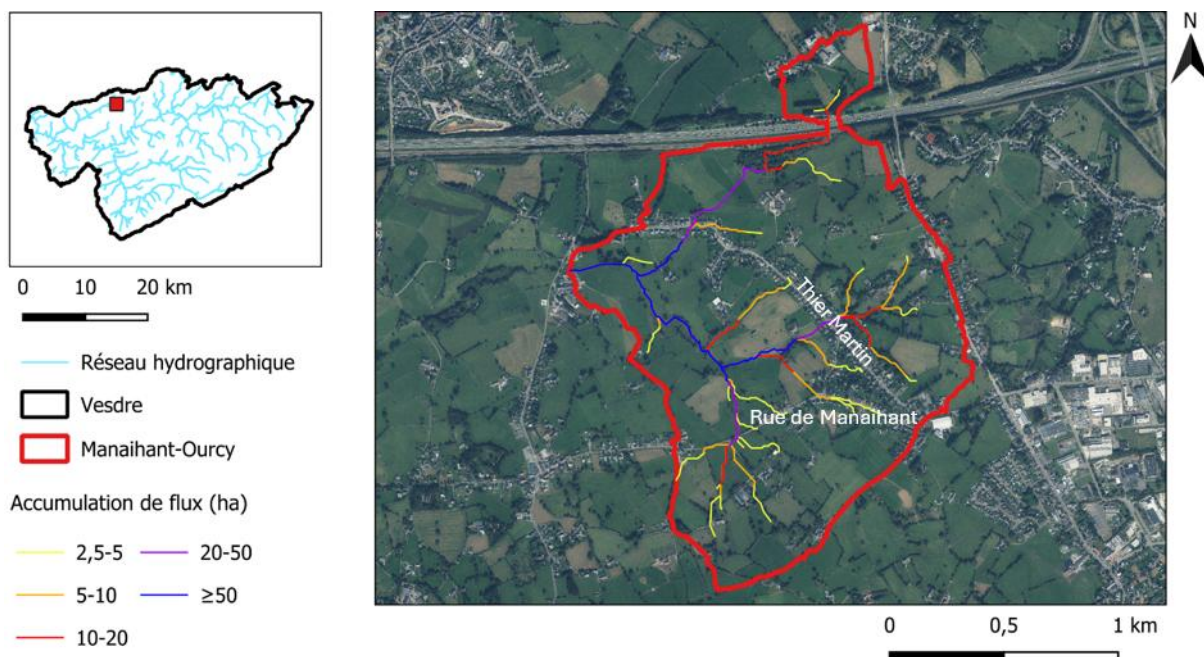


Figure 13 : Localisation du TIH de Manihant-Ourcy (Herve) et carte d'accumulation de flux. Les axes d'écoulement sont classés selon la surface contributive (ha).

La carte pédologique (Figure 14 a) met en évidence une prédominance de sols limoneux à limono-caillouteux avec un drainage naturel favorable à l'exception d'une bande de sols argileux avec un drainage naturel favorable à imparfait, appelé 'Smectites' dans la région du Pays de Herve. Les sols sont majoritairement peu caillouteux bien que les sols représentés en gris dans la Figure 14 (a) présentent une charge caillouteuse qui peut atteindre 50 %. Les sols sont majoritairement profonds (80-120 cm).

L'altitude du bassin versant est comprise entre 233 et 323m (Figure 14 c). Les parties sud et est du bassin présentent des pentes pouvant atteindre 29 %, tandis que le reste du bassin est caractérisé par des pentes modérées à fortes, comprises entre 3 et 12 %.

Comme le montre la Figure 14 (b), le bassin versant est occupé très majoritairement par des prairies permanentes qui sont utilisées comme prairies de fauche et de pâturage (75 %). Le SIGEC (Système Intégré de Gestion et de Contrôle) indique qu'il y a 11 déclarants au sein du territoire selon les données de 2023. Les sols artificiels recouvrent 11 %.

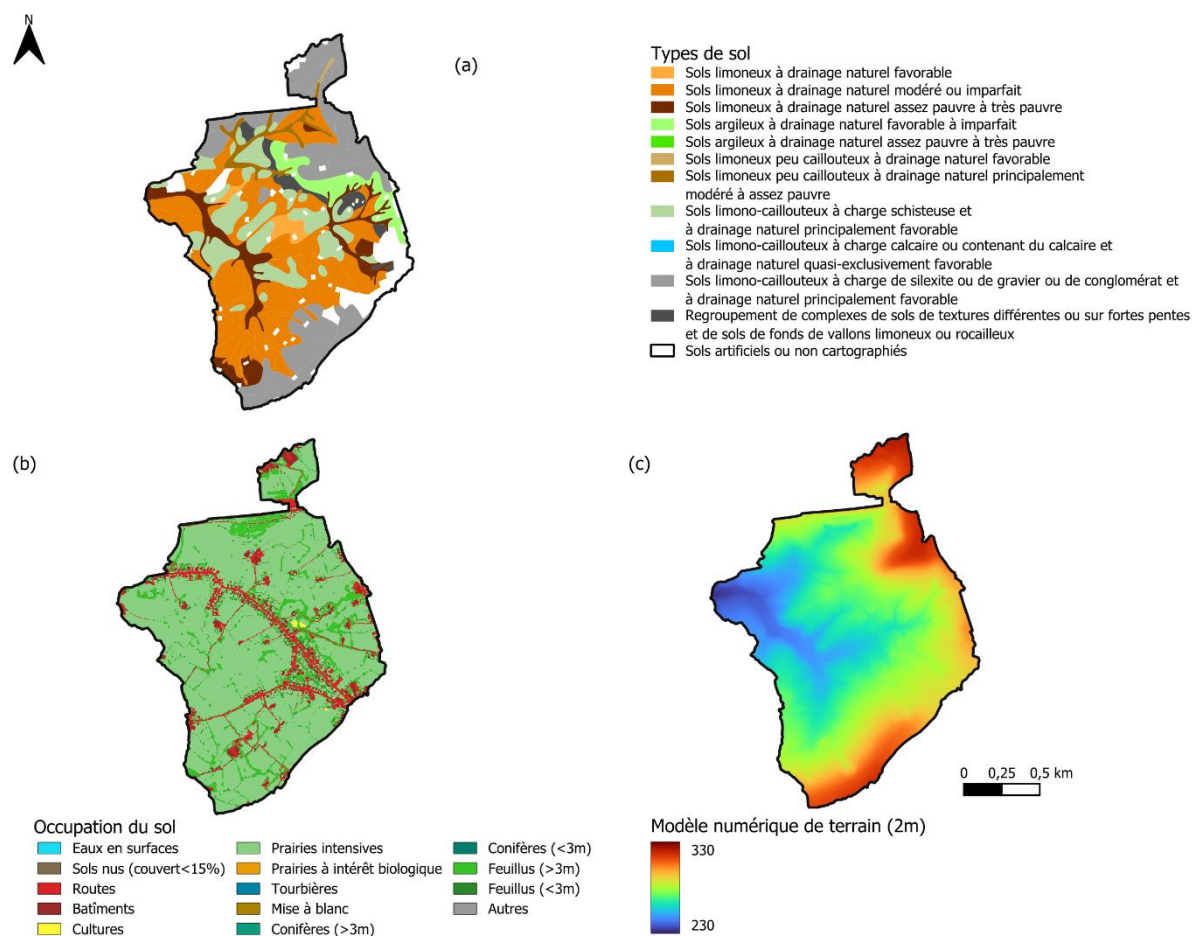


Figure 14 : Cartes des paramètres biophysiques de Manihant-Ourcy (Herve) : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).

L'évolution historique du territoire montre la disparition des haies bocagères avec l'agrandissement des parcelles agricoles depuis la fin du XVIII^{ème} siècle jusque dans les années 1990 (Figure 15). On peut également noter grâce aux orthophotos que l'urbanisation s'est densifiée, au détriment des terres agricoles, depuis les années 1970, notamment à la suite de la construction de l'autoroute et du chemin de fer. Un bassin d'orage a été créé à sa suite afin de recueillir l'eau qui y ruisselle. Ce bassin d'orage a un volume maximal de 5900 m³ et comporte un tuyau d'ajutage de dimension DN600, servant de trop plein.

La commune de Herve a également sélectionné ce bassin versant, car un point noir d'inondation y est localisé sans être pris en charge par des projets actuels, contrairement à d'autres points noirs de la commune. Ce point noir est situé à Ruelle de France et correspond à l'engorgement de trois axes naturels de concentration des écoulements au niveau d'un puits, sous la route Thier Martin (Figure 13). Ce cas a été étudié par le bureau d'études en environnement Geolys qui a proposé des aménagements pour réduire les inondations dans les habitations situées au croisement de Ruelle de France et la route

Thier Martin. Ces aménagements se composent de 2 haies et doublées chacune d'un merlon (topographie relevée de 25 cm), d'une noue à redent creusée de 70 cm et de 2 zones de rétention avec ajutage et merlon.

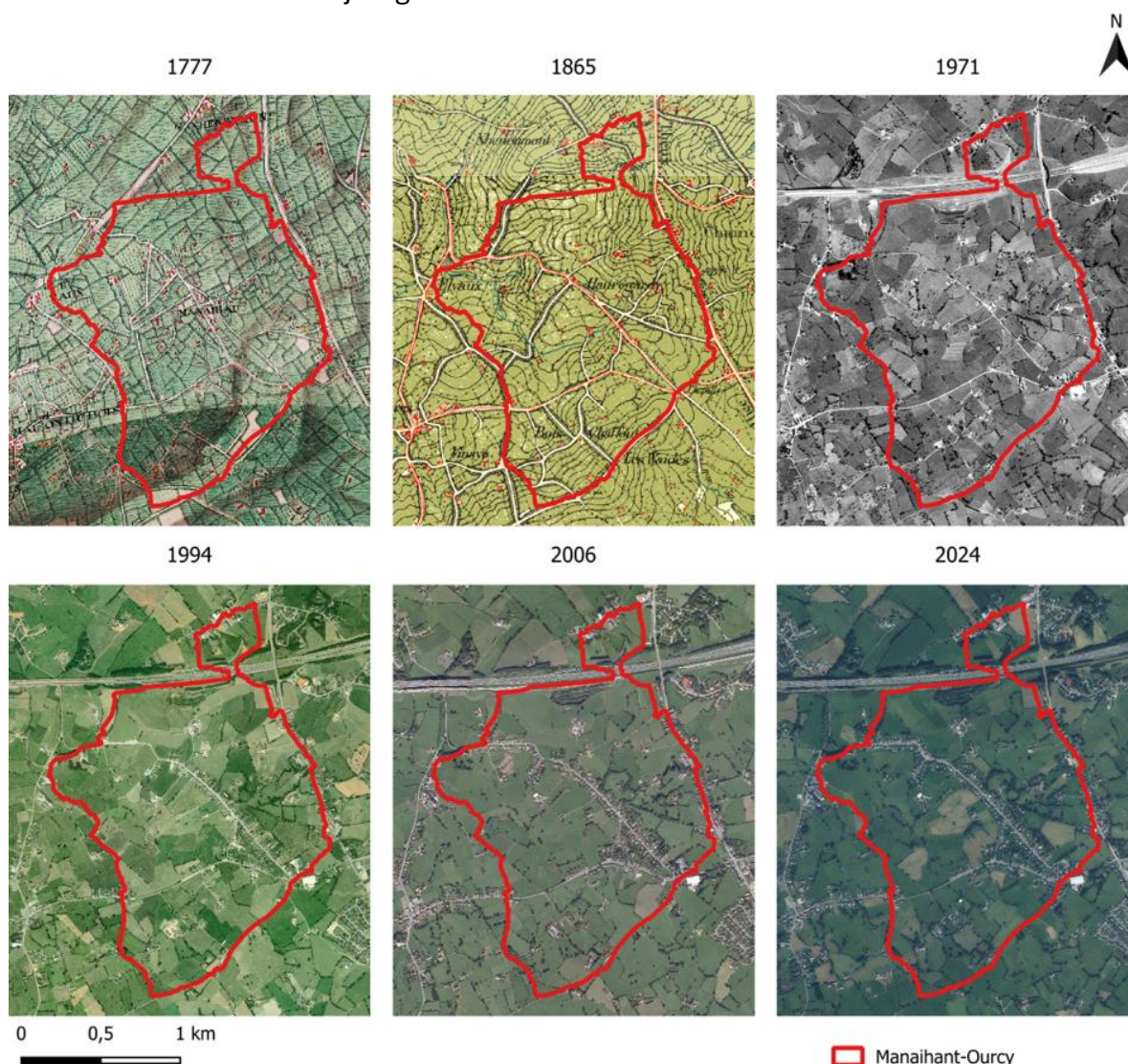


Figure 15 : Évolution de l'occupation du sol et de l'urbanisation du périmètre d'étude de Manaiant-Ourcy entre 1777 et 2024.

Le lotissement présent entre le Thier Martin, la rue de Manaiant et la Ruelle des soupirs a été étudié dans un travail de fin d'études du Master en Urbanisme par Clotilde Bourdoux supervisé par Pr. Jacques Teller (Bourdoux, 2025). Les solutions évoquées sont des noues en co-propriété et le long des voiries, des bassins secs et des structures de réservoirs. Ces propositions d'aménagements ont été intégrées à la réflexion pour la concertation. Elles ne se retrouvent toutefois pas telles quelles dans les scénarios d'aménagement bien que pertinentes et complémentaires à ce qui est proposé à la suite de ce document. Afin de récolter et de traiter les eaux grises du lotissement cité ci-dessus, une station d'épuration est prévue dans les années à venir bien qu'elle ne soit pas prioritaire pour la SPGE (Société Publique de Gestion de l'Eau) et pas encore intégrée au PASH

(Plans d'Assainissement par Sous-bassin Hydrographique) accessible sur WalOnMap (Figure 16).

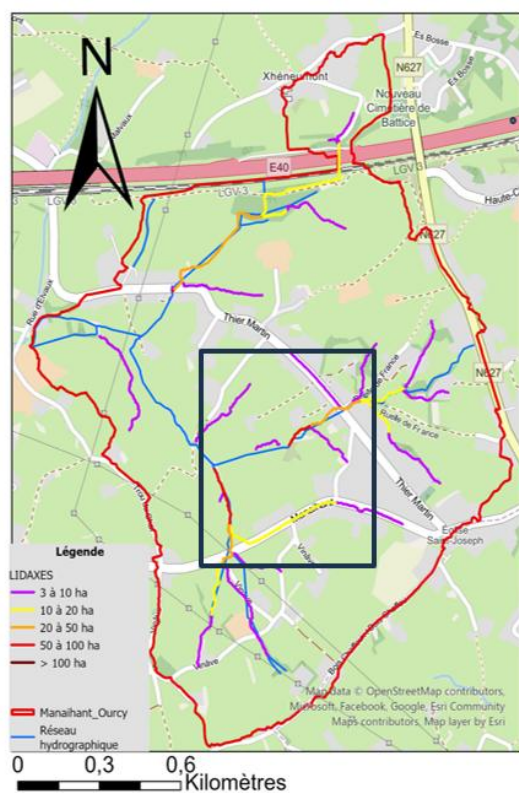


Figure 16 : Carte d'accumulation de flux (ha ; à gauche) et plan des égouts existants du PASH (flèches bleues ; à droite) dans une zone de régime d'assainissement collectif (zone encadrée en noir).

2.2. Pierreuchamps-Chawieumont

À la suite d'échanges avec l'administration communale de Theux, quatre TIH ont initialement été présélectionnés. Finalement, sur décision du Collège communal, le choix s'est porté sur la zone de Pierreuchamps-Chawieumont (Figure 17). Il convient de préciser que ce périmètre ne constitue pas un bassin versant au sens hydrologique strict. Il s'agit d'une zone contributive d'environ 0,7 km² regroupant divers axes d'écoulement issus de parcelles agricoles et urbaines (Figure 17). Ces flux convergent notamment via les chemins de Pierreuchamps et de Chawieumont avant de rejoindre leur exutoire final dans la Hoëgne.

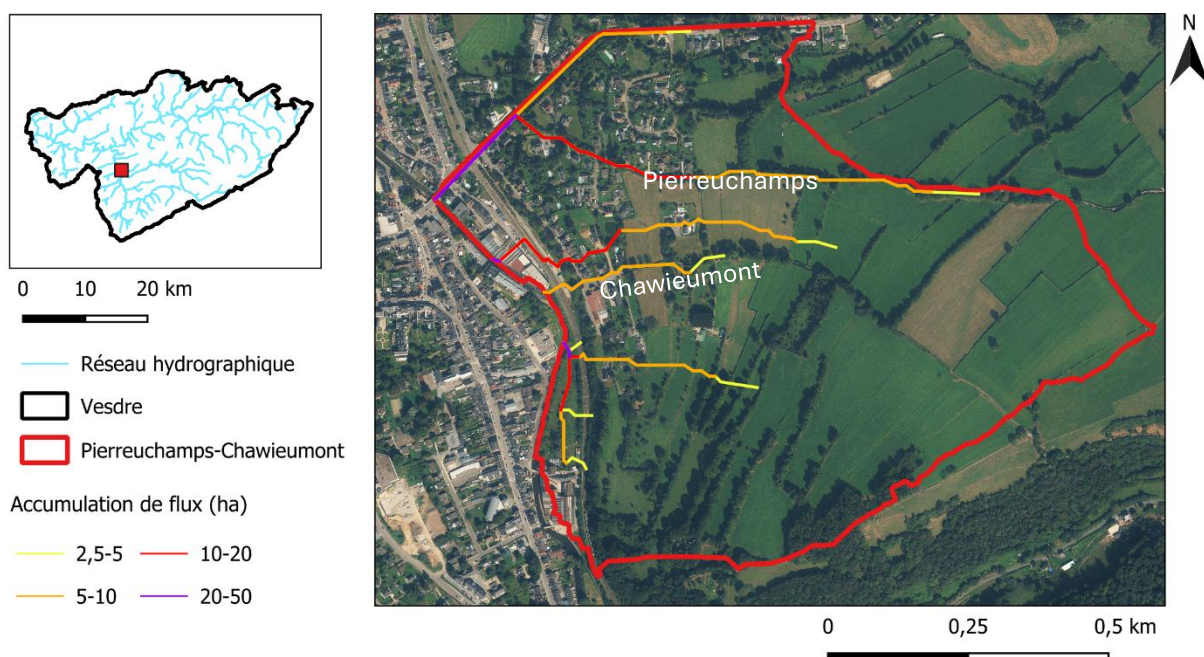


Figure 17 : Localisation du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont (Theux) et carte d'accumulation de flux. Les axes d'écoulement sont classés selon la surface contributive (ha).

La carte pédologique (Figure 18 a) met en évidence une prédominance de sols limoneux à limono-caillouteux sur l'ensemble du TIH. Ces sols sont associés à des conditions de drainage naturel favorables. Ils présentent une charge caillouteuse relativement élevée (5 à 40 %), avec une proportion importante d'éléments grossiers dans la matrice du sol, ainsi qu'une profondeur de sol modérée (40-80 cm) à faible (20-40 cm).

Le secteur présente une topographie particulièrement marquée, avec un dénivelé allant de 158 m à 291 m d'altitude (Figure 18 c). Cette configuration génère des pentes élevées le long des axes d'écoulement, atteignant respectivement 8 % pour le chemin de Pierreuchamps et 14 % pour celui de Chawieumont. Bien que les sols soient classés comme ayant un drainage favorable (Figure 18 a), l'importance de ces pentes est susceptible de limiter l'infiltration au profit de l'écoulement en surface.

Le site est aujourd'hui majoritairement occupé par des prairies permanentes (~63 %), avec une proportion de sols artificialisés non négligeable (~12 % ; Figure 18 b). L'analyse de l'évolution temporelle (Figure 19) révèle deux dynamiques récentes majeures : (1) Une urbanisation progressive de la zone s'est développée à partir des années 1970 depuis le village historique de Theux, situé à l'aval ; (2) Une densification du bocage qui, bien qu'existant historiquement, s'est renforcé avec le temps pour structurer le paysage actuel.

En remontant plus loin dans le passé, aux XVIIIe et XIXe siècles, on constate que la zone était bien plus cultivée qu'aujourd'hui, ces terres ayant progressivement laissé place aux prairies actuelles. On note également la disparition d'une série de vergers qui occupaient autrefois les versants abrupts.

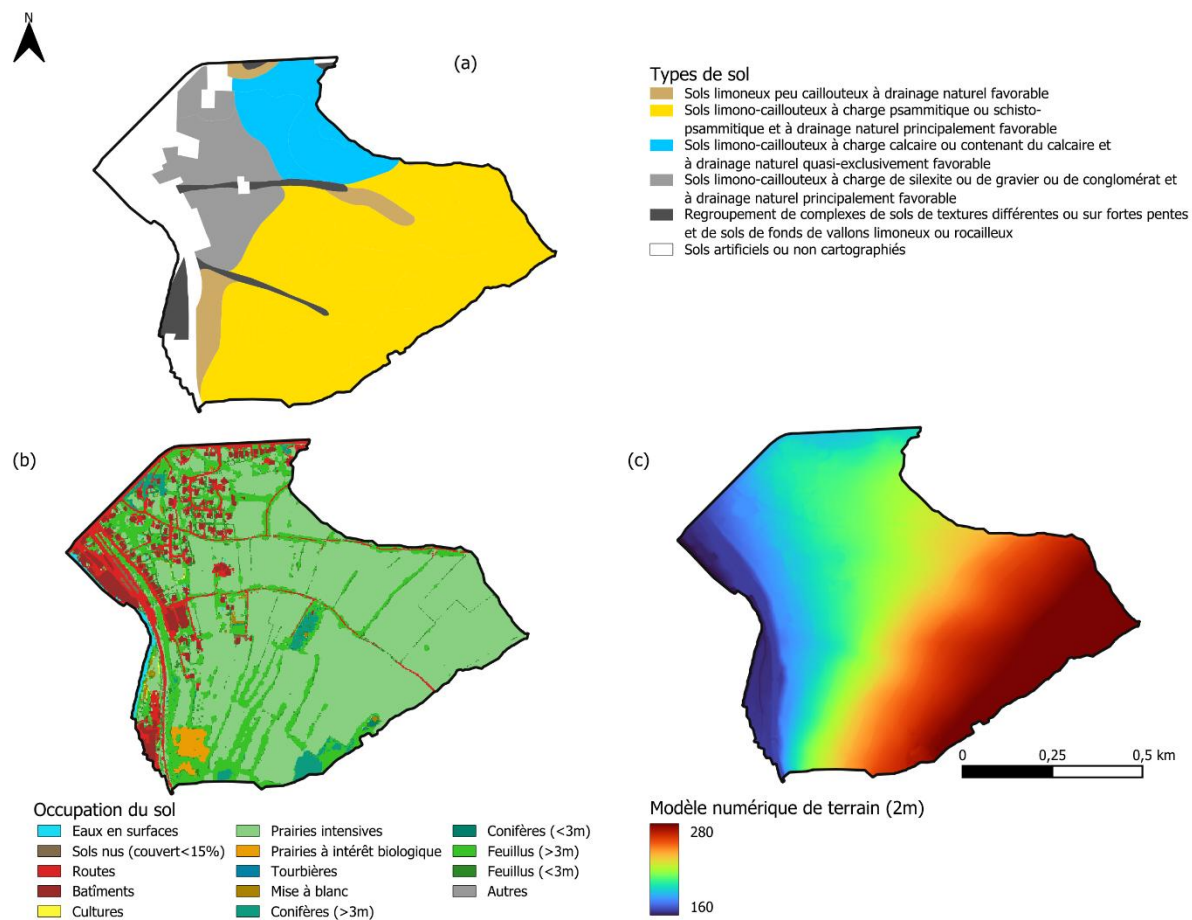


Figure 18 : Cartes des paramètres biophysiques du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).

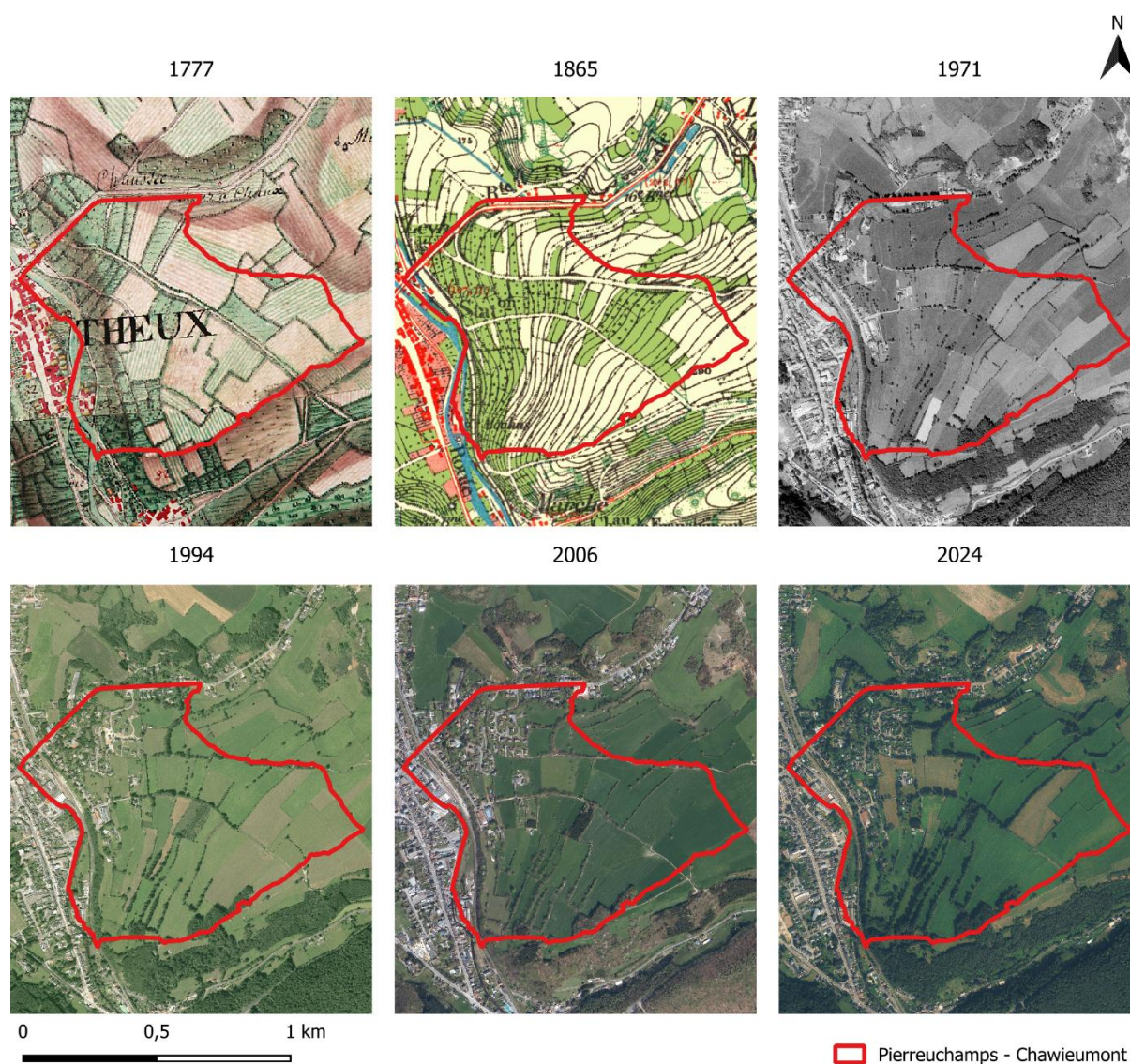


Figure 19 : Évolution de l'occupation du sol et de l'urbanisation du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont entre 1777 et 2024.

2.3. Statte

Lors de la première réunion avec la commune de Jalhay, la Statte s'est rapidement imposée comme TIH (Figure 20). Le bassin versant présente, en effet, un contexte particulièrement propice. Le DNF y a déjà engagé une dynamique de transformation forestière : exploitation des épicéas, régénération naturelle et aménagements hydrologiques, ce qui crée des synergies directes avec les objectifs du projet. La diversité des propriétaires, publics et privés, enrichit par ailleurs la démarche, intégrant divers points de vue et intérêts.

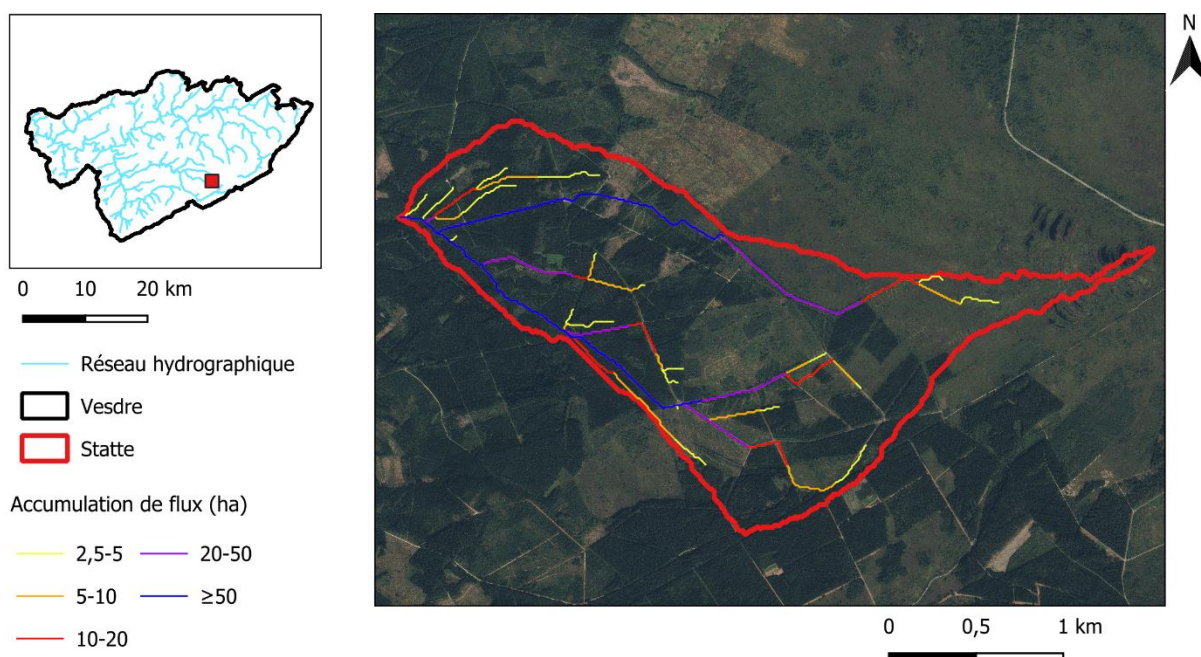


Figure 20 : Localisation du TIH de Statte (Jalhay) et carte d'accumulation de flux. Les axes d'écoulement sont classés selon la surface contributive (ha).

Le bassin versant de la Statte présente une aire contributive de 3,7 km². Il est situé en amont de la Hoëgne, avec un exutoire localisé à la cascade des Nutons. D'un point de vue topographique, la partie amont est caractérisée par des plateaux présentant des pentes moyennes comprises entre 2 et 4 % le long des axes d'écoulement (Figure 21 c). En aval, les pentes sont plus marquées, variant entre 4 et 6,5 %.

Les sols sont majoritairement limono-caillouteux, avec un drainage modéré à relativement faible sur la plus grande partie du bassin versant (Figure 21 a). Des zones de sols tourbeux et para-tourbeux sont présentes, principalement en amont, et en ordre dispersé dans le reste du bassin versant.

En ce qui concerne l'occupation du sol (Figure 21 b), les peuplements résineux de plus de trois mètres représentent 45 % de la surface, principalement constitués de pessières, ainsi que de quelques parcelles de mélèze et de douglas. Les prairies à intérêt biologique

couvrent 16 % du site, tandis que les tourbières représentent 15 %, en lien avec la zone de conservation des landes. Les feuillus (toutes hauteurs confondues) occupent 9 % du territoire. Enfin, les sols nus, souvent associés à des pessières infectées par les scolytes, représentent 8 % de la surface totale.

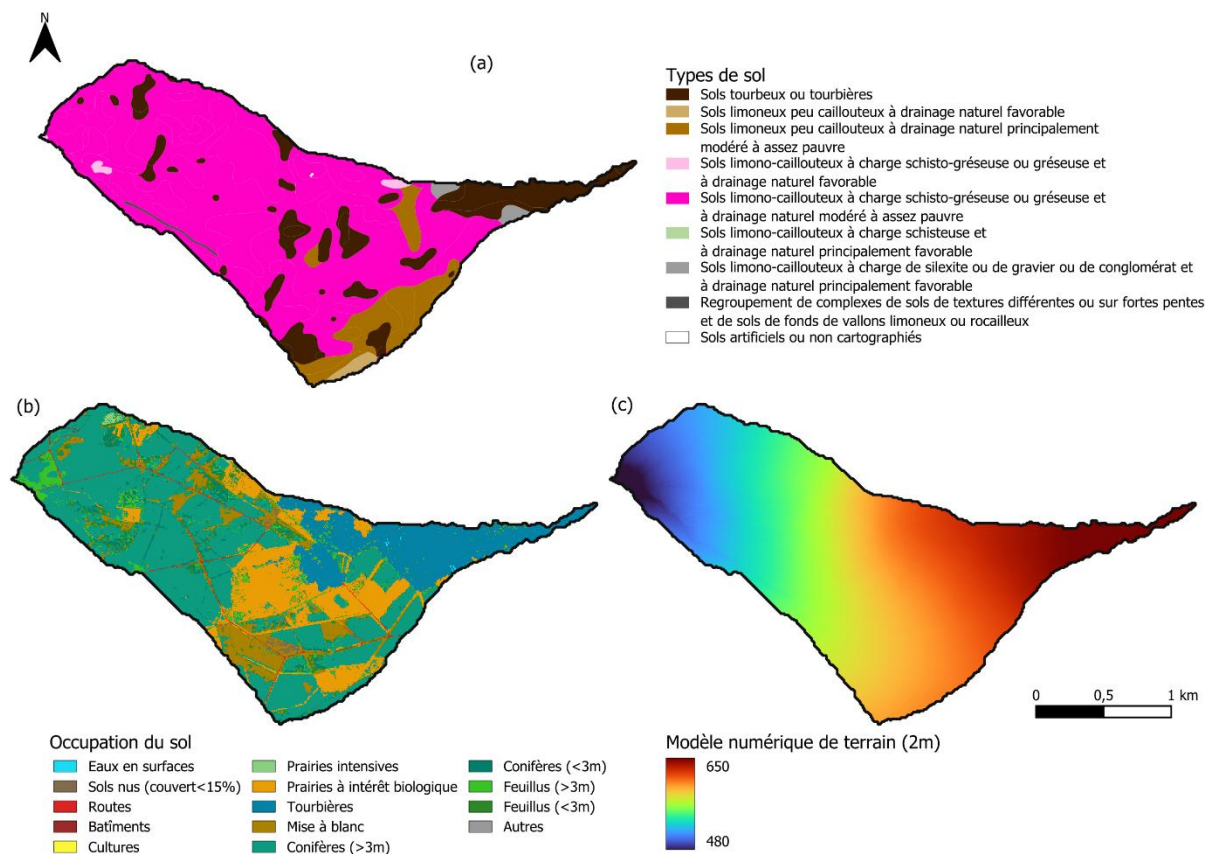


Figure 21 : Cartes des paramètres biophysiques du TIH de la Statte : (a) Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), (b) Carte de l'occupation des sols (LifeWatch 2022) et (c) Modèle numérique de terrain à 2m de résolution (LiDAR et LIDAXES).

Comme en témoigne la Figure 22, les landes tourbeuses ont, depuis le XIX^{ème} siècle, été drainées et plantées, principalement d'épicéas. La Figure 23 présente la répartition des forêts domaniales, communales et des parcelles privées actuelles. Les objectifs de gestion actuels sont principalement orientés vers la conservation et la production. Toutefois, les conditions stationnelles défavorables, notamment liées à l'hydromorphie des sols, nécessitent la mise en place de mesures de préservation et de protection des sols. Une zone de conservation des landes en milieu ouvert est également présente en amont du bassin versant.

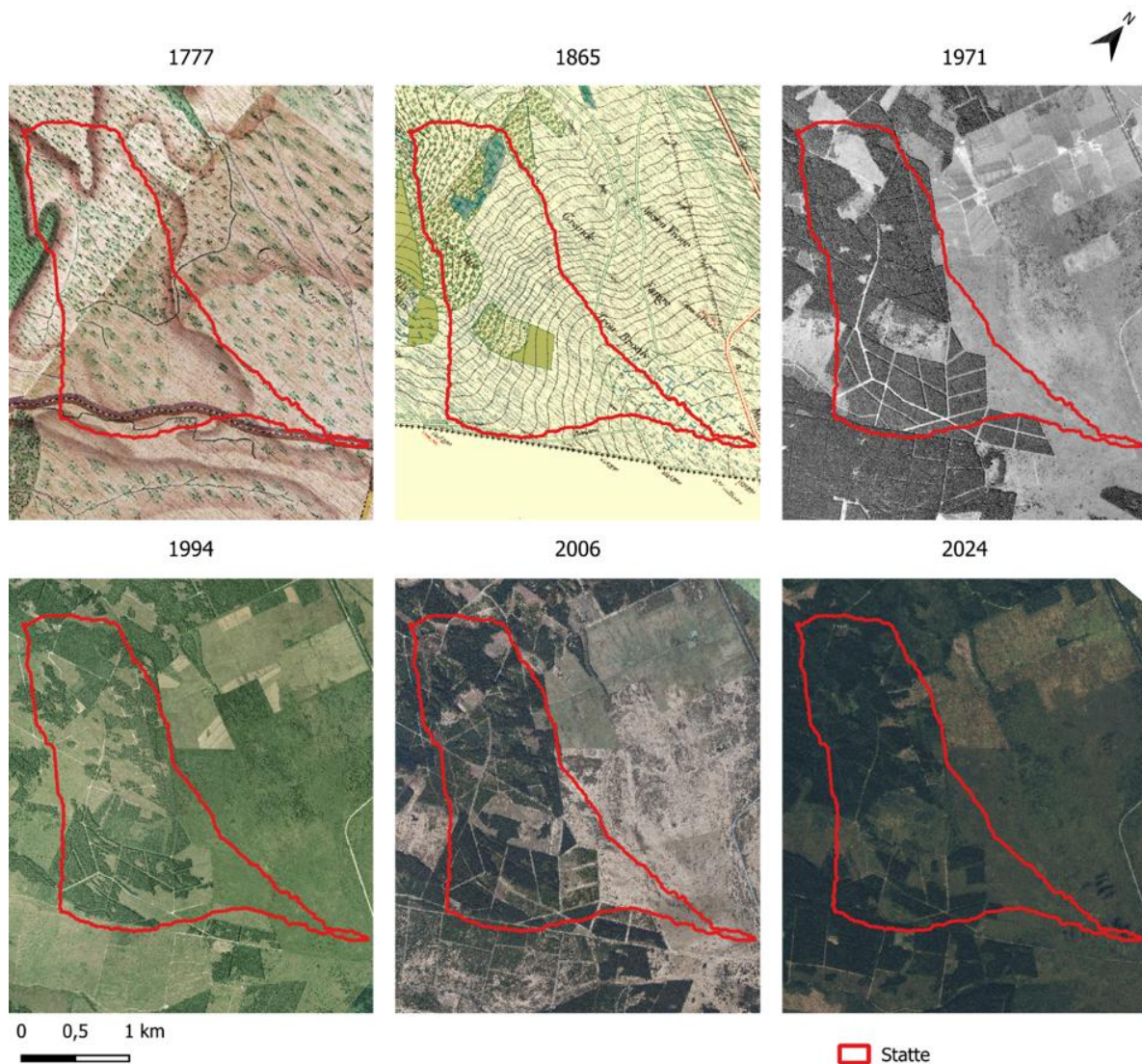


Figure 22 : Évolution de l'occupation du sol et de l'urbanisation du TIH de la Statte entre 1777 et 2024.

Les zones de sols nus constituent des opportunités pour l'implantation de mesures de gestion. Le DNF prévoit notamment d'y aménager des mares tampons ainsi que des déviations de fossés vers des zones de dispersion des eaux. Si le volume d'heures machine est déjà défini, la localisation précise des aménagements reste à déterminer. La modélisation vise à identifier les zones prioritaires afin de favoriser l'infiltration et de réduire les débits à l'exutoire. Par ailleurs, l'évaluation de la fréquence de saturation des sols apparaît pertinente afin d'anticiper d'éventuels impacts sur la productivité des peuplements forestiers.



Figure 23 : Carte des séries objectifs du DNF (2017) et des zones de conservation pour le TIH de la Statte.

3. CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS

3.1. Solutions fondées sur la nature

Les aménagements évalués dans le cadre de ce projet font recours aux Solutions Fondées sur la Nature (SFN). Dans une perspective d'hydrologie régénérative, ces dispositifs visent à renforcer la résilience hydrologique des territoires en atténuant les effets des épisodes pluvieux extrêmes tout en favorisant le maintien des ressources en eau durant les périodes de sécheresse. Le livrable n°6 (L6) du projet 104 du Plan de Relance de la Wallonie présente un inventaire détaillé de ces aménagements (Vesters et al., 2025).

Dans le cadre de ModRec 2-Hydrologie, une sélection d'aménagements parmi ceux présentés dans le livrable L6 a été proposée lors des réunions de concertation avec les acteurs locaux. Pour leur mise en œuvre, la DAFor, Natagriwal, ainsi que la cellule GISER, peuvent être mobilisés en tant qu'experts techniques, tant pour la conception des aménagements que pour l'accompagnement des démarches administratives associées (réglementation, conventions, permis, demandes de subsides).

3.1.1. Aménagements en contexte agricole

3.1.1.1. Éléments linéaires

Haies

Les haies constituent des infrastructures agroécologiques contribuant à la gestion des flux hydriques et à la conservation des sols. Elles ralentissent le ruissellement de surface, favorisent l'infiltration de l'eau et participent à l'amélioration de la structure des sols. Elles sont généralement implantées sur des sols suffisamment drainants afin de garantir leur bon développement.



Figure 24 : Haie large et diversifiée (à gauche ; © Sébastien Pirotte) et exemple d'intégration de haies dans le paysage agricole (à droite ; © Franck Barske).

Grâce à leurs systèmes racinaires profonds et diversifiés, les haies contribuent au fonctionnement de la pompe hydrologique végétale. En été, les prélèvements racinaires libèrent de la capacité de stockage dans le sol, favorisant l'infiltration lors d'épisodes pluvieux successifs. Au-delà de leurs bénéfices hydrologiques, les haies assurent également des fonctions écologiques et microclimatiques importantes, notamment par leur rôle d'habitat pour la biodiversité, leur effet brise-vent et l'ombrage qu'elles procurent.

Les haies peuvent être implantées en bordure ou à l'intérieur des parcelles agricoles. Lorsqu'elles sont implantées perpendiculairement à la pente, elles peuvent être associées à des fossés afin d'augmenter leur capacité à ralentir et temporiser les écoulements. En effet, l'efficacité hydrologique de ces aménagements dépend principalement de leurs caractéristiques (largeur, densité et diversité de la végétation) ainsi que de leur implantation dans le paysage. Un positionnement perpendiculaire aux axes préférentiels d'écoulement permet généralement de maximiser leur effet sur le ruissellement (Figure 24). Ces bénéfices s'installent progressivement et atteignent leur plein potentiel après plusieurs années de développement.

Une synthèse bibliographique consacrée aux différents types de haies et à leurs effets hydrologiques a été réalisée dans le cadre du travail de fin d'études de Maillen (2025).

Noues

Les noues sont des fossés peu profonds conçus pour collecter, ralentir et infiltrer les eaux de ruissellement. Leur fonctionnement repose sur une faible pente longitudinale et sur la présence d'une végétation favorisant la dissipation de l'énergie des écoulements et l'infiltration de l'eau dans le sol. Des aménagements complémentaires, tels que des redents, peuvent être intégrés afin d'augmenter le temps de séjour de l'eau et d'améliorer leur efficacité hydraulique. Dans la mesure du possible, les noues sont implantées sur des sols présentant de bonnes capacités d'infiltration.



Figure 25 : Noue agricole enherbée (à gauche ; © SPW) et noue urbaine (à droite ; © Yaël Haddad).

En contexte agricole, les noues prennent généralement la forme de fossés larges de plusieurs mètres et peu profonds (environ 40 cm), avec des talus faiblement inclinés permettant le passage des engins agricoles (Figure 25). Elles sont principalement utilisées pour intercepter les écoulements de surface, ralentir leur transfert vers l'aval et favoriser leur infiltration.

En milieu urbain, les noues constituent une alternative aux systèmes traditionnels de collecte des eaux pluviales. Elles se présentent généralement sous la forme de fossés végétalisés d'environ 40 cm de profondeur pour 1 m de largeur (Figure 25). Leur objectif principal est de favoriser la désimperméabilisation et l'infiltration des eaux de pluie au plus près de leur point de chute. Elles peuvent être implantées le long des voiries, en façade avant ou en limite de parcelle, notamment en fond de jardin, en fonction des contraintes foncières et urbanistiques.

Keyline design

Le principe du *keyline design* vise à optimiser la répartition des eaux de ruissellement à l'échelle d'une parcelle ou d'un bassin versant afin de maximiser leur infiltration dans le sol. Son objectif est de conserver un maximum d'eau dans le paysage en s'appuyant sur la topographie naturelle, sans recourir à des infrastructures hydrauliques conventionnelles. À partir des points d'inflexion du relief, des lignes directrices sont tracées parallèlement ou quasi parallèlement aux courbes de niveau afin de redistribuer les écoulements depuis les fonds de vallon vers les zones plus élevées du versant (Figure 26). Ces aménagements peuvent prendre la forme de fossés-talus-haies ou être réalisés par des pratiques culturales adaptées, telles que le labour ou la fissuration selon les lignes de keyline. Leur mise en œuvre est privilégiée sur des sols présentant de bonnes capacités d'infiltration.



Figure 26 : Illustration du *keyline design* (à gauche ; Del Carmen Ponce-Rodríguez et al. (2021)) et exemple d'aménagement en fossé-buttée (à droite ; © Boris Hallier). F = fossé ; K = ligne de *keyline* avec plantation d'arbres ; A = zone en aval.

3.1.1.2. Zones de stockage temporaire

Mares

Une mare est un plan d'eau peu profond et de superficie limitée, alimenté par les précipitations, les écoulements de surface et/ou les nappes phréatiques. D'origine naturelle ou anthropique, elle peut être isolée ou intégrée dans un réseau de mares interconnectées. Elles sont généralement localisées dans des secteurs humides ou peu drainés, peu propices à l'exploitation agricole. Autrefois très répandues dans les paysages agricoles, notamment pour l'abreuvement du bétail, de nombreuses mares ont disparu à la suite de leur comblement ou de l'évolution des pratiques agricoles. Leur restauration ou leur création constitue aujourd'hui un levier fréquemment mobilisé dans le cadre des SFN.



Figure 27 : Mares tampons aménagées le long d'un axe de ruissellement (à gauche ; © Michal Kravčík) et délimitation d'une zone tampon (jaune-rouge) autour d'une marre permanente (à droite ; © SPW).

Les mares peuvent également être implantées le long d'axes de ruissellement afin de ralentir les écoulements et de stocker temporairement une partie des volumes d'eau avant leur restitution progressive vers l'aval (Figure 27). Selon leur alimentation en eau et leurs caractéristiques hydrogéologiques, les mares peuvent être permanentes ou temporaires (Figure 27). Dans une optique de gestion hydrologique, elles peuvent être équipées de dispositifs de régulation, tels que des systèmes d'ajutage, permettant de contrôler les débits sortants et de maintenir une capacité de stockage disponible pour les épisodes pluvieux ultérieurs.

Zones de rétention

Une zone de rétention est un ouvrage hydraulique destiné à stocker temporairement les eaux issues d'un événement pluvieux intense. La zone de rétention est implantée le long d'un axe d'écoulement naturel (Figure 28), et sur un sol qui a un drainage pauvre (i.e., très peu infiltrant). Lorsqu'elle est aménagée en fond de vallée à proximité d'un cours d'eau, elle peut fonctionner comme une zone d'immersion temporaire en permettant le stockage temporaire des débordements lors des périodes de hautes eaux (Figure 28).

Son emprise est définie à partir de l'analyse de la topographie, en privilégiant les zones de faible pente ou les replats favorables au stockage de l'eau. L'aménagement comprend généralement une digue ou un merlon fermant partiellement la dépression naturelle, ainsi qu'un déversoir et un dispositif d'ajutage permettant de contrôler le niveau d'eau et de réguler les débits restitués vers l'aval. L'objectif est de ralentir le transfert des écoulements et d'écarter les débits de pointe lors des épisodes de crue. Dans le cadre de ce projet, ce type d'ouvrage est assimilé à une mare tampon de grande capacité.



Figure 28 : Zone de rétention avec ajutage (à gauche) et zone de rétention avec reméandration d'un cours d'eau (à droite). © ULiège-GxABT.

3.1.1.3. Gestion du sol et du parcellaire

Fissuration

La fissuration consiste en une incision étroite du sol, d'une largeur équivalente à celle d'une main, réalisée à l'aide d'une sous-soleuse (ou décompacteur) sur une profondeur comprise entre 30 et 50 cm (Figure 29). Réalisée parallèlement aux courbes de niveau et à espacements réguliers, elle vise à améliorer l'infiltration des eaux de surface, à favoriser les échanges gazeux et à réduire les effets du compactage. Cette intervention peut être répétée sur plusieurs années en fonction de l'évolution de la structure du sol. Lorsqu'elle est réalisée sur prairie, les systèmes racinaires de la végétation contribuent au maintien des fissures dans le temps, prolongeant ainsi son efficacité hydrologique (Figure 29).

La fissuration est particulièrement adaptée aux sols filtrants et peu caillouteux, afin de limiter les risques de dégradation du matériel. Sa mise en œuvre est également conditionnée par la pente du terrain, les interventions mécaniques devenant plus difficiles sur les versants les plus inclinés.

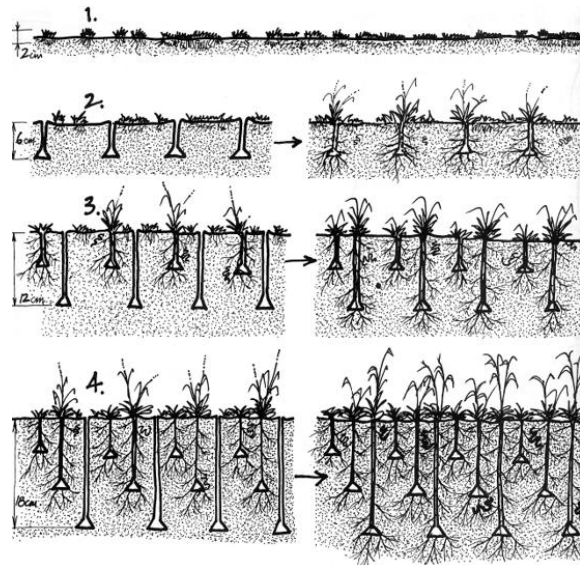


Figure 29 : Fissuration avec sous-soleuse en dents paraboliques/type Yeomans (à gauche ; © Fabian Feraux) et illustration des effets du sous-solage sur le sol et la végétation (à droite ; Mollison, 1988).

Redessin parcellaire

Le redessin parcellaire ne constitue pas en soi une SFN, mais représente une opportunité structurante pour leur mise en place de manière cohérente à l'échelle du bassin versant. Il ouvre en effet la voie à la combinaison de plusieurs leviers complémentaires : plantation de haies, *keyline design*, adaptation des accès parcellaires, évolution des pratiques culturales, et implantation de bandes enherbées et de noues d'infiltration.

Dans cette approche, les limites parcellaires et les barrières inter parcellaires sont préférentiellement implantées perpendiculairement aux axes de ruissellement, tandis que le travail du sol est réalisé parallèlement aux courbes de niveau. Les aménagements peuvent notamment inclure la conversion de bords de chemins vicinaux en barrières inter parcellaires ou encore des échanges amiables de portions de parcelles entre exploitants afin d'optimiser l'organisation du parcellaire.

La mise en œuvre d'un redessin parcellaire constitue généralement un processus de long terme, pouvant s'étendre sur une période de deux à dix ans. Elle nécessite la concertation des différents acteurs concernés, la mise en place de conventions spécifiques ainsi qu'un accompagnement technique et administratif, notamment par la DAFoR.

3.1.2. Aménagements en contexte forestier

3.1.2.1. Gestion du sol et du peuplement

Préservation des sols

Le décompactage regroupe un ensemble de pratiques (passives) visant à limiter ou réduire le tassement des sols forestiers provoqué par le passage répété d'engins d'exploitation. Dans les secteurs caractérisés par des sols tourbeux ou hydromorphes, particulièrement sensibles aux perturbations mécaniques, l'objectif est avant tout préventif et consiste à préserver la structure naturelle du sol ainsi que sa capacité d'infiltration et de stockage de l'eau.

Différentes mesures peuvent être mises en œuvre, telles que le recours au débardage à cheval, la limitation du trafic des engins lourds ou la concentration des passages sur des cloisonnements permanents. Cette organisation permet de préserver la majeure partie de la surface forestière des phénomènes de tassement et de maintenir une porosité favorable à l'infiltration des eaux de pluie et au développement racinaire.

En limitant la dégradation de la structure du sol, on favorise les échanges hydriques entre les horizons superficiels et profonds, réduisant le ruissellement, et permet ainsi le bon développement des peuplements forestiers. Les bénéfices de cette pratique s'inscrivent principalement dans une logique de gestion durable des sols forestiers à long terme (Nazari 2021).

Diversification des peuplements forestiers

La diversification des peuplements forestiers consiste à favoriser la coexistence de plusieurs essences d'arbres au sein d'un même massif forestier. Cette approche vise à accroître la résilience des écosystèmes face aux perturbations climatiques, sanitaires et hydrologiques tout en améliorant le fonctionnement global de la forêt.

D'un point de vue hydrologique, les peuplements mixtes présentent généralement une plus grande diversité de structures racinaires et de stratégies d'utilisation de l'eau. L'intégration d'essences feuillues permet notamment d'augmenter l'évapotranspiration durant la période de végétation, créant davantage de capacité de stockage dans les sols avant les épisodes pluvieux. La diversité des systèmes racinaires contribue également à améliorer la structure et la porosité du sol, facilitant l'infiltration vers les horizons profonds (Seiwa et al., 2021).

Les bénéfices hydrologiques de la diversification forestière se développent progressivement au cours de la croissance des peuplements. Au-delà de la gestion de l'eau, cette stratégie contribue également au renforcement de la biodiversité, à l'amélioration de la stabilité des peuplements et à leur adaptation face aux changements climatiques.

3.1.2.2. Aménagements sur les réseaux de drainage forestiers

Historiquement, de nombreux réseaux de drains ont été aménagés afin de faciliter l'évacuation de l'eau et d'améliorer les conditions d'exploitation sylvicole (Figure 30). Ces aménagements modifient le fonctionnement hydrologique naturel des sols en accélérant le transfert des eaux vers l'aval. La restauration hydrologique de ces réseaux vise à ralentir les écoulements, à favoriser l'infiltration et à augmenter le temps de séjour de l'eau dans les sols et les peuplements forestiers.

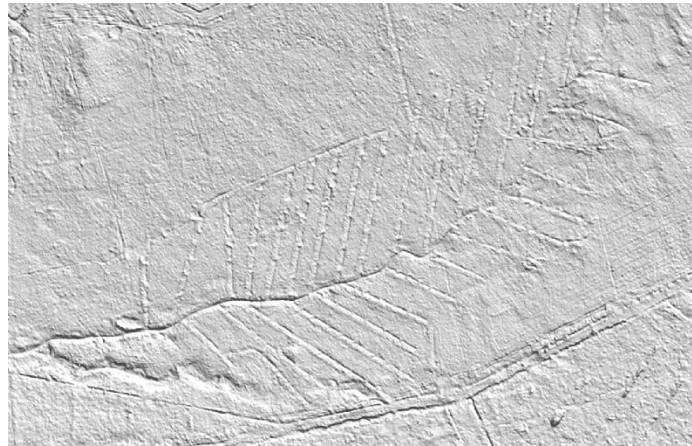


Figure 30 : Visualisation du réseau de drainage d'une exploitation sylvicole à partir d'un *hillshade*.
© ULiège-GxABT.

Bouchage de drains

Le bouchage de drains consiste à obstruer la sortie de fossés ou de drains encore fonctionnels afin de ralentir l'évacuation de l'eau hors des peuplements forestiers. L'aménagement repose sur la mise en place d'un ou plusieurs bouchons réalisés à partir de matériaux locaux (e.g., terre, tourbe ou bois). En limitant l'écoulement gravitaire, l'eau est retenue temporairement dans le réseau de drainage et dans les sols environnants. Cette augmentation du temps de séjour favorise la réhumidification des horizons superficiels.

Cette technique est particulièrement adaptée aux zones forestières présentant un réseau de drainage ancien et encore fonctionnel. Son efficacité dépend notamment de l'étanchéité des bouchons, de leur espacement et de la topographie locale. Au-delà de son intérêt hydrologique, le bouchage de drains participe également à la restauration des habitats humides et à la préservation, à long terme, des stocks de carbone dans les sols organiques (Nyberg et al., 2022).



Figure 31 : Photos avant (à gauche) et après (à droite) bouchage de réseau de drains. © Lucas Goosens.

Déviatation de drains bordiers

La déviation de drains bordiers vise à réorienter une partie des écoulements circulant dans les fossés forestiers vers les peuplements adjacents afin de favoriser leur infiltration et leur stockage temporaire (Figure 32). Cette technique repose sur la création d'un fossé secondaire associé à un léger obstacle dans le fossé principal, permettant de détourner une partie des flux vers la parcelle. En augmentant les temps de séjour de l'eau dans les sols, cette technique contribue à la recharge des réserves hydriques et à l'atténuation des débits de pointe lors des épisodes pluvieux.

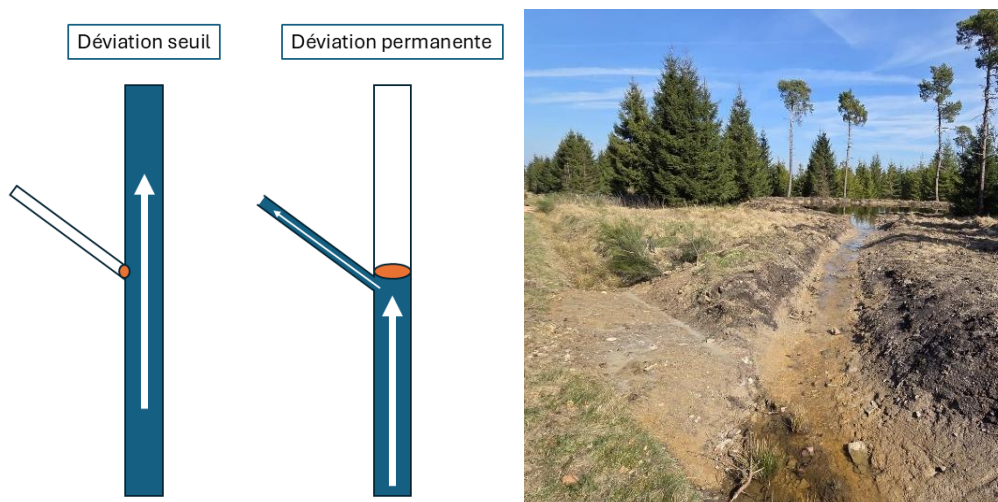


Figure 32 : Représentation de deux modalités de déviations : à droite, des fossés bordiers et à gauche, déviations permanente. © Lucas Gossens

Différentes modalités peuvent être mises en œuvre selon les objectifs recherchés (Figure 32). La première repose sur l'installation d'un seuil dans le fossé de dérivation. Dans ce cas, seuls les écoulements dépassant un certain niveau sont redirigés vers la parcelle,

tandis que les débits courants continuent de transiter par le fossé principal. Cette configuration permet de limiter les risques d'engorgement permanent et de préserver les conditions de croissance des arbres. La seconde consiste à dévier directement les écoulements vers le peuplement afin d'accroître l'humidité du sol et de ralentir le transfert de l'eau vers l'aval.

Redents dans les fossés bordiers

Les redents sont des petits ouvrages transversaux aménagés à intervalles réguliers au sein des fossés de drainage ou d'évacuation des eaux (Figure 33). Réalisés en terre, en bois ou à partir de matériaux locaux, ils ont pour fonction de ralentir les écoulements et d'augmenter temporairement le volume d'eau stocké dans le fossé en réduisant la pente hydraulique effective du fossé. Cette réduction de vitesse permet également de limiter le pouvoir érosif des écoulements, particulièrement dans les secteurs présentant des pentes importantes. Une partie de l'eau retenue peut également s'infiltrer dans le sol.

Les redents constituent une solution simple et peu coûteuse pour réduire la vitesse de transfert de l'eau au sein de réseaux de drainage existants. Leur efficacité dépend principalement de leur hauteur, de leur espacement et de la topographie du fossé concerné.



Figure 33 : Représentation de systèmes de redents dans un chenal : à gauche, une barrière en bois imitant les barrages des castors (© The Hadlow Estate, site internet), à droite, une succession de redents en béton (© l'eau, l'industrie, les nuisances, site internet).

3.1.2.3. Zones de stockage temporaire

Zones de dispersion des eaux

Les zones de dispersion des eaux sont des aménagements destinés à ralentir et stocker temporairement les écoulements de surface au sein du réseau de drainage forestier. Elles s'apparentent à des zones d'immersion temporaire de petite taille adaptées aux contextes forestiers humides à drainage naturel faible. Elles reposent généralement sur la création d'un merlon ou d'un seuil transversal permettant de retenir l'eau jusqu'à une

hauteur prédéfinie avant sa restitution progressive vers l'aval (Figure 34). Leur dimensionnement dépend notamment de la topographie locale, de la surface contributive et des volumes d'eau susceptibles d'être interceptés.



Figure 34 : A gauche : zone de dispersion des eaux (© Aurore Degré). A droite : zone de méandre et de déviation des écoulements (© Lisa Di Maggio).

Implantées le long d'axes de drainage ou dans des secteurs topographiques favorables à l'accumulation des écoulements, ces structures augmentent le temps de séjour de l'eau dans le paysage et réduisent les débits de pointe lors des épisodes pluvieux. Une partie des volumes stockés peut s'infiltrer dans les sols environnants, tandis que l'excédent est évacué progressivement vers le réseau hydrographique.

Au-delà de leur intérêt hydrologique, ils favorisent le maintien de conditions propices au développement d'habitats humides et renforcent la résilience des écosystèmes forestiers face aux périodes de sécheresse.

Mares tampons

Les mares prévues par le DNF sur la Statte ne correspondent pas à de simples dépressions destinées à accumuler de l'eau. Elles sont conçues comme des aménagements visant à ralentir localement les écoulements, à favoriser le stockage temporaire des eaux de ruissellement et à recréer des conditions humides propices à la biodiversité. Ces ouvrages sont généralement implantés à proximité des réseaux de fossés ou des zones de concentration des écoulements.

Ils se présentent sous la forme de dépressions peu profondes, aménagées avec des pentes douces et une profondeur maximale d'environ 1,5 m. Les matériaux excavés sont réutilisés pour former une digue périphérique limitant les débordements latéraux (Figure 35). Un trop-plein est aménagé afin d'évacuer les excédents d'eau lors des épisodes les plus importants et de garantir la stabilité de l'ouvrage. Contrairement à certains dispositifs de rétention hydraulique équipés d'organes de régulation, ces mares ne disposent

pas de système de vidange contrôlée. L'eau stockée est principalement évacuée par infiltration dans le sol, par évaporation ou, lorsque la capacité de stockage est dépassée, par débordement au niveau du trop-plein.



Figure 35 : Représentation des mares dans le contexte forestier. © Aurore Degré

3.1.3. Mise en place de ces aménagements

L'objectif de ce travail de recherche est d'aboutir à un plan d'aménagement pour les différents bassins versants concernés par le projet. Toutefois, au-delà de l'élaboration de ce plan, une attention particulière a été portée aux conditions de sa mise en œuvre. Dans cette optique, les dispositifs susceptibles d'encadrer la réalisation des aménagements proposés (subventions, conventions, accompagnement technique, etc.) ont été identifiés avec l'aide des acteurs concernés (Natagriwal, GISER, SPW-DCENN, DAFoR), afin de mieux comprendre ce que leur mise en place concrète pourrait représenter pour les agriculteurs et les propriétaires.

Cette réflexion était d'autant plus nécessaire que les modalités de mise en œuvre du projet se sont précisées progressivement au fil de son avancement. De nombreux éléments restaient en effet à définir pour la suite du projet, notamment les mécanismes de financement, les formes de conventionnement ou encore les modalités d'entretien des aménagements.

3.1.3.1. Subventions existantes

Les subventions existantes en contexte agricole sont listées dans les paragraphes qui suivent. Elles couvrent un large pan des mesures préconisées dans cette étude. Toutefois leur mise en œuvre est complexe à l'échelle du bassin versant. Il en résulte une mobilisation relativement limitée.

Aides destinées aux agriculteurs

Les aides destinées aux agriculteurs sont mobilisables via la PAC (Politique Agricole Commune) et avec l'accompagnement de Natagriwal. Elles nécessitent un préfinancement de la part des bénéficiaires. Le versement des fonds, dont le montant et les

échéances varient selon l'intervention sollicitée, est strictement conditionné à la conformité des travaux réalisés.

- Subvention à la plantation : vise à financer la plantation de haies, d'arbres, de vergers et/ou de taillis linéaires afin de maintenir ou recréer le maillage écologique du territoire (fonctions de biodiversité, de protection des sols face à l'érosion, etc.). Le montant de l'aide octroyée est déterminé par type de plantation ainsi que par montants forfaitaires par mètre de linéaire ou par unité plantée. La période d'engagement est de 30 ans.
- MAEC (Mesures Agro-Environnementales et Climatiques) : vise à mettre en place des pratiques favorables à la protection de l'environnement (préservation de la biodiversité, de l'eau, du sol, du climat), à la conservation du patrimoine (animal ou végétal) et au maintien des paysages en zone agricole. La période d'engagement est de 5 ans.
- Aides aux investissements non-productifs : vise à financer la construction, sur des terres agricoles, d'infrastructures ayant comme objectif principal l'amélioration de l'environnement en réduisant l'érosion et en renforçant le cadre hydraulique. Sont compris : les fascines, les fossés, les mares tampon, les noues, le bassin de rétention, le déplacement ou l'aménagement de l'entrée de champs, les aménagements des exutoires des drains. La période d'engagement est de 5 ans.

Aides à destination des pouvoirs publics

Les aides destinées aux pouvoirs publics (notamment les provinces et les communes) sont financées par le Gouvernement wallon, avec l'accompagnement de la DAFoR. Elles visent spécifiquement la protection des terres agricoles contre l'érosion ainsi que la lutte contre les inondations et les coulées boueuses induites par le ruissellement. À l'instar des subventions agricoles, l'octroi de ces aides requiert un préfinancement de la part des bénéficiaires.

- Arrêté du Gouvernement wallon du 18 janvier 2007 : vise à financer des dispositifs destinés à la protection contre l'érosion des terres agricoles et à la lutte contre les inondations et coulées boueuses dues au ruissellement. Sont compris : des travaux de génie rural visant à limiter le ruissellement (aménagement en voirie, ZIT, fossés, mares, talus, fascines, etc.), des travaux de plantations et de semis (haies, bandes enherbées), les essais nécessaires à l'exécution des travaux, l'acquisition de biens immobiliers non bâtis nécessaires à la bonne exécution des travaux précités ou le paiement d'une indemnité pour la création d'une servitude d'immersion temporaire. L'aide octroyée est à hauteur de 60 % du coût total (comprenant les travaux, un forfait de 10 % pour frais annexes et le prix éventuel de l'acquisition foncière). La période d'engagement est indéterminée.

- Arrêté du Gouvernement wallon du 24 avril 1997 : vise à financer des travaux d'amélioration de la voirie agricole situées sur le domaine public et desservant les terres soumises à l'exploitation agricole, forestière ou horticole. Sont exclues les voiries incluses dans un bloc d'aménagement foncier ou de remembrement actif, ou qui ont fait l'objet d'un subside régional au cours des 15 dernières années. Sont compris : les travaux d'amélioration de la voirie agricole, des plantations, les aménagements des abords, les frais d'étude et essais nécessaires à l'exécution des travaux, l'acquisition de biens immobiliers non bâtis nécessaires à la bonne exécution des travaux précités. L'aide octroyée est à hauteur de 60 % du coût total (travaux, forfait de 5 % pour frais annexes et achat foncier) et peut être jusqu'à 20 % si des plantations sont réalisées sur toute la longueur et des deux côtés de la voirie. La période d'engagement est indéterminée.

3.1.3.2. Estimation des coûts de la mise en place des aménagements

En milieu agricole

Le Tableau 5 reprend le montant des aides applicables aux aménagements modélisés et subventionnés par les dispositifs listés ci-dessus en contexte agricole. Ce tableau demeure non exhaustif, ces montants dépendant fortement de la typologie précise de l'ouvrage mis en place.

Tableau 5 : Montant des aides pour les aménagements en zone agricole.

Aménagement	Qui	Financement existant	Montant aide	Durée d'engagement	Modalité de paiement*
Haies	Agriculteur/ Propriétaire	Plantations	***Haie mono rang 5 €/m	30 ans	Dans les 6 mois après réalisa- tion des travaux
Fossé inter/intra parcellaires	Agriculteur/ Propriétaire	Investissements non productifs	10 €/m 80 €/déversoirs	5 ans	
Fossé à redents	Agriculteur/ Propriétaire	Investissements non productifs	15 €/m 125 €/redent	5 ans	Entre 1-2 ans après réalisa- tion des travaux
Mare tampon	Agriculteur/ Propriétaire	Investissements non productifs	50-100 m ² : 12 €/m ² 100-200 m ² : 11 €/m ² 200-300 m ² : 9 €/m ²	5 ans	
ZIT**	Commune	Gouvernement wallon	N/A	Indéterminée	Acomptes au prorata des tra- vaux réalisés
Noues urbaines	Commune	N/A	N/A	N/A	N/A

* Le montant est avancé par le bénéficiaire puis remboursé via l'aide sollicitée.

** Non couvert par les Investissements non productifs, contrairement au bassin de rétention.

*** A titre indicatif. Montant variable si haie mono, double ou triple rang, ou si plantation de taillis.

En milieu forestier

Le Tableau 6 reprend le montant des coûts des aménagements forestiers. Ils sont indicatifs et basés sur des retours d'expérience de chantiers réalisés avec une pelle hydraulique de 8 tonnes (85 €/h HTVA). Ils peuvent varier selon l'accessibilité du site, les distances de déplacement de l'engin, les conditions de terrain et l'évolution du coût du carburant.

Tableau 6 : Coûts des aménagements en milieu forestier.

Aménagement	Montant coût	Durée d'engagement
Redent dans un fossé	100 à 150 €/redent	5 ans
Mare	50 à 100 m ² : 6 à 8 €/m ²	5 ans
	100 à 200 m ² : 4 à 6 €/m ²	
	200 à 300 m ² : 3 à 5 €/m ²	
Zone de dispersion des eaux	3 à 6 €/m linéaire	5 ans
Bouchage de drain	50 à 75 €/bouchon	5 ans
Déviations vers peuplement	150 à 300 €/ouvrage	5 ans

3.1.3.3. Dans le cadre du projet ModRec 2 - Hydrologie

Ce projet pilote bénéficie d'un financement spécifique à ce projet, distinct des dispositifs existants, en raison de son caractère exemplatif et pionnier. Ceci doit permettre notamment de :

- Couvrir l'intégralité des coûts des travaux pour l'agriculteur, le propriétaire et/ou la commune.
- Établir une convention sur mesure, afin d'assurer la pérennité des aménagements tout en garantissant l'engagement du bénéficiaire.
- S'appuyer sur les modalités déjà prévues dans d'autres conventions (dimensionnement, entretien, etc.).
- Les bénéficiaires ne devront pas avancer le montant nécessaire à la réalisation des travaux, ce qui constitue un argument favorable à leur collaboration.

La mise en place et la définition de ce cadre (conventionnement, financement des aménagements, temporalité, etc.) sera pris en charge par la DCENN et les autres services ad hoc.

3.2. Elaboration des scénarios théoriques

Une première analyse des potentialités de chaque TIH a été réalisée afin d'identifier les zones les plus favorables à l'implémentation des SFN présentées à la section précédente. Sur cette base, un ou plusieurs scénarios dits « théoriques » ont été élaborés pour chaque territoire. Ces scénarios ne constituent pas des projets aboutis, mais des documents de

travail destinés à alimenter et structurer la phase de concertation et de co-construction avec les acteurs locaux.

Ces scénarios adoptent volontairement une approche centrée sur les seuls services hydrologiques, avec pour objectif de maximiser le potentiel de rétention, d'infiltration et de régulation des eaux à l'échelle du TIH. Les contraintes liées à la faisabilité technique, foncière, réglementaire ou socio-économique, de même que les arbitrages issus de la concertation, ne sont pas pris en compte à ce stade. L'objectif est de disposer d'une première vision des possibilités d'aménagement avant leur discussion avec les parties prenantes.

L'identification des zones favorables repose sur trois sources d'information complémentaires : l'analyse cartographique, les visites de terrain et la lecture du paysage. Sans en détailler exhaustivement la démarche, quelques éléments clés peuvent être mentionnés.

3.2.1. Analyse cartographique

Une série de critères biophysiques est mobilisée afin d'identifier les contraintes et opportunités propres à chaque territoire. L'occupation du sol constitue un premier filtre déterminant, les SFN étant souvent spécifiques à certains contextes (forestier, agricole ou urbain).

La topographie, le relief et le réseau hydrographique sont ensuite analysés afin de localiser notamment :

- Les points bas et zones de replat susceptibles d'accueillir des zones de stockage temporaires ;
- Les lignes de crête et points d'inflexion topographiques (*keypoints*) propices à l'implantation de *keylines* ;
- Les peuplements forestiers non-productifs susceptibles d'accueillir des zones de stockage temporaire.

Les caractéristiques pédologiques sont également prises en compte. La charge caillouteuse des sols conditionne notamment la faisabilité de certains aménagements, tel que la fissuration, tandis que le drainage naturel des sols permet de distinguer les secteurs où l'infiltration peut être privilégiée de ceux où le stockage temporaire des écoulements apparaît plus approprié.

Le parcellaire agricole est également analysé afin d'identifier les opportunités de redessin parcellaire et d'implantation d'aménagements à l'échelle des exploitations. Enfin, une analyse historique fondée sur d'anciennes cartographies (parcellaire, occupation du sol, réseaux de haies, etc.) complète cette lecture du territoire en mettant en évidence des structures paysagères aujourd'hui disparues, mais potentiellement inspirantes pour la conception des scénarios (cf. Section 2).

3.2.2. Visites de terrain

Plusieurs visites de terrain ont été réalisées afin de compléter les analyses cartographiques (Figure 36). Elles ont permis d'identifier des reprises d'écoulement, de localiser certaines infrastructures existantes (bassins d'orage, zones de débordement, fossés, ouvrages hydrauliques) et de recueillir les connaissances des acteurs locaux concernant les problématiques hydrologiques du territoire, notamment les secteurs drainés ou soumis à des écoulements récurrents (cf. Annexe C).



Figure 36 : Visites de terrain à Manihant-Ourcy (à gauche), dans la Statte (à droite) et à Pierrechamps-Chawieumont (en bas). © ULiège-GxABT.

3.2.3. Lecture du paysage

L'observation directe du paysage a permis d'affiner l'interprétation des données cartographiques et d'identifier des éléments difficilement détectables par analyse spatiale seule, tels que des discontinuités dans les réseaux de haies, des traces d'anciens aménagements hydrauliques ou certaines contraintes locales.

L'ensemble de ces analyses a conduit à l'élaboration d'un ou plusieurs scénarios théoriques pour chaque TIH. Leur efficacité hydrologique est ensuite évaluée au moyen de la modélisation présentée dans les sections suivantes. Ces scénarios constituent une base de discussion pour la phase de concertation et de co-construction avec les acteurs du territoire.

3.3. Concertation

Ce projet relève d'une démarche de modélisation, mais son ambition va au-delà de cet exercice. L'objectif est en effet de proposer un plan d'aménagement susceptible d'être concrètement mis en œuvre, avec l'accord des propriétaires fonciers et des exploitants agricoles concernés.

Il convient également de reconnaître que cette démarche présente un caractère relativement « top-down ». En effet, par exemple, les agriculteurs du Pays de Herve ne sont pas à l'origine du projet et ne sont pas directement confrontés aux problématiques d'inondation qui le motivent. Dès lors, la conception du processus visait à construire collectivement un projet d'aménagement, en s'appuyant sur l'implication des agriculteurs et sur l'expertise d'acteurs externes chargés de les accompagner tout au long de la démarche.

L'enjeu est ainsi d'introduire une dynamique de groupe et de favoriser l'émergence de choix collectifs à l'échelle d'un territoire restreint. C'est notamment dans cette perspective qu'a été élaboré le processus présenté ci-dessous.

3.3.1. Manihant-Ourcy

À Manihant-Ourcy, dans le cadre de ce projet, trois catégories d'acteurs sont représentées pour trois zones d'aménagements différentes ; les agriculteurs et les propriétaires associés pour les prairies, les riverains pour les habitations, et la commune pour les voiries communales.

3.3.1.1. Agriculteurs et propriétaires de parcelles agricoles

Sur la zone d'étude, 11 exploitants agricoles étaient recensés (11 exploitations déclarantes PAC) ainsi que 229 propriétaires de parcelles agricoles (comprenant de nombreuses co-propriétés). L'implication des agriculteurs dans le projet variait fortement. Certains étaient directement concernés par une part importante de leur surface agricole (jusqu'à 50 % des prairies pour l'un d'entre eux et 15 % pour un autre), tandis que d'autres n'étaient concernés que de manière marginale.

Le processus de co-construction avec les agriculteurs a été conçu comme suit :

1. Envoi d'un courrier à l'ensemble des agriculteurs et des propriétaires de prairies afin de présenter le projet.
2. Réalisation d'entretiens individuels avec les agriculteurs afin de :
 - Instaurer un climat de confiance ;
 - Présenter le projet et ses implications ;
 - Identifier les problématiques locales et localiser les éléments paysagers existants (mares, drains, haies, etc.).

A l'issue de ces entretiens, l'objectif était de rédiger un document reprenant l'ensemble des freins et opportunités récoltés.

Quatre réunions ont été organisées en présentiel avec les agriculteurs souhaitant participer au projet, en présence également de plusieurs acteurs externes tels que la DAFoR, GISER, Natagriwal et le GAL Pays de Herve. Le GAL (Groupe d'Action Locale) a pour mission de soutenir le développement rural durable du territoire afin d'améliorer la qualité de vie des habitants. Il intervient dans plusieurs thématiques, dont l'agriculture dans le cadre de ce projet.

Des échanges individuels avec les agriculteurs absents aux réunions ont été menés tout au long du processus. Les plans construits à l'issue de ces réunions et entretiens ont été implémentés dans le modèle MIKE SHE afin d'en évaluer les effets (sur les pluies et les sécheresses) et de le comparer au modèle qui représente la situation actuelle.

1. Première réunion : présentation du cadre du projet, retour sur les entretiens réalisés et découverte des aménagements envisageables à partir d'un plan d'inspiration initial élaboré par l'Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.
2. Deuxième réunion : atelier de co-construction visant à élaborer un plan d'aménagement à la fois ambitieux sur le plan hydrologique et adapté aux réalités du terrain.
3. Troisième réunion : présentation des résultats de la modélisation, derniers ajustements du plan et proposition d'un cadre de convention pour le maintien des aménagements.
4. Les exploitants agricoles et les propriétaires des parcelles concernées ont été consultés individuellement et ont donné leur accord écrit sur le plan d'aménagement co-construit, avec possibilité d'ajustement si nécessaire pour tenir compte de leurs retours respectifs.
5. Quatrième réunion : présentation du plan final et signature d'un engagement formel des agriculteurs et des propriétaires concernant la mise en œuvre et l'entretien des aménagements. Un moment convivial de clôture a ensuite été organisé.

3.3.1.2. Habitants

Le bassin versant de Manihant-Ourcy compte environ 500 habitations. Au début du projet, un courrier a été envoyé aux habitants afin de les informer du lancement de la démarche. Une réunion d'information a ensuite été organisée afin de présenter plus en détail les objectifs et le déroulement du projet. Une liste de contacts des habitant-es souhaitant suivre le projet a été constituée à cette occasion.

Deux évènements de sensibilisation ont ensuite été organisés à destination des habitants :

1. Une balade thématique abordant les questions liées aux eaux de pluie, au fonctionnement du bassin versant, aux inondations, à la gestion des eaux usées et à la gestion de l'eau à la parcelle ;
2. Une soirée d'information présentant des actions concrètes pouvant être mises en œuvre par les habitants afin d'améliorer la gestion de l'eau sur leur propriété.

L'objectif de ces rencontres était d'identifier des habitants intéressés par la mise en place d'aménagements de gestion des eaux pluviales à la parcelle. Deux situations concrètes ont ainsi pu être identifiées.

3.3.1.3. La commune

Le bassin versant de Manaihan-Ourcy comprend principalement des voiries communales, dont les deux axes principaux sont la rue de Manaihan et le Thier Martin. Il comprend également plusieurs ruelles (rue de France, rue des Soupirs, rue de la Chocolaterie, etc.) ainsi qu'une portion de voirie régionale (rue de Verviers) en bordure du bassin versant.

Dans les scénarios théoriques de modélisation, des noues avaient été implantées tout au long du Thier Martin et de la rue de Manaihan. À partir de ce scénario, qui ne tenait pas compte des contraintes locales, l'objectif était d'identifier, avec la commune, les aménagements réellement envisageables.

Deux réunions ont ainsi été organisées avec les services communaux : une première pour présenter les propositions d'aménagement et une seconde sur le terrain afin d'évaluer concrètement leur faisabilité.

3.3.2. Pierreuchamps-Chawieumont

Pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont, les informations liées au cadastre (liste des propriétaires de la zone) et au SIGEC (liste des agriculteurs exploitants de la zone) ont été difficiles à obtenir. Le processus a donc été simplifié.

3.3.2.1. Agriculteurs et propriétaires de parcelles agricoles

Il y a 11 exploitations déclarantes au SIGEC pour le bassin versant de Pierreuchamps-Chawieumont. Un courrier présentant le projet aux exploitants a été envoyé.

3.1.1.1. Habitants

Une balade de sensibilisation aux enjeux liés à la gestion de l'eau à la parcelle, à l'hydrologie régénérative ainsi qu'aux inondations, est prévue.

3.3.3. Statte

Le processus de concertation est relativement simple sur le bassin versant de la Statte en raison du nombre limité d'acteurs concernés. La commune de Jalhay est le principal propriétaire des terrains, tandis que la gestion des espaces forestiers est assurée par le SPW-DNF. Le bassin versant comprend également trois parcelles privées.

Dans le cadre du projet, la commune a envoyé un courrier de présentation aux propriétaires du bassin versant. Une réunion de présentation a également été organisée avec les représentants de la commune de Jalhay. Par ailleurs, plusieurs visites de terrain ont été réalisées avec le SPW-DNF, permettant de mieux comprendre leur vision et leur philosophie en matière d'aménagement des cours d'eau et des milieux naturels. Ces échanges ont constitué une source d'inspiration importante pour l'élaboration du plan d'aménagement.

4. MODÉLISATION

L'analyse s'appuie sur une modélisation hydrologique de chaque TIH réalisée à l'aide du modèle MIKE SHE, développé par l'Institut hydraulique danois (DHI). MIKE SHE est un modèle hydrologique intégré, physiquement basé et entièrement distribué. À partir de données d'entrée spatio-temporelles décrivant le climat, la topographie, l'occupation du sol, les sols et la géologie, le modèle simule les principaux processus du cycle hydrologique, tels que l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration, les écoulements souterrains et les écoulements de surface. Cette approche permet de représenter la variabilité spatiale des processus hydrologiques et d'analyser leurs interactions au sein des TIH étudiés (Figure 37).

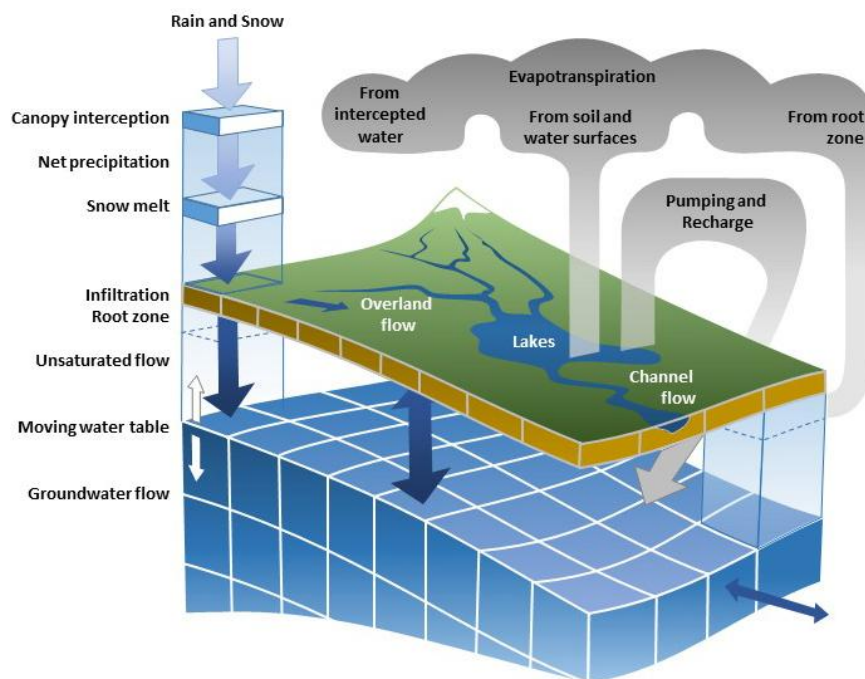


Figure 37 : Schéma des processus hydrologiques modélisés par MIKE SHE (DHI).

Contrairement à l'analyse réalisée à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Vesdre, les modèles développés pour les TIH reposent sur une résolution spatiale plus fine permettant de représenter explicitement les aménagements envisagés dans le cadre de l'hydrologie régénérative. Cette approche offre la possibilité d'évaluer l'impact de différentes mesures, telles que les ouvrages de rétention, les modifications de la microtopographie, les aménagements forestiers ou les dispositifs agroécologiques, sur les processus de stockage, d'infiltration et de transfert de l'eau.

Les résultats présentés dans cette seconde partie visent ainsi à évaluer le potentiel des mesures d'hydrologie régénérative, à identifier les configurations les plus efficaces et à fournir des éléments d'aide à la décision pour leur déploiement opérationnel.

4.1. Données d’entrée du modèle

Cette partie présente la constitution des données d'entrée du modèle, organisée selon ses différents modules : domaine (topographie et emprise), climat, végétation, surface, sols et sous-sols. Les données spatiales collectées, de résolutions initiales variables, ont été agrégées ou rééchantillonnées pour correspondre à la maille finale de 5 ou 10 m (selon le TIH). Le modèle fonctionne avec un pas de temps horaire.

4.1.1. Domaine

Le domaine MIKE SHE est représenté par une grille de mailles carrées dont l'emprise et la résolution doivent être définies. L’emprise est déterminée par les contours du bassin versant, tracés à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) et de la position d’un exutoire. La résolution spatiale est déterminée en fonction de la finesse souhaitée pour la description des processus hydrologiques et influence les temps de calcul des simulations numériques.

Résolution

La résolution spatiale est définie selon la superficie du bassin versant et la résolution des données d’entrée (Tableau 7), visant un compromis entre le niveau de détail attendu des résultats et le temps de calcul. En effet, l’augmentation du nombre de mailles accroît exponentiellement le coût de calcul. Ce dernier varie également selon les scénarios modélisés ; la présence de noues, par exemple, favorise l'accumulation d'eau en surface et allonge la durée des simulations.

Tableau 7 : Caractéristiques des domaines de modélisation par TIH.

TIH	Superficie du TIH (km ²)	Taille des mailles (m)	Nombre de mailles	Résolution temporelle (h)	Période simulée (hors chauffe)
Manaihant-Ourcy	2,2	5	177 926	1	01/01/2018- 31/08/2024
Pierreuchamps- Chawieumont	0,7	5	30 002	1	01/05/2005- 01/09/2024
Statte	3,7	10	39 811	1	01/01/2012- 01/09/2024

Topographie

Dans le cadre de ce projet, deux sources de données topographiques sont utilisées :

- Le MNT LIDAXES (version 2) : un modèle numérique de terrain hydrologiquement corrigé, à une résolution de 2 m, issu du produit « [LIDAXES \(version 2\) - MNT](#) » ;
- Le MNT LiDAR 2013-2014 : un modèle numérique de terrain à haute résolution (1 m), issu du produit « [Relief de la Wallonie – Modèle Numérique de Terrain \(MNT\) 2013–2014](#) ».

Ces deux jeux de données sont combinés afin de corriger les discontinuités présentes dans les données MNT LIDAXES, notamment dans les zones où l'écoulement est interrompu (zones karstiques, carrières, etc.). Les lacunes sont comblées à l'aide des valeurs issues du MNT LiDAR 2013-2014. Le résultat est un MNT continu, cohérent sur le plan hydrologique et couvrant l'ensemble du bassin versant de la Vesdre, avec une résolution finale de 2 m.

Les données topographiques sont ensuite rééchantillonnées. Ce rééchantillonnage repose sur une fonction d'agrégation qui sélectionne la valeur d'altitude minimale au sein de chaque fenêtre de calcul. Cette méthode permet de préserver au maximum les corrections hydrologiques intégrées au MNT LIDAXES, garantissant ainsi la cohérence hydraulique des MNT.

4.1.2. Climat

Les données climatiques d'entrée du modèle comprennent les précipitations horaires (mm h^{-1}) et l'évapotranspiration de référence au pas de temps journalier (mm j^{-1}).

Précipitations

Les données de précipitations proviennent de la combinaison de deux sources :

- Les précipitations journalières de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) d'une résolution de 5 km, issus du produit « [Gridded observational data](#) » ;
- Les enregistrements horaires du réseau de surveillance pluviométrique du Service public de Wallonie (SPW), issus du produit « [L'Hydrométrie en Wallonie](#) ».

Cette combinaison permet de désagréger les précipitations journalières de l'IRM à un pas de temps horaire, en s'appuyant sur les dynamiques horaires mesurées par les stations du SPW. Les données ainsi reconstruites couvrent la période allant du 1^{er} janvier 2002 (début du suivi contrôlé par le SPW) au 1^{er} septembre 2024. Pour chaque maille IRM, un ou plusieurs pluviomètres du SPW sont associés selon une grille de répartition spatiale construite par polygonation de Thiessen. Cette grille évolue dans le temps pour refléter les modifications du réseau de pluviographes du SPW.

L'Equation (15) synthétise le principe de calcul de la précipitation horaire au sein d'une maille i de la grille IRM, à partir d'un pluviomètre j du réseau du SPW. La précipitation à l'heure h ($PIRM_{i,d,h}$) est donc la précipitation journalière (jour d) telle que fournie par l'IRM ($PIRM_{i,d}$), multipliée par la précipitation observée à l'heure h par le pluviomètre j du SPW ($P_{j,h}$), puis divisée par la somme de la précipitation journalière observée ce même jour par le pluviographe du SPW. Si plusieurs polygones de Thiessen recouvrent une même maille IRM, une pondération est appliquée selon leur emprise relative.

$$PIRM_{i,d,h} = \frac{P_{j,h}}{\sum_{h=24}^{h=0} P_{j,h}} * PIRM_{i,d} \quad (15)$$

Evapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est directement fournie par l'IRM. Elle est estimée à l'aide de l'équation de Penman–Monteith, à partir des observations météorologiques du réseau de mesure (température, humidité, vitesse du vent et rayonnement). Ces données sont disponibles au pas de temps journalier et à une résolution spatiale de 5 km.

4.1.3. Occupation du sol et végétation

L'occupation du sol est utilisée pour représenter la variabilité spatiale de la végétation dans les modèles. Trois paramètres biophysiques liés à la végétation sont décrits :

- L'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index* – LAI , $m^2 m^{-2}$) ;
- Le coefficient cultural (K_c , -) ;
- La profondeur racinaire (R_d , cm).

Ces paramètres varient au cours de l'année et permettent de convertir l'évapotranspiration de référence, en évapotranspiration réelle, en tenant compte de la teneur en eau du sol, selon l'approche de Kristensen et Jensen (1975).

Les données d'occupation du sol proviennent du produit « [LifeWatch - Land Cover 2022](#) ». Il s'agit d'un raster de 2 m de résolution, dont les 13 classes d'occupation du sol initiales (2022) ont été regroupées en 7 classes de végétation (Tableau 8). Chaque type de végétation se voit attribuer une dynamique annuelle de ces trois paramètres biophysiques (Tableau 23 ; Figure 102, Annexe A.1). Ces trajectoires permettent de modéliser de manière réaliste l'évolution saisonnière de la végétation, et se traduisent par des cartes à 2 m de résolution décrivant la dynamique annuelle de chaque paramètre au pas de temps journalier. Les valeurs sont ensuite agrégées à la résolution finale du modèle (5 ou 10 m) par moyenne spatiale.

Concernant les cultures, les prairies permanentes sont considérées comme des surfaces de production ouvertes, tandis que la majorité des terres arables sont supposées être cultivées en maïs. En l'absence de données précises sur les pratiques agricoles locales, aucune rotation culturale n'est modélisée à ce stade. Pour le TIH de Jalhay, une huitième classe a été créée, la forêt mixte, reprenant la dynamique d'un peuplement de feuillus au cours de l'année et en pondérant les variables biophysiques d'un peuplement de feuillus et de conifères.

Tableau 8 : Correspondance entre la classification LifeWatch et la classification hydrologique utilisée dans la modélisation des TIH.

Classification LifeWatch	Classification hydrologique
Eau de surface	Pas de végétation
Surfaces naturelles minérales avec couverture végétale < 10 %	Pas de végétation
Surfaces artificiellement imperméabilisées	Pas de végétation
Bâtiments, structures et infrastructures spécifiques	Pas de végétation
Formations herbacées en rotation annuelle (e.g., cultures)	Cultures
Prairies à gestion intensive	Prairies intensives
Prairies et fourrés d'intérêt biologique	Prairies biologiques
Végétation de zones récemment perturbées (e.g., coupe rase)	Prairies biologiques
Prairies inondables et fourrés d'intérêt biologique	Zones humides
Peuplements résineux adultes (≥ 3 m)	Conifères
Jeunes peuplements résineux (< 3 m)	Conifères
Peuplements feuillus adultes (≥ 3 m)	Feuillus
Jeunes peuplements feuillus (< 3 m) et arbustes	Feuillus

4.1.4. Données hydrauliques de surface

Le modèle MIKE SHE requiert l'implémentation de deux paramètres hydrauliques liés à la surface :

- Le coefficient de rugosité de Manning (n , $m^{1/3} s^{-1}$) ;
- Le stock de rétention superficielle (mm).

Le premier correspond à la rugosité de surface et détermine la résistance à l'écoulement de l'eau. Le second correspond à la hauteur d'eau maximale que la rugosité de surface peut retenir au début d'une pluie, avant le début de l'écoulement. Ces deux paramètres sont spatialisés à partir de la carte d'occupation du sol LifeWatch 2022, en attribuant des

valeurs propres à chacune des 13 classes de couverture (Tableau 24, Annexe A.2). Les valeurs ainsi obtenues sont ensuite rééchantillonnées à la résolution finale du modèle, en calculant la moyenne spatiale pour chaque maille.

4.1.5. Sols dans la zone saturée

Les écoulements saturés sont modélisés à l'aide de l'équation de Darcy en 3D. Pour cela, il est nécessaire de définir les valeurs de conductivité hydraulique verticale ($K_{s,V}$) et horizontale ($K_{s,H}$) du sous-sol. Dans ce projet, le sous-sol est représenté par une couche unique dont les propriétés de conductivité verticale et horizontale peuvent varier en fonction de la nature géologique. Chaque unité homogène du sous-sol se voit attribuer un code spécifique, appelé « géocode ». La donnée, une résolution de 1 km (Figure 5), est rééchantillonnée aux résolutions spécifiques de chaque TIH. Ces données cartographiques du socle rocheux ont été établies dans le cadre du projet de cartographie hydrogéologique de la Wallonie, notamment pour le développement du modèle EPICgrid (GxABT-SPW). Les propriétés hydrauliques associées à chaque géocode sont définies en annexe, dans le Tableau 25. Ces valeurs ont été ajustées dans le cadre du projet ModRec – Vesdre (Degré et al., 2024).

4.1.6. Sols dans la zone non saturée

Les écoulements dans la zone non saturée sont formalisés par l'équation de Richards en 1D (Richards, 1931), couplée au modèle de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980; Mualem, 1986) pour la représentation explicite des propriétés hydrauliques des sols. La configuration de ce module repose sur trois étapes illustrées ci-dessous :

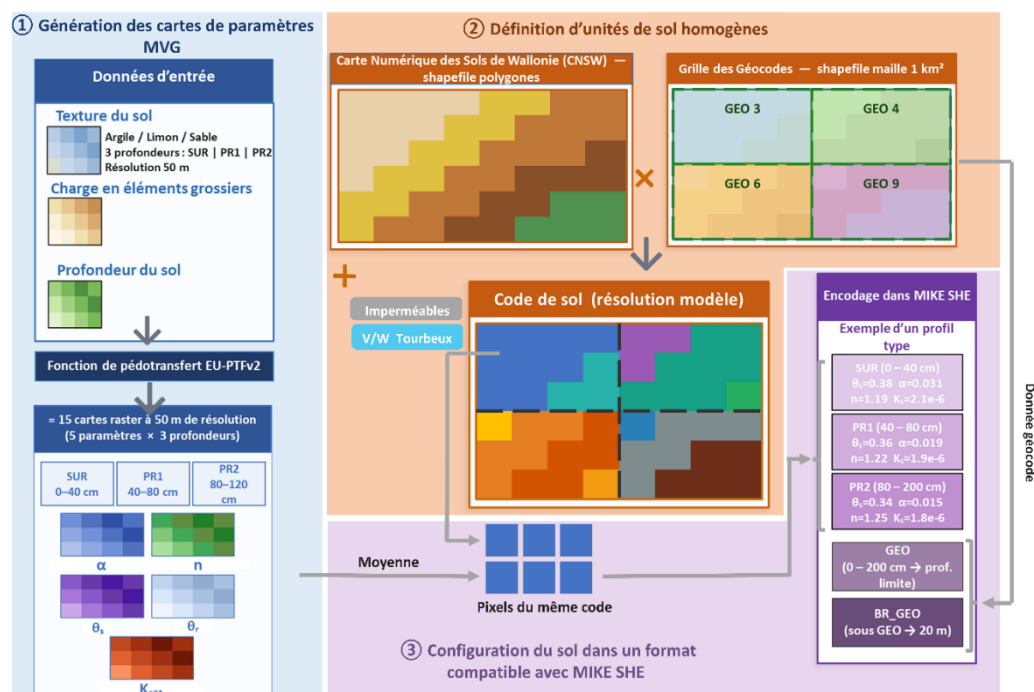


Figure 38 : Schéma de la méthodologie de paramétrisation des sols dans MIKE SHE.

4.1.6.1. Génération des cartes des propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques du sol, i.e., la courbe de rétention du sol ($\theta(h)$) et la courbe de conductivité hydraulique du sol ($K(h)$ ou $K(S_e)$), sont définies selon le modèle de van Genuchten-Mualem (MVG) (van Genuchten, 1980; Mualem, 1986) :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (16)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (17)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (18)$$

où h désigne la charge matricielle (cm), θ_s et θ_r sont, respectivement, les teneurs en eau à saturation et résiduelle (-), α est un paramètre lié à l'inverse du point d'entrée d'air (cm^{-1}), n caractérise la distribution de la taille des pores (-), et m définit la forme de la courbe de rétention ($m = 1 - \frac{1}{n}$), K_s est la conductivité hydraulique à saturation (cm jour^{-1}), et S_e désigne la saturation effective (-).

Les propriétés hydrauliques ont été estimées via la fonction de pédotransfert EU-PTFv2 (Szabó et al., 2021), en utilisant les fractions texturales et la profondeur comme prédicteurs (étape 1 de la Figure 38). Cette fonction de pédotransfert est intégrée dans une librairie R nommée [euptf2](#).

Texture du sol

Les données texturales proviennent de la carte « [Textures et fractions granulométriques de référence des sols de Wallonie](#) », qui fournit les teneurs en argile (0-2 μm), en limon (2-50 μm) et en sable (50-2000 μm) à trois profondeurs (surface, 40-80 cm et 80-120 cm), avec une résolution de 50 m (Figure 39). Les discontinuités spatiales sont comblées par une interpolation selon la méthode de pondération inverse à la distance (PID) :

$$V(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{V_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i^p}}, \quad (19)$$

où $V(x_0)$ est la valeur interpolée au point de coordonnées x_0 , k représente le nombre de points connus utilisés pour l'interpolation (fixé à 8), V_i est la valeur mesurée au point i , et d_i est la distance entre le point inconnu x_0 et le point i . Le paramètre p contrôle l'in-

fluence relative des points voisins i sur x_0 : pour $p=1$, l'influence d'un point est inversement proportionnelle à sa distance d_i , tandis que pour $p=2$, l'influence est inversement proportionnelle au carré de cette distance. Dans ce travail, le paramètre p est fixé à 1.

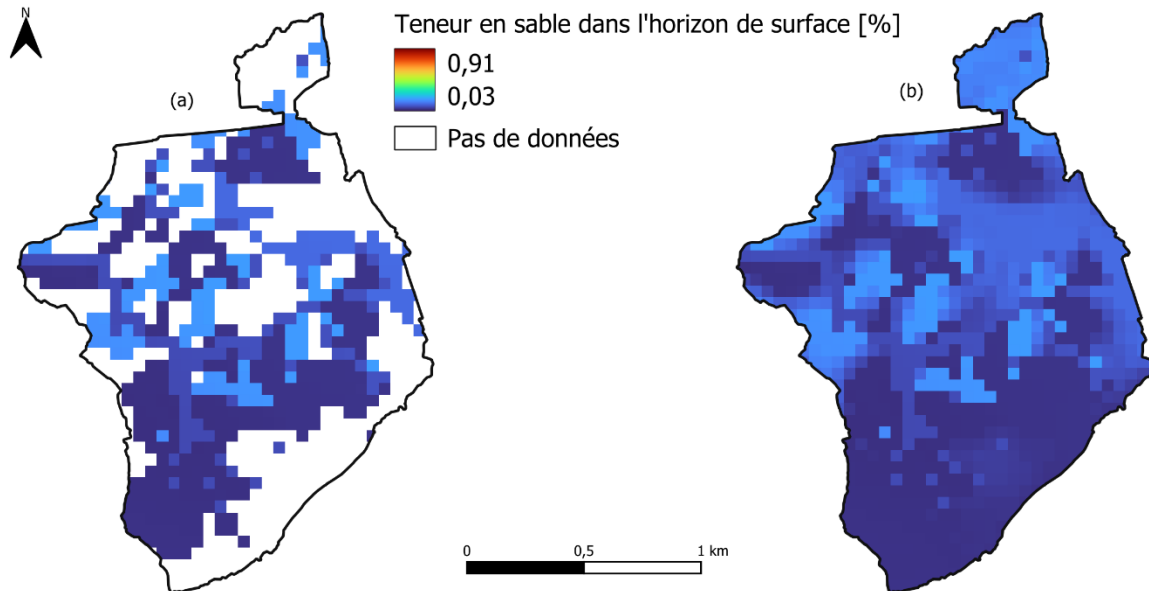


Figure 39 : Carte des teneurs en sable (50-2000 µm) dans l'horizon de surface (0-40 cm) sur Mainihant-Ourcy (résolution de 50 m) : (a) données brutes, (b) données extrapolées.

Charge en éléments grossiers

La charge en éléments grossiers (>2000 µm) n'est pas reprise dans la carte des textures, et n'est pas explicitement prise en compte dans la fonction de pédotransfert EU-PTFv2. Or, celle-ci influence directement la porosité effective du sol. Les valeurs obtenues de θ_s sont donc ajustées ($\theta_{s,corr}$) selon la relation suivante :

$$\theta_{s,corr} = \theta_s (1 - C) \quad (20)$$

où θ_s est la teneur en eau à saturation non corrigée, et C est la fraction volumique d'éléments grossiers (comprise entre 0 et 1).

Cette information est déduite de la légende de la « [Carte Numérique des Sols de Wallonie](#) » (CNSW), qui distingue quatre classes de charge caillouteuse :

- 0 : non caillouteux (0-5 %)
- 1 : peu caillouteux (5-15 %)
- 2 : caillouteux (15-50 %)
- 3 : très caillouteux (> 50 %)

Les polygones de la CNSW sont rééchantillonnés sur la même grille que la carte des textures par agrégation, en attribuant à chaque maille la classe majoritaire (Figure 40). Une interpolation spatiale est ensuite appliquée via l'algorithme PID ($p=1$; Equation (19)).

À chaque classe est associée une fraction volumique spécifique dépendant de la profondeur (Tableau 9) sous l'hypothèse d'une augmentation de la charge caillouteuse avec la profondeur.

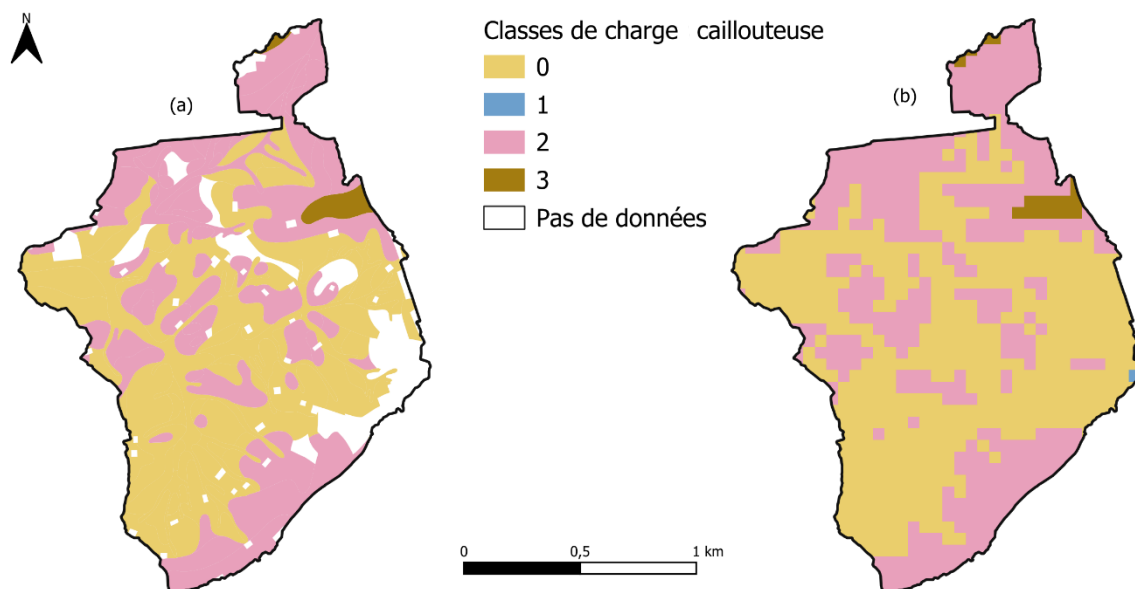


Figure 40 : Carte des classes de charge caillouteuse sur Manihant-Ourcy (résolution de 50 m) : (a) données brutes selon la CSNW, (b) données extrapolées.

Tableau 9 : Classes de charge en éléments grossiers et fractions volumiques (-) associées en fonction de la profondeur (SUR : 0-40 cm, PR1 : 40-80 cm, PR2 : 80-120 cm).

Profondeur (cm)	Fraction volumique (-)			
	Classes de charge caillouteuse			
	0	1	2	3
0-40 (SUR)	0,00	0,05	0,20	0,50
40-80 (PR1)	0,00	0,10	0,30	0,60
80-120 (PR2)	0,00	0,15	0,40	0,70

4.1.6.2. Configuration des profils de sol dans MIKE SHE

Le module de la zone non saturée nécessite l'attribution d'un profil vertical de propriétés hydrauliques à des unités de sol homogènes dans le domaine modélisé, jusqu'à une profondeur de 20 m.

Définition des unités de sol homogènes

La définition des unités de sol homogènes repose sur le croisement spatial entre les polygones rastérisés de la CSNW et les géocodes (étape 2 de la Figure 38). Un traitement

spécifique est appliqué aux sols tourbeux, correspondant aux textures V (tourbe inactive) et W (tourbe active), ainsi qu'aux surfaces imperméabilisées identifiées à partir de la carte d'occupation du sol, qui sont considérés comme des unités distinctes.

Chaque combinaison unique entre un type de sol et un géocode se voit attribuer un code spécifique (unité de sol homogène). La carte ainsi obtenue est ensuite rééchantillonnée sur la grille finale du modèle à l'aide d'une agrégation majoritaire, qui attribue à chaque maille du modèle le code le plus représenté au sein de celle-ci.

Agrégation des propriétés hydrauliques du sol

Une fois les unités de sol homogènes définies, un profil de sol aux propriétés hydrauliques uniques est construit pour chacune d'elles (étape 3 de la Figure 38). Les propriétés hydrauliques des horizons superficiels (0–2 m) sont issues des cartes distribuées des paramètres de van Genuchten-Mualem générées à partir des données pédologiques, tandis que les horizons plus profonds (2–20 m) sont décrits à partir des géocodes. Pour chacun des horizons du profil, une moyenne spatiale des paramètres est calculée sur l'ensemble des pixels appartenant à une même unité de sol homogène. Ainsi, toutes les mailles d'une même unité sont caractérisées par un profil vertical identique. Cette construction suppose toutefois que le sol soit suffisamment profond pour atteindre 2 m : lorsque ce n'est pas le cas (sols de moins de 40 cm ou entre 40 et 80 cm de profondeur), le profil pédologique est tronqué et le géocode prend le relais jusqu'en bas du profil.

4.1.6.3. Cas particuliers

Sols tourbeux

Les sols tourbeux (V et W) font l'objet d'une paramétrisation spécifique. Les fonctions de pédotransfert classiques étant inadaptées aux sols organiques, les propriétés hydrauliques ont été déterminées à partir de mesures de terrain et de données bibliographiques.

Les propriétés de la courbe de rétention ont été caractérisées à partir de mesures réalisées entre 2012 et 2014 dans les tourbières des bassins versants de Deux-Séries et de Cléfaye, dans le cadre du projet « Recherche d'intérêt général portant sur la mise en place d'un système d'évaluation des mesures de restauration hydrique dans les tourbières hautes de Haute Ardenne et de leurs impacts sur la prévention des inondations (plan P.L.U.I.E.S.) ». La conductivité hydraulique à saturation a quant à elle été estimée à partir des valeurs synthétisées par Morris et al. (2022) pour les tourbières de l'hémisphère nord, en suivant un gradient décroissant avec la profondeur.

Sols imperméabilisés

La paramétrisation des unités de sol homogènes correspondant aux surfaces artificialisées repose sur les hypothèses suivantes : une conductivité hydraulique quasi nulle et une très faible porosité sur les deux premiers mètres sous la surface.

4.1.7. Rivière

Le modèle hydrologique MIKE SHE est couplé au modèle hydraulique instationnaire 1D MIKE+ afin de représenter les écoulements au sein du réseau hydrographique. Bien que ce module ne constitue pas l'objet principal de l'étude, il est nécessaire pour assurer le transfert des écoulements de surface vers l'exutoire du bassin versant. Il est également employé pour la modélisation de structures hydrauliques de stockage ou de rétention d'eau.

Le réseau hydrographique a été intégré jusqu'à une aire contributive comprise entre 4,5 et 20 ha selon le TIH. Il est représenté par une succession de tronçons de cours d'eau auxquels sont associées des sections transversales générées automatiquement à partir du MNT, avec un espacement moyen d'environ 100 m. Une valeur uniforme du coefficient de Manning ($n = 10 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ pour Manahant-Ourcy et Pierreuchamps-Chawieumont ; $n = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ pour la Statte) a été attribuée à l'ensemble du réseau hydrographique.

Aucune donnée topo bathymétrique détaillée n'a été utilisée pour la définition des sections. Ce choix s'explique par l'objectif du modèle, qui vise principalement à assurer un routage cohérent des écoulements et non à reproduire précisément les niveaux d'eau dans les chenaux. Par ailleurs, les bassins versants étudiés étant situés dans des secteurs amont du réseau hydrographique, les écoulements y sont généralement limités aux périodes humides et aux épisodes de crue, rendant l'utilisation d'un MNT classique pertinente dans ce cadre.

4.2. Données de sortie du modèle

Les résultats produits par le modèle couvrent un large éventail de variables hydrologiques, parmi lesquelles :

- Les débits simulés aux exutoires et aux points de contrôle internes ;
- Les niveaux piézométriques et les teneurs en eau du sol, qui permettent d'évaluer la dynamique des échanges entre les compartiments de surface et souterrains ;
- Les composantes du bilan hydrique (précipitations, évapotranspiration, infiltration, ruissellement, recharge de nappe), disponibles à des pas de temps et des résolutions spatiales définis par l'utilisateur ;
- Des cartes spatialisées illustrant la distribution des variables clés (infiltration, humidité, écoulement de surface, etc.), essentielles pour identifier les zones à fort potentiel d'infiltration ou, au contraire, sujettes au ruissellement.

4.3. Calibration et validation des modèles

La validation de modèles hydrologiques repose classiquement sur la comparaison entre les débits simulés et les débits observés aux exutoires des bassins versants, à partir des mesures issues de stations limnimétriques. Cette approche permet d'évaluer la cohérence globale du comportement hydrologique simulé. L'absence de telles données à l'échelle des TIH n'a malheureusement pas permis de réaliser cet exercice de manière formelle.

Deux éléments permettent néanmoins de garantir un niveau minimal de confiance dans les simulations. D'une part, la méthodologie de construction des modèles hydrologiques des TIH est identique à celle mise en œuvre pour le bassin versant de la Vesdre (cf. Partie I), lequel a fait l'objet d'une calibration et d'une validation détaillées (cf. Section 4.1). Cette cohérence méthodologique garantit une homogénéité dans la représentation des processus hydrologiques entre les différents modèles développés dans le cadre du projet. D'autre part, l'analyse repose sur une approche comparative par scénarios. Ce sont les différences relatives entre une situation de référence et différents scénarios d'aménagement qui sont évaluées, et non les valeurs absolues simulées. L'exactitude de la représentation de la situation actuelle revêt donc une importance moindre.

Il convient toutefois de souligner que l'instrumentation des TIH demeure une priorité pour la suite. Une instrumentation adaptée permettrait non seulement de calibrer et de valider les modèles de manière plus rigoureuse, mais également d'évaluer sur le terrain l'efficacité réelle des aménagements mis en œuvre. Ces observations contribueraient à améliorer la représentation des SFN dans les modèles hydrologiques et à renforcer la confiance accordée aux simulations.

4.4. Modélisation de la situation actuelle

Pour chaque TIH, un modèle de référence est développé afin de simuler la situation actuelle (occupation du sol de 2022). Selon les spécificités de chaque site, divers processus physiques et manipulations de données sont intégrés pour reproduire fidèlement la réalité du terrain. Ce modèle initial sert ensuite de base comparative pour les différents scénarios prospectifs. Afin de garantir la cohérence stricte de ces comparaisons, tous les scénarios partagent rigoureusement la même résolution spatiale, le même réseau hydraulique et les mêmes paramètres généraux de configuration du modèle MIKE SHE.

4.4.1. Topographie

L'agrégation à une résolution plus grossière (5 ou 10 m) d'un MNT initial de 2 m engendre un lissage des singularités topographiques et modifie localement les axes d'écoulement. Ce biais méthodologique a rendu nécessaires des ajustements topographiques spécifiques pour Pierreuchamps-Chawieumont et la Statte.

Pour Pierreuchamps-Chawieumont, les axes de ruissellement longeant la chaussée de Verviers n'étaient pas intégralement restitués et se trouvaient déviés en dehors du périmètre d'étude. Afin de les rétablir, le tracé de la voirie a été intégré dans le MNT agrégé. Le profil altimétrique a été extrait le long de l'axe de la chaussée, puis corrigé de manière à supprimer les remontées artificielles générées par l'agrégation et à imposer une décroissance continue de l'amont vers l'aval. Le terrain immédiatement adjacent est légèrement relevé si les pixels de chaussée corrigés ne constituent pas partout le point bas local (en D8).

Dans le bassin versant de la Statte, la dynamique des flux de surface dépend fortement de nombreux fossés bordiers. Cependant, ces structures d'environ 1 m de large ont été effacées lors du passage à la maille de 10 m. Afin de garantir un cheminement réaliste de l'eau, ce réseau de fossés a dû être réincisé numériquement après l'étape d'agrégation. Le tracé de ces corrections a été défini et affiné sur la base de campagnes de terrain et en collaboration avec le DNF.

4.4.2. Drainage artificiel

L'objectif principal du drainage artificiel des sols est d'abaisser le niveau de la nappe phréatique jusqu'à une profondeur cible, en évacuant l'eau via des drains, afin de rendre les sols exploitables pour les usages agricoles ou forestiers. La représentation des drains a été utilisée pour le TIH de Manihant-Ourcy et de la Statte.

Le drainage souterrain peut être simulé par MIKE SHE en faisant intervenir une condition limite supérieure conceptuelle dans le module de la zone saturée. Le flux d'eau drainé, q (m s⁻¹) dans chaque maille est calculé par l'Equation (21).

$$q = (h - Z_{dr}) \times C_{dr} \quad (21)$$

où h est le niveau piézométrique de la nappe (m), Z_{dr} est le niveau souhaité de la nappe (m). Le flux d'eau est nul si le niveau de la nappe (h) est inférieur au niveau souhaité (Z_{dr}). C_{dr} (s⁻¹) est une constante de temps contrôlant la réactivité du système de drainage. Elle dépend de divers facteurs comme l'espacement entre les drains, ou la perméabilité du sol. Ces constantes, implémentées dans les modèles, sont définies dans le Tableau 10. L'eau drainée est instantanément redirigée depuis la maille concernée vers la branche du réseau hydrographique (du module hydraulique MIKE+) ayant la distance euclidienne la plus proche.

Pour Manihant-Ourcy, le modèle initial intègre le réseau de drainage artificiel identifié sur le terrain par les exploitants agricoles. Pour le TIH de la Statte, des parcelles actuellement ou historiquement drainées ont également été prises en compte, la présence de fossés associés ayant été mise en évidence par l'analyse des données topographiques.

Tableau 10 : Paramètres de drainage artificiel dans la zone saturée pour les TIH de Manihant-Ourcy et de la Statte.

TIH	Profondeur de drainage par rapport à la surface	Constante de temps d'écoulement
	(m)	c_{dr} (s ⁻¹)
Manihant-Ourcy	-0,5	10 ⁻⁷
Statte	-0,2	10 ⁻⁷

4.4.3. Infrastructures hydrauliques

Les zones de stockage temporaire ou de régulation des écoulements sont représentées dans MIKE+ au moyen d'ouvrages hydrauliques associés au réseau hydrographique. Chaque ouvrage est raccordé à une branche du réseau hydraulique et équipés d'un système de régulation composé d'un déversoir (*weir*) et d'un ajutage (*culvert*), permettant de contrôler la restitution des volumes stockés vers l'aval. Les cotes du déversoir et de l'ajutage sont définies à partir de la topographie locale de manière à assurer le stockage temporaire des écoulements tout en limitant les débits restitués vers l'aval.

Pour Manihant-Ourcy, afin de représenter le bassin d'orage, les données bathymétriques relevées fin 2023 ont été mises à disposition par le SPW Mobilité et Infrastructures. Le tuyau d'ajutage est un tuyau DN600. Ces données sont intégrées sur la branche du réseau correspondante via les outils *Weir* et *Culvert* dans MIKE+.

Certaines sections du réseau hydrographique sont canalisées en souterrain dans la réalité, notamment les chemins Pierreuchamps et Chawieumont ainsi que le tronçon traversant la zone humide en aval du futur site de la station d'épuration de Manihant-Ourcy. Par souci de simplification, et à défaut d'informations techniques précises, ces sections ont été représentées dans MIKE+ comme des canaux à ciel ouvert, ce qui constitue une limite du modèle à prendre en compte dans l'interprétation des résultats locaux.

4.5. Modélisation des SFN dans MIKE SHE

4.5.1. Principes

L'intégration des solutions fondées sur la nature dans le modèle repose sur la modification des données d'entrée de MIKE SHE et, lorsque nécessaire, sur l'ajout de structures hydrauliques spécifiques dans MIKE+. Les aménagements sont ainsi représentés par des modifications de la topographie, de l'occupation du sol et de la végétation (Manning, capacité de stockage de surface, LAI , R_d , K_c) ou des propriétés hydrodynamiques du sol (θ_s , K_s). L'ensemble des valeurs attribuées à ces paramètres pour la représentation des SFN dans le modèle est synthétisé dans le Tableau 11.

Afin d’assurer une représentation cohérente des aménagements dans le modèle, deux hypothèses clés sont adoptées. Premièrement, les aménagements sont implémentés à un stade de maturité fonctionnelle complète ; les phases transitoires de mise en place et de croissance, notamment pour les aménagements végétalisés tels que les haies, ne sont pas représentées. Deuxièmement, certaines mesures de gestion concernent des zones dont l’étendue spatiale est inférieure à la résolution de la maille du modèle. Afin de tenir compte de leur occupation partielle des mailles, les paramètres modifiés par ces aménagements sont systématiquement rééchelonnés au prorata de la surface réelle occupée selon la relation suivante :

$$P_{\text{ajusté}} = \frac{S_{\text{aménagement}}}{S_{\text{maille}}} \times P_{\text{aménagement}} + \left(1 - \frac{S_{\text{aménagement}}}{S_{\text{maille}}}\right) \times P_{\text{initial}} \quad (22)$$

où $P_{\text{ajusté}}$ est la valeur du paramètre attribuée à la maille, $P_{\text{aménagement}}$ la valeur associée à l'aménagement, P_{initial} la valeur initiale du paramètre, $S_{\text{aménagement}}$ la surface occupée par l'aménagement dans la maille et S_{maille} la surface totale de la maille.

Dans le cas des paramètres modifiés par l'application d'un coefficient multiplicatif (ω), la valeur associée à l'aménagement est définie par :

$$P_{\text{aménagement}} = \omega \times P_{\text{initial}} \quad (23)$$

Cette formulation est utilisée pour la modification des paramètres hydrodynamiques du sol (θ_s , K_s). Les sols tourbeux et para-tourbeux (classes V et W) ainsi que les surfaces imperméabilisées identifiées par la carte d'occupation du sol LifeWatch 2022 sont exclus de ces modifications, sauf lorsque l'aménagement prévoit explicitement une désimpermeabilisation.

Les aménagements nécessitant une régulation hydraulique ou un stockage temporaire des écoulements sont quant à eux représentés dans MIKE+ par l'ajout d'ouvrages spécifiques tels que des déversoirs, des ajutages ou des zones de débordement (*Flood Codes*). Les principes de représentation propres à chaque aménagement sont décrits dans la section suivante.

4.5.2. Aménagements en contexte agricole

4.5.2.1. Éléments linéaires

Haies

Les haies sont représentées par une modification de l'occupation du sol vers la classe « Jeunes peuplements feuillus (< 3 m) et arbustes ». Les paramètres de végétation (LAI , R_d , K_c) ainsi que les paramètres de surface (coefficient de Manning, stock de rétention)

sont ajustés en fonction de leur emprise surfacique selon l'Equation (22). Afin de représenter l'amélioration de la structure du sol liée au développement racinaire et à l'activité biologique, θ_s est augmentée de 20 % et K_s est multipliée par deux sur les 80 premiers centimètres du profil selon l'Equation (23).

Noues

Les noues agricoles sont représentées par un abaissement local de la topographie de 0,4 m. Lorsque des redents sont prévus, la noue est subdivisée en plusieurs segments dont l'espacement est au minimum égal à la résolution spatiale du modèle (soit 5 m pour le TIH de Manihant-Ourcy) afin de reproduire l'effet de ralentissement des écoulements et de stockage temporaire de l'eau.

Les noues urbaines sont représentées par une alternance de mailles abaissées de 0,2 m afin de reproduire l'effet de ralentissement associé aux redents. Les surfaces concernées sont désimperméabilisées et reclassées en « Eau », ce qui entraîne une adaptation des paramètres de surface, de végétation et du sol.

Keyline design

L'approche de modélisation des *keylines*, consiste, en première étape, à identifier les *keypoints*, correspondant aux points d'inflexion de pente, situés sur les axes naturels de concentration du ruissellement. À partir de chacun de ces points, une *keyline* est ensuite générée au moyen d'un algorithme de moindre coût reliant le *keypoint* à une limite parcellaire ou à une voirie. Cette ligne (*keyline*) sert alors de géométrie de référence pour modifier la topographie. Le long de cette *keyline*, un fossé est creusé numériquement en abaissant l'altitude de chaque cellule raster à celle de son voisin le plus bas, à laquelle s'ajoute une profondeur paramétrable correspondant aux dimensions souhaitées de l'ouvrage.

Fossés

Les fossés sont représentés dans le modèle par une modification locale de la topographie le long de leur tracé. Celui-ci est intégré à partir d'une couche vectorielle et projeté sur le maillage de MIKE SHE. Ils sont idéalement tracés parallèlement aux courbes de niveaux et/ou associés à des haies (en aval du fossé). Une profondeur de 0,5 m est appliquée aux mailles intersectées par le fossé selon le principe de pondération décrit à l'Equation (22).

Pour le TIH de Pierreuchamps–Chawieumont, l'implémentation des fossés a nécessité plusieurs adaptations afin de tenir compte de la topographie locale et des limites liées à la résolution du modèle. Les fossés sont représentés par un abaissement topographique de 0,5 m le long de leur tracé, sans application de pondération surfacique. Cette profondeur constitue la valeur cible appliquée au fond de l'ouvrage. Afin de garantir un fonctionnement hydraulique cohérent, une pente longitudinale minimale de 0,1 % est imposée lorsque la topographie locale ne permet pas d'assurer naturellement l'écoulement au

sein du fossé. Des corrections complémentaires sont également appliquées à proximité immédiate du fossé afin de limiter les écoulements latéraux artificiels et de supprimer les micro-dépressions susceptibles d'interrompre la continuité hydraulique. Ces ajustements peuvent conduire à des variations locales mineures de la profondeur effective du fossé, tout en conservant un ordre de grandeur proche de la profondeur cible de 0,5 m.

4.5.2.2. Zones de stockage temporaire

Mares

Les mares tampons sont représentées par un abaissement local de la topographie correspondant à une profondeur cible de 0,5 m. L'altitude finale de la maille est ajustée selon l'équation de pondération surfacique (Equation (22)). Le volume de stockage potentiel a ensuite été estimé, permettant de réévaluer l'emprise surfacique de chaque mare en cohérence avec un volume cible. L'occupation du sol est reclassée en « Eau », ce qui entraîne l'adaptation des paramètres de végétation et de surface associés.

Zones de rétention

L'intégration des zones de rétention dans la modélisation repose sur l'ajout d'ouvrages hydrauliques (déversoirs et ajutages) dans le modèle MIKE+ sur les branches d'axe d'écoulement. Ces ouvrages sont délimités à partir de secteurs topographiquement favorables à l'accumulation de l'eau, généralement localisés dans des replats suivant les courbes de niveau (Figure 41). Des *Flood Codes* sont définis dans MIKE+ et MIKE SHE afin de délimiter les emprises susceptibles d'être inondées lors du débordement des écoulements. L'eau peut alors être temporairement stockée dans ces secteurs avant d'être progressivement évacuée par infiltration, évapotranspiration ou restitution vers l'aval.

Les dimensions de l'ajutage sont estimées à partir de la formule de Manning-Strickler, en visant un débit de restitution inférieur au débit de pointe simulé dans l'état de référence :

$$V = \frac{1}{n} \times R_h^{2/3} \times S^{1/2} \quad (24)$$

où V est la vitesse moyenne de l'écoulement (m s^{-1}), n le coefficient de Manning (-), R_h le rayon hydraulique (m) et S la pente hydraulique (m m^{-1}).

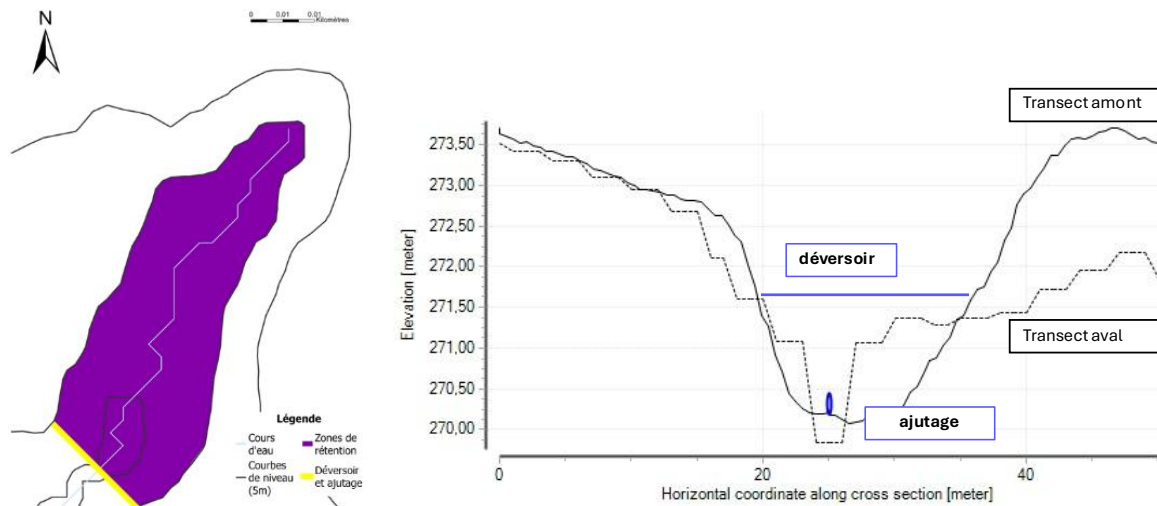


Figure 41 : Dessin d'une zone de rétention en suivant les courbes de niveaux (à gauche) et schéma de la conception d'un déversoir et ajutage à l'aval d'une zone de rétention dans MIKE+ (à droite).

4.5.2.3. Gestion du sol et du parcellaire

Fissuration

Pour l'implémentation de la fissuration dans le modèle, les paramètres de rétention et conductivité à saturation sont augmentés respectivement de 5 % et 25 % sur les surfaces concernées sur les 40 premiers centimètres sous la surface. En raison du manque de données expérimentales permettant de quantifier précisément les effets de cette technique, les valeurs retenues reposent sur des hypothèses de travail et doivent être considérées comme une estimation du gain de capacité d'infiltration plutôt que comme une représentation quantitative de son impact réel.

Redessin parcellaire

Le redessin parcellaire s'appuie sur un ensemble cohérent de leviers d'aménagement et de pratiques agricoles, incluant notamment la plantation de haies, le *keyline design*, l'adaptation des accès aux parcelles, l'évolution des pratiques culturales, ainsi que la mise en place de bandes enherbées et de noues d'infiltration. Ces dispositifs visent à accroître l'infiltration de l'eau dans les sols et à limiter les écoulements de surface. Les limites parcellaires, comme lorsqu'elles sont associées à des barrières interparcellaires, sont ainsi redéfinies perpendiculairement aux axes de ruissellement, tandis que le travail du sol est réalisé parallèlement aux courbes de niveau. Un levier peut être un bord de chemin vicinal converti en barrières interparcellaires, ou des parties de parcelles agricoles échangées à l'amiable. Ce processus peut-être très long (de 2 à 10 ans) et nécessite des conventions spécifiques et l'expertise de la DAFoR.

Tableau 11 : Modification des paramètres dans MIKE SHE pour les différents aménagements en contexte agricole.

Aménagement	Topographie (m)	Occupation du sol	Manning (m ^{1/3} s ⁻¹)	Stock de rétention (mm)	Coefficient (ω) des paramètres hydrauliques du sol			
					0 – 40 cm		40 – 80 cm	
					θ_s (-)	K_s (cm jour ⁻¹)	θ_s (-)	K_s (cm jour ⁻¹)
Haies	/	Jeunes peuplements feuillus (< 3 m) et arbustes	0,800	5	1,2	2	1,2	2
Noues agricoles	-0,4	/	/	/	/	/	/	/
Noues urbaines	-0,2	Eau de surface	0,030	1	/	/	/	/
Keyline design	-1	/	/	/	/	/	/	/
Fossés	-0,5	/	/	/	/	/	/	/
Mares tampons	-0,5	Eau de surface	0,030	1	/	/	/	/
Fissuration	/	/	/	/	1,05	1,25	/	/

4.5.3. Aménagements en contexte forestier

4.5.3.1. Aménagements sur les réseaux de drainage forestiers

Déviations de drains bordiers

Les déviations de drains bordiers visent à détourner une partie des écoulements concentrés vers les parcelles adjacentes afin de favoriser leur infiltration et de réduire les volumes transférés rapidement vers l'aval. Dans le modèle, la représentation de la déviation permanente a été préférée car il s'agit du type de déviation que le DNF réalise sur site.

Pour ce faire, la topographie est localement modifiée de 10 cm afin de reproduire la redistribution des écoulements vers les zones adjacentes et d'augmenter les possibilités d'infiltration en amont du réseau hydrographique.

Bouchage de drains

Le bouchage des drains est représenté par la suppression de la fonction de drainage artificiel dans la zone non saturée. Concrètement, le drainage est désactivé à une profondeur de 30 cm sous la surface du sol sur les zones concernées. Cette modification permet de simuler une réduction de l'évacuation rapide de l'eau vers le réseau de drainage et favorise son stockage temporaire dans les horizons superficiels du sol.

Redents dans les fossés bordiers

Les redents sont représentés par une succession d'obstacles ponctuels le long des fossés bordiers afin de ralentir les écoulements et d'augmenter les capacités de stockage temporaire. Dans le modèle, un pixel est rehaussé de 0,5 m tous les 200 m le long du tracé du fossé. Cette représentation permet de reproduire l'effet de retenue créé par les redents.

4.5.3.2. Zones de stockage temporaire

Zones de dispersion des eaux

Les zones de dispersion des eaux ont pour objectif de dévier les écoulements concentrés vers des surfaces plus larges afin de favoriser leur infiltration et de limiter leur concentration dans les axes de drainage. Elles sont représentées par un rehaussement topographique suivant un tracé établi parallèlement aux courbes de niveau. L'altitude du point le plus élevé du tracé est surélevée de 0,5 m. Cette nouvelle valeur est ensuite appliquée à l'ensemble des mailles intersectées, créant ainsi un seuil continu capable de redistribuer les écoulements vers l'aval de manière diffuse.

Mares forestières

Les mares forestières poursuivent les mêmes objectifs hydrologiques que les mares implantées en contexte agricole. Leur représentation repose sur un abaissement local de la topographie correspondant à la profondeur cible de l'ouvrage. Plusieurs dimensions de mares ont été considérées comme dans le plan d'aménagement du DNF. Les caractéristiques géométriques retenues sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Dimensions et implémentations des mares forestières dans MIKE SHE.

	Longueur et largeur	Volume	Profondeur	Nombre de pixels
	(m)	(m ³)	(m)	
Mare 1	10 × 10	50	0,5	1
Mare 2	20 × 10	90	0,45	2
Mare 3	20 × 15	130	0,65	2

4.5.3.3. Gestion du sol et du peuplement

Préservation des sols

Les opérations de décompactage sont représentées par une modification des propriétés hydrodynamiques des sols forestiers afin de traduire l'amélioration de leur porosité et de leur capacité d'infiltration. L'effet du décompactage est appliqué de manière décroissante avec la profondeur, les impacts des engins forestiers étant principalement concentrés dans les horizons superficiels du sol.

Les adaptations des paramètres hydrodynamiques varient selon le type de sol considéré. Les sols tourbeux, plus sensibles aux phénomènes de compaction, présentent une dégradation plus importante de leur structure sous l'effet des passages d'engins et bénéficient dès lors d'un gain potentiel plus élevé avec des itinéraires qui préservent de la compaction des sols (Nazari et al., 2021; Lepilin et al., 2022). Les ajustements appliqués aux différents paramètres sont détaillés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Modification des paramètres hydrodynamiques des sols pour le décompactage dans MIKE SHE.

Types de sols	Profondeur (cm)	Coefficient (ω) des paramètres hydrauliques du sol		
		θ_s (-)	α (cm ⁻¹)	K_s (cm jour ⁻¹)
Sols limono-caillouteux	0-30	1,05	1,20	1,15
	30-80	1,03	1,02	1,10
Sols tourbeux	0-30	1,12	1,40	1,40
	30-80	0,035	1,10	1,15

Diversification des peuplements forestiers

La diversification des peuplements forestiers est représentée par une modification de l'occupation du sol vers la classe « Forêts mixtes ». Cette modification entraîne une adaptation des paramètres de végétation, notamment l'indice foliaire (LAI), la profondeur racinaire (R_d) et le coefficient cultural (K_c), ainsi que des paramètres de surface tels que le coefficient de Manning et le stock de rétention. Les valeurs retenues pour ces paramètres sont présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Modification des paramètres de végétation et de surface pour la diversification des peuplements dans MIKE SHE.

Paramètres de végétation	Jour	LAI ($m^2 m^{-2}$)	R_d (mm)	K_c (-)
Forêts mixtes	0,25	3,5	900	0,9
	105	4	900	0,9
	140	6	900	1,2
	270	6	900	1,2
	330	4	900	0,9
	365	3,5	900	0,9
Paramètres de surface	Manning ($m^{1/3} s^{-1}$)	Stock de rétention (mm)		
Forêts mixtes	0,6	4		

4.6. Analyse des résultats de modélisation

Une chaîne d'analyse complète des résultats a été développée et appliquée aux résultats de modélisation des trois TIH. Cette analyse a pour objectif :

- De caractériser le fonctionnement hydrologique actuel des TIH,
- De rendre compte de l'effet potentiel des scénarios d'aménagements retenus sur le fonctionnement hydrologique des TIH,
- De dégager des tendances d'efficacité de chaque type de mesures, selon leur contexte biophysique.

Ces résultats s'inscrivent dans différentes temporalités à travers des analyses à long terme ou événementielles, selon l'enjeu considéré ; sécheresse / inondations. Ces analyses sont réalisées à des échelles spatiales variables : à l'échelle locale/ponctuelle ou à l'échelle du bassin versant.

Les comparaisons entre la situation initiale et un scénario aménagé se font toujours selon la logique : Δ = scénario aménagé - situation initiale. Ainsi, une variation (Δ) positive, implique une augmentation dans le scénario aménagé par rapport à la situation de référence, quelle que soit la variable considérée.

4.6.1. Bilans en eau

Les bilans en eau à l'échelle du bassin versant sont analysés à partir des fichiers *Water Balance* produits par MIKE SHE. Les flux sont regroupés en quatre compartiments fonctionnels : l'atmosphère, la surface, le sol (et sous-sol) et le réseau hydrographique. Pour chacun de ces compartiments, les flux entrants (*entrées*), les flux sortants (*sorties*) et les variations de stockage sont distingués. Le bilan hydrique s'écrit alors :

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} I_i = \sum_{j \in \mathcal{O}} O_j + \sum_{k \in \mathcal{S}} \Delta S_k + \varepsilon \quad (25)$$

où I_i représente le flux entrant i , O_j le flux sortant j , ΔS_k la variation du stockage k , $\mathcal{I}$, $\mathcal{O}$ et $\mathcal{S}$ les ensembles des flux entrants, sortants et de stockage respectivement, et ε l'erreur de fermeture du bilan hydrique. Une variation de stockage négative correspond à un déstockage du compartiment considéré, tandis qu'une valeur positive traduit un stockage d'eau au sein du système.

Les différentes composantes du bilan utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau 15. Les flux sont agrégés à l'échelle saisonnière à partir de la différence entre les valeurs cumulées enregistrées au début et à la fin de chaque saison. Les bilans saisonniers obtenus pour chaque année de simulation sont ensuite moyennés sur l'ensemble de la période d'analyse afin de produire des bilans saisonniers moyens interannuels. Les résultats sont présentés sous forme de diagrammes empilés comparant la situation actuelle et les différents scénarios d'aménagement.

Tableau 15 : Description des flux selon le compartiment de la balance hydrique dans le modèle MIKE SHE.

Compartiments	Entrées	Sorties	Δ Stock
Atmosphère	Précipitations, irrigation	Évapotranspiration réelle	Stockage dans le couvert végétal, stockage nivéal
Surface	Apports latéraux de surface, entrées par drainage superficiel	Sorties latérales de surface, pertes vers exutoires externes, sorties par drainage superficiel	Stockage en surface, stockage dans les drains de surface
Sol et sous-sol	Apports souterrains latéraux, entrées par drainage profond	Sorties souterraines latérales, pompage, pertes vers exutoires externes, sorties par drainage profond	Variation du stockage en eau du sol et de la zone saturée
Réseau hydrographique	Échanges du cours d'eau vers le système souterrain	Écoulements vers le réseau hydrographique, drainage vers la rivière, échanges nappe-rivière	/

4.6.2. Hydrogrammes

4.6.2.1. Sélection des évènements

Les évènements de crue sont identifiés à partir des séries temporelles de débit (Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) simulées en situation actuelle à l'exutoire de chaque TIH à l'aide d'une approche *Peak Over Threshold* (POT). Le seuil de détection correspond au quantile $q = 0,999$ de la distribution des débits simulés. Les périodes durant lesquelles le débit excède ce seuil sont considérées comme des évènements potentiels. Afin de garantir l'indépendance des pics, les dépassements séparés par moins de 24 heures sont fusionnés en un même évènement hydrologique. Chaque évènement est ensuite étendu de 10 heures avant le début du dépassement et de 48 heures après sa fin, afin de prendre en compte l'ensemble de la réponse hydrologique associée. Le seuil et les fenêtres temporelles sont définis sur la situation actuelle, puis appliqués à l'identique aux scénarios d'aménagement.

Pour chaque évènement sélectionné, plusieurs indicateurs hydrologiques sont calculés sur la fenêtre étendue. Ceux-ci comprennent notamment le débit de pointe (Q_p , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), le volume écoulé au cours de l'évènement, le cumul et l'intensité maximale des précipitations, le cumul pluviométrique des cinq jours précédant l'évènement, le décalage temporel entre le maximum de précipitations et le débit de pointe.

Le débit de pointe correspond au maximum du débit sur la fenêtre étendue. Le volume écoulé est estimé par intégration discrète des débits sur cette même période, en sommant les produits ($Q \times \Delta t$), où Δt représente le pas de temps de simulation. La durée d'évènement reportée correspond, quant à elle, à la seule durée de dépassement du seuil. Ces indicateurs sont calculés de manière identique pour la situation actuelle et pour chacun des scénarios étudiés.

La période de retour associée aux évènements sélectionnés a été déterminée à partir de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) calibrées selon un scénario climatique intégrant une augmentation de la température moyenne de $+1^\circ \text{C}$ (Brajkovic et al., 2025).

4.6.2.2. Comparaison des débits selon le scénario

L'effet des aménagements est évalué par comparaison des caractéristiques hydrologiques simulées pour chaque évènement. La réduction relative du débit de pointe (R_{Q_p}) est calculée selon :

$$R_{Q_p} = \frac{Q_{p, \text{Situation actuelle}} - Q_{p, \text{Scénario}}}{Q_{p, \text{Situation actuelle}}} \times 100 \quad (26)$$

où $Q_{p, \text{Situation actuelle}}$ correspond au débit de pointe simulé en situation actuelle et $Q_{p, \text{Scénario}}$ au débit de pointe simulé dans le scénario considéré. Une valeur positive de R_{Q_p} traduit une diminution du débit de pointe induite par l'aménagement. Le décalage temporel du pic de crue est évalué comme la différence entre les moments d'occurrence

des débits de pointe, une valeur positive indiquant un pic retardé dans le scénario aménagé.

La relation entre les débits de pointe simulés en situation actuelle et ceux obtenus dans le scénario aménagé est analysée au moyen d'une régression linéaire :

$$Q_{p, \text{Scénario}} = a \cdot Q_{p, \text{Situation actuelle}} + b \quad (27)$$

où a représente la pente de la droite de régression et b son intercept. Une valeur de a inférieure à l'unité indique une diminution moyenne des débits de pointe dans le scénario aménagé par rapport à la situation actuelle.

Afin d'évaluer la validité du modèle de régression, plusieurs tests statistiques sont réalisés. Un test F , comparant le modèle complet au modèle contraint à l'origine par la méthode des sommes des carrés résiduels (1 et $n-2$ degrés de liberté), est utilisé pour vérifier si l'intercept est significativement différent de zéro. L'homoscédasticité des résidus est examinée au moyen du test de Breusch–Pagan, tandis que leur normalité est évaluée à l'aide du test de Shapiro–Wilk. Lorsque l'intercept n'est pas significativement différent de zéro et que les hypothèses d'homoscédasticité et de normalité des résidus sont satisfaites ($p > 0,05$), la régression contrainte à l'origine est retenue comme représentative de la relation entre les simulations en situation actuelle et celles du scénario aménagé.

4.6.3. Cartographies évènementielles

Quatre évènements ont été retenus (pour les trois TIH étudiés) parmi ceux identifiés lors de l'analyse des crues extrêmes présentée à la section précédente. Pour la situation actuelle et les différents scénarios d'aménagement, les sorties journalières de MIKE SHE, sont analysées afin de calculer, à l'échelle du pixel, la production d'écoulement cumulée et le coefficient d'écoulement associés à chacun de ces évènements.

La production d'écoulement désigne la fraction de la précipitation incidente qui, après interception, évapotranspiration, infiltration, est disponible pour alimenter le ruissellement de surface. Elle représente la contribution potentielle de chaque pixel au ruissellement. Contrairement au débit à l'exutoire d'un bassin versant, elle ne résulte pas de l'intégration spatiale des différents écoulements produits sur l'ensemble du bassin versant. La production d'écoulement journalière est calculée pour chaque pas de temps t par :

$$R_t = P_t - E_{int,t} - \Delta S_{int,t} + SZ_{OL,t} - E_{pond,t} + OL_{SZ,t} + I_{UZ,t} - \Delta S_{OL,t} \quad (28)$$

où R_t est la production d'écoulement journalière (mm j^{-1}), P_t la précipitation (mm j^{-1}), $E_{int,t}$ l'évaporation depuis l'interception végétale (mm j^{-1}), $\Delta S_{int,t}$ la variation du stockage d'interception (mm j^{-1}), $SZ_{OL,t}$ la résurgence des eaux de la zone saturée vers la surface (mm j^{-1}), $E_{pond,t}$ l'évaporation des eaux de surface (mm j^{-1}), $OL_{SZ,t}$ l'infiltration depuis la

surface vers la zone saturée (mm j^{-1}), $I_{UZ,t}$ l'infiltration vers la zone non saturée (mm j^{-1}) et $\Delta S_{OL,t}$ la variation du stockage d'eau de surface (mm j^{-1}).

Le coefficient d'écoulement (CE , -) est défini comme le rapport entre la production d'écoulement cumulée et la précipitation totale reçue sur l'évènement :

$$CE = \frac{R_{cum}}{P_{cum}} \quad (29)$$

$$R_{cum} = \sum_{t=t_0}^{t_n} R_t ; P_{cum} = \sum_{t=t_0}^{t_n} P_t \quad (30)$$

avec R_{cum} et P_{cum} la production d'écoulement et la précipitation cumulée (mm) sur la durée étendue de l'évènement $[t_0 ; t_n]$. Les pixels pour lesquels $P_{cum} = 0$ sont exclus du calcul. Il faut noter qu'il est physiquement possible que les valeurs de CE pour certains pixels soient inférieures à 0 ou supérieures à 1. Ces dernières correspondraient respectivement à des zones de réinfiltration et de résurgence/suintement. Les valeurs de CE obtenues sont délibérément limitées à l'intervalle $[0 ; 1]$ pour des raisons graphiques. Une valeur de 0 traduit ainsi l'absence de production d'écoulement et une valeur de 1 indique qu'au moins l'intégralité de la pluie reçue est convertie en écoulement.

4.6.4. Cartographies long terme

Trois indicateurs spatialisés sont produits sur l'ensemble de la période simulée afin de caractériser le fonctionnement hydrologique moyen du bassin versant. Les métriques sont calculées à l'échelle du pixel puis exprimées sous forme de valeurs annuelles moyennes.

4.6.4.1. Évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle annuelle moyenne (ET_R , mm an^{-1}) correspond à la quantité d'eau effectivement transférée du sol, de la végétation et des surfaces libres vers l'atmosphère. Elle est calculée en sommant les flux journaliers simulés par MIKE SHE sur l'ensemble de la période de simulation, puis en divisant ce cumul par le nombre d'années simulées. Cette carte reflète la capacité du sol et de la végétation à mobiliser l'eau disponible vers l'atmosphère.

4.6.4.2. Stress hydrique

Le stress hydrique est exprimé par le nombre moyen annuel de jours durant lesquels l'ensemble de la zone racinaire est soumis à une disponibilité en eau insuffisante. Pour chaque pixel, on identifie les journées où le potentiel matriciel h (m) des couches de sol comprises dans la zone racinaire est inférieur à un seuil donné (e.g., $-30 \text{ m} \approx pF 3,5$ pour un stress modéré ou $-150 \text{ m} \approx pF 4,2$, point de flétrissement permanent pour un stress

extrême). Le nombre total de jours vérifiant ce critère est divisé par le nombre d'années de la période, ce qui donne un nombre moyen de jours de stress par an (jour an⁻¹).

Une couche est considérée comme appartenant à la zone racinaire si sa profondeur supérieure est inférieure à la profondeur d'enracinement simulée par MIKE SHE, laquelle varie dynamiquement dans le temps et dans l'espace selon le type de végétation. Le critère de stress est appliqué au maximum du potentiel matriciel sur l'ensemble des couches racinaires.

Les pixels dépourvus de zone racinaire ou correspondant à des surfaces artificialisées sont exclus de cette analyse. Cette métrique permet d'identifier les secteurs les plus susceptibles de connaître des déficits hydriques pour la végétation.

4.6.4.3. Saturation des sols

Le taux de saturation (S , %) est défini comme le rapport entre la teneur en eau volumique du sol (θ) et la teneur en eau à saturation (θ_s) :

$$S = \frac{\theta}{\theta_s} \times 100 \quad (31)$$

Pour chaque pixel, on identifie les journées où le taux de saturation moyen du profil de sol compris entre 0 et 1,2 m de profondeur dépasse un seuil de 95 %. La saturation moyenne sur le profil est calculée comme une moyenne pondérée par l'épaisseur de chaque couche, de sorte que les couches les plus épaisses contribuent proportionnellement davantage à l'indicateur. Le nombre total de jours satisfaisant ce critère est ensuite rapporté au nombre d'années simulées afin d'obtenir un nombre moyen annuel de jours de saturation (jour an⁻¹).

Cette métrique permet d'identifier les zones les plus fréquemment soumises à des conditions proches de la saturation, favorables au développement de zones humides mais aussi susceptibles de limiter l'infiltration, de ralentir le développement de la végétation et de favoriser le ruissellement ainsi que les remontées d'eau vers les infrastructures (caves, fondations).

4.6.5. Efficacité des aménagements

Afin d'évaluer l'impact des différents aménagements modélisés, les caractéristiques biophysiques de leurs sites d'implantation seront analysées dans un premier temps, avant d'examiner leurs effets sur les différents flux du bilan hydrique. La première analyse vise à identifier les principaux déterminants et les tendances spatiales ayant guidé la localisation des aménagements au sein des différents scénarios.

Dans un second temps, les flux du bilan hydrique observés à l'emprise des aménagements sont comparés à ceux du scénario de référence, correspondant à la situation actuelle. Cette comparaison permet de quantifier l'impact des différents types d'aménagements sur le fonctionnement hydrologique local.

Concrètement, les pixels par type d'aménagement sont regroupés afin de constituer les ensembles d'analyse utilisés dans les différentes étapes de l'évaluation.

4.6.5.1. Analyse du contexte biophysique

Pour l'analyse des contextes biophysiques, les pixels associés à chaque type d'aménagement sont mobilisés afin de produire des boîtes à moustaches, mettant notamment en évidence la médiane des variables continues, telles que la pente, la profondeur des sols, la distance à l'exutoire ou encore les caractéristiques topographiques. Les variables catégorielles, comme le drainage, l'occupation du sol (LULC) et le type de sol, sont quant à elles représentées sous forme de diagrammes en barres illustrant les fréquences d'occurrence de chaque variable.

4.6.5.2. Efficacité hydrologique

Pour chaque évènement pluvieux et chaque flux hydrologique étudiés notamment l'infiltration, la production d'écoulement cumulée, l'évapotranspiration réelle et le coefficient d'écoulement, la différence pixel à pixel entre le scénario aménagé et la situation actuelle est calculée pour l'ensemble des pixels appartenant à chaque type d'aménagement.

Notons toutefois, que l'analyse isolée de l'évapotranspiration à la seule échelle de l'évènement pluvieux présente des limites : la végétation continue en effet de puiser dans les réserves hydriques du sol et d'évapotranspirer sur un pas de temps plus long après la fin de l'épisode, contribuant ainsi au tarissement progressif de ces réserves et à la restauration de la capacité d'infiltration avant l'évènement suivant. Une analyse strictement intra-évènementielle de l'évapotranspiration ne rend donc pas compte de ce rôle de régulation différée, qui conditionne pourtant les états hydriques antécédents et, par extension, la réponse hydrologique aux précipitations ultérieures.

Les distributions de ces différences sont ensuite représentées sous forme de boîtes à moustaches, la médiane étant affichée pour chaque aménagement, permettant d'apprécier à la fois l'amplitude et la variabilité de l'effet induit par chaque type d'aménagement sur les flux hydrologiques simulés.

La significativité des différences entre les scénarios est évaluée pour chaque type d'aménagement et chaque variable en suivant 2 étapes. Tout d'abord la normalité de la distribution de chaque groupe (type aménagement et scénario) est vérifiée via le test de Shapiro-Wilk. Ensuite, si les deux groupes satisfont l'hypothèse de normalité : le test t de Welch est réalisé pour comparer les moyennes sans supposer l'homoscédasticité, ce qui le rend adapté aux distributions généralement hétéroscédastiques entre scénarios. Si

au moins un groupe dévie de la normalité, le test de Mann-Whitney U (non paramétrique) est effectué. Ce test, basé sur les rangs, est insensible aux violations de normalité et aux valeurs extrêmes fréquentes dans les distributions de flux hydrologiques.

Les niveaux de significativité statistique sont indiqués selon les notations suivantes : *ns* ($p \geq 0,05$ – non significatif), * ($p < 0,05$ - significatif), ** ($p < 0,01$ – très significatif) et *** ($p < 0,001$ – hautement significatif).

4.6.5.3. Efficacité hydrologique en fonction des contextes biophysiques

Le croisement des différences de flux hydrologiques moyennés sur l'ensemble des événements sélectionnés avec les variables biophysiques caractérisant le contexte local de chaque pixel permet d'examiner dans quelle mesure les conditions du milieu modulent l'effet des aménagements.

Pour chaque événement, la différence de flux entre le scénario aménagé et la situation de référence est calculée à l'échelle du pixel, pour l'ensemble des pixels appartenant à chaque type d'aménagement. Ces valeurs sont ensuite présentées dans des boîtes à moustaches par type d'aménagement et par classe de variable biophysique (drainage, occupation du sol, type de sol), permettant d'identifier si l'efficacité d'un aménagement est conditionnée par le contexte dans lequel il est implanté. Cette approche constitue néanmoins une première analyse exploratoire ; des analyses de sensibilité plus approfondies seraient nécessaires pour consolider ces résultats.

5. RÉSULTATS

5.1. Contexte hydrologique du bassin versant de la Vesdre

Les données climatiques utilisées comme données d'entrées du modèle comprennent les précipitations ainsi que l'évapotranspiration de référence (ET_0). Afin de caractériser le contexte climatique de l'ensemble des bassins étudiés, les statistiques présentées dans cette section sont calculées sur la période complète allant du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2023 et agrégées mensuellement à l'échelle du bassin versant de la Vesdre. Les périodes effectivement simulées peuvent toutefois différer selon le TIH considéré, en raison de la disponibilité des données hydrologiques et de l'exclusion d'une période de chauffe. Les périodes de simulation utilisées pour chaque bassin sont précisées dans les sections correspondantes.

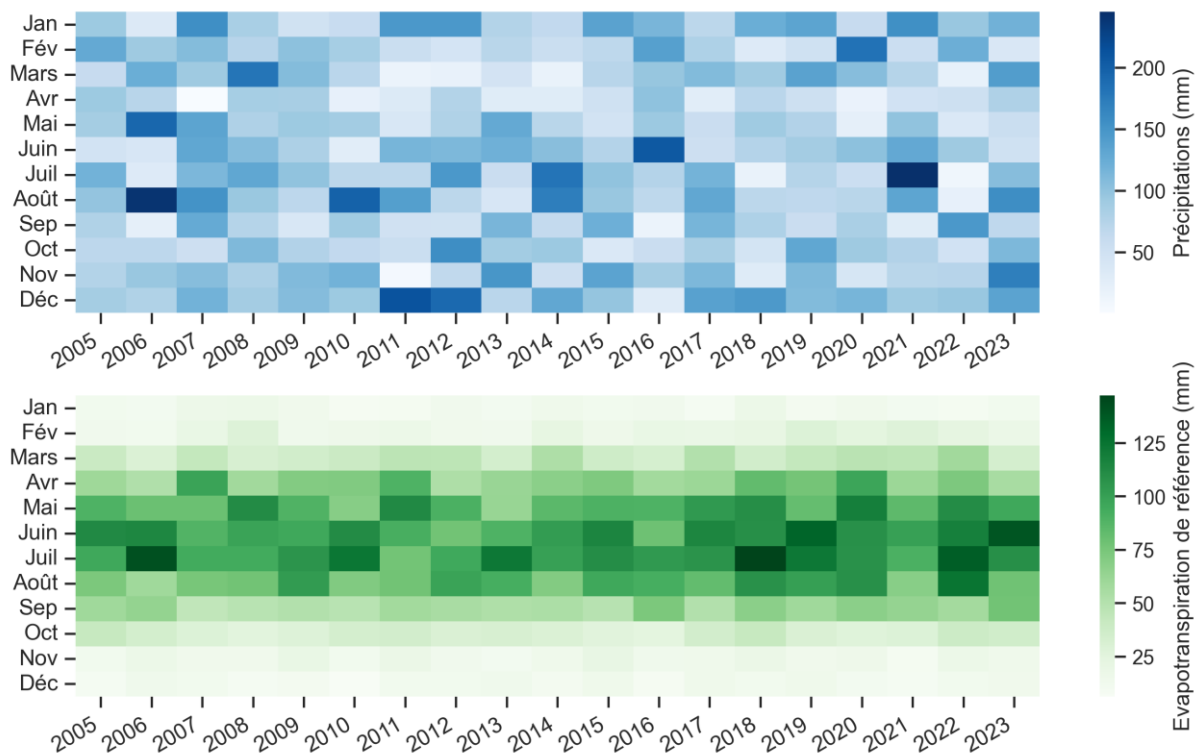


Figure 42 : Heatmap des précipitations (mm) et de l'évapotranspiration de référence (ET_0 , mm) dans le bassin versant de la Vesdre pour la période de 2005 à 2023.

La pluviométrie annuelle moyenne sur la période étudiée est de $1061,6 \pm 122,6 \text{ mm an}^{-1}$, ce qui traduit une variabilité modérée des précipitations d'une année à l'autre (Figure 42). À l'échelle saisonnière, les précipitations sont réparties de manière relativement homogène entre l'hiver ($99,06 \pm 40,8 \text{ mm mois}^{-1}$) et l'été ($99,6 \pm 51,7 \text{ mm mois}^{-1}$), tandis que le printemps apparaît comme la saison la plus sèche ($73,5 \text{ mm mois}^{-1}$). Ces caractéristiques sont représentatives du climat de l'est de la Wallonie (Service public de Wallonie, 2018). Les TIH étudiés sont situés dans le bassin de la Vesdre, qui s'étend sur plusieurs

régions bioclimatiques, depuis le Plateau Sambre-et-Meuse pour Pierreuchamps–Chawieumont et Manaihan–Ourcy jusqu'à la Haute Ardenne pour la Statte.

L'évapotranspiration de référence (ET_0) annuelle moyenne sur la période étudiée est de $655,1 \pm 58,7 \text{ mm an}^{-1}$. Contrairement aux précipitations, elle présente une forte saisonnalité, avec des valeurs moyennes maximales en été ($100,9 \pm 19,6 \text{ mm mois}^{-1}$) et minimales en hiver ($14,6 \pm 5,1 \text{ mm mois}^{-1}$).

5.2. Manaihan-Ourcy

5.2.1. Scénarios / Résultats concertations

Les scénarios développés pour le TIH de Manaihan–Ourcy ont été construits à partir des échanges menés avec les différents acteurs du territoire, à savoir la Ville de Herve, les agriculteurs exploitants et propriétaires, ainsi que les habitants. Cette démarche visait à intégrer les connaissances de terrain et les contraintes locales dans la conception des aménagements.

5.2.1.1. Agriculteurs et propriétaires de parcelles agricoles

Résultats des entretiens individuels et du diagnostic initial

Pour rappel, les objectifs de ces rencontres en individuel avec les agriculteurs sont :

- Instaurer un climat de confiance ;
- Présenter le projet et ses implications ;
- Identifier les problématiques locales et localiser les éléments paysagers (mares, drains, haies).

Le TIH de Manaihan-Ourcy compte 11 agriculteurs. Parmi eux, 10 ont accepté d'être rencontrés par le Contrat de rivière Vesdre dans le courant des mois de juillet et août 2025. A l'issue de ces entretiens, un diagnostic initial a été établi (pour plus de détails, cf. Annexe D).

Perception du projet : l'accueil du projet est globalement positif. Les 10 agriculteurs rencontrés ont accepté de participer à la démarche de co-construction, certains toutefois avec des réserves.

Perception des inondations et sécheresses : ces problématiques ne sont généralement pas perçues comme des contraintes directes majeures dans leur activité quotidienne. Les répondants reconnaissent que certaines de leurs pratiques participent à la lutte contre les inondations et la sécheresse (maintien de mares, de haies, de zones humides, etc.). Plusieurs soulignent toutefois une forme de contradiction entre ces efforts locaux et la poursuite de l'imperméabilisation du territoire liée à l'urbanisation et aux projets d'infrastructure.

Freins identifiés :

- Structure des exploitations : petites parcelles, perte de surface utile si implantation de haies.
- Disponibilité : manque de temps pour réunions ou travaux supplémentaires.
- Statut foncier : locataires dépendant des propriétaires.
- Contraintes techniques : risque d'endommager les drains, difficultés liées au relief ou aux engins agricoles.
- Facteurs externes : urbanisation, autoroute, eaux de ruissellement des habitations.

À l'issue de ces entretiens, les 10 agriculteurs ont accepté de poursuivre leur participation au projet ModRec 2-Hydrologie.

Résultats des réunions de concertation avec les agriculteurs

Initialement, 3 à 4 réunions étaient prévues afin de construire un scénario d'aménagement concerté à l'échelle des zones agricoles du TIH. Trois réunions ont finalement été organisées (Tableau 16).

En amont de chaque rencontre, les participants ont été sollicités par courrier, courriel et appel téléphonique afin de maximiser la participation. Malgré ces efforts, la représentation des agriculteurs est restée globalement limitée, bien que les participants présents soient souvent ceux disposant des surfaces agricoles les plus importantes. Un agriculteur étant également élu communal, celui-ci a été comptabilisé à la fois comme exploitant et comme représentant communal lors des réunions.

Tableau 16 : Réunions de co-construction, présences et surfaces de prairie concernée.

	Date	Nombre d'agriculteurs présents	Nombre d'experts externes présents	ULiège et CRV	Commune	% de surfaces agricoles du TIH couvertes par les agriculteurs présents
Réunion 1	21/10/2025	3	4	5	1	69 %
Réunion 2	13/11/2025	5	2	4	1	83 %
Réunion 3	16/12/2025	4	5	3	3	74 %

Face au faible taux de participation, le protocole de concertation a été adapté, permettant ainsi un passage plus rapide aux aspects concrets du projet. Les participants étaient également avides de propositions et n'étaient pas à l'aise de discuter des parcelles des voisins absents lors des réunions. En conséquence, des échanges individuels complémentaires ont été réalisés avec les agriculteurs absents afin d'assurer un suivi continu du projet.

1. Réunion 1

Un plan d'aménagement théorique, élaboré en amont par l'équipe ULiège-GxABT, a été proposé comme base de discussion pour la co-construction (Tableau 17 et Figure 45). Celui-ci a ensuite été retravaillé collectivement, les agriculteurs y intégrant leurs contraintes, leurs opportunités, ainsi que leur connaissance fine du territoire. Le résultat correspond au « Scénario 1 Agri » dans le Tableau 17.

Plusieurs points clés ont émergé :

- Les zones humides en prairies sont des zones difficilement exploitables pour les agriculteurs et constituent des opportunités pour les aménagements ;
- Le redécoupage parcellaire est globalement peu acceptable, notamment en raison de l'attachement foncier et familial aux terres ;
- Les drains sont jugés importants pour le maintien de la productivité des prairies ;
- Les haies sont bien acceptées, tant qu'elles ne fragmentent pas les parcelles.



Figure 43 : Réunion 2 avec les agriculteurs, les acteurs externes (DAFoR, GISER, Natagriwal, Gal Pays de Herve), ULiège-GxABT et Contrat de Rivière Vesdre.

2. Réunion 2

Pour donner suite à la première réunion, les propositions des agriculteurs présents ont été intégrées dans la modélisation, complétées par des aménagements supplémentaires proposés par l'équipe de recherche (« Scénario 1 Agri + ULiège » ; Tableau 17).

Cette deuxième réunion (Figure 43) avait pour objectif d'évaluer les effets des aménagements et leur acceptabilité, en attribuant un statut (vert, orange, rouge ; Figure 44) à chaque proposition, tout en identifiant les freins techniques ou organisationnels associés. Une nouvelle modélisation a ensuite été réalisée sur base de ces échanges.

Lors de la deuxième réunion, les agriculteurs ont formulé plusieurs demandes, notamment davantage d'illustrations et de photos des aménagements, l'organisation de visites de terrain, ainsi que le respect de leur souveraineté sur leur propriété.

Votre vision du plan d'aménagement

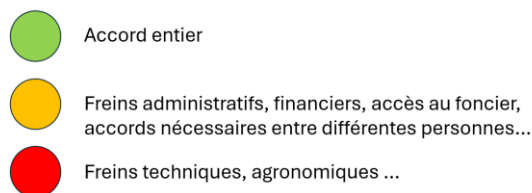


Figure 44 : Signalétique pour les aménagements proposés en milieu agricole lors de la deuxième réunion à Manihant-Ourcy.

3. Réunion 3

Cette troisième réunion visait à valider les aménagements envisagés lors des deux réunions précédentes. De nombreuses questions restaient toutefois en suspens à l'issue de cette réunion, notamment concernant les modalités de financement, la gestion de l'entretien des aménagements ainsi que les conventions à mettre en place.

Résultat du plan d'aménagement pour les zones agricoles

Au total, 15 aménagements ont été définis pour le TIH de Manihant-Ourcy et ont été implémentés dans la modélisation sous le nom « Scénario 2 Agri ». Les aménagements concernent 6 exploitations sur les 10 ayant participé à la démarche. Les propriétaires concernés ont majoritairement validé les propositions formulées par les exploitants.

Les aménagements retenus présentent les caractéristiques suivantes :

- Ils se situent en bordure de parcelle sans fragmentation ;
- Ils s'implémentent dans des zones peu productives ou hydromorphes ;
- Ils présentent des co-bénéfices pour l'exploitation (ombre, eau, etc.) ;
- Ils ont emprise foncière limitée.

Les typologies d'aménagement qui n'ont pas été retenues :

Fissuration : cette technique présente des réserves, notamment :

- Incompatibilité avec le réseau de drainage ;
- Interrogation quant à la stabilité dans le temps, e.g., sur les sols argileux, les ornières disparaissant naturellement ;
- Risque pour la sécurité des animaux (coincage des pattes dans la fissure).

Keyline design en fossés-talus-haies : ce dispositif impliquant des traversées de parcelles a été jugé inacceptable par les exploitants dans le contexte étudié.

Le redessin parcellaire : pour des raisons socio-culturelle, historique, et économique, le redessin des parcelles cadastrales n'a pas été accepté.

Conditionnalité de la mise en place de certains aménagements :

La mise en place des zones de rétentions prévues sur le cours d'eau va dépendre de la mise en place de la station d'épuration. En effet, celles-ci ne peuvent être construites en l'état, c'est-à-dire avec les eaux usées du bassin versant dans le cours d'eau.

Les différents scénarios :

Ci-dessous sont présentés les différents scénarios élaborés lors du processus de co-construction.

1. **Le scénario théorique** a été réalisé en amont des rencontres et présenté lors de la première réunion avec les agriculteurs qui s'est déroulée le 21/10/2025. Ce scénario a été modélisé.
2. **Les scénarios 1 Agri et 1 Agri + ULiège** ont été présentés lors de la deuxième réunion de co-construction, qui s'est déroulée le 13/11/2025. Le premier résulte des échanges de la première réunion, tandis que le second a été complété par des propositions d'aménagement pour les zones dont les agriculteurs concernés n'étaient pas présents lors de la première réunion (et pour lesquelles les agriculteurs présents étaient réticents à proposer des aménagements, notamment pour les prairies dont ils n'étaient pas responsables). Ces deux scénarios ont été modélisés.
3. **Le scénario Agri 2** constitue la suite des échanges de la deuxième réunion. Ce scénario a été modélisé, et présenté lors de la troisième réunion du 16/12/2025.
4. **Le scénario Agri 3** constitue le scénario d'aménagement final. Il résulte des ultimes rencontres individuelles, menées du 5 janvier au 30 mai 2026 auprès de chaque agriculteur et propriétaire foncier, afin de valider définitivement l'implantation des ouvrages. Finalisé à l'issue de cette période, ce calendrier propre à la dynamique de co-construction n'a pas permis la modélisation de ce scénario dans le cadre du présent rapport.

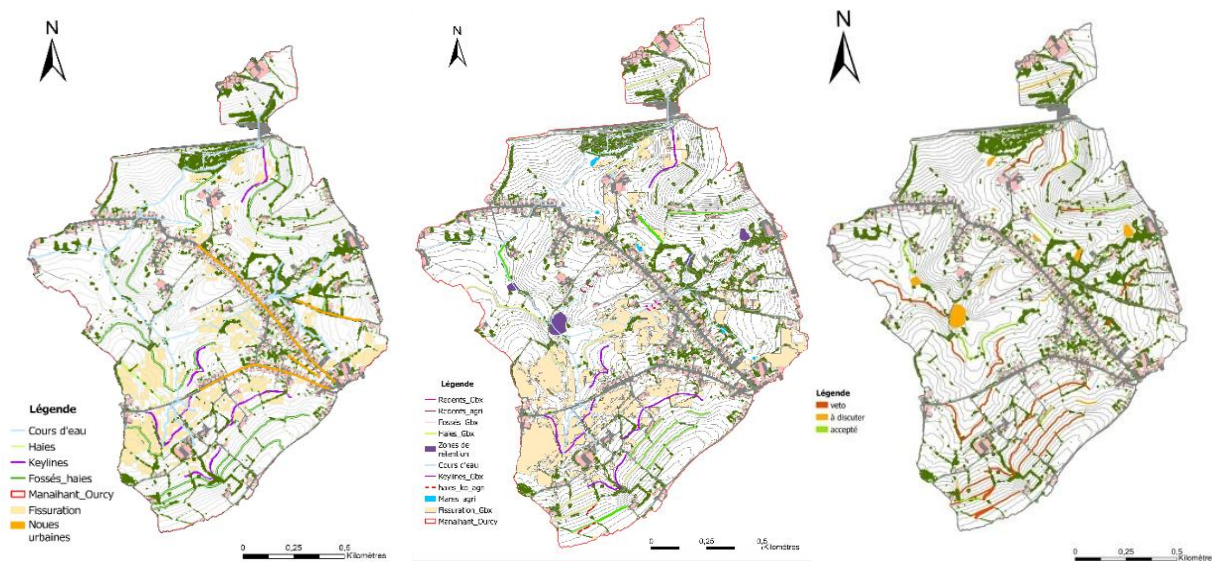


Figure 45 : Trois scénarios intermédiaires réalisés lors du processus de co-construction avec les agriculteurs à Manahant-Ourcy dans l’ordre de gauche à droite : Scénario théorique, Scénario 1 Agri + ULiège, statut d’acceptabilité.

Tableau 17 : Scénarios et typologies d’aménagement (emprise surfacique (m²) et linéaire (km)).

Aménage- ments	Scénarios				
	Théorique	Scénario 1 Agri	Scénario 1 Agri + ULiège	Scénario 2 Agri	Scénario 3 Agri (final)
Fossés (km)	5,325	1,125	3,052	1,125	0,393
Haies (km)	6,207	2,241	4,169	2,061	0,724
Noues agricoles (m²)	/	431	622	654	265
Keyline (km)	1,926	/	1,926	/	/
Noues urbaines (m²)	2205	2205	2205	2205	205
Mares (m²)	/	1068	1068	1160	1132
Zones de rétention (m²)	/	10 878	10 878	10 878	9884
Fissuration (km²)	0,255	/	0,255	/	/

La Figure 46 présente le « Scénario Agri 2 », qui représente les aménagements en milieu agricole qui ont été modélisés. Celui-ci comporte les aménagements en milieu agricole, mais également les noues en voirie pour le scénario « noue urbaine V1 ».

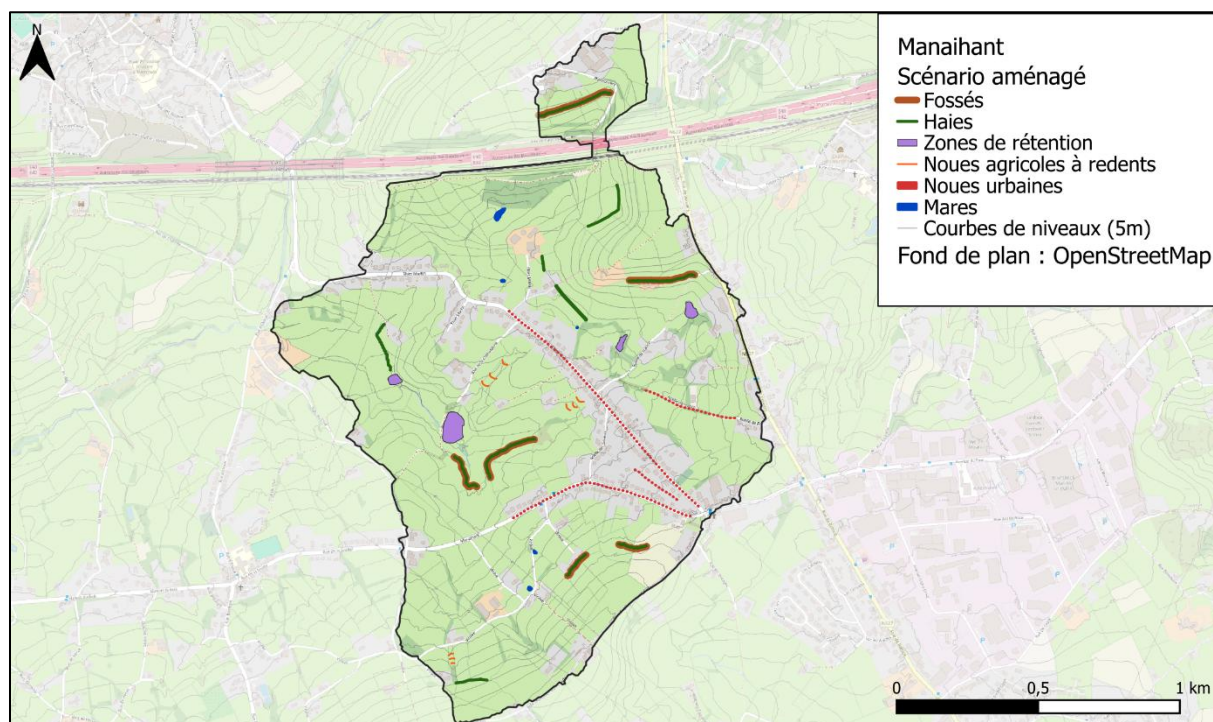


Figure 46 : Plan d'aménagement du « Scénario Agri 2 » pour le TIH de Manihant-Ourcy.

5.2.1.2. Habitants

Les évènements à destination des habitants

Plusieurs évènements ont été organisés à destination des habitants du bassin versant par le Contrat de rivière Vesdre, avec le soutien de la commune de Herve et l'équipe ULiège-GxABT (Tableau 18; Figure 47).

Tableau 18 : Evènements et participations des habitants de Manihant-Ourcy.

Evènements	Présence
Séance d'information (septembre 2025)	50 personnes
Balade de l'inondation et de la gestion de l'eau de pluie (printemps 2026)	8 personnes
Soirée de réflexion autour de la gestion de l'eau à la parcelle (printemps 2026)	19 personnes

Les objectifs de ces évènements étaient les suivants :

- Sensibiliser les habitants au caractère multicausal des inondations (ruissellement, imperméabilisation des sols, etc.) ;
- Identifier des habitants motivés à repenser la gestion de l'eau à l'échelle de leur habitation et prêts à mettre en place des aménagements adaptés.

Pour chacun de ces événements, la commune a apporté son soutien au projet en assurant une présence sur place et en contribuant à la diffusion de l'information, tant par courrier postal que par courrier électronique auprès des personnes inscrites sur la liste de diffusion.



Figure 47 : Evénements organisés dans le cadre du projet ModRec 2-Hydrologie pour les habitants de Manahant-Ourcy. En haut : séance d'information pour les habitants (à gauche) ; flyers pour la balade de l'inondation. Au milieu : balade de l'eau de pluie à Manahant-Ourcy. En bas : soirée d'échange sur la thématique de la gestion de l'eau à la parcelle.

Les aménagements chez les habitants

À l'issue des évènements, deux ensembles d'habitations ont exprimé un intérêt pour la mise en œuvre d'aménagements de gestion des eaux pluviales à l'échelle parcellaire. Ces propositions n'ont toutefois pas été intégrées dans la modélisation.

1. Première situation : Deux habitations voisines ont signalé des épisodes de ruissellement importants en provenance de parcelles agricoles en amont, entraînant des inondations à l'intérieur des maisons (Figure 48). Des dispositifs de type noues de stockage et de ralentissement des écoulements ont été proposés afin de limiter les transferts rapides.
2. Deuxième situation : Une habitation a exprimé un besoin de gestion des eaux de toiture et de ruissellement de parcelle. Une noue d'infiltration a été proposée à gauche de la maison (Figure 48). Elle serait alimentée par le pan arrière de la toiture, et connectée au réseau de la voirie via une surverse en suivant la pente du parking.

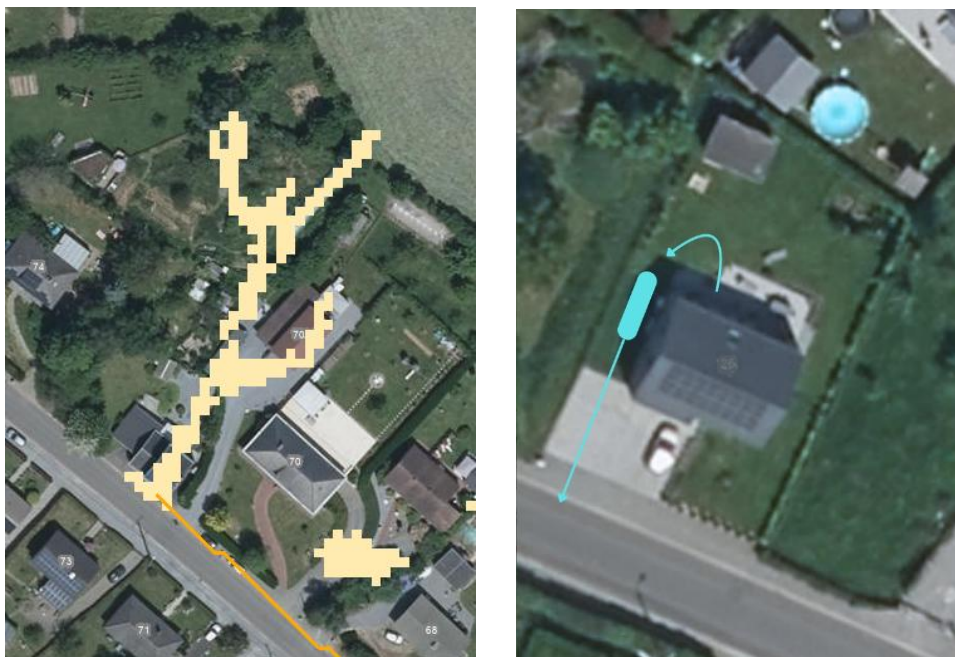


Figure 48 : Localisation des deux situations d'aménagement proposées à l'échelle parcellaire chez les habitants (WalOnMap et carte LIDAXE). Première situation à gauche ; Deuxième situation à droite.

5.2.1.3. La commune

Scénario Noues urbaines v1

Afin de démontrer que les zones urbaines ont un rôle à jouer dans la gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant, un scénario concernant uniquement les sols urbains a été construit par l'équipe ModRec2 de l'ULiège (Figure 49). Inspiré du travail de fin d'études de Clotilde Bourdoux, quatre noues urbaines (2205 m²) sur les voiries ont été intégrées

dans ce scénario (Bourdoux, 2025). Ces aménagements ont, notamment, été choisis pour leur simplicité d'implémentation dans le modèle mais beaucoup d'autres sont possibles. Ce scénario a été modélisé, et les résultats ont été présentés à la commune de Herve.

Comme indiqué précédemment, ce scénario a été intégré au scénario agricole dans la modélisation. Néanmoins, en isolant la contribution des seules noues en voirie, les simulations indiquent une réduction des débits de pointe de l'ordre de 12 %. Ce résultat s'explique par la capacité de ces décaissements topographiques à intercepter le ruissellement de surface et à favoriser l'infiltration locale de l'eau, réduisant ainsi le volume d'eau transféré vers le réseau hydrographique.

Scénario Noues urbaines v2 : après discussion avec la commune

Notons que le scénario V1 a été dessiné de manière théorique et systématique sur les 4 voiries concernées. Le scénario v2 a été pensé avec la commune de Herve et avec la réalité du terrain mais n'a pas été modélisé à l'inverse du scénario V1.



Figure 49 : Scénario intermédiaire avec uniquement les noues urbaines v1.

A la suite des réunions avec la commune de Herve, il a finalement été décidé d'implanter des noues au niveau de deux voiries (voir Figure 50 set Figure 51 pour illustrations et localisations) :

- Thier Martin : onze noues seront implantées au niveau des ralentisseurs/zones de stationnement en voirie. La commune étant actuellement en phase de test pour l'installation de ces ralentisseurs, leur prolongement en noues sur le bas-côté permettra d'assurer une cohérence d'ensemble.
- Rue de Manaihan : six noues seront aménagées à l'emplacement de six bacs de végétation communaux déjà présents le long de la voirie. Il est proposé de reconverter ces aménagements en noues, en tout ou en partie, selon leur pertinence au regard de la pente, des distances, du nombre de noues nécessaires et des volumes d'eau à gérer.

La végétation envisagée pour ces noues serait des plantes indigènes hélophytes telles que l'iris des marais (*Iris pseudacorus*), la reine des prés (*Filipendula ulmaria*), la menthe aquatique (*Mentha aquatica*), le jonc épars (*Juncus effusus*), la salicaire commune (*Lythrum salicaria*), la massette (*Typha latifolia*), etc. Ce sont des plantes qui ne demandent pas beaucoup d'entretien (une coupe par an).



Figure 50 : Visite de terrain à Manaihan-Ourcy pour les aménagements en voirie. A gauche ; emplacement d'un futur ralentisseur et noue sur la Thier Martin. A droite : les 6 bacs à fleurs de la commune convertibles en noue pour la rue de Manaihan.

Ce scénario, s'étant concrétisé tardivement dans le déroulement du projet, n'a pas pu faire l'objet d'une modélisation. Notons également que, bien que le scénario « Noues urbaines V1 » présentait une superficie de noues plus importante, il ne reposait sur aucune connexion réelle avec le terrain. À l'inverse, le scénario co-construit avec la commune s'appuie sur une vision concrète, cohérente et réalisable de l'aménagement envisagé.



Figure 51 : Plan des noues implémentées dans le scénario « Noues urbaines v2 ».

5.2.2. Fonctionnement hydrologique

Dans la suite, les résultats du scénario « 2 Agri », désigné ci-après comme scénario « aménagé », sont comparés à ceux de la situation actuelle (résumé au Tableau 17 et à la Figure 46). Ce scénario regroupe les aménagements concertés lors de l'avant-dernière phase de discussion avec les agriculteurs, ainsi que la première version des noues prévues sur les voiries (scénario « Noues urbaines v1 »).

Le scénario « final », également appelé « 3 Agri », n'a pas pu être modélisé, celui-ci ayant été finalisé le 30/05/2025, soit après la clôture des simulations. Le scénario « final » (3 Agri) se distingue principalement du scénario « 2 Agri » par une réduction des linéaires de fossés et de haies, ainsi que des surfaces de noues urbaines (Tableau 17). Toutefois, les aménagements les plus déterminants sur le plan de la réduction des débits de pointe, à savoir les mares et les zones de rétention, présentent des emprises quasi identiques entre les deux scénarios. Les réductions de débits de pointe à l'exutoire seront donc vraisemblablement proches de celles présentées dans ce rapport, tandis que les effets sur l'infiltration et l'évapotranspiration seront probablement inférieurs, en raison de la réduction des linéaires de haies et de fossés-haies.

5.2.2.1. Bilans saisonniers

Les bilans hydrologiques saisonniers du TIH de Manahant-Ourcy permettent de caractériser le fonctionnement hydrologique de la zone et d'évaluer l'impact du scénario (Figure 52) sur les flux et les stocks d'eau.

À l'échelle saisonnière, les précipitations sont plus élevées en été et en hiver (respectivement 269 et 246 mm) qu'au printemps et en automne (224 et 216 mm). Malgré des apports importants en période estivale, l'été correspond à une phase de déstockage net ($\Delta\text{Stock} = -94$ mm), principalement en raison d'une évapotranspiration élevée (236 mm). À l'inverse, l'hiver se distingue par une évapotranspiration très faible (24 mm), favorisant une recharge significative des stocks ($\Delta\text{Stock} = +123$ mm). Cette saison constitue ainsi la principale période de recharge du TIH. Hormis l'évapotranspiration, l'eau ne quitte le bassin versant que par la rivière. Les sorties par ce cours d'eau présentent une légère variation saisonnière, étant plus importantes en hiver et au printemps (121 et 124 mm) qu'en été et en automne (105 et 95 mm).

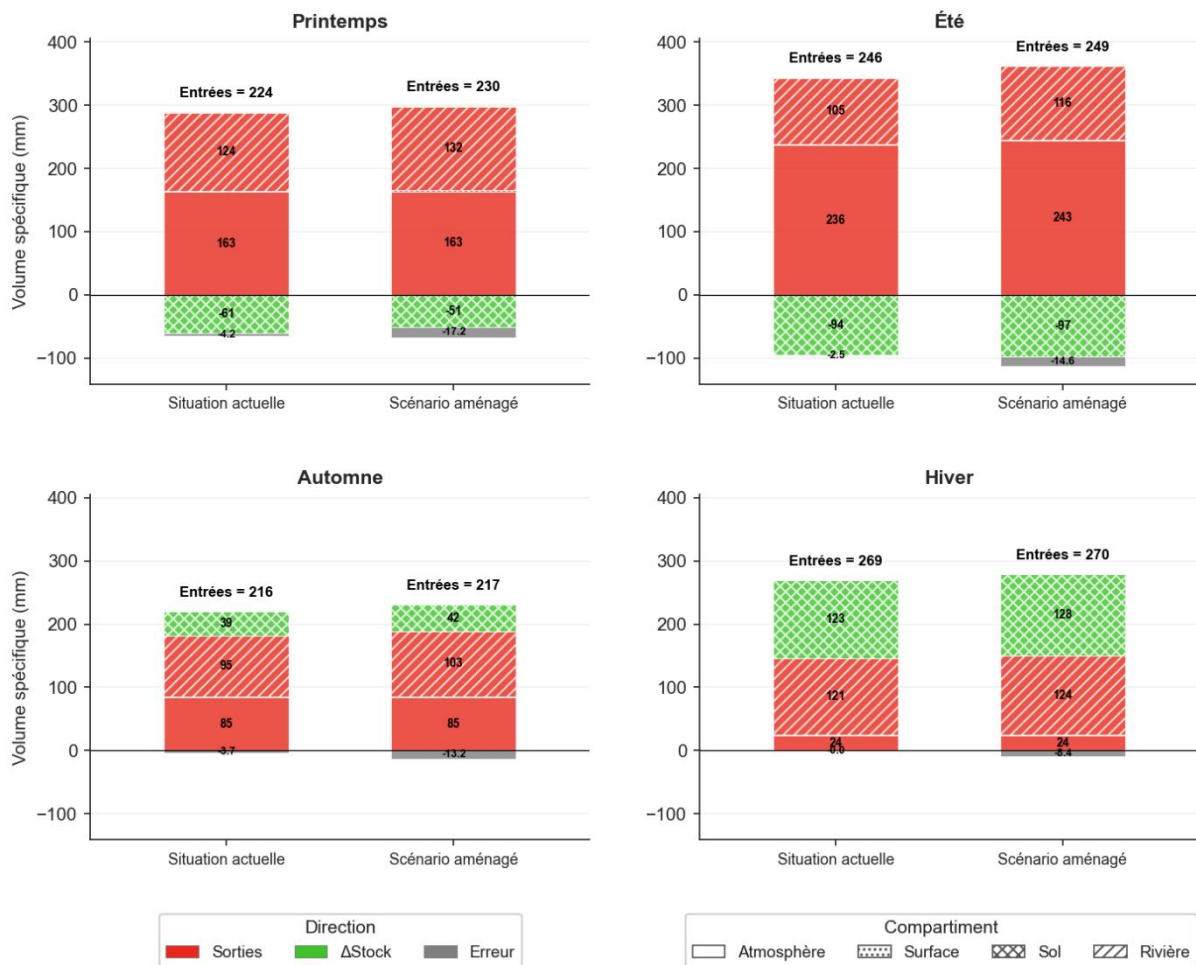


Figure 52 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de Manihant-Ourcy par saison pour la situation actuelle et le scénario aménagé.

Le scénario aménagé ne modifie pas de manière significative le bilan hydrologique global. Cette absence de variation marquée s'explique principalement par la faible emprise spatiale des aménagements (<1 % de la superficie totale du TIH). Les effets induits, localisés, tendent à se diluer à l'échelle du bassin étudié et ne se traduisent pas par des variations perceptibles du bilan agrégé. Il est toutefois probable que ces impacts soient da-

vantage visibles à des pas de temps plus fins, notamment lors d'évènements pluviométriques spécifiques. Les erreurs, limitées à un maximum de 7 % et considérées comme acceptables au regard des performances du modèle, sont présentes uniquement dans le scénario aménagé. Elles résultent de l'accumulation d'eau de surface au niveau des mares, fossés et noues, laquelle rend plus difficile la fermeture du bilan hydrique sur les pixels concernés.

5.2.2.2. Analyses d'hydrogrammes

Cette section présente la sélection et l'analyse détaillée d'évènements de crues, afin d'évaluer la réponse du système lors d'épisodes pluvieux contrastés. Les évènements retenus couvrent différentes saisons, intensités et conditions hydrologiques antécédentes, afin de représenter un large éventail de situations hydrologiques.

Sélection des évènements

La Figure 53 présente les évènements de dépassement d'un seuil de débit fixé au quantile 99,9 % ($Q = 0,329 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) pour la situation actuelle. Les dépassements sont associés à des épisodes de crue ponctuels, caractérisés par des pics de débit parfois très importants, pouvant dépasser $2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Au total, 10 évènements ont été sélectionnés. Ils sont majoritairement observés au printemps ($n=4$) et en été ($n=3$), tandis que leur occurrence présente une forte variabilité interannuelle (de 0 à 3 par an).

Une analyse des débits de pointe (Q_p) modélisés sur la sous-sélection des 10 évènements est présentée à la Figure 54. Il convient de noter que les conditions de linéarité entre les débits de la situation actuelle et ceux du scénario sont respectées ($p > 0.05$). Le scénario aménagé met en évidence une diminution importante des débits de pointe supérieurs au seuil de $0,329 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($n=10$), avec des réductions comprises entre 27 % et 67 %.

La tendance globale présente une bonne performance de réduction des débits de pointe. Toutefois, des différences existent entre les évènements. Dès lors, une analyse approfondie a été menée sur quatre évènements pluvieux représentatifs (Tableau 19). Ces évènements ont été sélectionnés parmi les six dernières années de simulation de manière à couvrir différentes saisons, conditions d'humidité antécédente et périodes de retour.

Le scénario aménagé permet une réduction notable des débits de pointe pour les évènements les plus intenses, atteignant 51% pour l'évènement de mai 2018 (1), 58 % pour les évènements de juin 2018 (2) et février 2020 (3) ainsi que 67 % pour l'évènement exceptionnel de juillet 2021 (4).

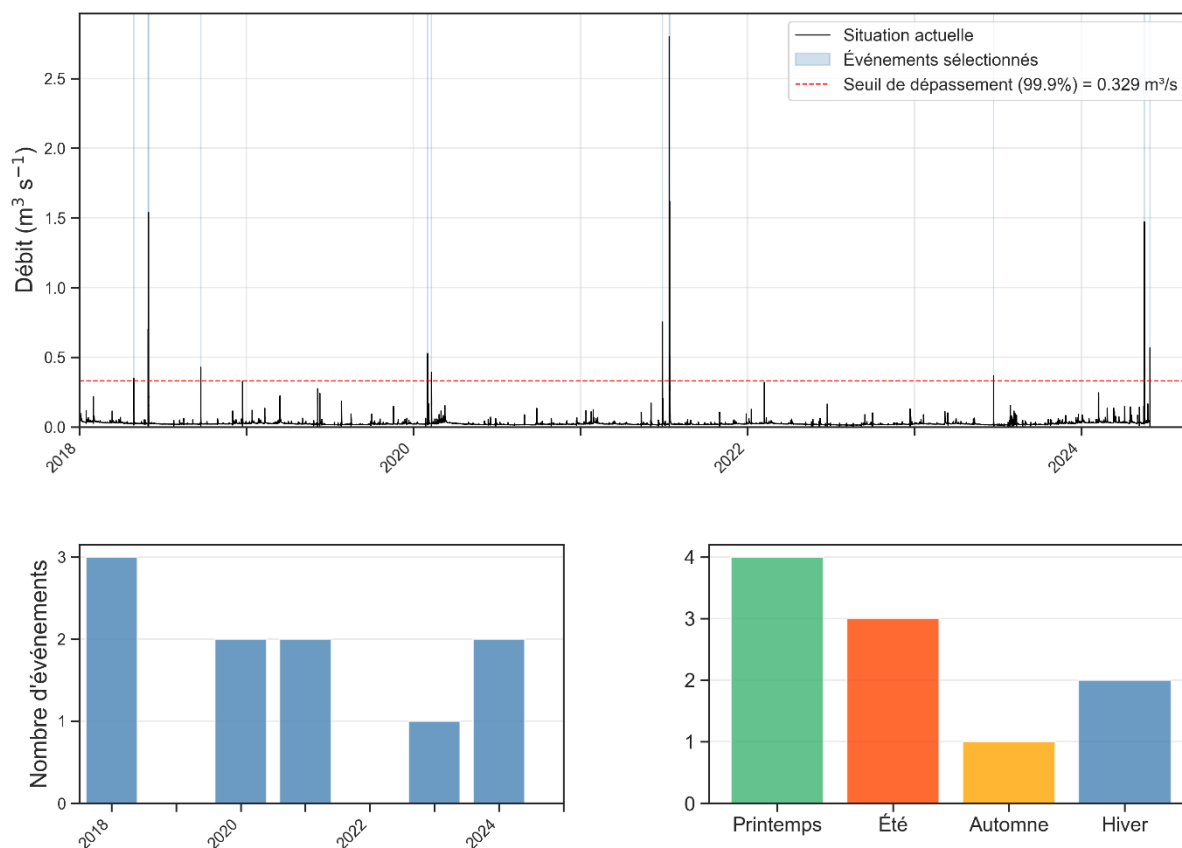


Figure 53 : Dépassements du seuil de débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) correspondant au quantile 99,9 % de la situation actuelle ($Q = 0,329 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) sur la période du 01/01/2018 au 01/09/2024. Les graphiques situés en bas à gauche et à droite présentent respectivement la fréquence.

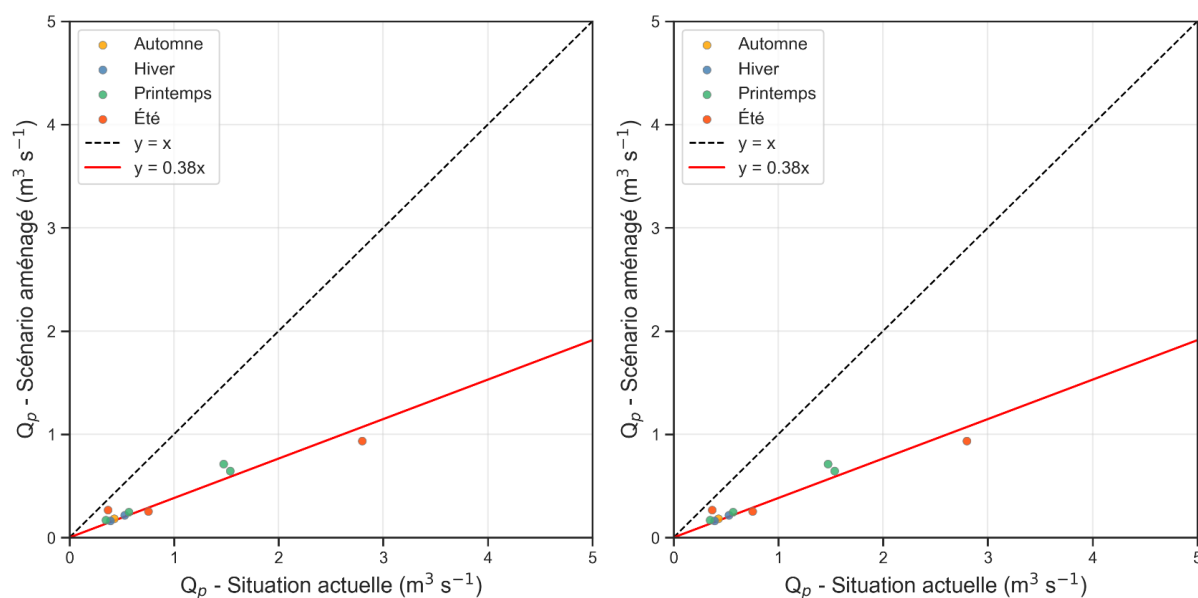


Figure 54 : Évolution des débits de pointe modélisés (Q_p) du TIH de Manihant-Ourcy dans le scénario aménagé, avec la droite de régression linéaire représentée en rouge.

Tableau 19 : Caractéristiques des quatre évènements pluvieux sélectionnés pour l'analyse approfondie.

#	Date	Saison	Période de retour (an)	Durée (h)	Pluviométrie (mm)	Conditions antérieures (mm 5j ⁻¹)
1	29/04/2018 – 02/05/2018	Printemps	< 2	32	41	30 (humides)
2	30/05/2018- 03/06/2018	Printemps	≈ 4	30	84	27 (humides)
3	01-03/02/2020	Hiver	< 2	24	28	42 (humides)
4	13-15/07/2021	Été	84	67	158	19 (intermédiaire)

Hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes met en évidence la forte réactivité hydrologique du TIH face aux précipitations (Figure 55 et Figure 56). Les hyétogrammes moyens et les hydrogrammes simulés apparaissent quasiment synchrones, traduisant des temps de réponse courts, autour d'une heure. Ce comportement s'explique par la combinaison de pentes marquées, une certaine artificialisation via l'urbanisation et une saturation des sols relativement rapide vu les conditions humides antérieures aux évènements étudiés (Tableau 19).

Le rôle des conditions d'humidité antécédente est démontré à travers l'évènement de juin 2018 (2), dont le hyétogramme présente deux impulsions successives (Figure 55). Bien que l'intensité des deux impulsions pluvieuses soit du même ordre de grandeur, c'est la seconde qui génère le débit de pointe maximal. La première phase de pluie contribue en effet à saturer progressivement les sols, augmentant fortement leur propension à produire du ruissellement lors de la seconde impulsion pluvieuse, pourtant moins intense.

Pour les évènements les plus intenses, tels que ceux de juin 2018 (2) et de juillet 2021 (4), 24 et 27 % des précipitations sont converties respectivement en ruissellement direct. Pour les évènements plus fréquents et moins intenses (1 et 3), cette proportion n'atteint qu'environ 15 %. Ces hydrogrammes confirment par ailleurs que les effets du scénario aménagé sont significatifs lors des quatre évènements sélectionnés, avec une réduction notable des débits sur l'ensemble de l'hydrogramme. Les aménagements compris dans le scénario aménagé entraînent un décalage temporel et un étalement perceptible des pics de crues. Ce décalage s'élève entre 2h30 pour l'évènement 3 et environ 4h pour les évènements les plus extrêmes (2) et (4).

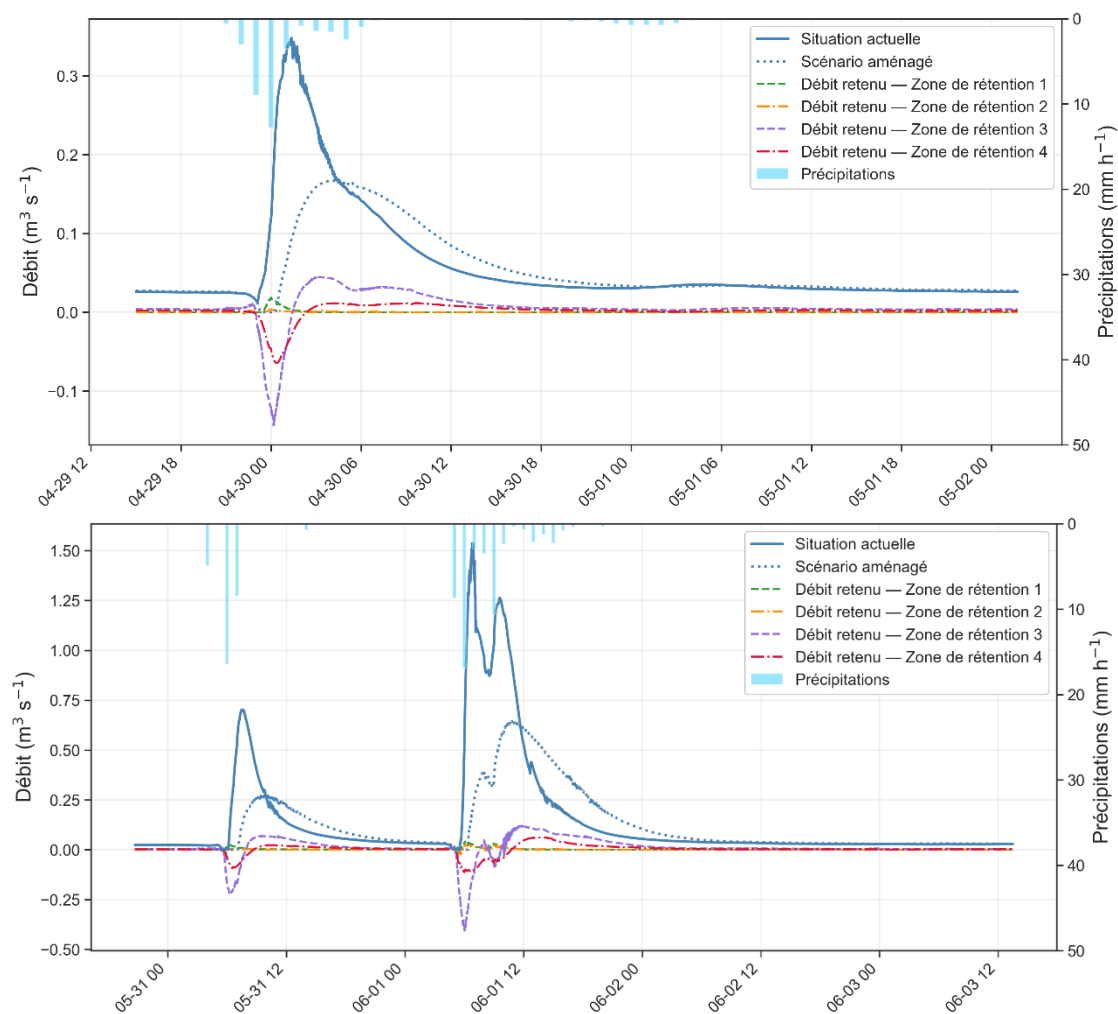


Figure 55 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Manihant-Orcy pour les événements pluvieux (1) et (2) (cf. Tableau 19). La figure compare la situation actuelle au scénario aménagé. Le débit retenu correspond à la différence de débit entre l'aval et l'amont de la zone de rétention.

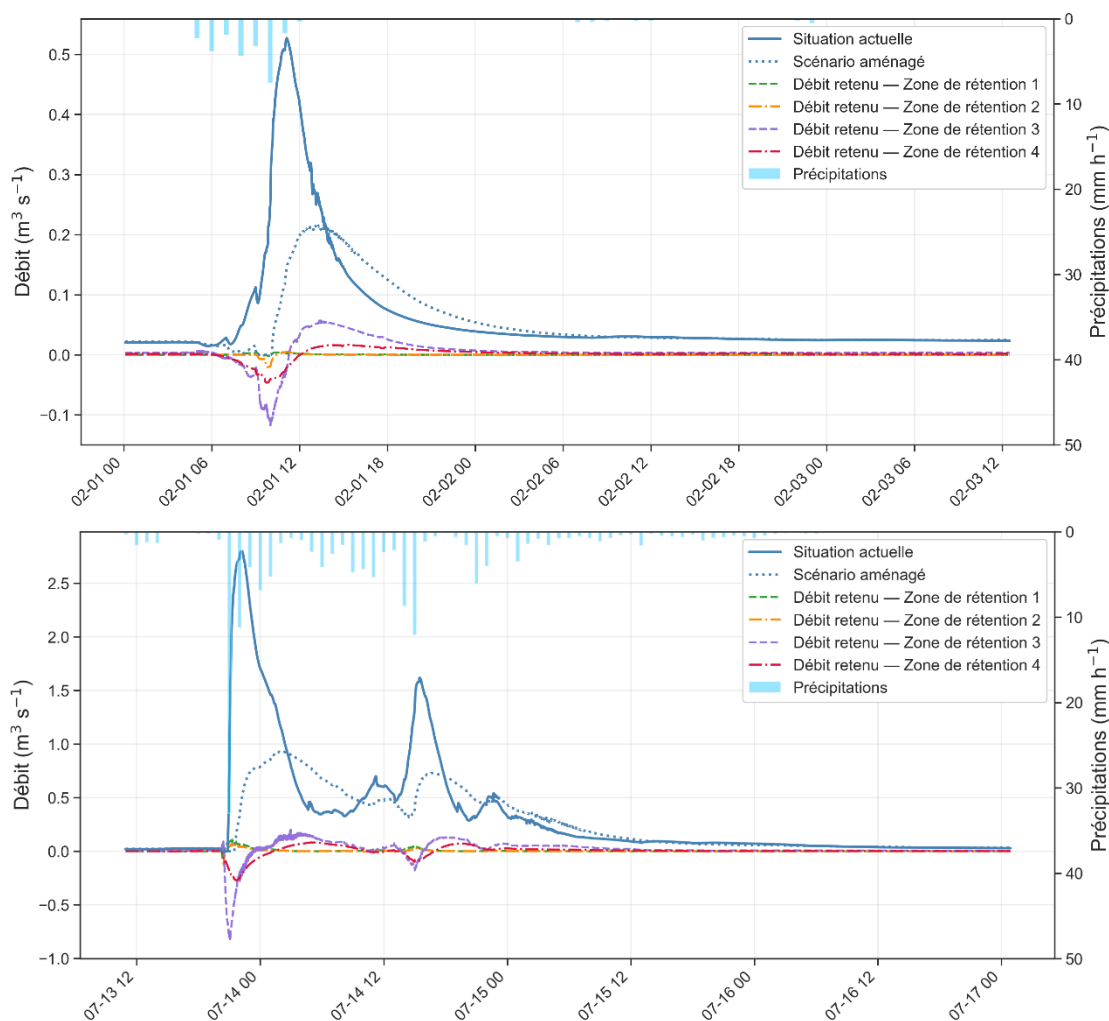


Figure 56 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Manihant-Ourcy pour les événements pluvieux (3) et (4) (cf. Tableau 19). La figure compare la situation actuelle au scénario aménagé. Le débit retenu correspond à la différence de débit entre l'aval et l'amont de la zone de rétention.

Effet des aménagements sur les débits de pointe

Les zones de rétention (Figure 57) contribuent de manière déterminante à l'atténuation et le décalage des débits de pointe. En leur absence, la réduction des débits de pointe ne serait limitée qu'à 14 % (Figure 58), alors que leur intégration porte cet effet à environ 60 %. Or, comme mentionné précédemment, les zones de rétention du scénario final (3 Agri) présentent une emprise quasi identique à celles du scénario modélisé ici. Il est donc raisonnable d'estimer que le scénario final produira des réductions de débits de pointe de l'ordre de 50 %. Néanmoins, la méthode d'implémentation des zones de rétention dans le modèle influence fortement les débits simulés dans le réseau hydrographique, c'est pourquoi un monitoring d'aménagements réels serait particulièrement pertinent.

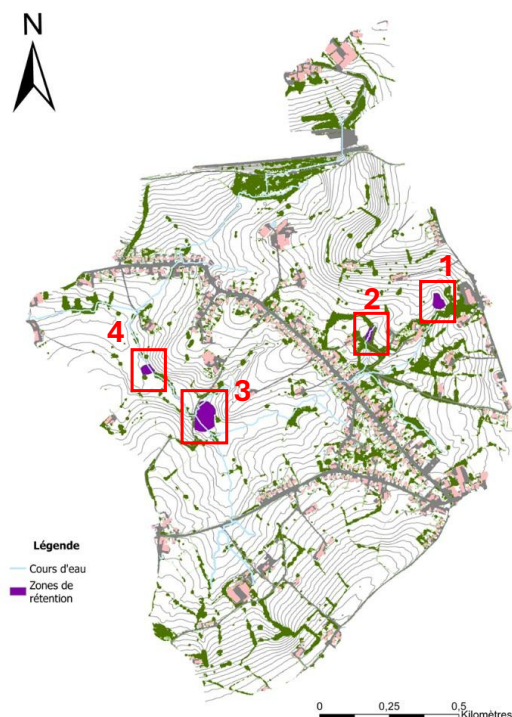


Figure 57 : Localisation des zones de rétention numérotées au sein du TIH de Manihant-Ourcy.

Les zones de rétention n°1 et n°2, situées dans la partie amont du bassin versant et caractérisées par une faible aire contributive, présentent une capacité de stockage limitée. En conséquence, un léger accroissement du débit est observé en début d'évènement pour les quatre épisodes étudiés, à l'exception de la zone de rétention n°2 lors de l'évènement de juin 2018.

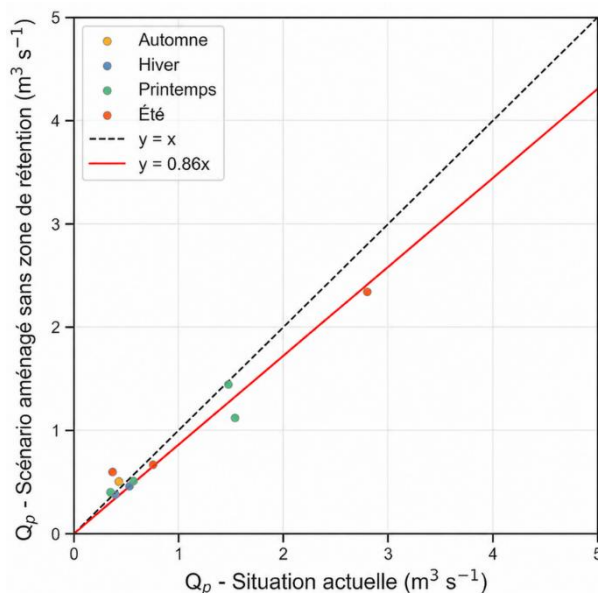


Figure 58 : Évolution des débits de pointe modélisés (Q_p) du TIH de Manihant-Ourcy dans le scénario aménagé sans les quatre zones de rétention, avec la droite de régression linéaire représentée en rouge.

À l'inverse, les zones de rétention n°3 et n°4 assurent un stockage plus important de l'eau dans le cours d'eau. La zone n°3, de plus grande dimension et située en amont de la zone n°4, est la plus efficace, avec une réduction des débits à l'exutoire comprise entre 7 et 27 % selon l'évènement considéré. Lors des premières heures de l'évènement de juillet 2021, cette zone n°3 a emmagasiné 3000 m³ d'eau de ruissellement, soit l'équivalent d'environ une piscine olympique. Ce volume a ensuite été progressivement restitué dans les heures suivant le pic de crue. La zone n°4, de plus faible capacité de stockage et située en aval, présente un effet plus modéré, avec une diminution des débits comprise entre 1,7 et 3,6 %.

5.2.2.3. Cartographies évènementielles

La cartographie évènementielle des coefficients d'écoulement (*CE*) permet d'évaluer spatialement les mécanismes à l'œuvre et d'apporter des éléments d'explication aux dynamiques contrastées observées sur les hydrogrammes (Figure 59 et Figure 60).

Un premier constat s'impose, quel que soit l'évènement : les zones imperméabilisées sont systématiquement les plus contributives au ruissellement, avec des *CE* de 0,86 à 1, stables entre scénarios et types d'évènements. La quasi-totalité de l'eau tombant sur ces surfaces est directement convertie en ruissellement. Certaines zones de prairies, associées à des zones humides, sont également génératrices de ruissellement.

Pour les surfaces agricoles et la végétation arborée, le comportement dépend fortement de l'intensité de l'évènement. Lors d'un évènement courant (Figure 59, évènement 1), ces surfaces absorbent la quasi-totalité des précipitations et ne génèrent pratiquement pas de ruissellement. À l'échelle du TIH, le *CE* avoisine alors 0,13, correspondant essentiellement au ruissellement généré par les surfaces imperméabilisées et par les zones de saturation permanente, bien que ces dernières ne représentent qu'une faible part de la superficie du territoire. Lors des évènements extrêmes (2 et 4), la capacité d'infiltration des sols est dépassée et ces surfaces deviennent à leurs tours génératrices de ruissellement, portant le *CE* du TIH à 0,34 et 0,45 respectivement.

Ce contraste explique également les faibles diminutions de *CE* liées au scénario aménagé pour les évènements peu intenses. Les aménagements étant implantés sur des surfaces agricoles déjà infiltrantes lors des évènements courants, la production de ruissellement à intercepter y est quasi nulle. Ces différences restent néanmoins systématiquement en faveur du scénario traduisant une réduction de production d'écoulement dans tous les cas, mais d'ampleur limitée à l'échelle du bassin versant, de l'ordre de 0,1 à 1,2 % en moyenne sur l'ensemble du TIH selon l'évènement considéré.

La carte des différences de CE entre situation actuelle et scénario aménagé (Figure 59 et Figure 60) révèle que l'effet du scénario est spatialement localisé et propre à chaque type d'aménagement. Les réductions les plus marquées s'observent au droit des noues urbaines, dont la désimperméabilisation supprime directement la production de ruissellement sur les surfaces concernées. Au droit des haies et des fossés-haies, ainsi qu'en aval de ces aménagements, la diminution de CE traduit un ralentissement et une diminution des écoulements favorisant l'infiltration. Cet effet résulte des modifications au droit des aménagements, notamment l'augmentation de la rugosité de surface, de la porosité du milieu et les changements topographiques locaux.

Les noues agricoles, mares et zones de rétention contribuent quant à elles par accumulation temporaire des eaux. Leur efficacité est cependant conditionnée à leur dimensionnement : celui-ci doit à la fois prévenir tout débordement et assurer une vidange suffisante entre deux épisodes pluvieux, de sorte que la capacité de rétention soit restaurée avant l'évènement suivant.

Bien que le scénario aménagé entraîne une réduction globale du ruissellement, la redistribution spatiale des écoulements, notamment par la création de zones de concentration induites par les fossés, peut engendrer des effets locaux. Certains aménagements peuvent en effet rediriger des écoulements vers des zones à saturation rapide ou concentrer davantage d'eau sur des axes de drainage préexistants, se traduisant par une augmentation locale du CE . Cet effet, visible en rose sur les cartes de différences (Figure 59 et Figure 60), souligne la nécessité d'une conception attentive des aménagements afin d'éviter tout transfert non maîtrisé vers des zones sensibles.

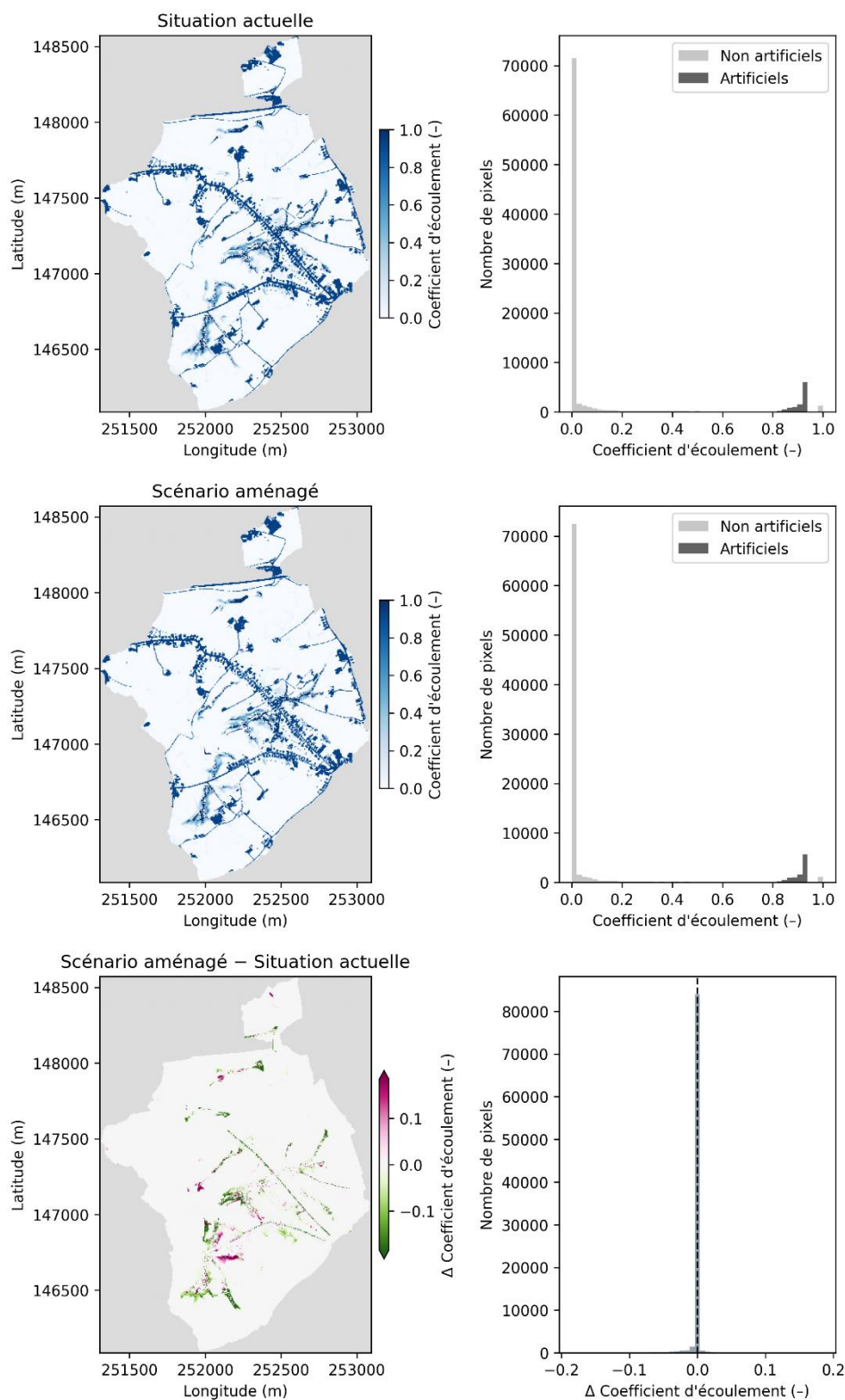


Figure 59 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (1) pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

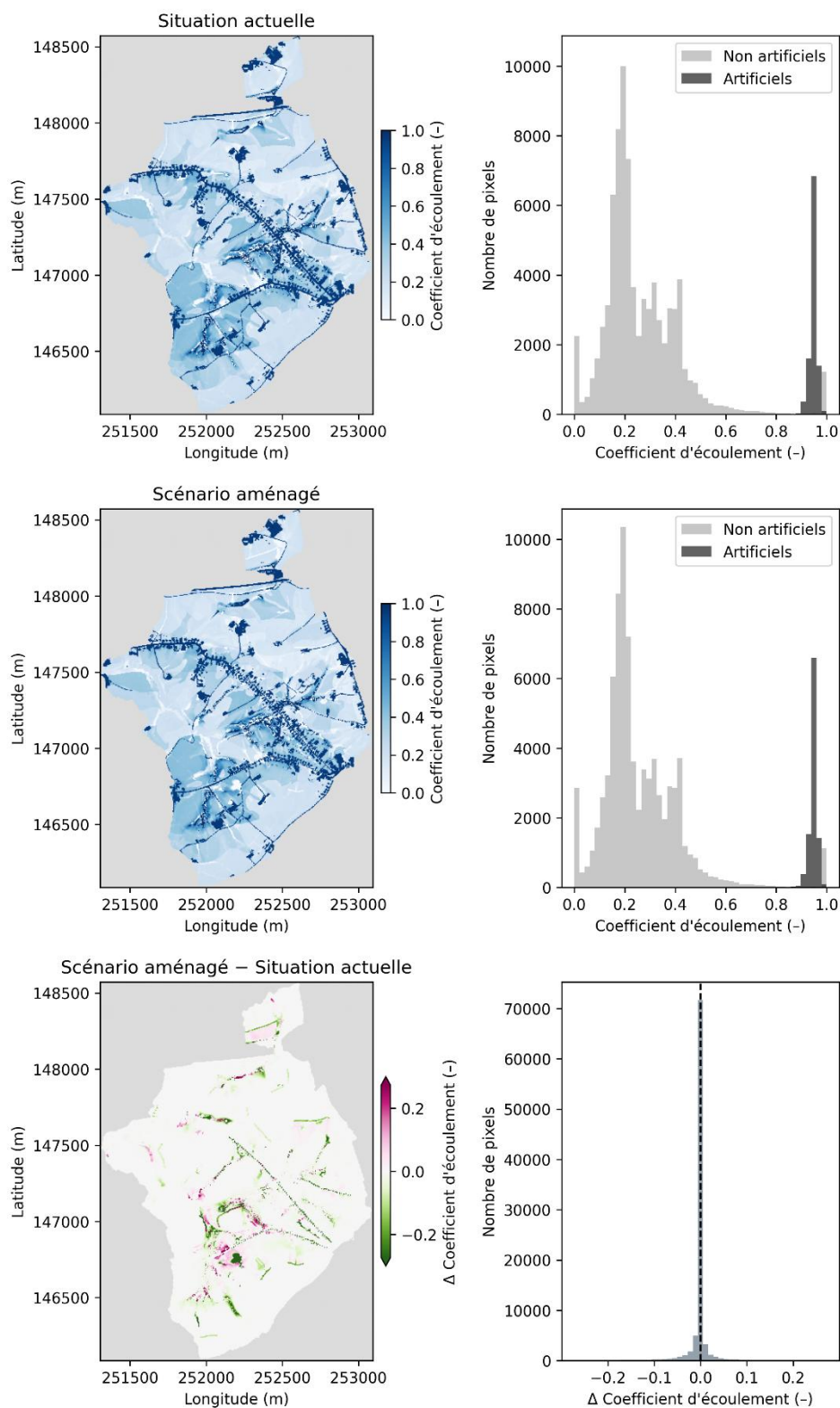


Figure 60 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

5.2.2.4. Cartographies long terme

Evapotranspiration réelle

La cartographie de l'évapotranspiration réelle (ET_R) annuelle moyenne permet de distinguer trois grands types d'occupation du sol aux comportements contrastés (Figure 61). Les zones imperméabilisées, dépourvues de végétation, présentent logiquement les valeurs les plus faibles ($\leq 200 \text{ mm an}^{-1}$). Les prairies affichent une ET_R d'environ 500 mm an^{-1} . Certaines prairies, associées aux creux de vallées, ressortent un peu plus en vert que d'autres, suggérant une meilleure disponibilité de l'eau pour l'évapotranspiration. La végétation arborée, comprenant haies, alignements d'arbres et arbres isolés, constitue l'occupation qui évapotranspire le plus, avec des valeurs pouvant atteindre 940 mm an^{-1} .

Les effets du scénario aménagé sur l' ET_R restent localisés majoritairement au droit des aménagements. La conversion de prairies en haies n'augmente l' ET_R que de manière locale, ce qui explique les effets modestes observés à l'échelle des bilans globaux. L'impact des fossés sur l' ET_R est quant à lui très limité, en l'absence de changement de végétation associé. Les noues urbaines retenant des petites quantités d'eau et, étant végétalisées, évapotranspirent nettement plus que dans la situation actuelle. Les mares et zones de rétention provoquent localement une diminution de l' ET_R car l'occupation du sol change d'un couvert végétal en une masse d'eau. Par conséquent, il n'y a plus de transpiration de la végétation, mais uniquement de l'évaporation de l'eau de surface.

Stress hydrique

Les cartes de stress hydrique révèlent que les prairies subissent un stress modéré durant 5 à 40 jours par an avec une moyenne de 15 jours par an à l'échelle du TIH (Figure 62). Cette variabilité reflète les différences de réserves utiles en eau entre les unités hétérogènes de sols, dont les délimitations sont clairement identifiables sur cette carte. Les unités de sol les plus exposées sont les sols limono-caillouteux avec une charge caillouteuse superficielle (Gbbf4 ; CNSW), ou encore les sols associés aux smectites de Herve (Edby2 ; CNSW). Bien que cette période de déficit n'engendre que de légères variations de l'évapotranspiration annuelle (comme constaté à la section précédente), elle peut temporairement contraindre la disponibilité en eau pour la végétation herbacée, avec des répercussions potentielles sur la production fourragère. Il convient toutefois de noter que MIKE SHE modélise l'évapotranspiration réelle de manière continue dès que l'eau est à nouveau disponible dans le sol, sans tenir compte d'un éventuel délai de récupération physiologique de la végétation après un épisode de stress. Cela conduit probablement à une légère surestimation de l' ET_R en sortie de période sèche.

À l'inverse, la végétation arborée (haies ou alignements d'arbres) bénéficie d'un accès racinaire aux horizons profonds du sol, lui conférant une plus grande résilience face aux déficits hydriques de surface. Elle peut ainsi constituer une ressource fourragère d'appoint durant les épisodes où les prairies sont soumises à un stress hydrique. Par ailleurs,

les simulations du scénario aménagé indiquent que la conversion de parcelles de prairies en haies, mares et noues agricoles atténue localement ce stress hydrique, suggérant que ces aménagements sont susceptibles de favoriser une couverture végétale plus résiliente aux épisodes de sécheresse, sous réserve des limites de représentation du modèle mentionnées ci-dessus.

Saturation des sols

La carte de saturation des sols met en évidence une forte variabilité spatiale, allant de 0 à 365 jours de saturation par an (Figure 63). Les zones les plus exposées se situent principalement à l'aval du TIH, au sein des fonds humides (i.e., complexe de drainage F dans la CNSW). L'influence des caractéristiques pédologiques est, par ailleurs, particulièrement marquée au nord-est du bassin : la délimitation des classes de drainage de la CNSW y conditionne nettement la saturation. En effet, les sols à charge caillouteuse superficielle (Gbbf4), qui limitent la porosité, ainsi que la bande argileuse de smectites (Edby2), dotée d'une plus faible capacité d'infiltration, exacerbent cette saturation locale. Cela trouve d'ailleurs un écho dans les témoignages recueillis auprès des agriculteurs lors des entretiens, qui identifiaient spontanément ces zones humides comme des secteurs difficiles à exploiter.

En accord avec les dynamiques d'évapotranspiration observées, les sols situés sous un couvert arboré sont systématiquement moins saturés que les prairies adjacentes. Cette tendance est corroborée par le scénario aménagé, qui montre que l'implantation de haies réduit localement la saturation d'environ 40 jours par an. À l'inverse, on observe une augmentation locale de la saturation au droit des mares, des noues agricoles et des noues urbaines. Pour ces ouvrages, le décaissement topographique, couplé à la désimperméabilisation dans le cas des noues urbaines, favorise logiquement l'accumulation et la rétention d'eau en surface au sein du paysage.

Redistribution spatiale des flux

Lorsque la situation actuelle est comparée au scénario aménagé, l'aval de certaines mares et haies-fossés présente une réduction d'accumulation de flux (provoquant une diminution de l'évapotranspiration (Figure 61), du coefficient d'écoulement (Figure 59 et Figure 60) et du nombre de jours où le sol est saturé à plus de 95 % (Figure 63) ainsi que d'une augmentation du nombre de jours de stress hydrique (Figure 62). Ce phénomène s'explique par la rétention d'eau dans les fossés et mares entraînant une diminution de l'eau en surface en aval de ces aménagements. Dans les zones concernées, ce n'est pas problématique car ces zones sont déjà fortement humides, en témoignent la présence de joncs et la faible exploitation par l'agriculteur. Cependant, assécher une zone dans d'autres contextes peut entraîner davantage de sécheresse. Il s'agit d'un point d'attention en cas de transposition à un autre territoire. Les zones concernées sont représentées en rose sur les Figure 61, Figure 62 et Figure 63.

En outre, une zone au sud de la rue de Manaihan concentre plusieurs axes d'écoulement convergeant vers un puits sous la voirie. Elle a déjà connu des inondations. Cette zone présente une forte augmentation d'évapotranspiration, de saturation ainsi qu'une réduction notable du stress hydrique (en vert sur les Figure 61, Figure 62 et Figure 63). L'analyse de l'accumulation de flux montre que les fossés-haies et les mares modifient localement le parcours de l'eau au sein du bassin versant. Ce constat soulève un point d'attention importants pour toute transposition à d'autres territoires. En effet, il est nécessaire d'anticiper les effets de redistribution des flux en aval de ces ouvrages, afin de ne pas diriger les eaux vers des zones déjà exposées au risque d'inondation.

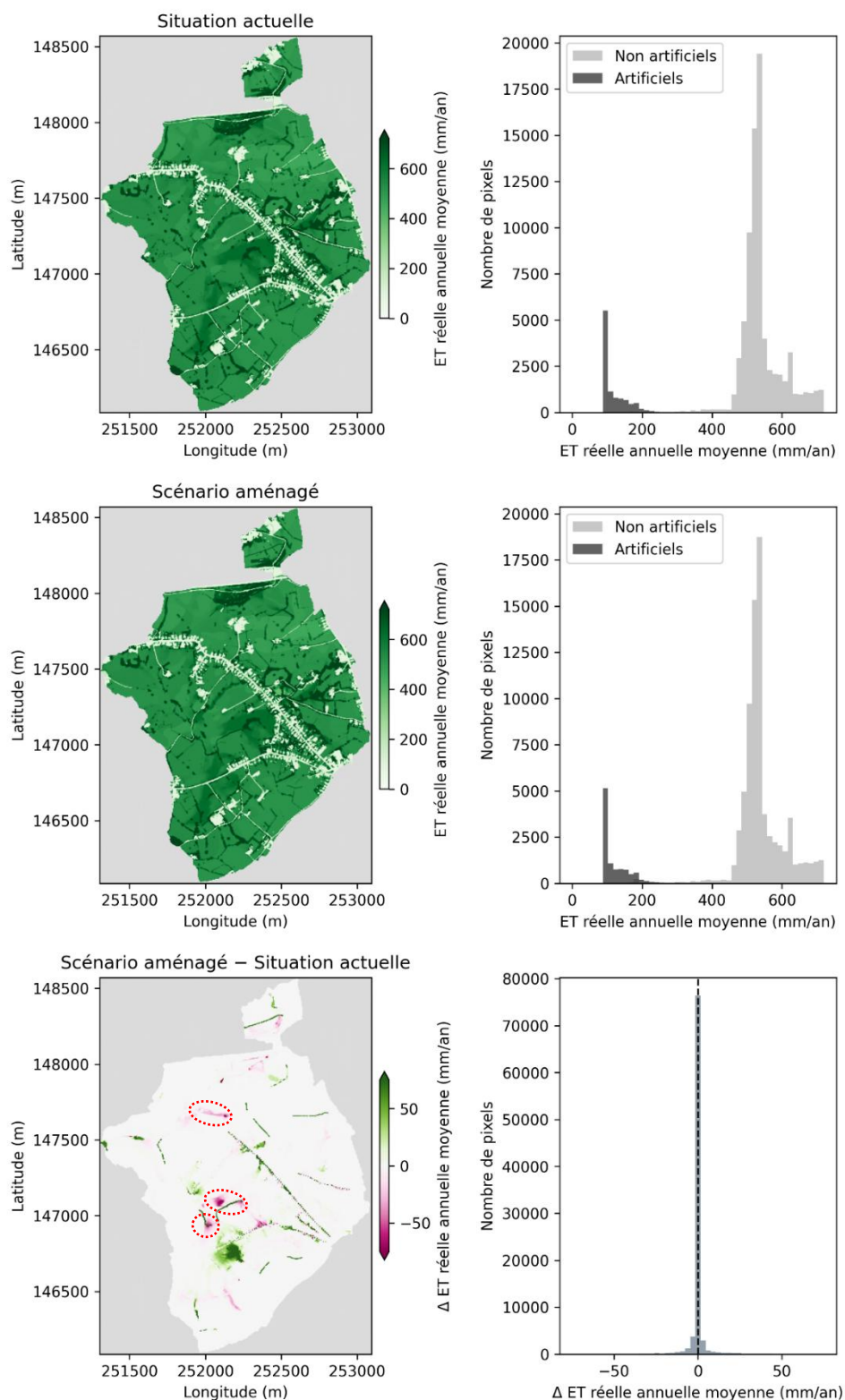


Figure 61 : Evapotranspiration réelle (ET_R) annuelle moyenne sur le TIH de Manaiant-Ourcy pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de ET_R par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

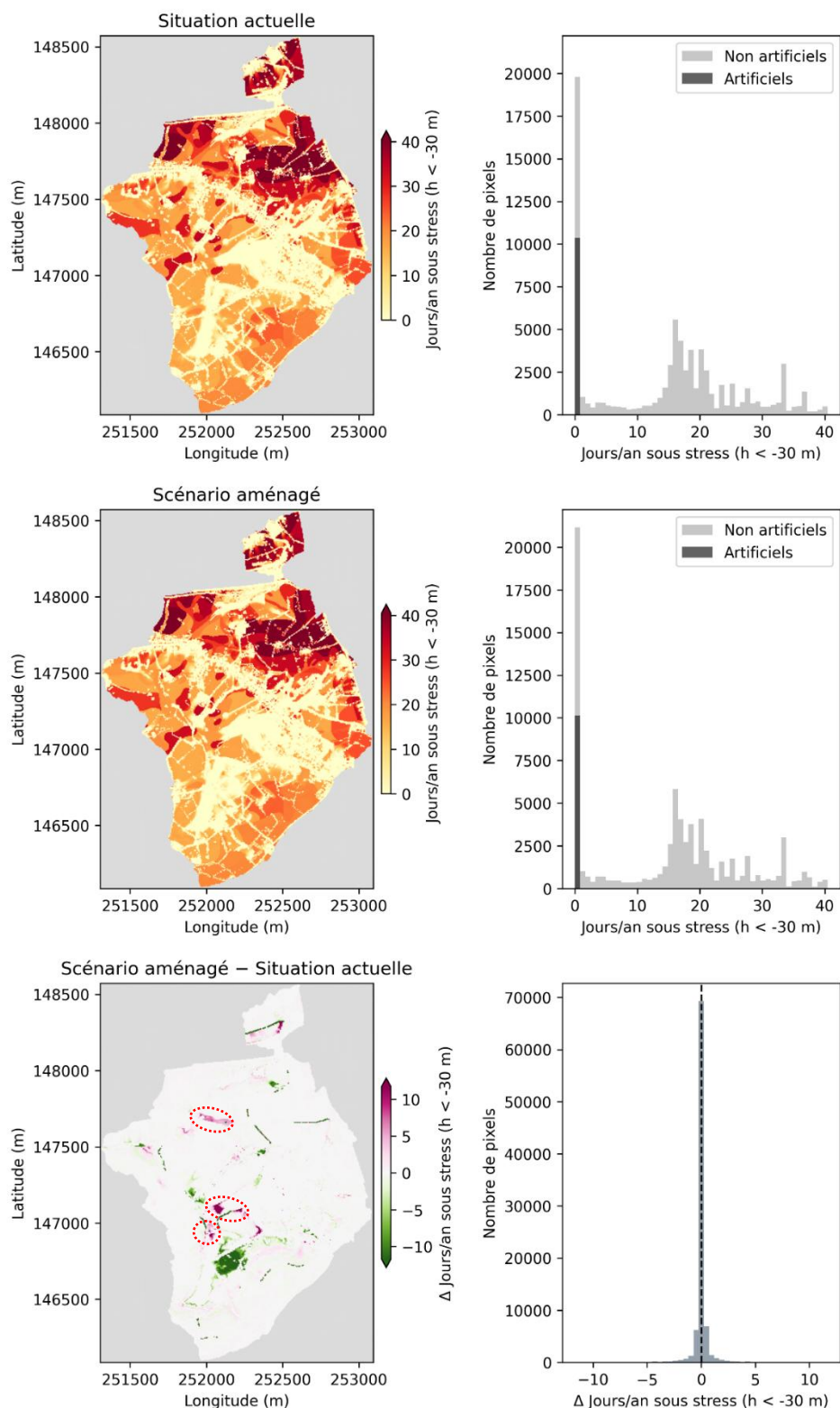


Figure 62 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de Manihant-Ourcy pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (bas). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une diminution (vert) ou une augmentation (rose) du nombre de jours sous stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

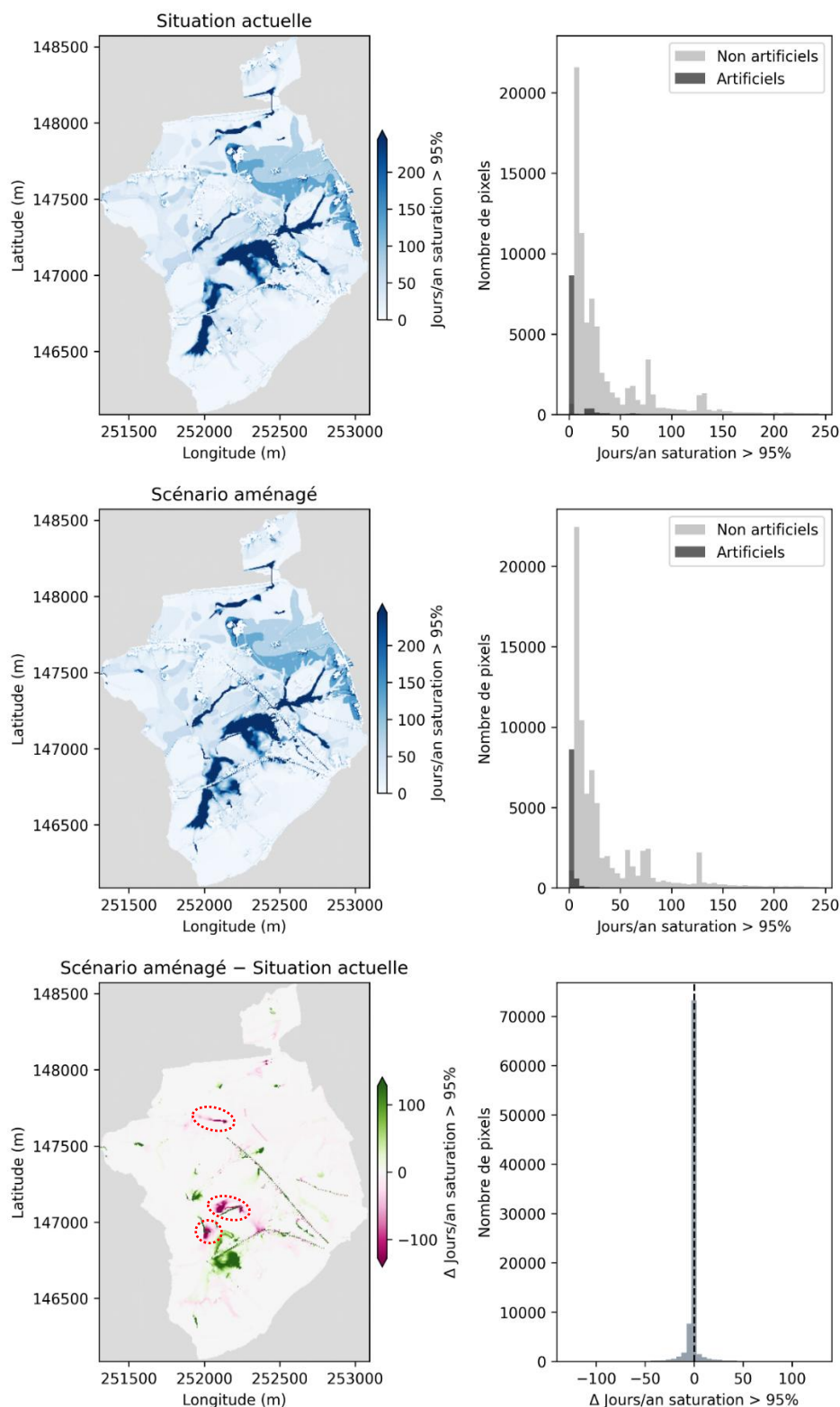


Figure 63 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de Manahant-Orcy pour la situation actuelle (haut) et le scénario aménagé (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) du nombre de jours où le sol est saturé par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

5.2.2.5. Localisation des aménagements

Afin d'identifier les déterminants biophysiques de l'efficacité des aménagements sur le TIH de Manihant-Ourcy, leur contexte d'implantation a été caractérisé à partir de plusieurs variables explicatives. Rappelons que les emplacements ont été définis en concertation avec les agriculteurs exploitants et guidés par l'équipe ModRec 2 de l'ULiège et le CRV. Il convient par ailleurs de noter que les aménagements n'occupent pas des superficies équivalentes au sein du bassin versant. Par ordre croissant d'emprise spatiale, on distingue : les noues agricoles, les mares, les noues urbaines, les haies, les zones de rétention et les fossés-haies.

L'occupation du sol dominante étant la prairie intensive permanente, la majorité des aménagements y ont été localisés ; les noues urbaines constituent une exception, implantées principalement sur surfaces artificialisées (Figure 64).

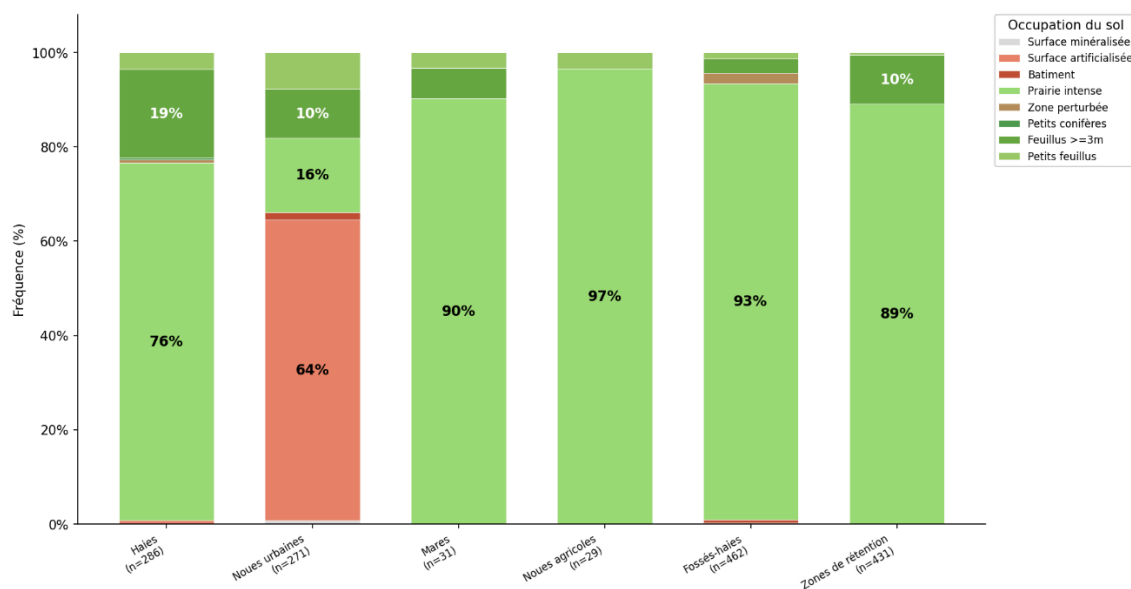


Figure 64 : Répartition des types d'aménagement en fonction de l'occupation du sol (LifeWatch 2022) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé.

La topographie révèle deux groupes fonctionnels distincts (Figure 65). Les fossés-haies, noues agricoles et haies occupent une large gamme de pentes pouvant atteindre environ 30 %, cohérente avec leur rôle de ralentissement du ruissellement et de redistribution latérale de l'eau sur les versants. Les mares, zones de rétention et noues urbaines se concentrent en revanche sur des pentes faibles, en position de zone humide aval, avec des sols peu infiltrants et donc des conditions favorables au stockage.

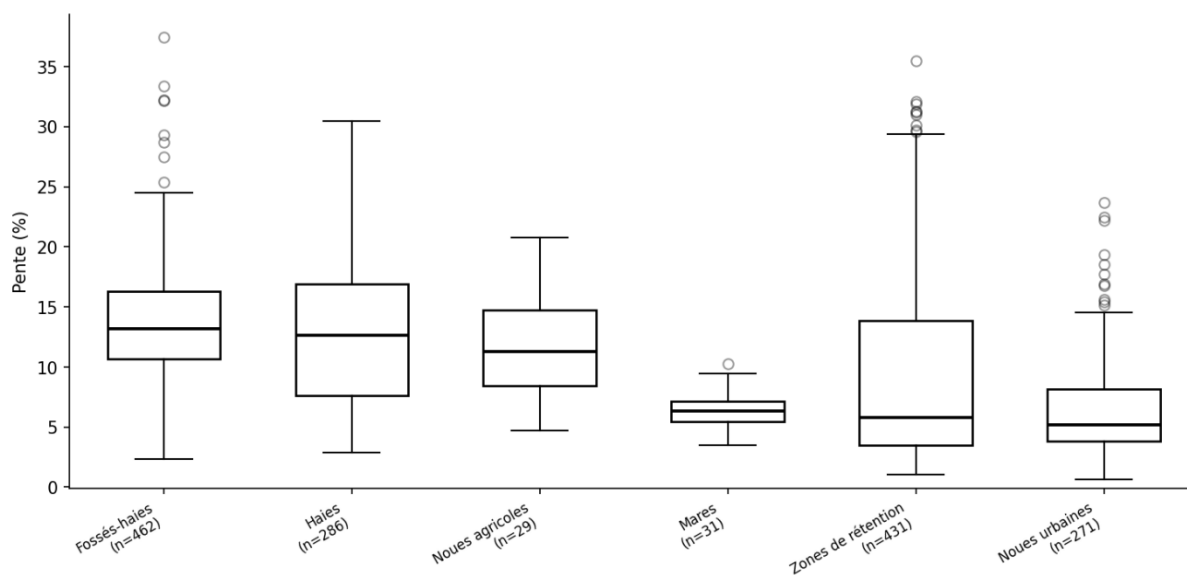


Figure 65 : Répartition des types d'aménagements en fonction des pentes (%) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé.

Concernant la pédologie, les aménagements se distribuent sur plusieurs types de sol (Figure 66). Cette répartition n'est toutefois pas homogène entre types d'aménagement : les zones de rétention sont préférentiellement localisées sur des sols à drainage assez pauvre à très pauvre, reflétant une contrainte d'infiltration qui oriente vers une logique de stockage. A l'inverse, les haies et fossés-haies se concentrent quasi exclusivement sur des sols à drainage favorable à modéré, parfois imparfait (Figure 67).

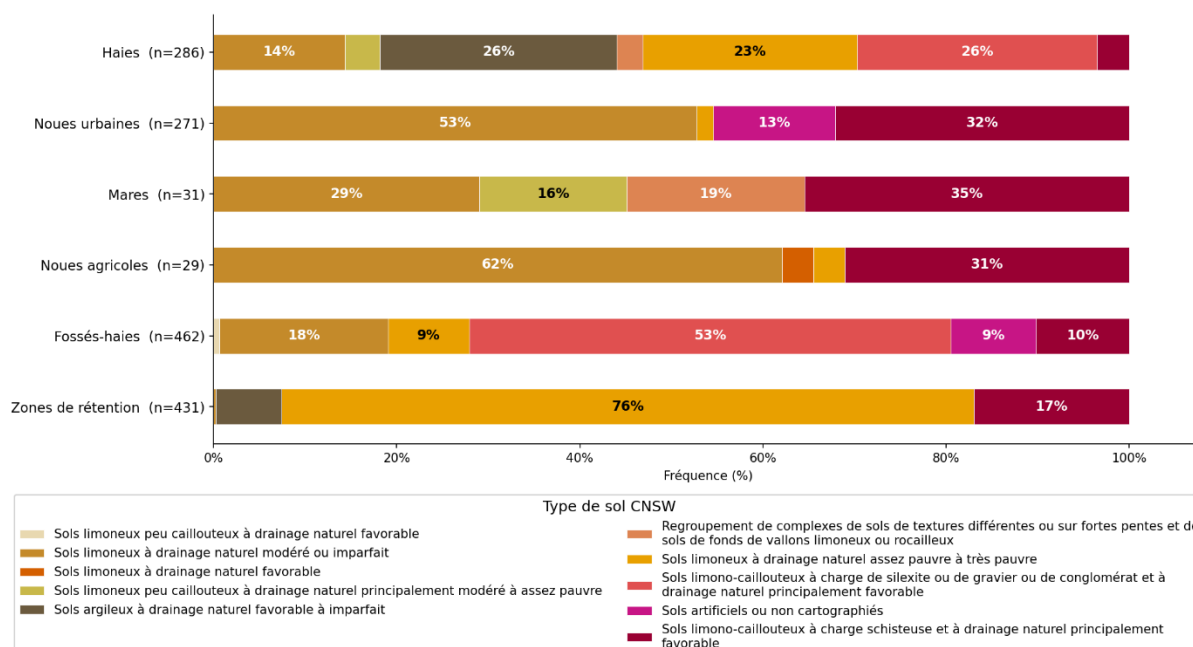


Figure 66 : Répartition des types d'aménagement en fonction des types de sol (CNSW) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé.

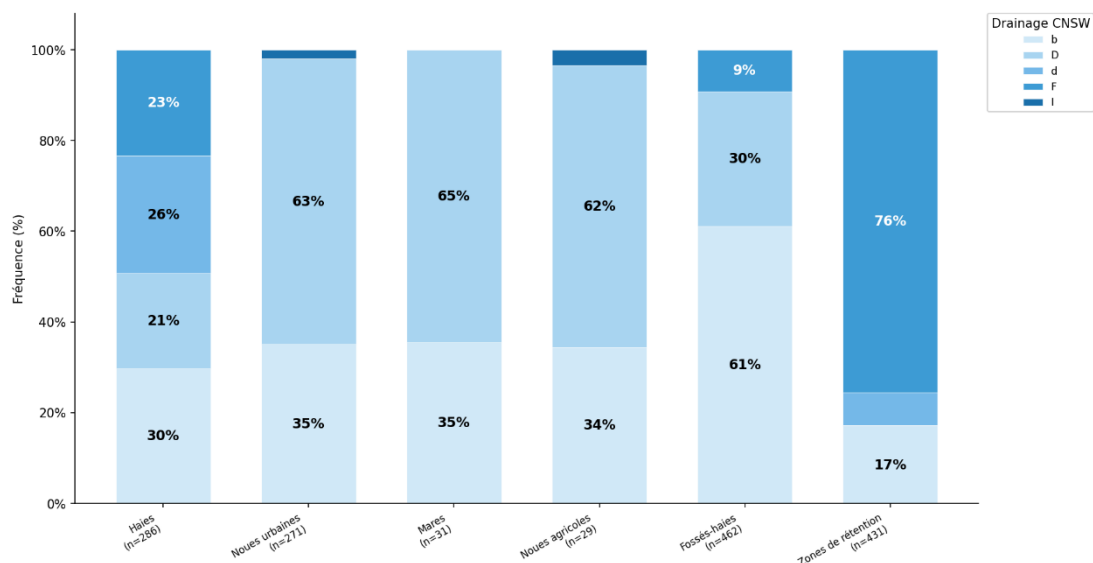


Figure 67 : Répartition des types d'aménagement en fonction des classes de drainage (CNSW) au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé. 'b', 'D', 'd', 'F', 'I' correspondent respectivement aux classes de drainage suivantes : drainage naturel légèrement excessif (textures Z) ou favorable (textures L, A, E, U, G) ; drainage modéré ou imparfait ; drainage naturel imparfait ; drainage pauvre ou assez pauvre et drainage pauvre ou assez pauvre à horizons réduits sur des textures L, A, E, U ou G.

Comme le montre la Figure 68, la charge caillouteuse ne constitue pas un facteur limitant pour la localisation des fossés-haies, mares et noues agricoles, ces aménagements étant fonctionnellement compatibles avec des sols à texture hétérogène dès lors que le drainage demeure suffisant. L'implantation de haies impose un sol suffisamment meuble et homogène pour permettre un développement racinaire adéquat en profondeur, une charge caillouteuse élevée pouvant mécaniquement contraindre la pénétration et la croissance des systèmes racinaires des végétaux ligneux. Enfin pour les zones de rétention, les sols à faible charge caillouteuse étant fréquemment associés à des positions de replat topographique, leur distribution spatiale coïncide structurellement avec les emplacements les plus propices aux ouvrages de stockage.

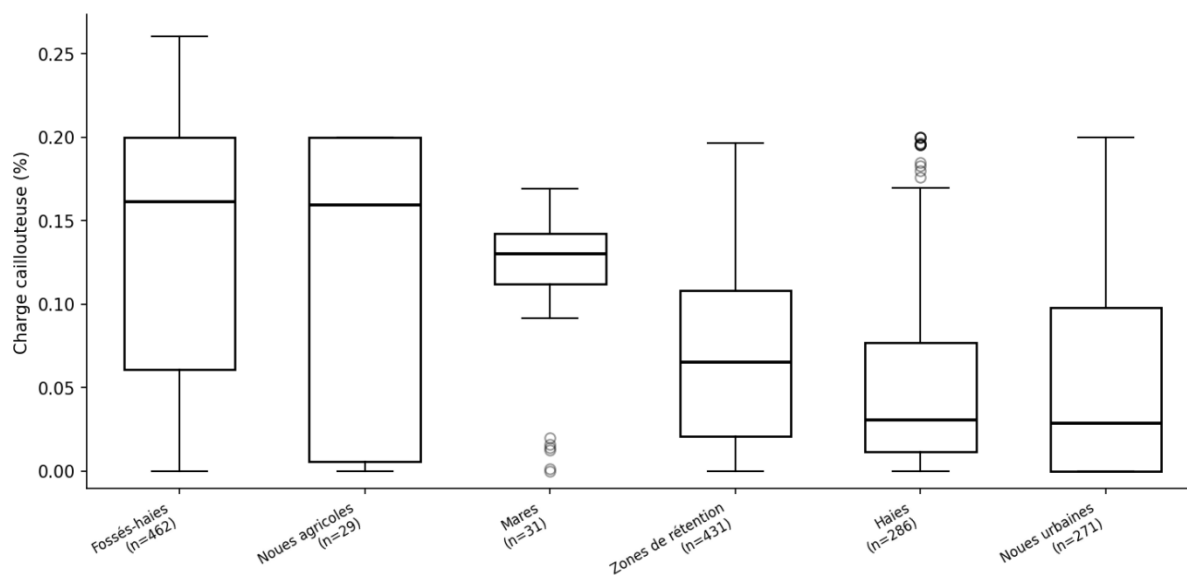


Figure 68 : Répartition des types d'aménagement en fonction des charges caillouteuses (%) au sein du TIH Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé.

La profondeur de sol représente également un facteur de différenciation (Figure 69) : la quasi-totalité des aménagements est implantée sur des sols d'au moins 80 cm, et les haies et fossés-haies semblent être conditionnées par des profondeurs de 80 à 120 cm, nécessaires au développement racinaire et à l'accès à la ressource en eau. Les mares, noues urbaines et noues agricoles présentent des exigences moindres à cet égard.

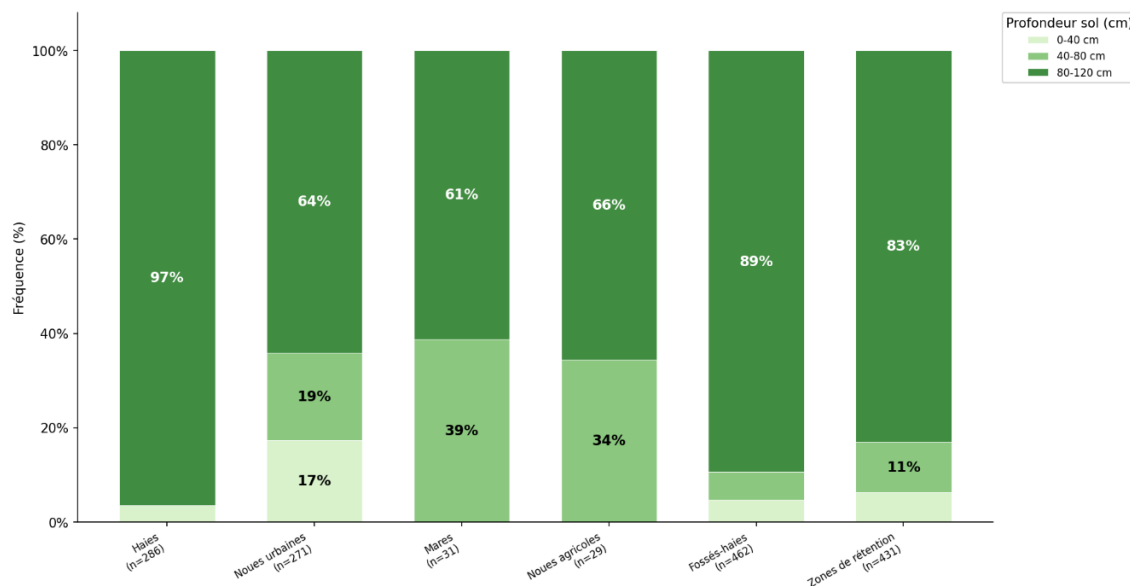


Figure 69 : Répartition des types d'aménagement en fonction des profondeurs de sol au sein du TIH de Manihant-Ourcy pour le scénario aménagé.

5.2.2.6. Efficacité des aménagements

Par type d'aménagement

L'efficacité des aménagements est analysée individuellement à travers le coefficient d'écoulement, variable intégratrice reflétant le partage entre précipitations, infiltration et ruissellement au droit des pixels concernés par chaque aménagement. Cette analyse ne tient pas compte des effets potentiels induits en amont ou en aval, et porte sur les événements de juin 2018 (2) et juillet 2021 (4), pour lesquels les effets les plus significatifs ont été observés (Figure 70). Ces résultats pour les événements (1) et (3) sont disponibles en Annexe B.2 (Figure 103).

Pour ces deux événements, une diminution hautement significative ($p\text{-value} < 0,001$) des CE est constatée au niveau des pixels associés aux haies, fossés-haies, mares et noues urbaines. Les zones de rétention et les noues agricoles ne présentent pas de modification significative du CE . Pour ces dernières, ce résultat est attendu : les zones de rétention sont exclusivement représentées dans le modèle hydraulique MIKE+ et n'interagissent pas avec MIKE SHE, duquel sont issus les CE analysés ici.

Pour les pixels concernés par les haies, le CE médian diminue de 0,18 à 0,1 pour l'événement de juin 2018, et de 0,30 à 0,21 pour celui de juillet 2021. L'effet est encore plus marqué au niveau des fossés-haies, où le CE médian passe de 0,18 à 0 pour juin 2018, et de 0,32 à 0 pour juillet 2021. Le passage à des valeurs négatives est particulièrement significatif : ces pixels ne produisent plus de ruissellement et contribuent activement à la ré-infiltration des écoulements générés en amont. Ce résultat s'explique par le fonctionnement synergique du fossé et de la haie. D'une part, le fossé intercepte et retient temporairement les eaux de ruissellement, favorisant leur infiltration locale. D'autre part, le système racinaire de la haie assure un pompage biologique continu, restaurant progressivement la capacité d'infiltration du sol entre les événements. La combinaison de ces deux mécanismes confère aux fossés-haies une efficacité hautement significative et nettement supérieure à celle des haies seules.

Les mares fournissent également des résultats intéressants, avec des CE médians qui passent de 0,29 à 0 pour l'événement de juin 2018, et de 0,31 à 0 pour celui de juillet 2021. Ces ouvrages agissent selon deux mécanismes conjoints : ils captent l'eau ruisselée en amont, comme en témoignent ces coefficients d'écoulement négatifs, et favorisent une infiltration accrue grâce au stockage temporaire qu'ils assurent. L'augmentation de l'infiltration seule ne suffit en effet pas à expliquer une telle variation du CE , le rôle tampon joué par le stockage temporaire de l'eau y contribuant largement.

En ce qui concerne les noues urbaines, l'effet sur le CE médian passe de 0,95 à 0 pour juin 2018, et de 0,98 à 0,43 pour juillet 2021. Ce résultat montre que la désimperméabilisation d'une partie de la voirie peut jouer un rôle majeur dans la diminution du ruissellement et peut infiltrer l'eau afin qu'elle ne contribue pas au ruissellement de surface. Une variabilité importante est observée, avec un écart-type des CE atteignant 0,8 au droit de

ces pixels, indiquant que l'efficacité des noues varie considérablement selon leur localisation.

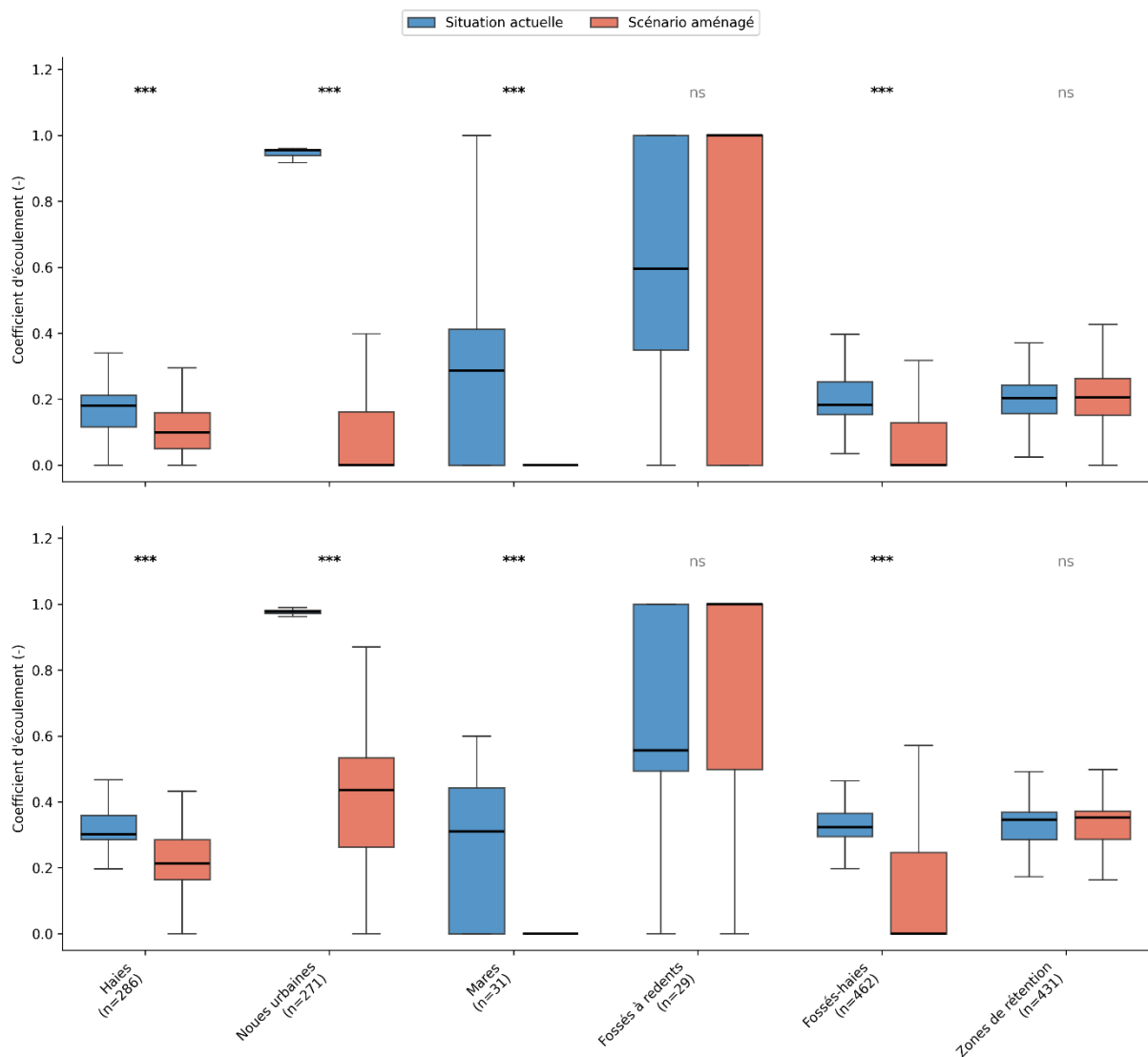


Figure 70 : Comparaison des coefficients d'écoulement entre la situation actuelle et le scénario aménagé pour les événements pluvieux (2) et (4) en fonction des différents types d'aménagement.

Efficacité hydrologique en fonction des contextes biophysiques

La variabilité observée dans l'effet d'un même type d'aménagement sur le coefficient d'écoulement peut s'expliquer notamment par la diversité des contextes biophysiques dans lesquels ces ouvrages ont été implantés. Chaque type d'aménagement regroupe en effet des situations pédologiques, topographiques et hydrologiques hétérogènes. Cette analyse est approfondie pour les aménagements les plus fonctionnels, dont la variabilité spatiale des *CE* s'avère la plus marquée et qui ont été implémentés dans des contextes biophysiques contrastés.

Haies : Les haies ne comptent pas parmi les aménagements dont l'efficacité présente la plus forte variabilité spatiale : elles agissent de manière relativement homogène, quel que soit l'endroit où elles sont implantées. Leur efficacité semble néanmoins conditionnée par le drainage naturel des sols. Les haies implantées dans des sols à drainage favorable à modéré offrent les diminutions de CE les plus importantes. Ce constat reste cohérent avec les résultats de Guillaume et al. (2025).

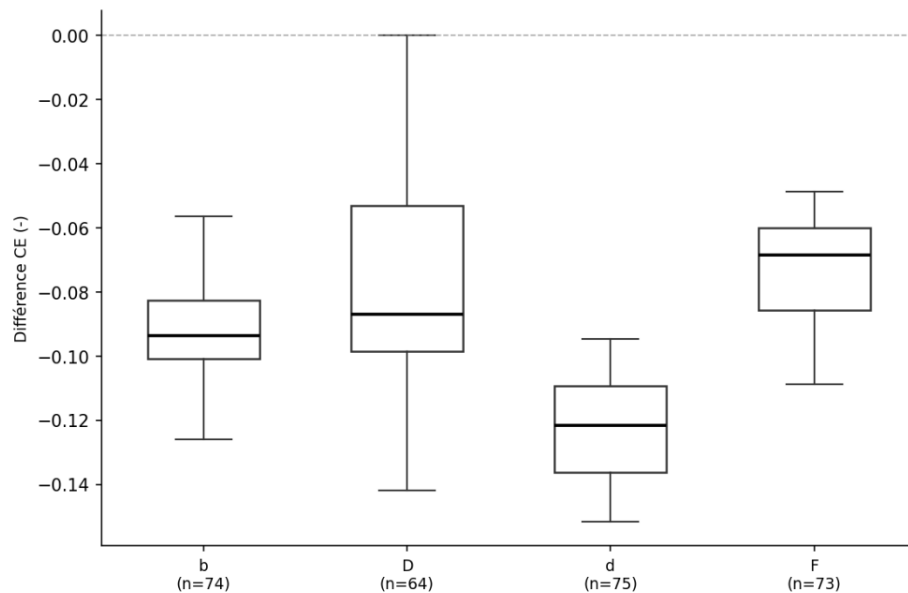


Figure 71 : Modification des coefficients d'écoulement pour les pixels concernés par l'aménagement de haies en fonction du drainage naturel des sols, pour l'évènement de juillet 2021 (4).

Haies-Fossés : L'efficacité des haies-fossés présente une variabilité spatiale plus marquée que celle des haies seules. Il est vraisemblable que plusieurs facteurs biophysiques clairs expliquent cette variabilité. Ces aménagements sont complexes, et leur efficacité pourrait dépendre de certaines particularités liées à leur implémentation dans le modèle, notamment la manière dont la topographie est localement modifiée et dont les écoulements sont redirigés. Il convient par ailleurs de souligner que les haies-fossés, en modifiant le cheminement des écoulements, exercent une action qui dépasse l'emprise des pixels directement concernés par l'aménagement, avec des effets perceptibles en aval de celles-ci (Figure 59 ; Figure 60). Cela limite la pertinence d'une analyse strictement localisée comme celle présentée ici pour ce type d'ouvrage.

Noues urbaines : L'efficacité des noues urbaines est importante car la désimperméabilisation et végétalisation permettent une infiltration de l'eau dans le sol et entraînent donc une diminution significative de CE (Figure 72).

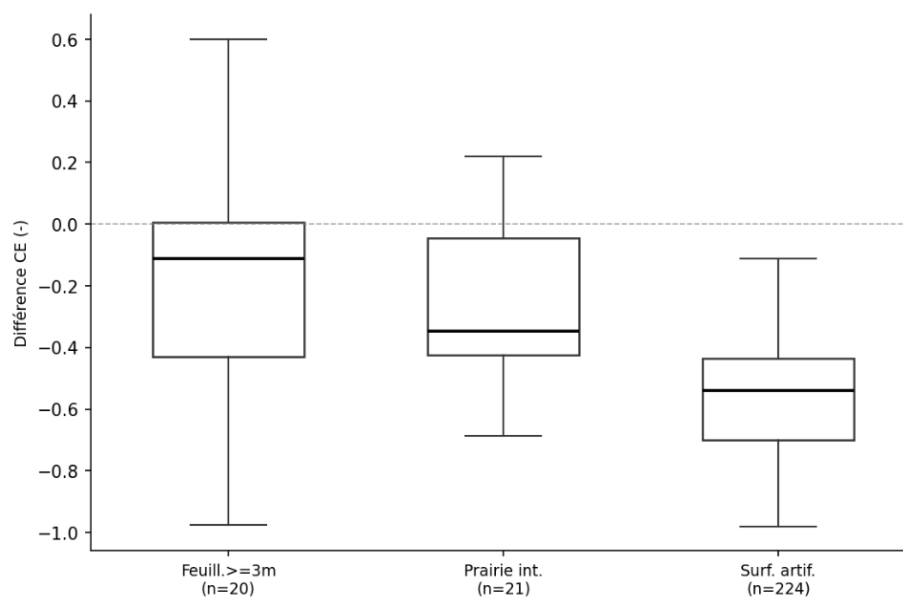


Figure 72 : Modification des coefficients d'écoulement pour les pixels concernés par l'aménagement de noues urbaines en fonction de l'occupation initiale du sol, pour l'évènement de juillet 2021 (4).

Lors d'épisodes intenses ou consécutifs, tels que celui de juillet 2021 ou celui de juin 2018 comportant deux séquences pluvieuses importantes, le sol atteint rapidement sa capacité de rétention. Comme le montre la Figure 70, les ouvrages de stockage et de rétention distribués dans le paysage, tels que mares, zones de rétention et fossés, peuvent intercepter et infiltrer la première pluie, mais leur capacité tampon se trouve progressivement saturée au cours de l'épisode, réduisant dans un court terme leur efficacité pour les coups d'eau suivants. Ces situations mettent en évidence la nécessité de dimensionner et dessiner ces aménagements en cohérence avec les gammes d'intensité pluviométrique attendues, notamment en intégrant des systèmes d'ajutage et de déversoir permettant de gérer les surplus sans compromettre la fonction de rétention. Ces dispositifs n'ont cependant pas été systématiquement implémentés dans la modélisation. Ces résultats appuient les analyses menées à la Section 5.2.2.3.

5.2.3. Synthèse

Le travail mené sur le TIH de Manihant-Ourcy a permis d'aboutir à un plan d'aménagement concerté. Ce résultat doit beaucoup à l'implication des parties prenantes du territoire, notamment les agriculteurs et la commune de Herve, largement mobilisée pour faciliter le dialogue, ainsi qu'à l'effort soutenu du Contrat de Rivière Vesdre. De nombreux allers-retours ont en effet été nécessaires pour coordonner et construire une vision cohérente entre les domaines agricole, urbain privé et urbain public, habituellement gérés de manière cloisonnée.

Le scénario aménagé démontre une réelle capacité à réduire le risque d'inondation à l'exutoire, avec des réductions modélisées des débits de pointe comprises entre 27 et 67 % selon les évènements.

Deux familles d'aménagements en zones agricoles se distinguent par leur fonction. La première, axée sur le stockage temporaire (zones de rétention et mares), est responsable de l'essentiel de cette réduction. Les zones de rétention offrent l'impact hydraulique le plus important, mais contribuent peu à la restauration du cycle de l'eau. Leur rôle se limite au ralentissement des écoulements sans favoriser réellement l'infiltration ni l'évapotranspiration. Les mares, à l'inverse, combinent rétention et infiltration de manière plus équilibrée. Ces deux types d'ouvrages présentent l'avantage d'être bien acceptés par les agriculteurs, étant localisés sur des zones naturellement humides et peu productives. La seconde famille, orientée vers l'infiltration et la redistribution des écoulements sur les versants (haies, fossés-haies, noues agricoles), joue un rôle plus limité sur les débits de pointe, mais contribue davantage à la restauration des « petits » cycles de l'eau. Les fossés-haies se distinguent par l'efficacité de leur fonctionnement combiné, alliant rétention, infiltration et pompage biologique racinaire. Les noues agricoles, trop peu nombreuses sur ce TIH, ne permettent pas de tirer de conclusion robuste quant à leur efficacité.

Ce projet illustre par ailleurs l'importance d'associer les zones urbaines, privées comme publiques, à cette démarche. Les noues urbaines ont notamment démontré un effet significatif sur la réduction du ruissellement, confirmant que la désimperméabilisation des voiries constitue un levier d'action à part entière, au même titre que les aménagements agricoles. Cette implication des zones urbaines répond par ailleurs à une préoccupation exprimée par plusieurs agriculteurs lors des entretiens : ceux-ci observent une urbanisation continue de leur environnement. Cette tension, entre l'effort demandé en zone agricole et la poursuite de l'imperméabilisation ailleurs sur le territoire, souligne la nécessité d'une approche partagée entre l'ensemble des acteurs, sous peine de fragiliser l'acceptabilité des mesures à long terme.

Plus largement, ce travail soulève une question importante pour la suite : comment pérenniser et élargir ce type de démarche, absolument nécessaire au vu des changements globaux actuels, rendue possible ici grâce à l'effort de coordination joué par le Contrat de Rivière Vesdre ?

5.3. Pierreuchamps-Chawieumont

5.3.1. Scénarios / Résultats concertations

Dans le cadre de cette étude, une démarche de co-construction des scénarios d'aménagement a été envisagée à l'échelle du bassin versant, impliquant les principaux acteurs locaux, à savoir la commune, les agriculteurs et les citoyens. L'objectif initial était d'associer ces parties prenantes à la définition des mesures proposées afin d'assurer une meilleure adéquation des scénarios aux réalités du territoire. Cependant, ce processus participatif n'a pu être déployé dans les conditions initialement prévues, en raison de plusieurs contraintes organisationnelles.

1. L'identification et la prise de contact avec les agriculteurs concernés se sont révélées complexes. Les coordonnées des exploitants étant soumises à des règles de confidentialité, la commune ne pouvait pas les transmettre directement, et les organismes de référence tels que Natagriwal ou GISER n'avaient pas la capacité de nous les transmettre. La mobilisation des participants a donc reposé principalement sur des mises en relation volontaires. Par ailleurs, contrairement au TIH de Manihant-Ourcy, aucun élu communal ne faisait partie des agriculteurs concernés, ce qui a limité les possibilités de relais local.
2. La diffusion de l'information auprès des habitants a également été rendue plus difficile par l'impossibilité d'accéder aux coordonnées individuelles, ce qui a limité les canaux de communication disponibles pour présenter le projet, sensibiliser la population et identifier d'éventuelles personnes intéressées à repenser la gestion de l'eau à l'échelle de leur parcelle.
3. Enfin, la question de la gestion des eaux de voirie n'a pas pu être approfondie dans le cadre de cette étude. Les échanges avec les services communaux n'ont pas permis, dans les délais du projet, de réunir les conditions nécessaires à un travail concerté sur cette thématique. Les analyses ont donc été recentrées sur les volets pour lesquels des données exploitables et une dynamique de collaboration étaient disponibles.

5.3.1.1. Agriculteurs et propriétaires de parcelles agricoles

À l'issue de la phase de prise de contact (courriers et appels téléphoniques), un seul agriculteur a manifesté un intérêt pour le projet. Cette implication n'a toutefois pas permis d'élaborer un scénario co-conçu à l'échelle du bassin versant.

Dans ce contexte, la démarche de modélisation appliquée au territoire de Pierreuchamps-Chawieumont repose sur deux scénarios d'aménagement « théoriques », définis par l'équipe ULiège-GxABT selon la méthodologie présentée à la Section 3.2 et modélisés conjointement avec la situation actuelle du bassin versant. Ces scénarios,

centrés sur le domaine agricole, se distinguent par leur niveau d'intensité et d'intervention.

- 1. Le scénario dit « intermédiaire » correspond à un renforcement du maillage bocager existant, combinant l'entretien et la complétion des haies avec la création ponctuelle de fossés sur certaines parcelles (Figure 73).

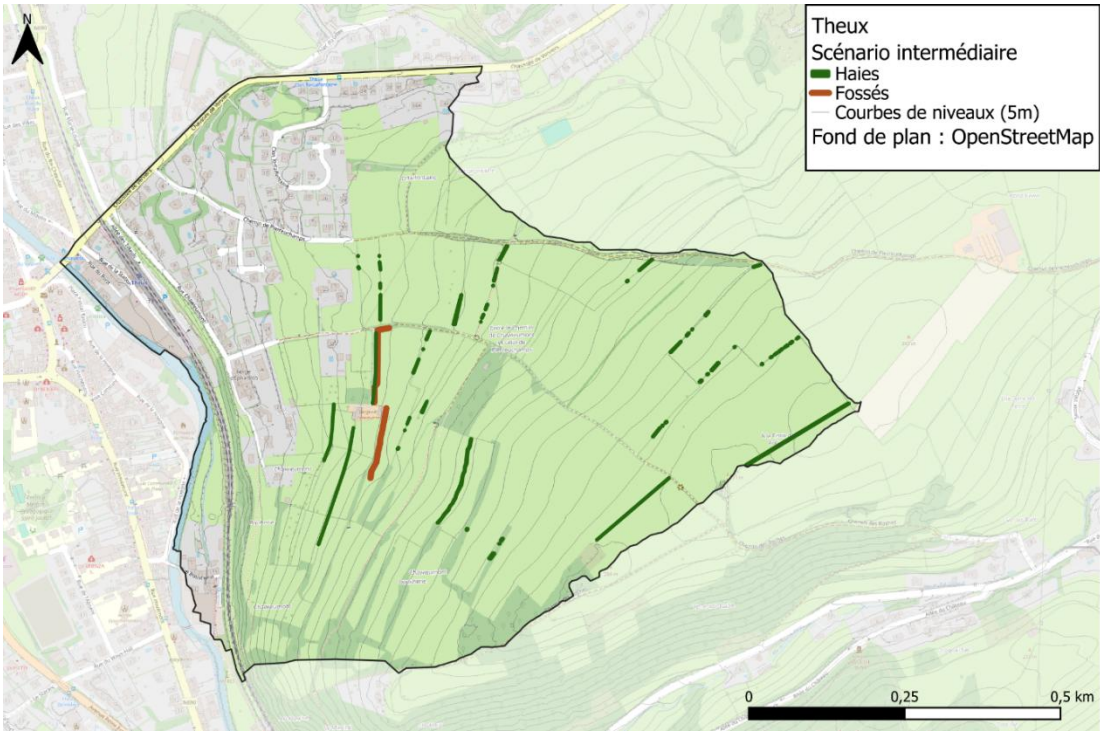


Figure 73 : Plan d'aménagement du scénario intermédiaire pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont.

- 2. Le scénario dit « théorique » représente une version plus ambitieuse, intégrant la plantation de nouvelles haies, un réseau de fossés plus développé ainsi qu'une déviation des écoulements provenant des chemins (Figure 74). Il implique ainsi des transformations plus importantes du parcellaire et des aménagements plus étendus.

Les linéaires d'aménagement associés à ces scénarios sont les suivants :

SFN	Scénario « intermédiaire »	Scénario « théorique »
Fossés	260 m	1420 m
Haies	1330 m	2340 m

En l'absence de scénario final issu d'une co-construction effective, seuls ces scénarios théoriques ont été retenus pour la modélisation hydrologique. Il est à noter que les parcelles de l'unique agriculteur ayant manifesté un intérêt se situent précisément dans le périmètre d'aménagement des fossés du scénario intermédiaire. Toutefois, les résultats

de modélisation indiquent que les aménagements envisagés sur ces parcelles n'apporteraient pas d'amélioration hydrologique significative.

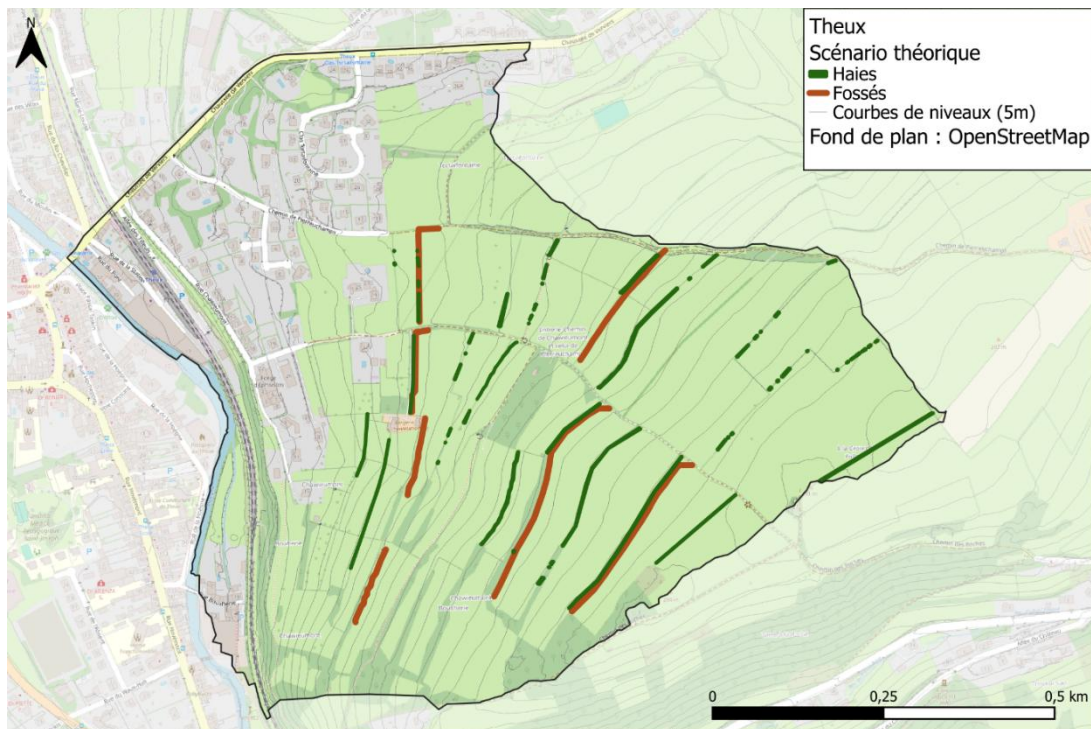


Figure 74 : Plan d'aménagement du scénario théorique pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont.

5.3.2. Fonctionnement hydrologique

5.3.2.1. Bilans saisonniers

Les bilans hydrologiques saisonniers du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont permettent de caractériser le fonctionnement hydrologique de la zone et d'évaluer l'impact des scénarios intermédiaire (Figure 104, Annexe B.3) et théorique (Figure 75) sur les flux et les stocks d'eau.

À l'échelle saisonnière, les précipitations sont plus élevées en été et en hiver (respectivement 273 et 263 mm) qu'au printemps et en automne (205 et 222 mm). Malgré des apports importants en période estivale, l'été correspond à une phase de déstockage net ($\Delta\text{Stock} = -94$ mm), principalement en raison d'une évapotranspiration élevée (241 mm). À l'inverse, l'hiver se distingue par une évapotranspiration très faible (22 mm), favorisant une recharge significative des stocks ($\Delta\text{Stock} = +130$ mm). Cette saison constitue ainsi la principale période de recharge du TIH. Il convient également de noter que les volumes de ruissellement, ici estimés par la somme des flux de surface et des écoulements vers la rivière, restent relativement homogènes entre les saisons. Ils apparaissent même légèrement plus élevés en été (122 mm) qu'en hiver (109 mm).

Comme pour le TIH de Manihant-Ourcy, les deux scénarios ne modifient pas de manière significative le bilan hydrologique global. Cette absence de variation marquée s'explique principalement par la faible emprise spatiale des aménagements (<2 % de la superficie

totale du TIH). Les effets induits, localisés, tendent à se diluer à l'échelle du territoire et ne se traduisent pas par des variations perceptibles du bilan agrégé. Il est toutefois probable que ces impacts soient davantage visibles à des pas de temps plus fins, notamment lors d'évènements pluvieux spécifiques.

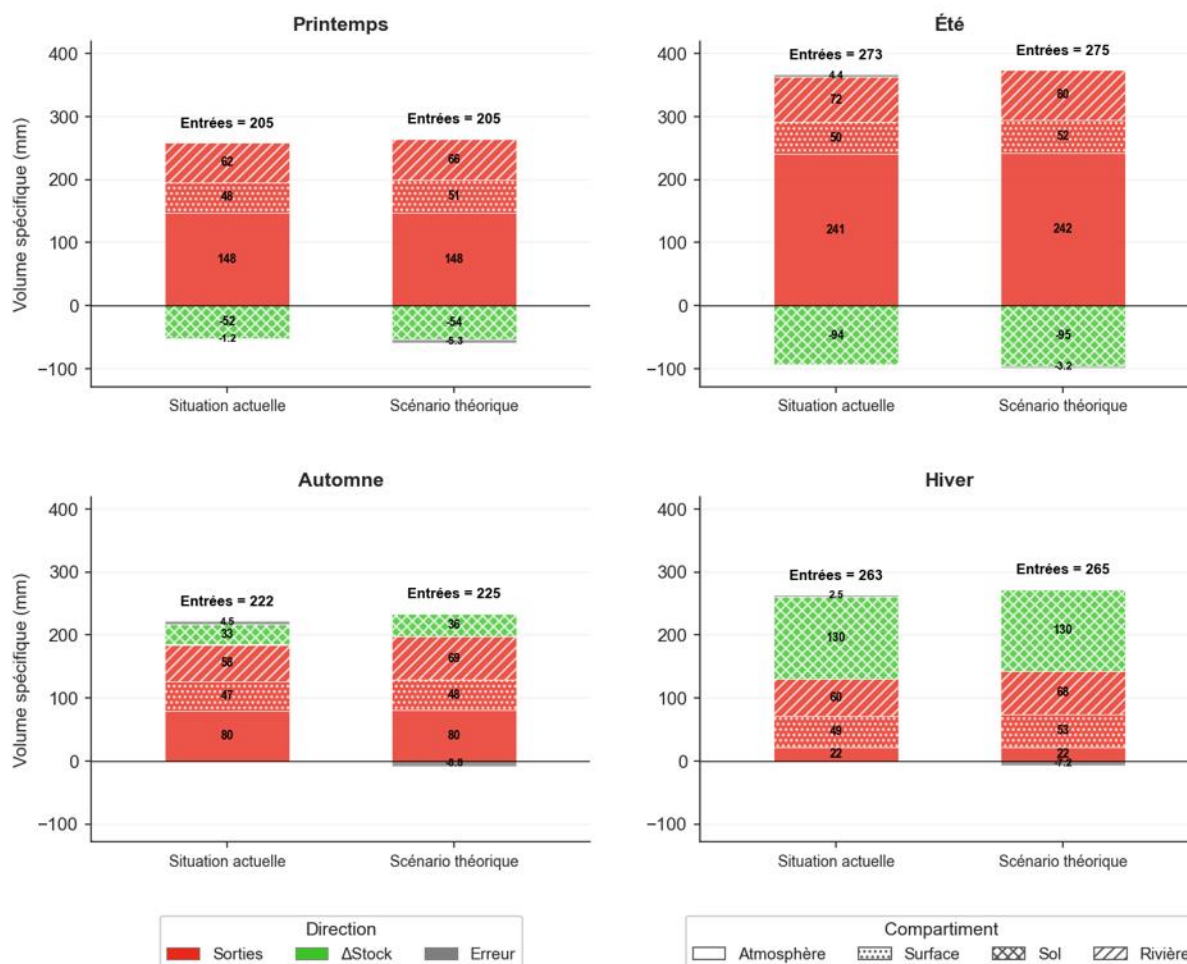


Figure 75 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont par saison pour la situation actuelle et le scénario théorique complet.

5.3.2.2. Analyses d'hydrogrammes

Cette section présente la sélection et l'analyse détaillée d'évènements de crues, afin d'évaluer la réponse du système lors d'épisodes pluvieux contrastés. Les évènements retenus couvrent différentes saisons, intensités et conditions hydrologiques antécédentes, afin de représenter un large éventail de situations hydrologiques. Comme énoncé à la Section 0, le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont présente la particularité d'intégrer uniquement les axes d'écoulement issus de surfaces agricoles et urbaines (Figure 17). La Hoëgne n'étant pas explicitement représentée dans le modèle MIKE+, le débit total de la zone correspond à un flux composite obtenu par agrégation de ces différents axes de concentration, dont les chemins de Pierreuchamps et de Chawieumont.

Sélection des évènements

La Figure 76 présente les évènements de dépassement d'un seuil de débit fixé au quantile 99,9 % ($Q = 0,043 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) pour la situation actuelle. Les dépassements sont associés à des épisodes de crue ponctuels, caractérisés par des pics de débit parfois très importants, pouvant dépasser $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Au total, 90 évènements ont été sélectionnés. Ils sont majoritairement observés au printemps ($n=24$) et en été ($n=41$), tandis que leur occurrence présente une forte variabilité interannuelle (1 à 8 évènements par an).

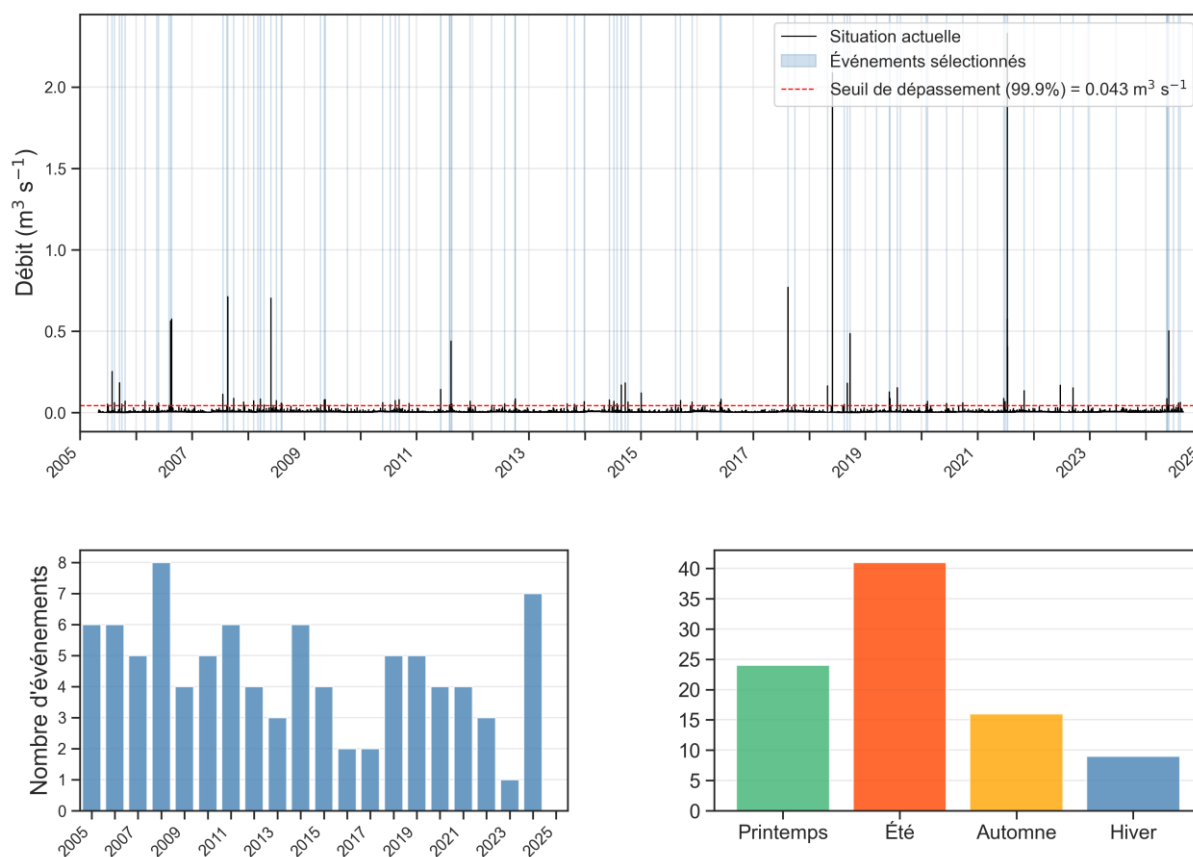


Figure 76 : Dépassesments du seuil de débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) correspondant au quantile 99,9 % de la situation actuelle ($Q = 0,043 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) sur la période du 01/05/2005 au 01/09/2024. Les graphiques situés en bas à gauche et à droite présentent respectivement la fréquence annuelle et saisonnière des dépassements observés.

Avant d'appréhender les effets des deux scénarios sur la régulation des inondations à une échelle temporelle plus fine, une analyse des débits de pointe (Q_p) modélisés sur l'ensemble de la série simulée est réalisée (Figure 77). Il convient de noter que, pour les deux scénarios, les conditions de linéarité entre les débits de la situation actuelle et ceux des scénarios ne sont pas respectées ($p < 0.05$). Concernant le scénario « intermédiaire », aucune réduction significative des débits de pointe n'est observée. Dans la mesure où ce scénario n'apporte d'amélioration ni au bilan hydrologique global ni à la régulation des débits extrêmes, il n'est pas davantage développé dans la suite de l'analyse. À l'inverse, le scénario « théorique » met en évidence une diminution marquée des débits de pointe lorsqu'ils sont supérieurs à $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($n=10$), avec des réductions

systématiques comprises entre 9 % et 45 %. Pour les évènements générant des débits inférieurs à $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($n=80$), l'effet du scénario semble plus limité.

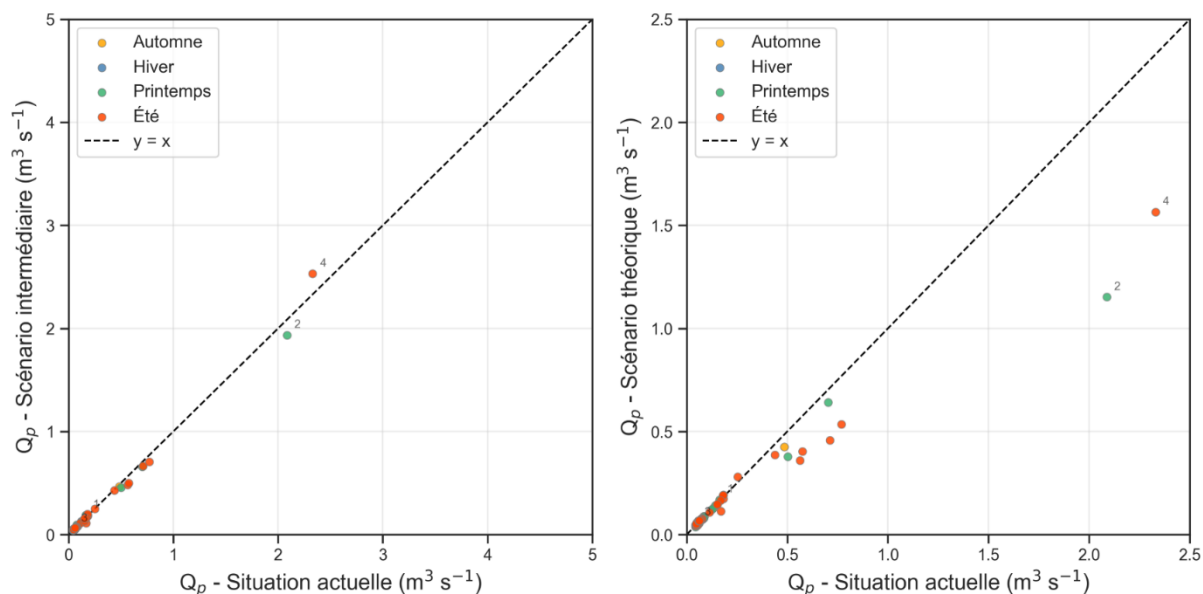


Figure 77 : Evolution des débits de pointe (Q_p) modélisés du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour les scénarios intermédiaire (gauche) et théorique (droite).

Afin de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de ces réponses contrastées et d'évaluer plus finement l'influence du scénario sur la dynamique des crues, une analyse approfondie a été menée sur quatre évènements pluvieux représentatifs (Tableau 20). Ces évènements ont été sélectionnés parmi les dix dernières années de simulation de manière à couvrir différentes saisons, conditions d'humidité antécédente et périodes de retour.

Tableau 20 : Caractéristiques des quatre évènements pluvieux sélectionnés pour l'analyse approfondie.

#	Date	Saison	Période de retour (an)	Durée (h)	Pluviométrie (mm)	Conditions antérieures (mm $5j^{-1}$)
1	29-30/04/2018	Printemps	< 2	32	38	10 (sèches)
2	01-02/06/2018	Printemps	≈ 7	28	63	27 (humides)
3	01-02/02/2020	Hiver	< 2	26	26	30 (humides)
4	13-15/07/2021	Été	> 100	66	165	36 (humides)

Le scénario « théorique » présente des résultats contrastés selon les caractéristiques des évènements étudiés. Il permet une réduction notable des débits de pointe pour les évènements les plus intenses, atteignant 45 % pour l'évènement de juin 2018 (2) et 33 % pour l'évènement exceptionnel de juillet 2021 (4). À l'inverse, pour les évènements de moindre ampleur, l'effet du scénario apparaît plus limité, voire légèrement défavorable,

avec une augmentation des débits de pointe de l'ordre de 3 % pour l'évènement printanier de 2018 (1) et de 14 % pour l'évènement hivernal de 2020 (3).

Hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes met en évidence la forte réactivité hydrologique du TIH face aux précipitations (Figure 78 et Figure 79). Les hyétogrammes moyens et les hydrogrammes simulés aux exutoires apparaissent quasiment synchrones, traduisant des temps de réponse très courts, inférieurs à une heure. Ce comportement s'explique vraisemblablement par la combinaison de pentes marquées et d'une superficie réduite du bassin versant ($0,7 \text{ km}^2$), favorisant une réponse rapide et peu amortie aux épisodes pluvieux. Les hydrogrammes permettent également de distinguer les contributions respectives des sous-bassins de Pierreuchamps (rouge) et de Chawieumont (vert) au ruissellement total observé à l'exutoire.

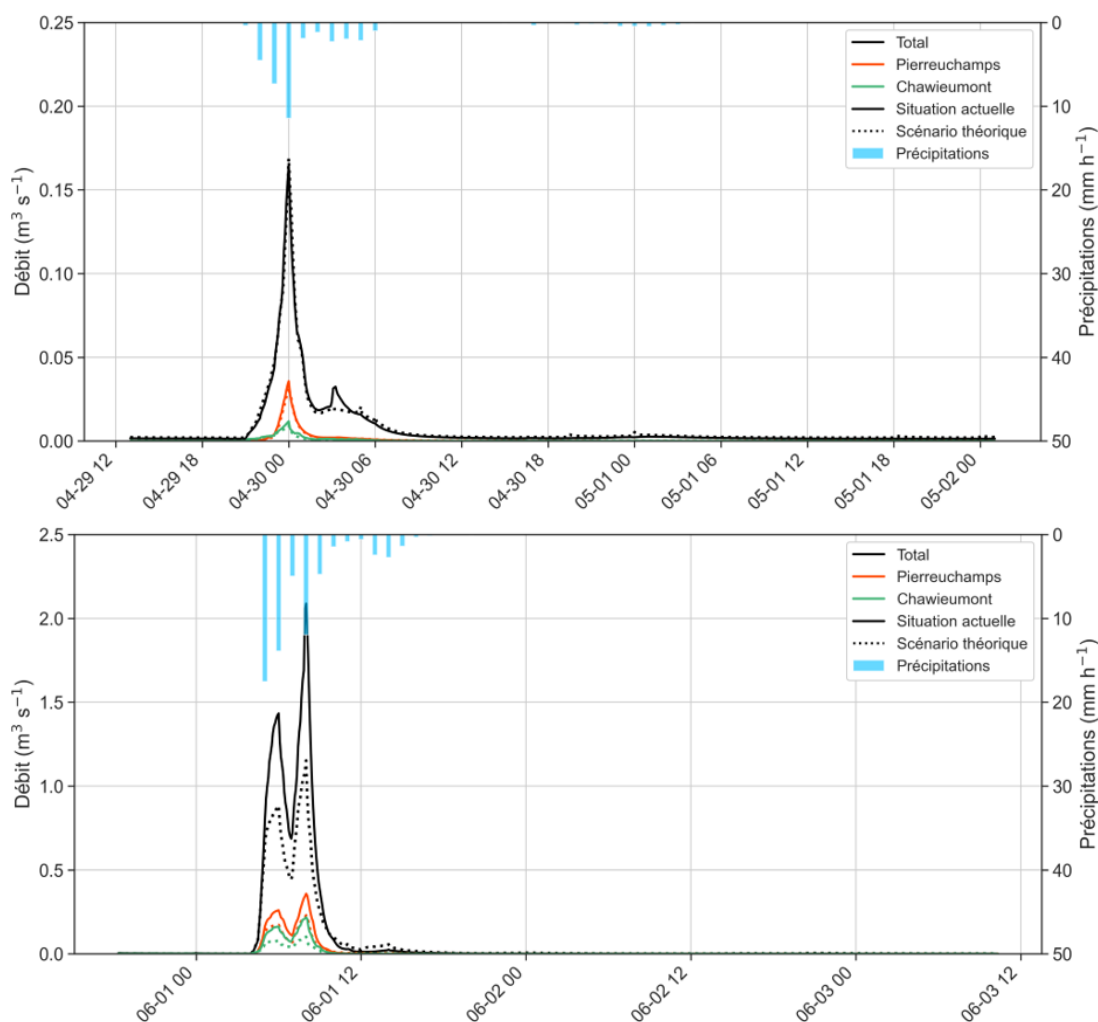


Figure 78 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour les événements pluvieux (1) et (2) (cf. Tableau 20). La figure compare la situation actuelle au scénario théorique complet, en distinguant les débits des routes de Pierreuchamps (orange) et de Chawieumont (vert).

Lorsqu'on s'intéresse aux volumes, pour les événements les plus intenses, tels que ceux de juin 2018 (2) et de juillet 2021 (4), entre 30 et 40 % des précipitations sont converties en ruissellement direct, ce qui témoigne d'une saturation importante de la capacité d'infiltration des sols. À l'inverse, pour les événements plus fréquents et moins intenses (1 et 3), cette proportion n'atteint qu'environ 5 %. Ce faible coefficient de ruissellement est observé aussi bien pour l'évènement hivernal (3), malgré des conditions antécédentes humides, que pour l'évènement printanier (1), caractérisé par des sols relativement secs. Le rôle des conditions d'humidité antécédente apparaît néanmoins clairement à travers l'évènement de juin 2018 (2), dont le hyétogramme présente deux impulsions successives. Bien que la première soit la plus intense, c'est la seconde qui génère le débit de pointe maximal. La première phase de pluie contribue en effet à saturer progressivement les sols, augmentant fortement leur propension à produire du ruissellement lors de la seconde impulsion pluvieuse, pourtant moins intense.

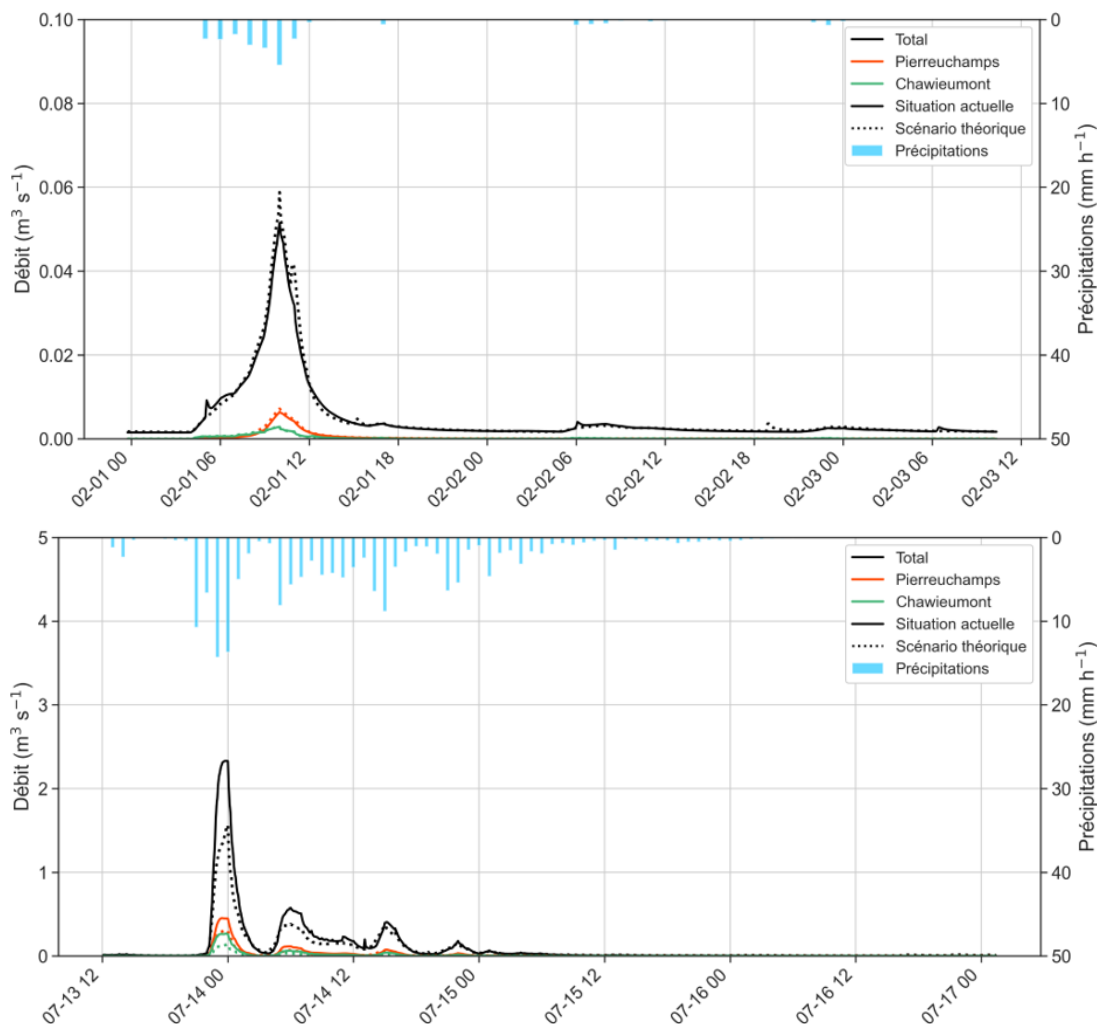


Figure 79 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour les événements pluvieux (3) et (4) (cf. Tableau 20). La figure compare la situation actuelle au scénario théorique complet, en distinguant les débits des routes de Pierreuchamps (orange) et de Chawieumont (vert).

Ces hydrogrammes confirment par ailleurs que les effets du scénario théorique sont significatifs lors des événements extrêmes (2 et 4), avec une réduction notable des débits sur l'ensemble de l'hydrogramme, sans toutefois induire de décalage temporel perceptible du pic de crue. Cet effet reste marginal pour des événements d'ampleur plus modeste. Pour l'événement (3), une légère augmentation du débit de pointe est observée avec le scénario. L'effet du scénario théorique reste marginal pour des événements d'ampleur modeste.

5.3.2.3. Cartographies événementielles

La cartographie événementielle des coefficients d'écoulement (CE) permet d'évaluer spatialement les processus hydrologiques à l'œuvre au sein du TIH et expliquer les dynamiques contrastées observées sur les hydrogrammes (Figure 80 et Figure 81).

L'analyse met en évidence une première tendance commune à l'ensemble des événements : les surfaces imperméabilisées constituent les principales zones productrices de ruissellement. Leur CE , compris entre 0,96 et 0,98, varie peu selon les scénarios ou les événements. La quasi-totalité des précipitations reçues sur ces surfaces est ainsi directement transformée en ruissellement. À l'inverse, le comportement des surfaces agricoles et de la végétation arborée dépend fortement de l'intensité des précipitations. Lors des événements courants (1 et 3), ces surfaces absorbent la quasi-totalité des précipitations et ne génèrent pratiquement pas de ruissellement. Le CE moyen à l'échelle du TIH avoisine alors 0,05, correspondant essentiellement au ruissellement généré par les surfaces imperméabilisées. En revanche, lors des événements extrêmes (2 et 4), la capacité d'infiltration des sols est dépassée et ces surfaces deviennent à leurs tours génératrices de ruissellement, portant le CE moyen du TIH à 0,30 et 0,40, respectivement. Ce résultat illustre le rôle tampon considérable de ces sols infiltrants et rappelle à quel point l'imperméabilisation aggrave l'aléa, tout en exposant ces constructions elles-mêmes.

Cette différence de comportement explique également pourquoi les aménagements ont un effet limité lors des événements de faible intensité. Implantés majoritairement sur des surfaces agricoles, ils interviennent dans des secteurs qui ne produisent déjà quasiment pas de ruissellement dans ces conditions. Les écoulements à intercepter étant très faibles, les différences observées entre les scénarios restent marginales, ce qui se traduit par des variations de CE quasi nulles sur les pixels non artificialisés.

La situation est sensiblement différente lors des événements extrêmes, lorsque les aménagements deviennent pleinement fonctionnels. En interceptant les écoulements et en favorisant leur stockage temporaire puis leur infiltration, ils réduisent la contribution de certaines zones au ruissellement. Pour l'événement de juin 2018, le CE moyen calculé sur les surfaces non artificielles diminue de 0,31 à 0,29. La carte des différences (Figure 80) montre que cet effet est spatialement localisé et davantage associé aux fossés qu'aux haies simples. Les fossés interceptent les écoulements provenant de l'amont et les redistribuent progressivement vers les terrains adjacents. Les zones situées en aval de ces

ouvrages présentent fréquemment des diminutions du CE (cercle rouge sur la Figure 80), témoignant d'une infiltration accrue dans les secteurs de débordement.

L'interprétation de ces diminutions de CE nécessite toutefois une certaine prudence. Dans la situation actuelle, les précipitations atteignent simultanément l'ensemble des surfaces du TIH et les écoulements suivent les trajectoires imposées par la topographie. Dans le scénario aménagé, une partie de l'eau est temporairement retenue dans les fossés puis redistribuée progressivement vers les zones adjacentes. Ces dernières reçoivent alors des volumes d'eau plus importants, parfois en dehors des pics d'intensité pluvieuse. Cette redistribution peut augmenter le temps disponible pour l'infiltration et expliquer localement la diminution du coefficient d'écoulement. La comparaison avec la carte des sols renforce cette interprétation, les secteurs concernés correspondant généralement à des zones présentant une bonne aptitude à l'infiltration (Figure 18).

Cette redistribution spatiale des écoulements modifie toutefois les tracés hydrologiques naturels et peut produire des effets contrastés selon les secteurs. Les fossés implantés entre les chemins de Pierreuchamps et de Chawieumont en constituent un exemple. Ils détournent une partie des écoulements concentrés sur les chemins vers la prairie située en aval, où l'eau peut davantage s'infiltrer. Si cela contribue à réduire le ruissellement global, une partie de l'eau non infiltrée atteint les habitations situées en contrebas (cercle rouge sur la Figure 80). Ceci illustre le transfert local de risque et souligne l'importance d'une analyse fine avant toute modification du tracé naturel des écoulements.

Un second exemple, plutôt favorable, est observé dans la zone située au sud de Chawieumont (cercle jaune sur la Figure 80). Le fossé le plus en amont dévie une partie des écoulements vers une dépression naturelle localisée légèrement plus en aval. Cette cuvette reçoit alors des volumes d'eau plus importants qu'en situation actuelle, ce qui favorise son remplissage temporaire et augmente les possibilités d'infiltration. L'eau excédentaire poursuit ensuite son écoulement selon les pentes naturelles du terrain. Les très faibles valeurs de CE observées dans ce secteur ne doivent donc pas être interprétées comme une absence d'écoulement, mais comme le reflet d'une faible contribution à la production de ruissellement sortant. Ces surfaces reçoivent de l'eau provenant de l'amont, la stockent temporairement et en infiltrent une part importante avant restitution progressive vers l'aval.

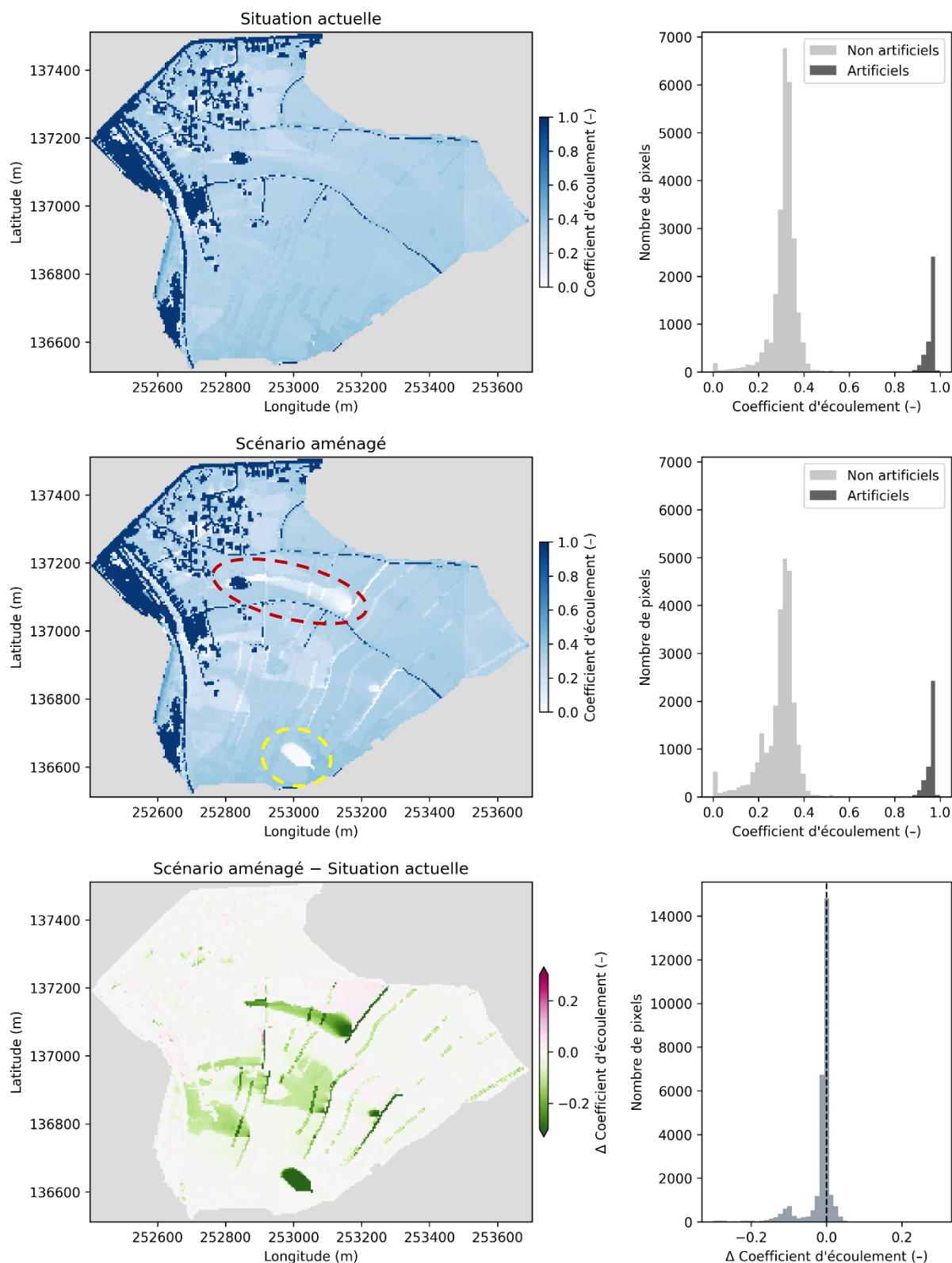


Figure 80 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

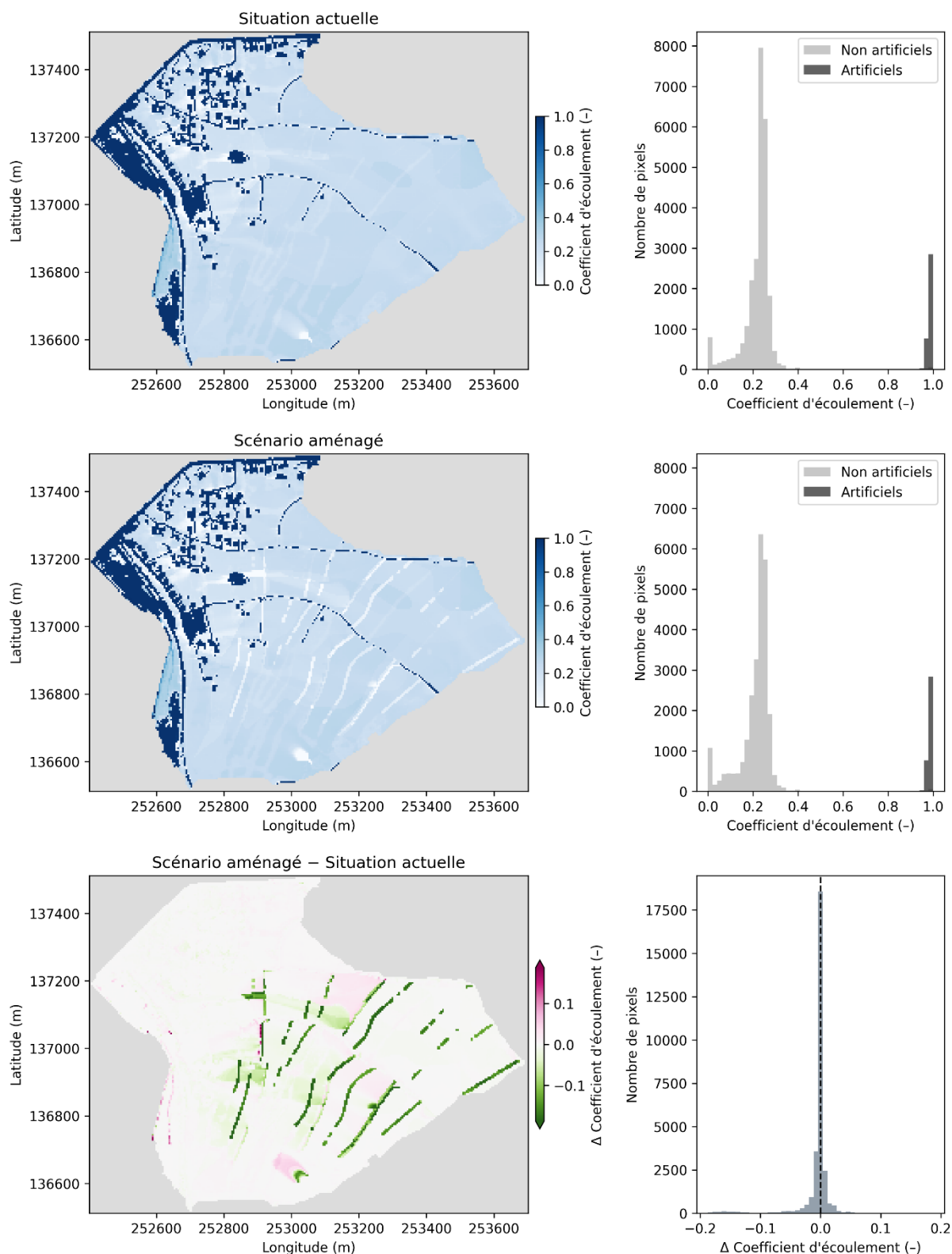


Figure 81 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (4) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

5.3.2.4. Cartographies long terme

Evapotranspiration réelle

La cartographie de l'évapotranspiration réelle (ET_R) annuelle moyenne (Figure 83) met en évidence des comportements contrastés selon trois grands types d'occupation du sol. Les surfaces imperméabilisées, sans couvert végétal, affichent logiquement les valeurs les plus faibles ($\leq 200 \text{ mm an}^{-1}$). Les prairies affichent une ET_R remarquablement homogène sur l'ensemble du TIH, d'environ 500 mm an^{-1} , suggérant l'absence de stress hydrique limitant. Enfin, la végétation arborée (haies, alignements d'arbres et arbres isolés) constitue le couvert le plus évapotranspirant avec des valeurs atteignant 750 mm an^{-1} , jouant ainsi un rôle moteur dans l'entretien du cycle de l'eau verte et la régénération hydrologique.

L'analyse des scénarios montre que l'impact des aménagements sur l'évapotranspiration reste strictement circonscrit à leur emplacement, sans aucun effet de propagation en amont ou en aval. La conversion de prairies en haies n'augmente l' ET_R que localement, ce qui explique son faible impact sur le bilan hydrologique global. De même, en l'absence de modification du couvert végétal, l'influence des fossés s'avère marginale. Une exception est toutefois notée au droit du fossé aval déviant le chemin de Chawieumont : une légère baisse de l' ET_R y est observée, traduisant probablement un stress anoxique induit par la saturation fréquente de l'ouvrage (un processus explicitement pris en compte par le modèle).



Figure 82 : Vue drone illustrant deux types de haies aux caractéristiques hydrologiques contrastées. En rouge, une haie vive mature, non soumise à une taille régulière, hydrologiquement fonctionnelle. En jaune, une haie entretenue, à faible impact hydrologique. © ULiège-GxABT

Enfin, les cartes soulignent l'importance cruciale du mode de gestion des haies. Les haies et alignements matures, non taillés (Figure 82), se distinguent par une évapotranspiration nettement supérieure et une emprise spatiale élargie (cercles rouges, Figure 83). À l'inverse, les haies régulièrement entretenues, plus étroites et moins denses, participent moins au cycle de l'eau verte (cercles jaunes, Figure 83). Les haies simulées dans

les scénarios correspondent à une version intermédiaire de ces deux types de haies et font en moyenne 2,5 m de largeur.

Stress hydrique

Les cartes de stress hydrique révèlent que les prairies subissent un stress modéré s'étalant en moyenne sur 5 à 15 jours par an (Figure 84). La variabilité spatiale de ce phénomène traduit les différences de réserves utiles en eau des sols, dont les contours sont nettement visibles sur les cartographies. Bien que cette courte période de déficit n'impacte que marginalement l'évapotranspiration annuelle (comme constaté à la section précédente), elle peut temporairement limiter la production fourragère.

À l'inverse, la végétation arborée (haies et alignements d'arbres) échappe totalement à ce stress hydrique grâce à sa capacité d'enracinement profond. Elle peut ainsi constituer un précieux fourrage d'appoint lors des épisodes de déficit des prairies. De plus, les simulations du scénario théorique révèlent que la conversion de parcelles de prairies en haies supprime localement ce stress hydrique. Ce constat souligne que l'implantation de haies offre non seulement des bénéfices hydrologiques, mais favorise également une résilience végétale accrue face à la sécheresse, contrairement aux fossés qui n'apportent pas d'avantage évident durant ces périodes.

Saturation des sols

La carte de saturation des sols met en évidence une forte variabilité spatiale, s'échelonnant de 0 à 90 jours de saturation par an (Figure 85). Les zones les plus exposées se situent principalement à l'aval du TIH, dans le lit majeur de la Hoëgne, ainsi que dans le secteur loti au nord. L'influence des caractéristiques géologiques est également très marquée : le secteur, défini par un géocode plus perméable, présente des durées de saturation moindres. Ce contraste net appelle toutefois à la prudence lors de l'interprétation, les données d'entrée liées aux géocodes comportant une part d'incertitude, notamment vu la taille réduite du TIH.

En accord avec les dynamiques d'évapotranspiration observées, les sols situés sous un couvert arboré sont systématiquement moins saturés que les prairies adjacentes. Cette tendance est corroborée par le scénario théorique complet, qui montre que l'implantation de haies réduit localement la saturation d'environ 15 jours par an. À l'inverse, on observe une légère augmentation de la saturation en aval du fossé déviant les eaux du chemin de Pierreuchamps. Cet aménagement semble concentrer les écoulements à travers la prairie située entre ce chemin et le chemin de Chawieumont, avec un point de sortie orienté vers des habitations. Les autres fossés modélisés ne présentent, quant à eux, aucun impact perceptible sur la saturation des sols.

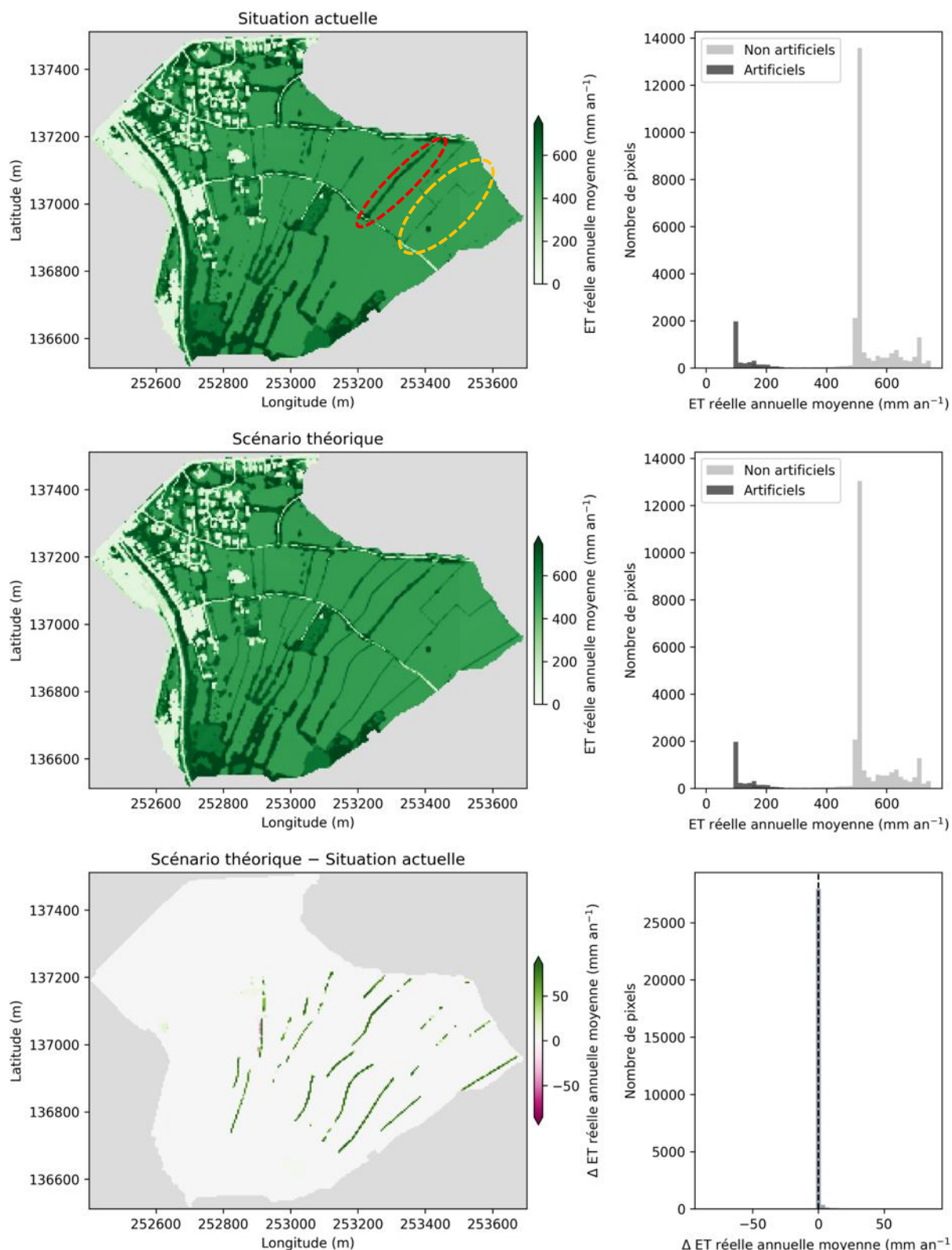


Figure 83 : Evapotranspiration réelle (ET_R) annuelle moyenne sur le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de l' ET_R par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de l' ET_R pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

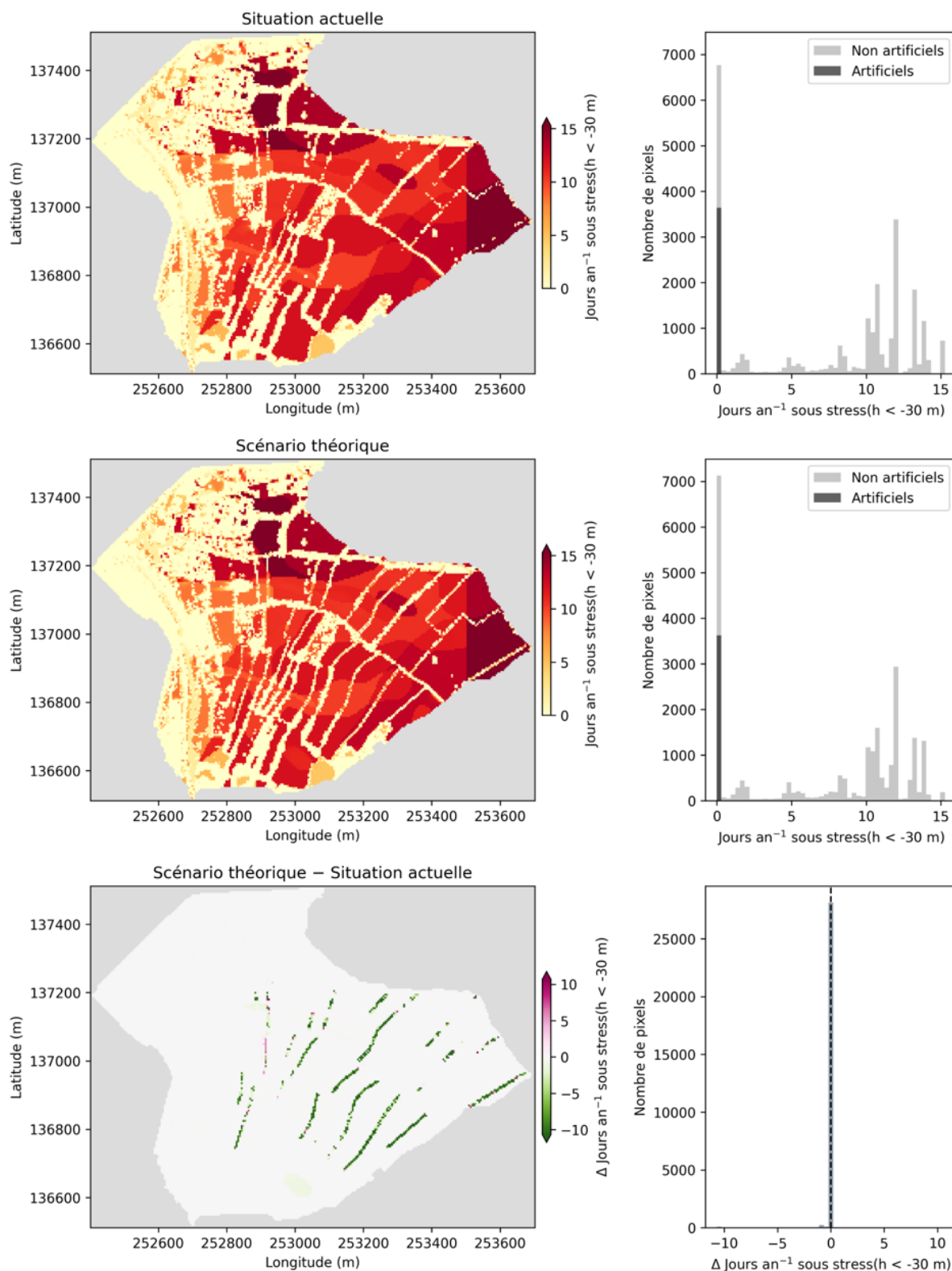


Figure 84 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

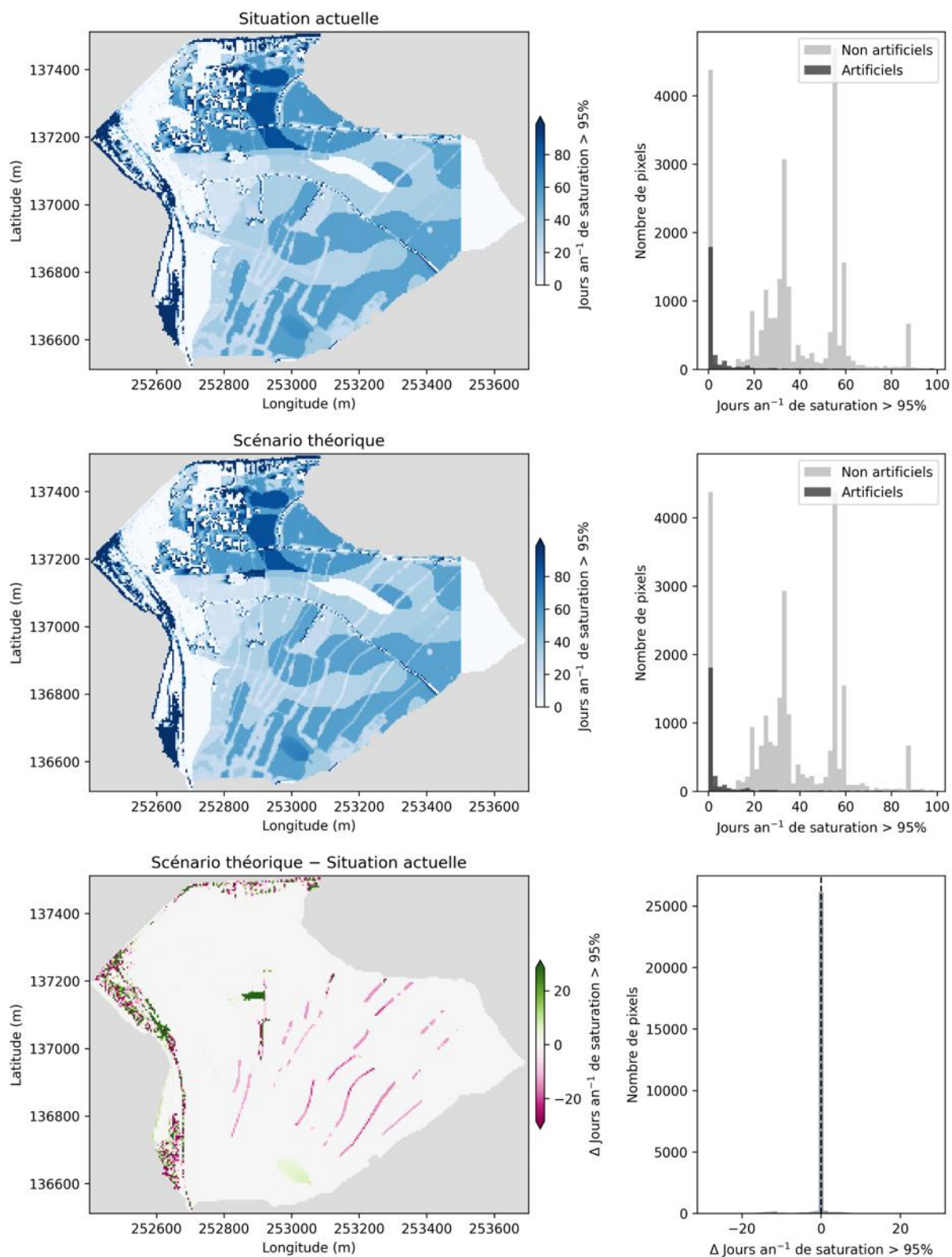


Figure 85 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

5.3.2.5. Localisation des aménagements

Afin d'identifier les déterminants biophysiques qui conditionnent l'efficacité des aménagements sur le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont, leur contexte d'implantation a été caractérisé à l'aide de plusieurs variables biophysiques pour le scénario théorique complet. Pour rappel, sur ce bassin, l'analyse se porte sur deux typologies d'ouvrages aux emprises et aux fonctions distinctes : les haies et les fossés. Les fossés sont des éléments linéaires continus, parallèles aux courbes de niveau, et souvent associés à des haies (préexistantes ou nouvelles). À l'inverse, l'implantation des nouvelles haies est beaucoup plus dispersée puisqu'elle combine des complétions de tracés préexistants (les anciennes haies ne sont pas incluses dans l'analyse) et de nouveaux éléments linéaires.

Le paysage étant fortement agricole, les haies et les fossés s'inscrivent majoritairement au sein de prairies permanentes (représentant respectivement plus de 90 % et 78 % de leur emprise spatiale). On note toutefois une occupation légèrement plus diversifiée aux droits des fossés, incluant une proportion plus marquée d'autres végétations permanentes, car parfois associés à des haies anciennes et diversifiées.

Les deux typologies d'aménagement sont implantées sur des pentes raides (entre 15 % et 20 % en moyenne). En raison de la présence de vastes prairies en amont du TIH, les nouvelles haies se positionnent majoritairement en tête de bassin et viennent compléter le maillage des anciennes haies situées plus en aval. Ce positionnement favorise une interception diffuse dès le haut du versant. Les fossés, à l'inverse, se concentrent dans la partie intermédiaire du TIH. Placés à l'interface des axes préférentiels de concentration du ruissellement (chemins de Pierreuchamps et de Chawieumont), ils ont pour but d'intercepter et de redistribuer latéralement les flux de surface.

Contrairement à d'autres TIH, le contexte pédologique est ici très uniforme (Figure 18). Les deux types d'ouvrages reposent exclusivement sur des sols à drainage naturel favorable, de nature limono-caillouteuse (charge psammitique ou schisto-psammitique) et présentant une charge caillouteuse moyenne de 19 %. Les fossés sont creusés dans des profils pédologiques relativement profonds (entre 40 et 80 cm), tandis que l'implantation des haies se heurte, en revanche, à des sols très superficiels (0 à 40 cm). Si ce substrat est suffisant pour des prairies, cette faible épaisseur limite non seulement le développement racinaire optimal des ligneux, mais bride également la capacité de stockage hydrique local au droit de ces aménagements.

5.3.2.6. Efficacité des aménagements

L'efficacité des aménagements est mesurée uniquement au droit des pixels d'implantation des haies et des fossés en comparant la situation actuelle au scénario théorique complet pour les quatre événements étudiés. À cette échelle spatio-temporelle, l'impact quantitatif dépend directement du volume de ruissellement naturel local, et le principal moteur physique de cette efficacité à l'échelle est l'infiltration (l'évapotranspiration jouant un rôle négligeable sur des pas de temps si courts).

Lors des événements modérés (1 et 3), le bassin versant génère intrinsèquement très peu d'écoulement (environ 5 % des précipitations). Dans la situation actuelle, les CE moyens sur ces pixels spécifiques s'établissent à environ 0,03, générant des productions d'écoulement locales de l'ordre de 1,5 à 1,6 mm. Bien que pour l'évènement printanier (1) la réduction soit statistiquement significative ($p < 0,01$ pour les haies et $p < 0,001$ pour les fossés), cet abattement local est minime en valeur absolue (baisse moyenne d'environ 1,4 mm pour les haies et 0,9 mm pour les fossés). Pour l'évènement hivernal (3), aucune diminution de la production d'écoulement locale ni du CE n'est significative ($p > 0,05$). Dans ces conditions, la capacité naturelle du milieu à infiltrer est suffisante, rendant l'impact physique des aménagements marginal.

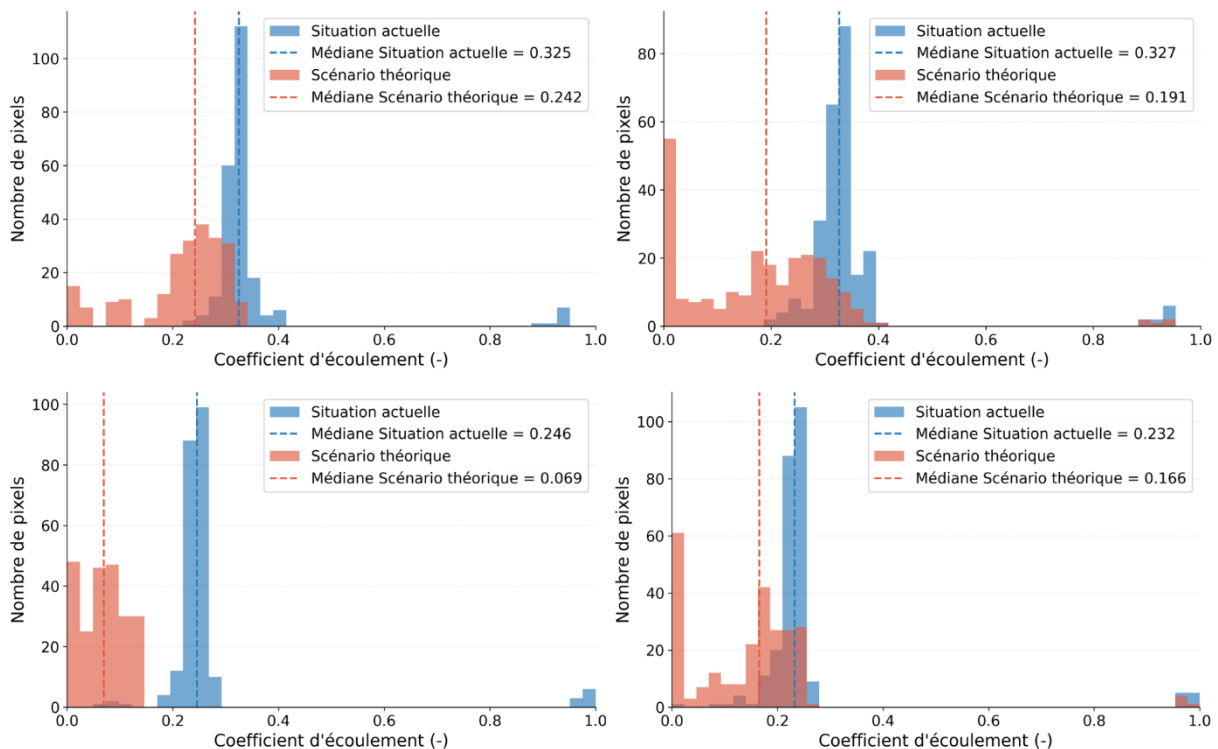


Figure 86 : Histogrammes comparatifs des coefficients d'écoulement (CE) entre la situation actuelle (en bleu) et le scénario théorique complet (en rouge). Les résultats sont présentés pour les pixels de haies (à gauche ; $n = 226$) et de fossés (à droite ; $n = 251$), lors des événements 2 (en haut) et 4 (en bas).

Lors des événements intenses (2 et 4), la production d'écoulement au niveau de ces parcelles est plus élevée (les CE moyens de la situation actuelle étant compris entre 0,25 et 0,35). Dans ces contextes, la capacité de réduction de l'écoulement devient hautement significative ($p < 0,001$; Figure 86). Cela est intimement lié à l'augmentation locale de l'infiltration (+21 à 29 % en moyenne sous les haies, +25 à 51 % dans les fossés). Lors de l'évènement printanier (2), les fossés interceptent efficacement les écoulements de surface, abaissant la production d'écoulement locale de 47 % en moyenne (passant de 27,3 à 14,4 mm), contre une réduction de 37 % pour les haies. À l'inverse, lors de l'évènement estival centennal (4), les haies réduisent la production d'écoulement de 75 % (chute de 47,2 à 12,0 mm). Ceci peut s'expliquer par l'état hydrique initial des profils de sols sous

la végétation : en été, l'évapotranspiration intense de la végétation permet de restaurer en partie la réserve utile du sol, ce qui accroît la capacité des sols à infiltrer l'eau incidente. Les fossés conservent quant à eux un abattement robuste de 42 % (de 45,1 à 26,2 mm en moyenne) face à ces débits extrêmes. Bien que très efficaces, leur performance relative plafonne, car le volume d'eau fini par excéder la capacité de stockage de ces ouvrages.

5.3.3. Synthèse

Le travail mené sur le TIH de Pierreuchamps-Chawieumont n'a pas permis d'aboutir à un scénario d'aménagement co-construit avec les acteurs du territoire. Malgré une démarche initialement envisagée avec la commune, les agriculteurs et les citoyens, plusieurs contraintes organisationnelles et de disponibilité des données ont limité la mise en œuvre effective de la concertation. Dans cette perspective, et afin de faciliter les démarches futures de co-construction, il pourrait être pertinent d'envisager un dispositif de concertation dans lequel le chargé de mission disposerait directement des informations de contact nécessaires pour joindre les acteurs concernés, dans le respect du cadre du RGPD.

Sur le plan hydrologique, les résultats de la situation actuelle montrent un fonctionnement globalement très réactif, avec des temps de réponse courts et une forte sensibilité aux épisodes pluvieux intenses. Les sols jouent un rôle tampon important lors des événements fréquents, mais leur capacité d'infiltration est rapidement dépassée lors des épisodes extrêmes, entraînant une hausse marquée des coefficients d'écoulement à l'échelle du bassin.

Les simulations mettent en évidence une efficacité contrastée des aménagements. Le scénario « intermédiaire », principalement constitué de haies et d'interventions ponctuelles, n'engendre pas de modifications significatives du fonctionnement hydrologique global. À l'inverse, le scénario « théorique » permet une réduction des débits de pointe pour les événements les plus intenses, sans toutefois modifier le bilan hydrologique saisonnier. Les haies et les fossés présentent des fonctions hydrologiques complémentaires : les fossés agissent principalement par interception et redistribution des écoulements, tandis que les haies contribuent davantage à l'infiltration, avec une efficacité dépendant fortement des conditions hydriques initiales et de l'intensité des précipitations.

Enfin, l'analyse spatiale révèle que ces aménagements induisent des effets localement contrastés. S'ils favorisent globalement l'infiltration et la diminution du ruissellement sur le TIH, ils peuvent également modifier les trajectoires d'écoulement et transférer ponctuellement les flux vers des secteurs sensibles. Ces résultats soulignent ainsi l'importance d'une lecture intégrée du fonctionnement hydrologique, combinant dynamique événementielle, organisation spatiale des écoulements et maîtrise des risques.

5.4. Statte

5.4.1. Scénarios / Résultats concertations

En raison de son occupation du sol à dominante forestière, la démarche de co-construction menée sur le TIH de la Statte a suivi un parcours distinct de celui des deux autres TIH étudiés. L'acteur principal y est la commune de Jalhay, propriétaire public de la majeure partie de cette surface (65 %, soit environ 250 ha). On retrouve également des zones domaniales, dont 82 ha (21 %) du cantonnement de Verviers ainsi que 39 ha (10 %) des Hautes Fagnes. La gestion courante de ce domaine foncier, incluant le réseau de voiries forestières, est assurée par le Département de la Nature et des Forêts (SPW DNF - Cantonnement de Verviers). C'est donc avec ce gestionnaire privilégié que l'équipe de l'U-Liège - GxABT a étroitement collaboré pour concevoir les scénarios d'aménagement.

Parallèlement, le bassin comprend également des parcelles forestières privées, couvrant une superficie de 9 ha (2 %). Dans une volonté d'inclusivité, ces propriétaires ont été conviés à participer au projet via un courrier informatif préparé par les chargés de projet et relayé par l'administration communale. Cette sollicitation n'a toutefois suscité aucun retour de leur part.

Sur la base des concertations menées avec le DNF, plusieurs scénarios d'aménagement ont été élaborés afin d'évaluer l'efficacité potentielle de différentes stratégies de gestion. Pour quantifier cette efficacité, les performances de ces propositions prospectives sont systématiquement comparées à la situation actuelle du bassin versant, qui fait office de scénario de référence.

1. Le premier scénario, dénommé « DNF » (Figure 87), intègre les aménagements prévus dans le cadre des fiches d'investissements non productifs du gestionnaire. Son objectif est d'évaluer l'impact hydrologique des mesures dont la mise en œuvre est d'ores et déjà planifiée sur le TIH. Ce scénario intègre le creusement de 12 mares ainsi que la création de 16 déviations de fossés bordiers, dont 12 sont spécifiquement dimensionnées pour rediriger les écoulements de surface vers ces mares. Il ne concerne qu'une zone contributive localisée en amont du territoire (48 %).
2. Le second scénario, qualifié de « théorique » (Figure 88) a été conçu par l'équipe de recherche dans le prolongement de la stratégie proposée par le DNF. Il reprend l'ensemble des aménagements du premier scénario, auxquels s'ajoutent plusieurs mesures complémentaires, dont la mise en œuvre a été jugée compatible avec les contraintes opérationnelles et les moyens mobilisables sur le site. Elles se déclinent comme suit :
 - Le bouchage du réseau de drainage des parcelles drainées, entraînant l'arrêt du drainage et la création de zones de stagnation dans les anciens fossés ;
 - La mise en place de redents dans les fossés bordiers, permettant de ralentir les écoulements et de créer des micro-zones de rétention ;

- La déviation de fossés bordiers vers des zones de dispersion des eaux ;
- La création de mares avec déviations ;
- L'aménagement de zones de rétention sur sols présentant une bonne capacité d'infiltration.

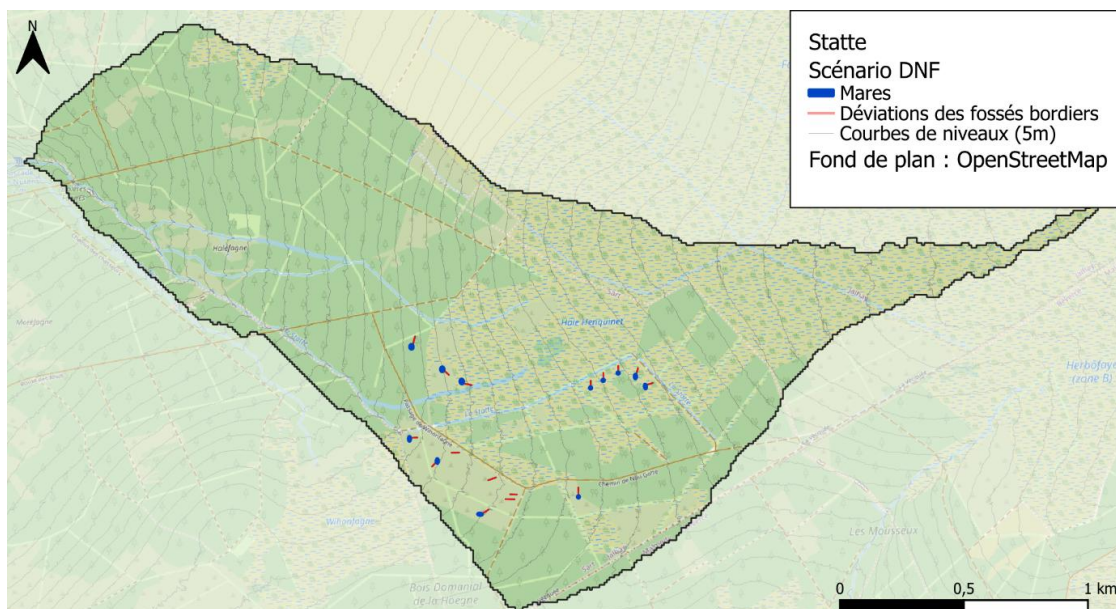


Figure 87 : Plan d'aménagement du scénario DNF pour le TIH de la Statte.

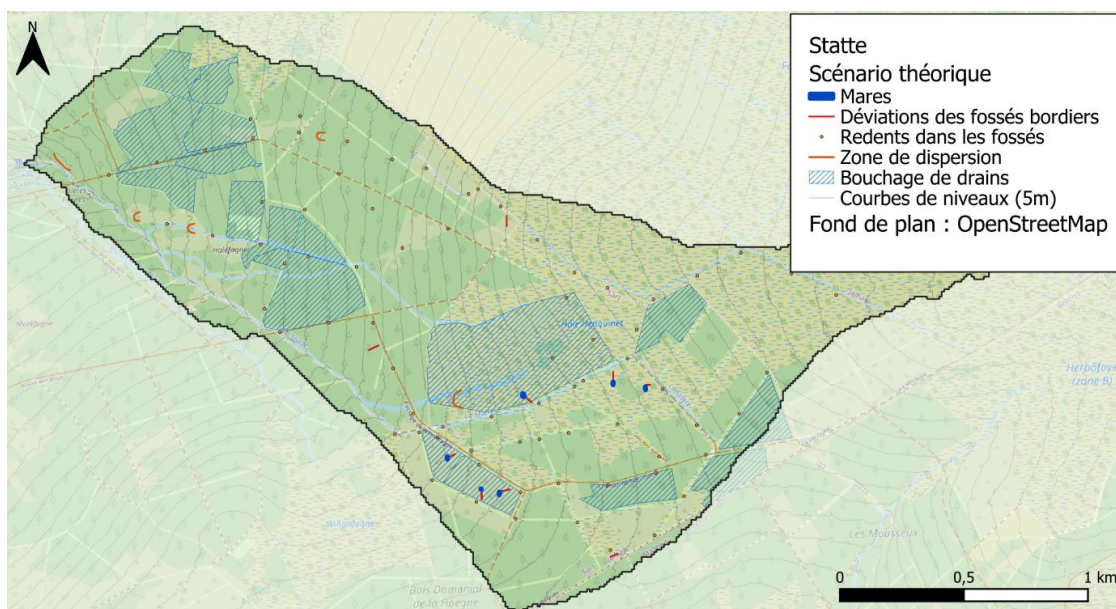


Figure 88 : Plan d'aménagement du scénario théorique pour le TIH de la Statte.

3. Le troisième scénario, qualifié de « théorique long terme » (Figure 89), combine les aménagements du scénario théorique avec des mesures de gestion forestière dont les bénéfices ne peuvent être atteints qu'à plus longue échéance. Il comprend la conversion progressive des peuplements vers des forêts mixtes, ainsi que l'adaptation

des itinéraires techniques d’exploitation forestière entraînant une aggradation des propriétés hydrodynamiques des sols.

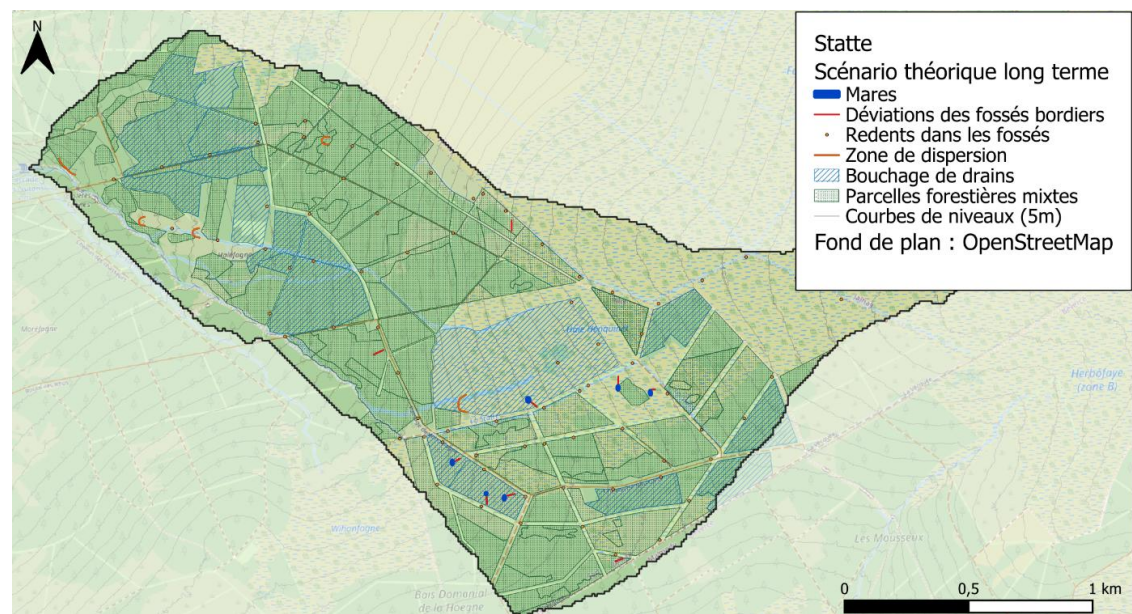


Figure 89 : Plan d’aménagement du scénario théorique long-terme pour le TIH de la Statte.

Dans le cadre de la modélisation, les effets attendus de ces pratiques sont directement intégrés sous la forme d’un état mature des peuplements et des sols. Cette hypothèse permet d’estimer le potentiel maximal de ces mesures, bien que leur pleine efficacité ne puisse être atteinte qu’après plusieurs années, voire plusieurs décennies d’évolution du milieu. L’ensemble des aménagements considérés dans les différents scénarios est synthétisé dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Description des aménagements pour chaque scénario sur la Statte.

Scénario	Types aménagements	Nombres d’aménagements	Emprise
DNF	Mares	3 mares de 20 × 15 m,	1.800 m ²
		5 mares de 20 × 10 m,	
		4 mares de 10 × 10 m	
Théorique	Déviations	16 déviations	502 m
	Mares	1 mare de 20 × 15 m,	941 m ²
		4 mares de 20 × 10 m,	
		1 mare de 10 × 10 m	
	Déviations	9 déviations	297 m
	Redents	80 redents	800 m ²
	Zone de dispersion	5 zones de dispersion	423 m

Scénario	Types aménagements	Nombres d'aménagements	Emprise
Théorique	Bouchage de drains	18 parcelles forestières	823.120 m ²
Théorique long terme	Diversification des peuplements et décompactage	149 parcelles forestières	2.341.734 m ²

5.4.2. Fonctionnement hydrologique

5.4.2.1. Bilans en eau

L'analyse des bilans hydrologiques saisonniers permet de caractériser les principales dynamiques de stockage et de transfert de l'eau au sein du bassin versant, ainsi que leur évolution sous l'effet des aménagements (Figure 90).

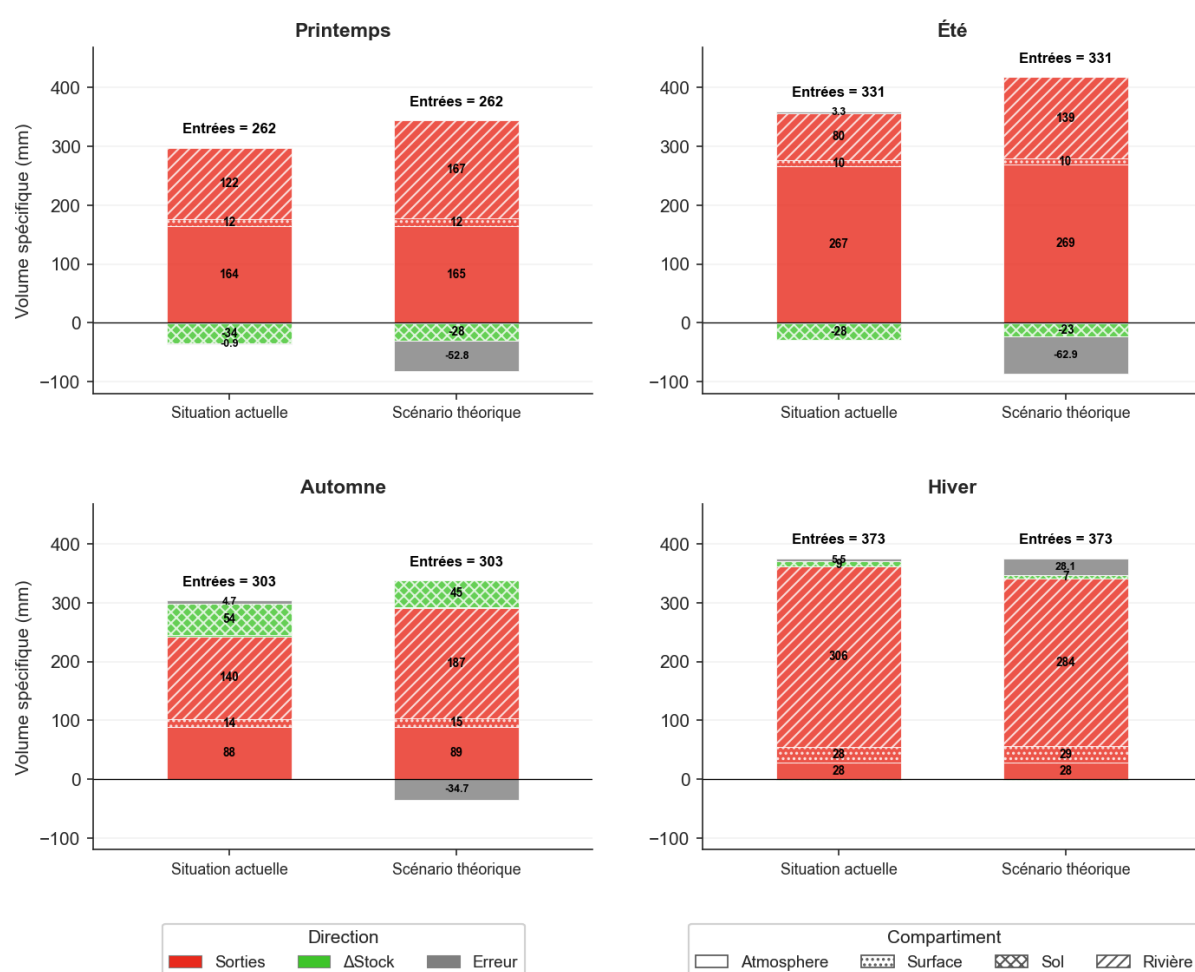


Figure 90 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de la Statte par saison pour la situation actuelle et le scénario théorique.

A l'échelle annuelle, les précipitations sur le TIH de la Statte sont 30 % plus importantes que pour les deux autres TIH. À l'échelle saisonnière, les précipitations les plus importantes sont observées en hiver (373 mm) et en été (331 mm), tandis que le printemps

constitue la saison la plus sèche avec 262 mm de précipitations. Les flux vers l'atmosphère sont exclusivement contrôlés par l'évapotranspiration, qui atteint son maximum en été (267 mm) sous l'effet d'une activité végétale accrue. À l'inverse, l'évapotranspiration reste limitée durant la période hivernale, favorisant le maintien des réserves en eau au sein du bassin versant. Les écoulements vers la rivière présentent également une forte variabilité saisonnière. Ils sont maximaux en hiver (306 mm), lorsque les sols sont proches de la saturation et que les pertes par évapotranspiration sont faibles. À l'inverse, durant l'été, une part importante des précipitations est consommée par l'évapotranspiration, limitant les volumes transférés vers le réseau hydrographique (80 mm). Les variations saisonnières de stocks d'eau dans les sols sont assez faibles, traduisant des sols souvent engorgés. La recharge des réserves en eau est principalement observée en automne (+54 mm), tandis que le printemps correspond à une période de déstockage (-34 mm), marquant la transition entre la recharge hivernale et la reprise de l'activité végétative.

Contrairement au scénario DNF, qui ne modifie que marginalement les composantes du bilan hydrologique en raison de son emprise limitée (Annexes B.4 ; Figure 107), le scénario théorique induit des changements plus perceptibles dans la répartition des flux. Les principales modifications concernent les transferts d'eau vers le réseau hydrographique et l'évolution des stocks. On observe notamment une augmentation des volumes dirigés vers la rivière au printemps (+45 mm), en été (+59 mm) et en automne (+47 mm). Les variations de stock d'eau dans le sol apparaissent également plus lissées entre les saisons. Cette évolution suggère que les aménagements modifient principalement les modalités de transfert de l'eau au sein du bassin versant plutôt que les volumes globaux mobilisés. Une partie de l'eau temporairement retenue ou infiltrée est finalement restituée au réseau hydrographique sous forme d'écoulements différés, ce qui se traduit par une augmentation de la composante « rivière » dans le bilan saisonnier. Les mêmes tendances sont observées pour le scénario théorique long terme (Annexe B.4 ; Figure 108).

Il convient toutefois de noter que les erreurs de bilan sont élevées dans le scénario théorique. Cette hausse est vraisemblablement liée à une intensification des échanges de surface induite par certains aménagements, générant davantage d'instabilités numériques dans le modèle. Ainsi, les différences observées doivent être interprétées avec prudence et complétées par l'analyse des événements pluvieux et des débits de pointe, qui permettent d'évaluer plus directement l'efficacité hydraulique des aménagements.

5.4.2.2. Analyses d'hydrogrammes

Cette section vise à évaluer l'effet des différents scénarios d'aménagement sur la réponse hydrologique du bassin versant lors d'événements pluvieux. L'analyse repose sur une sélection d'épisodes de crue représentatifs couvrant différentes saisons, intensités de précipitation et conditions hydrologiques antérieures. Cette approche permet d'étudier l'efficacité des aménagements dans un large éventail de situations hydrologiques.

Sélection des évènements

La Figure 91 présente les évènements identifiés à partir du dépassement d'un seuil de débit correspondant au quantile 99,0 % de la série simulée pour la situation actuelle ($Q = 1,121 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Au total, 157 évènements ont été sélectionnés sur la période de simulation. Ceux-ci sont majoritairement observés durant la période hivernale ($n = 83$), période où les sols sont plus saturés et où l'évapotranspiration est limitée. Ceci contraste notamment avec les TIH de Manihant-Ourcy et de Pierreuchamps-Chawieumont, où la majorité des évènements producteurs de ruissellement sont localisés au printemps et en été. Ces évènements servent de base à l'analyse comparative des scénarios à travers l'étude des débits de pointe simulés et les cartes évènementielles dans les différents modèles.

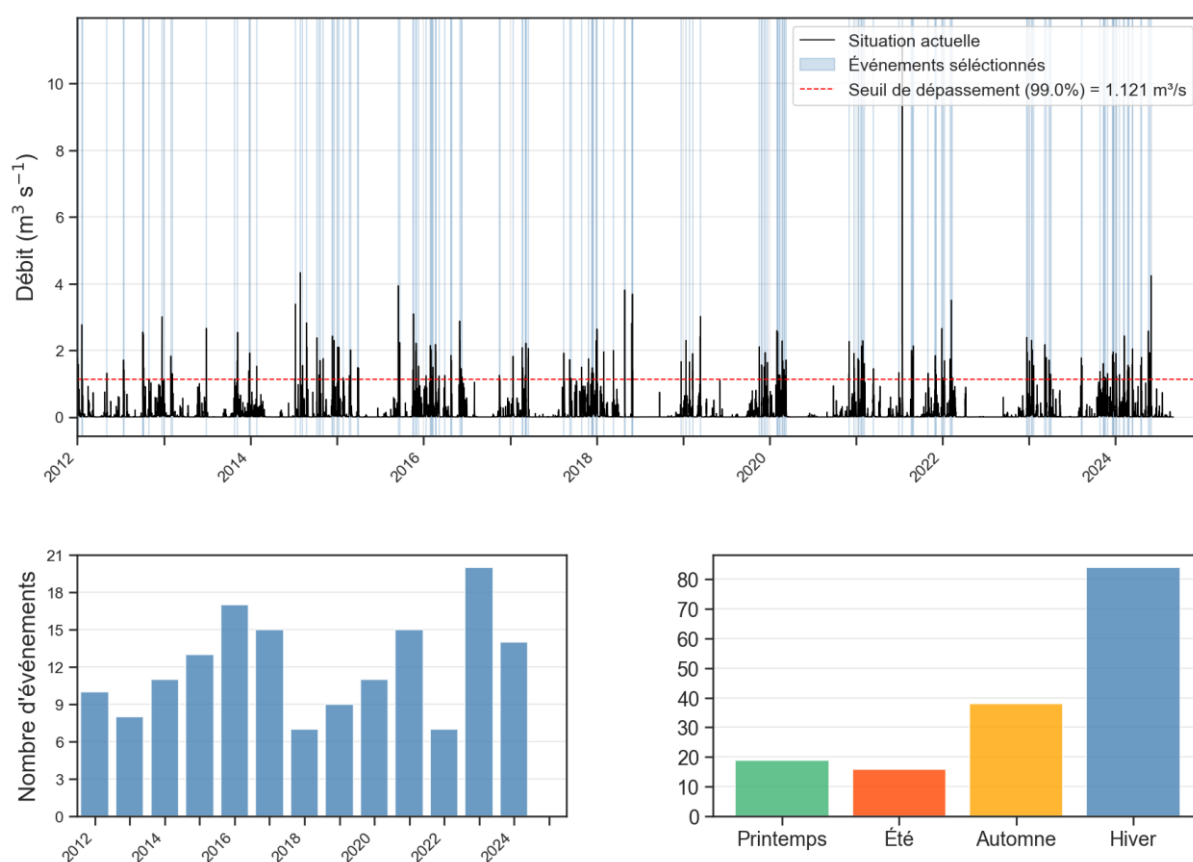


Figure 91 : Dépassesments du seuil de débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) sur la période du 01/01/2012 au 01/09/2024. Les graphiques situés en bas à gauche et à droite présentent respectivement la fréquence annuelle et saisonnière des dépassements observés.

Comme mentionné précédemment, les bilans hydrologiques des scénarios « théorique » et « théorique long terme » présentent des erreurs importantes liées au bouclage du bilan, susceptibles de biaiser l'évaluation de ces scénarios. Afin de limiter ce biais, seuls les évènements dont l'erreur relative sur l'ensemble de l'évènement (ε_{rel}) est inférieure à 15 % sont retenus pour la suite des analyses évènementielles. Ce pourcentage d'erreur est calculé selon l'équation suivante :

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\sum_{j=1}^k \varepsilon_j}{\sum_{j=1}^k P_j} \times 100 \quad (32)$$

où ε_j est l'erreur absolue de fermeture du bilan associée au pas de temps j , P_j est la précipitation au pas de temps j , et k le nombre total de pas de temps composant l'évènement.

Il convient de noter que, pour les trois scénarios, les conditions de linéarité entre les débits de la situation actuelle et ceux des scénarios ne sont pas respectées ($p < 0.05$). A la Figure 92, on observe le nuage de points reprenant les débits maximums observés pour les évènements décrits ci-avant et une droite de régression entre le scénario actuel et le scénario DNF. La réduction des débits est de l'ordre de 5 % à l'exutoire du bassin versant. En effet, les surfaces aménagées sont assez petites (1800 m² de mares et 502 m de déviation) et se situent à l'amont du bassin (l'aire contributive du territoire aménagé est de 48 % du TIH de la Statte). Analysés à l'aval immédiat de ce périmètre aménagé, les débits de pointe montrent des réductions plus importantes, de l'ordre de 14 %, confirmant que les effets des aménagements se diluent progressivement en direction de l'aval. De plus, certains aménagements ne sont pas mis en charge car les déviations se situent pour la plupart sur les mêmes axes et vers les mêmes peuplements. En effet, la première déviation dévie toute l'eau vers le peuplement, l'eau n'arrive plus à l'aval là où on trouve potentiellement une deuxième déviation.

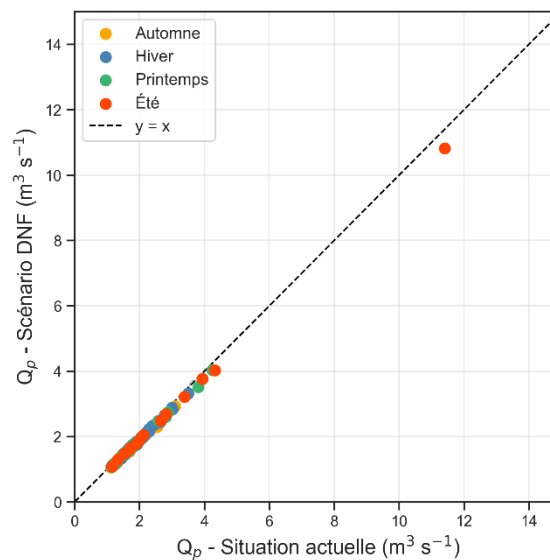


Figure 92 : Evolution des débits de pointe (Q_p) modélisés du TIH de la Statte pour le scénario DNF.

Concernant les scénarios théoriques, une part importante des évènements n'a pas été retenue en raison d'erreurs de bilan supérieures à 15 %. Ce sont préférentiellement les évènements les plus intenses qui ont été écartés, ceux-ci générant les flux de surface les plus importants et donc les erreurs les plus élevées. Les résultats présentés ci-après ne

sont donc pas représentatifs des évènements extrêmes, tels que celui de juillet 2021, et doivent être interprétés avec prudence.

Pour les évènements retenus, la diminution des débits de pointe semble néanmoins nettement plus marquée que dans le scénario « DNF » (Figure 93). Le scénario théorique montre une réduction des débits de pointe de l'ordre de 40 % par rapport à la situation actuelle. Le scénario théorique long terme, qui intègre en outre la conversion des peuplements existants vers des forêts mixtes ainsi qu'un travail non invasif du sol, semble accentuer encore cet effet, avec des réductions atteignant 50 %.

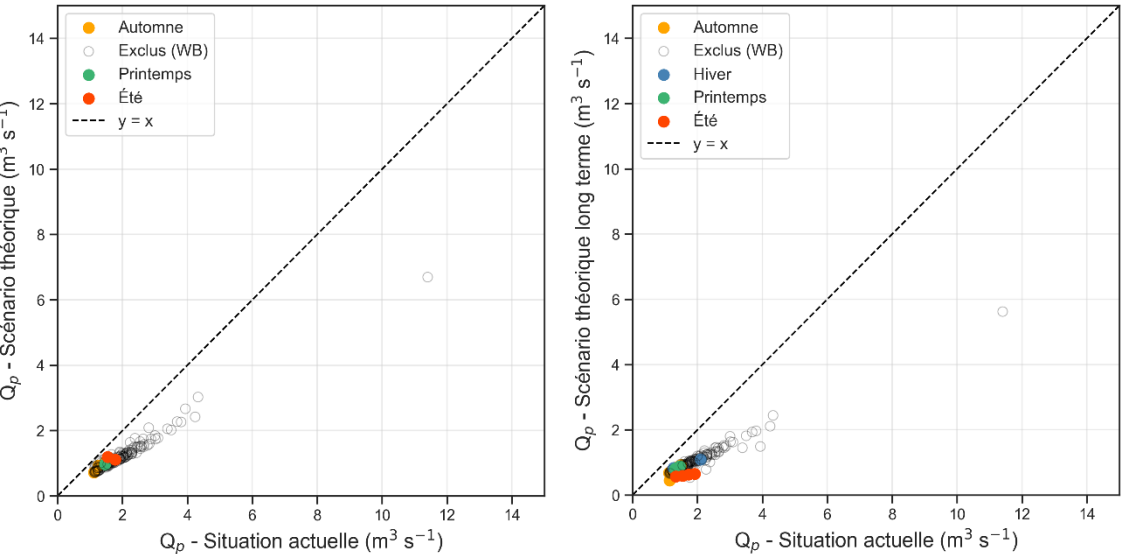


Figure 93 : Evolution des débits de pointe (Q_p) modélisés du TIH de la Statte pour les scénarios théorique (gauche) et théorique long terme (droite).

Afin de mieux comprendre les mécanismes hydrologiques à l'origine des réductions observées, une analyse détaillée est réalisée sur deux évènements (Tableau 22) ayant des erreurs maîtrisées de 17 % sur les deux derniers modèles.

Tableau 22 : Caractéristiques des deux évènements pluvieux sélectionnés pour l'analyse approfondie pour le TIH de la Statte.

#	Date	Saison	Période de retour (an)	Durée (h)	Pluviométrie (mm)	Conditions antérieures (mm 5j ⁻¹)
1	2-4/04/2015	Printemps	<2	23	17	54 (humides)
2	9/08/2023	Été	<2	18	22	58 (humides)

Hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes permet d'évaluer l'influence des aménagements sur la dynamique des crues à l'exutoire du TIH de la Statte. De manière générale, les scénarios aménagés entraînent une diminution des débits sur l'ensemble de l'hydrogramme, sans

décalages temporels marquants des débits de pointe. L'intensité de cette réduction augmente progressivement avec l'ambition des scénarios considérés.

Pour l'évènement printanier du 2 au 4 mai 2015 (évènement 1, cf. Tableau 22), le scénario DNF induit une diminution modérée du débit de pointe de l'ordre de 4 % (Figure 94). La diminution du volume écoulé à l'exutoire reste limitée, avec une réduction de 2 % sur l'ensemble de l'évènement. Ces résultats sont cohérents avec l'emprise relativement restreinte des aménagements prévus dans ce scénario, composés principalement de mares et de déviations localisées en amont du bassin versant.

Les scénarios théoriques induisent une diminution du débit de pointe, de 34 % pour le scénario théorique et 43 % pour le scénario théorique long terme. La diminution des volumes écoulés à l'exutoire est de 25 % pour le scénario théorique et 24 % pour le scénario théorique long terme sur l'ensemble de l'évènement.

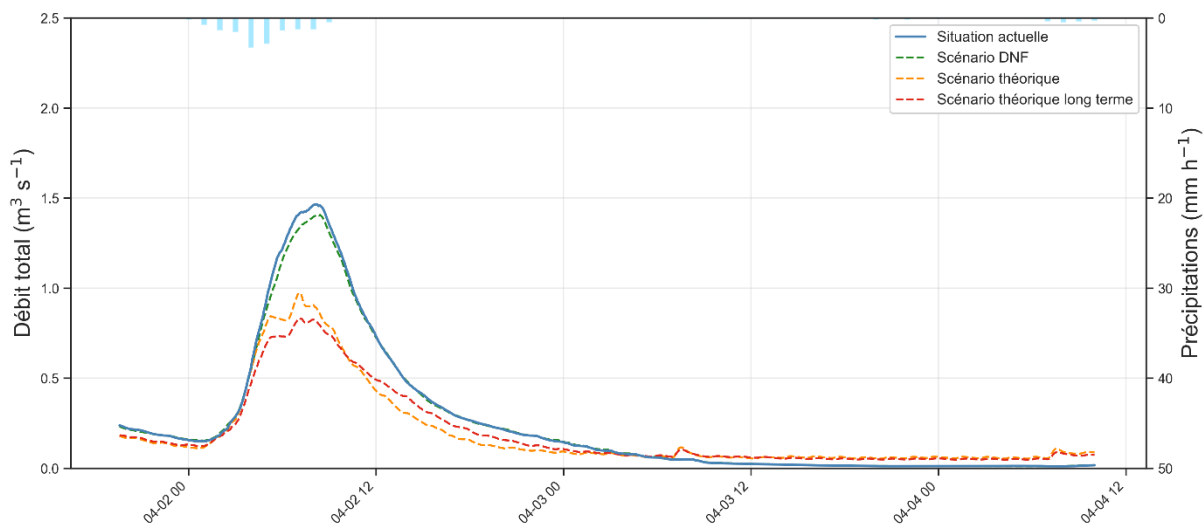


Figure 94 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de la Statte pour l'évènement pluvieux (1) (cf. Tableau 22). La figure compare la situation actuelle aux trois scénarios.

La comparaison simultanée des trois scénarios pour l'évènement du 8 au 11 août 2023 (évènement 2, cf. Tableau 22) met particulièrement bien en évidence cette progression de l'efficacité hydrologique (Figure 95). Le scénario DNF entraîne une réduction limitée du débit de pointe (4 %) et pas de différence sur le volume écoulé. À l'inverse, les scénarios théorique et théorique long terme réduisent respectivement les débits de pointe de 37 % et 70 %, tandis que les volumes écoulés diminuent de 22 % et 48 %.

Ces résultats montrent que l'efficacité des aménagements ne dépend pas uniquement de leur nombre ou de leur emprise, mais également de leur diversité et de leur répartition spatiale au sein du bassin versant. La combinaison de plusieurs types d'aménagements agissant sur des processus hydrologiques complémentaires (stockage temporaire, ralentissement des écoulements, dispersion des eaux et amélioration de l'infiltration) per-

met d'obtenir un effet cumulatif nettement plus important à l'exutoire. L'ajout des mesures de gestion forestière dans le scénario théorique long terme renforce encore cette dynamique, en augmentant la capacité de rétention et d'infiltration du bassin versant.

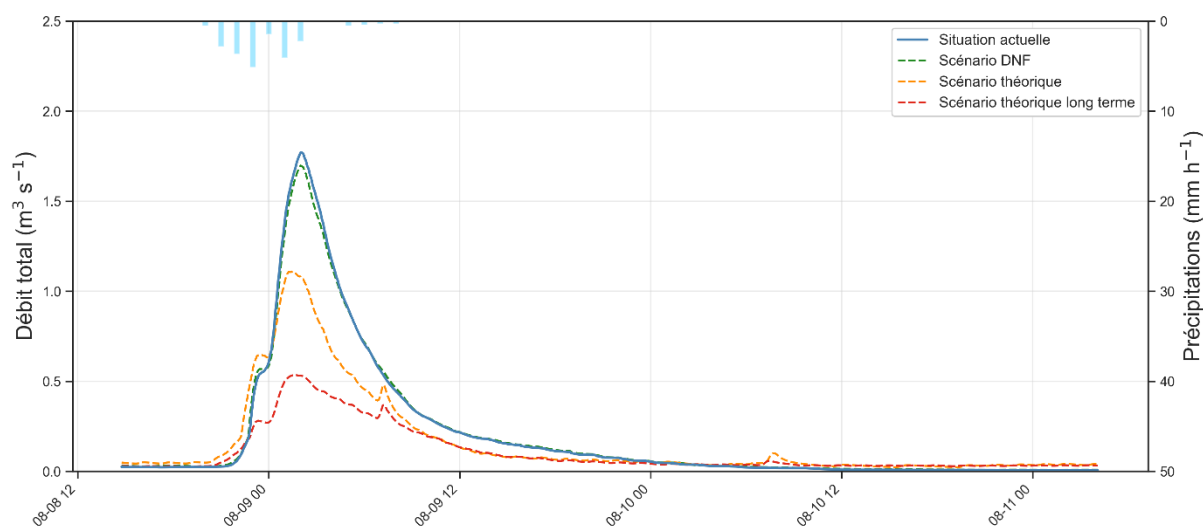


Figure 95 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire du TIH de la Statte pour l'évènement pluvieux (2) (cf. Tableau 22). La figure compare la situation actuelle aux trois scénarios.

5.4.2.3. Cartographies évènementielles

Coefficient d'écoulement

La cartographie évènementielle des coefficients d'écoulement (*CE*) permet d'analyser la répartition spatiale des processus de production du ruissellement et d'identifier les secteurs contribuant le plus fortement aux écoulements observés à l'exutoire (Figure 96, Figure 97, et Annexe B.4; Figure 110).

Le premier constat concerne les zones tourbeuses (localisées à l'extrême Est du TIH) et les secteurs présentant un drainage naturel défavorable. Ces zones affichent des coefficients d'écoulement particulièrement élevés, généralement compris entre 0,8 et 0,9. Cette réponse hydrologique s'explique par un état de saturation fréquent, voire quasi permanent, qui limite fortement les possibilités de stockage supplémentaire de l'eau dans le sol lors des épisodes pluvieux. Une grande partie importante des précipitations contribue alors directement au ruissellement et aux écoulements rapides vers le réseau hydrographique. Les surfaces imperméabilisées apparaissent également très nettement sur les cartes, avec des coefficients d'écoulement atteignant localement 0,9 à 0,99. Dans le cas de la Statte, ces secteurs correspondent essentiellement au réseau routier.

Pour le scénario DNF, les modifications observées du coefficient d'écoulement restent relativement localisées en raison du nombre limité d'aménagements mis en œuvre. La principale évolution concerne la zone de dispersion alimentée par une déviation, où une diminution du coefficient d'écoulement de l'ordre de 0,1 est observée. Cette réduction traduit une augmentation du temps de séjour de l'eau. À proximité immédiate de cette zone, des augmentations ponctuelles du coefficient d'écoulement, également de l'ordre

de 0,1, sont observées. Celles-ci peuvent s'expliquer par une redistribution locale des écoulements induite par la déviation, qui modifie les trajectoires préférentielles de l'eau au sein du bassin versant. Enfin, plusieurs variations isolées, de faible ampleur, apparaissent sur la carte en dehors des secteurs aménagés. Ces différences ne présentent pas de cohérence spatiale avec les aménagements ; elles sont assimilées à des erreurs liées au bouclage du bilan en eau et ne sont dès lors pas interprétées.

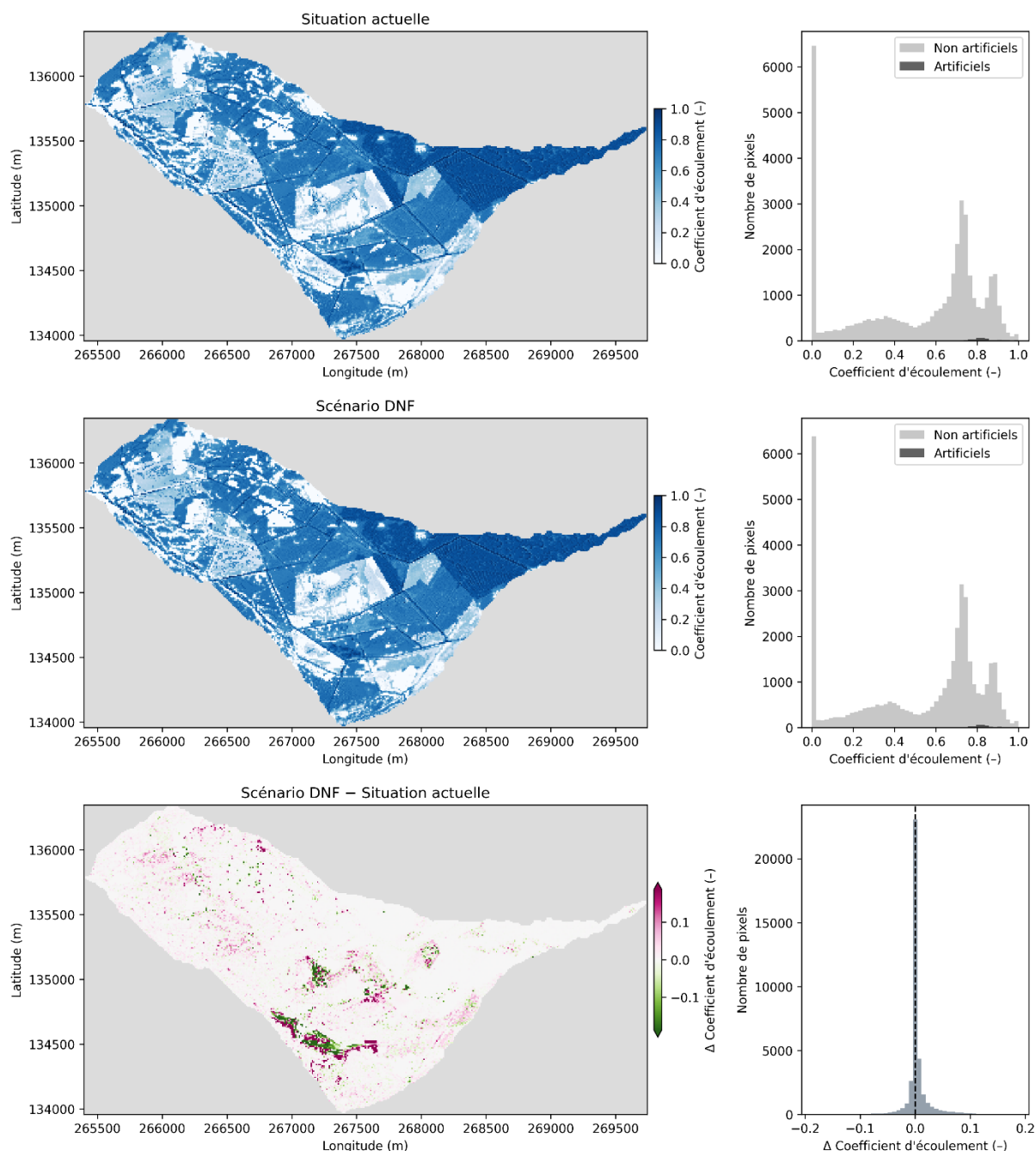


Figure 96 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario DNF (milieu) sur le TIH de la Statte. La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

L'analyse du scénario théorique long terme (Figure 97) met en évidence plusieurs modifications locales du fonctionnement hydrologique du bassin versant. Les parcelles concernées par le bouchage des drains présentent une augmentation du coefficient d'écoulement comprise entre 0,1 et 0,5. Cette évolution peut sembler contre-intuitive mais s'explique par le rôle du drainage dans le maintien d'une capacité de stockage disponible dans les horizons superficiels. Lorsque les drains sont bouchés, le niveau de la nappe augmente (Laudon et al., 2023) et les sols restent davantage saturés entre les événements pluvieux, ce qui réduit localement leur capacité d'infiltration lors d'un épisode donné et favorise une augmentation du ruissellement à l'échelle de la parcelle. Cette même dynamique est observée pour l'évènement 1 (Annexe B.4, Figure 109), mais de manière encore plus marquée. Cette différence s'explique vraisemblablement par les conditions hydrologiques de fin d'hiver, caractérisées par des sols déjà fortement saturés et une activité végétative encore limitée. Dans ce contexte, la fermeture des drains entraîne une augmentation plus prononcée de la saturation des sols, ce qui accentue localement l'augmentation du coefficient d'écoulement.

Toutefois, cette augmentation locale du coefficient d'écoulement ne se traduit pas nécessairement par une augmentation des débits à l'exutoire. L'eau ainsi produite reste davantage stockée dans le bassin versant ou est interceptée par d'autres aménagements situés à l'aval. Ce résultat illustre l'importance de distinguer les effets observés à l'échelle locale de ceux observés à l'échelle du bassin versant.

La conversion des peuplements existants vers des forêts mixtes, associée à une décompaction des sols, semble contribuer de manière significative à la réduction des CE à l'échelle du TIH. Cet effet s'explique en grande partie par l'emprise spatiale importante de ces aménagements, qui leur confère un poids considérable dans le bilan hydrologique global.

Les diminutions les plus marquées du coefficient d'écoulement sont observées à proximité des dispositifs de ralentissement et de dispersion des eaux. L'agglomérat de cellules présentant une baisse du coefficient d'écoulement au centre du bassin correspond notamment à une déviation connectée au réseau de fossés bordiers. Dans ce secteur, les coefficients diminuent localement de 0,1 à 0,3. Cette réduction traduit la capacité de l'aménagement à détourner les écoulements vers des zones où les temps de séjour sont plus élevés et où l'infiltration peut se poursuivre plus longtemps. Ces observations apparaissent encore plus nettement sur le scénario théorique pour ce même évènement (Annexe B.4, Figure 110). En l'absence des mesures de diversification des peuplements et d'amélioration des propriétés hydrodynamiques des sols, les effets propres aux aménagements hydrauliques sont plus facilement identifiables. Les diminutions du coefficient d'écoulement associées aux dispositifs de ralentissement, de dispersion et de rétention ressortent ainsi plus clairement, tandis que l'augmentation du coefficient d'écoulement au niveau des parcelles concernées par le bouchage des drains est également plus marquée.

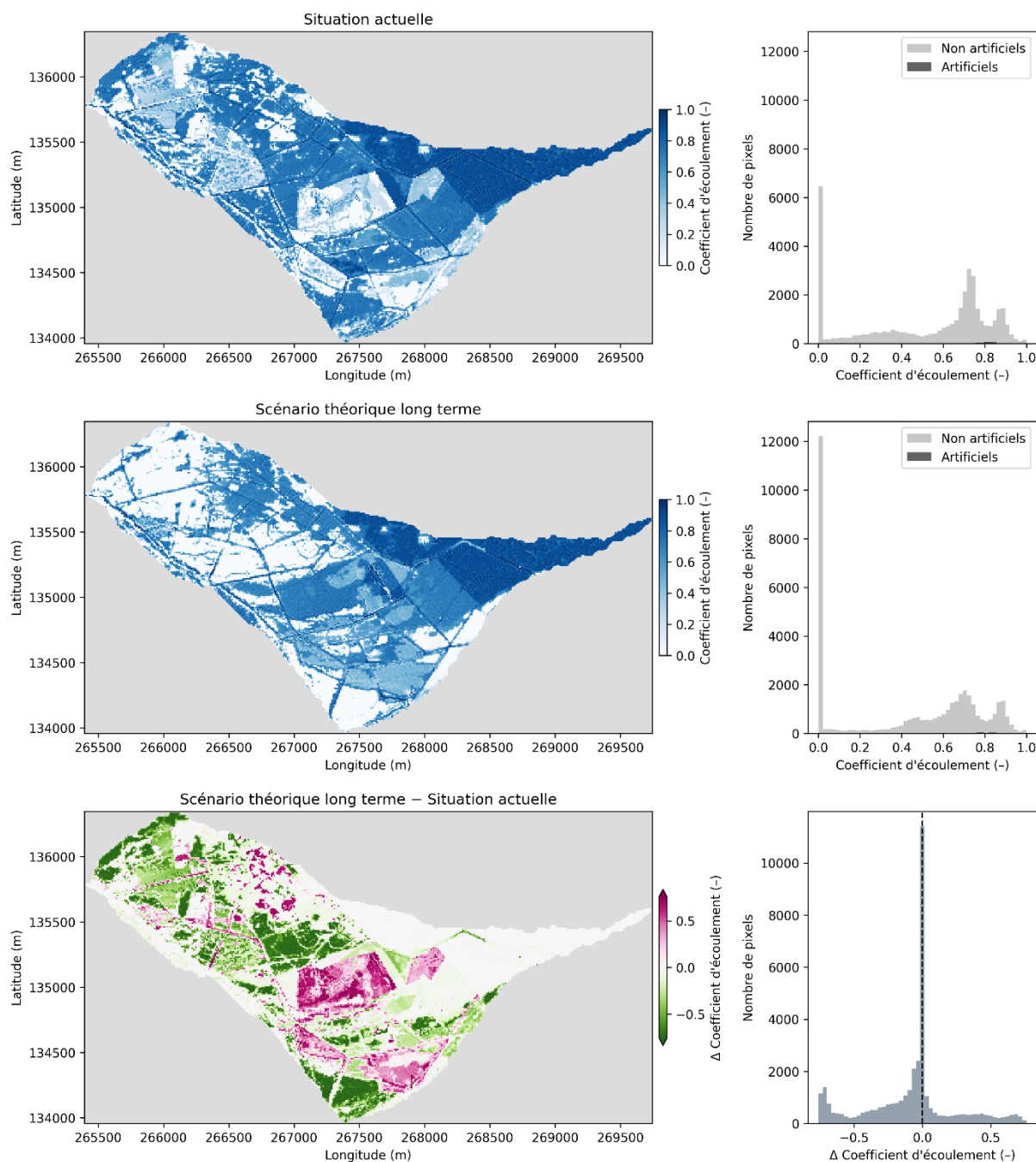


Figure 97 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (2) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu) du TIH de la Statte. La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique long terme induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

Des diminutions plus ponctuelles sont également observées au niveau des redents, des mares et des autres dispositifs de rétention temporaire. En ralentissant les écoulements et en augmentant les temps de résidence de l'eau dans le bassin versant, ces aménagements favorisent l'infiltration et réduisent localement la proportion des précipitations

transformée en ruissellement direct. Ces résultats confirment que l'efficacité du scénario théorique long terme repose principalement sur une redistribution spatiale des écoulements et sur l'augmentation des opportunités d'infiltration plutôt que sur une réduction uniforme du ruissellement à l'échelle du territoire.

5.4.2.4. Cartographies long terme

Évapotranspiration réelle

La cartographie de l'évapotranspiration réelle permet de distinguer clairement trois grands types de surfaces. Les zones boisées présentent les valeurs les plus élevées, autour de 600 mm an^{-1} , suivies des zones de tourbières (environ 300 mm an^{-1}), tandis que les surfaces imperméabilisées affichent les valeurs les plus faibles (environ 200 mm an^{-1}).

Le scénario théorique long terme est celui qui induit les modifications les plus importantes de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant. La conversion vers des forêts mixtes entraîne une augmentation notable de l'évapotranspiration réelle dans les zones concernées, avec des valeurs atteignant environ 650 mm.an^{-1} , soit une hausse sensible par rapport à la situation actuelle.

Stress hydrique

Les cartes de stress hydrique mettent en évidence le caractère globalement très humide du bassin versant de la Statte. En situation actuelle, les secteurs les plus sensibles présentent en moyenne moins de 2,5 jours de stress hydrique par an, ce qui confirme que la disponibilité en eau n'est généralement pas un facteur limitant sur le bassin versant.

La Figure 99 présente les différences observées entre la situation actuelle et le scénario théorique long terme. Les variations restent très limitées et dépassent rarement quelques jours par an. Une légère diminution du stress hydrique est observée dans plusieurs secteurs aménagés, ce qui peut s'expliquer par une meilleure rétention de l'eau dans le paysage et par les apports supplémentaires induits par certains aménagements de ralentissement et de dispersion des écoulements.

À l'inverse, une zone localisée présente une augmentation du nombre de jours sous stress hydrique, de l'ordre d'un à deux jours par an et peut s'expliquer par la conversion en forêts mixtes. En effet, la Figure 98 montre une augmentation des flux évapotranspiratoires annuels dans le scénario théorique long terme par rapport à la situation actuelle. Cette hausse de l'évapotranspiration se traduit par une consommation plus importante de l'eau stockée dans le sol au cours de certaines périodes de l'année, ce qui peut localement accroître le nombre de jours durant lesquels les plantes sont soumises à un stress hydrique. Malgré cette augmentation relative, les valeurs observées restent faibles et témoignent d'un impact limité sur le fonctionnement hydrique global du bassin versant.

Saturation des sols

Les résultats de saturation des sols confirment le caractère très humide du bassin versant de la Statte. Une grande partie du territoire présente des durées de saturation élevées, en particulier dans les zones tourbeuses et les secteurs à drainage défavorable, qui apparaissent nettement sur les cartes (Figure 100). Ces milieux restent proches de la saturation durant une large partie de l'année, limitant fortement la capacité de stockage supplémentaire des sols lors des épisodes pluvieux.

Pour le scénario DNF, les différences observées par rapport à la situation actuelle demeurent localisées. Une augmentation du nombre de jours à saturation est notamment visible sur une parcelle où plusieurs mares et dispositifs de déviation des écoulements ont été implantés. Cette évolution traduit une présence plus fréquente de l'eau dans ce secteur et témoigne du rôle des aménagements dans le maintien de conditions humides à l'échelle locale. En dehors de cette zone, les variations restent faibles, ce qui s'explique par l'emprise limitée des aménagements et par le niveau de saturation déjà élevé observé dans l'état actuel.

Le scénario théorique long terme (Figure 101) présente des tendances sur une emprise spatiale plus importante. On observe une diminution du nombre de jours de saturations sur les surfaces concernées par la transformation des peuplements existants par des forêts mixtes. En revanche, une augmentation du nombre de jours de saturation est principalement observée au niveau des parcelles initialement drainées, ayant fait l'objet de bouchage de drains. Plus localement, la saturation des sols augmente à proximité de plusieurs aménagements de déviation et dans les secteurs destinés à recevoir temporairement les écoulements. Ces zones jouent un rôle de stockage et de redistribution de l'eau au sein du bassin versant, ce qui se traduit par un maintien plus fréquent de conditions proches de la saturation. Cette augmentation reste néanmoins localisée (48 % d'aire contributive) et n'affecte pas le fonctionnement global du bassin versant, dont les sols présentent déjà des niveaux de saturation élevés en situation actuelle.

L'augmentation locale de la saturation observée autour de certains aménagements souligne l'importance de leur implantation dans des secteurs adaptés. Ces dispositifs devraient être privilégiés au sein de peuplements peu sensibles à l'engorgement ou dans des milieux naturellement humides, capables de tolérer des périodes prolongées de saturation.

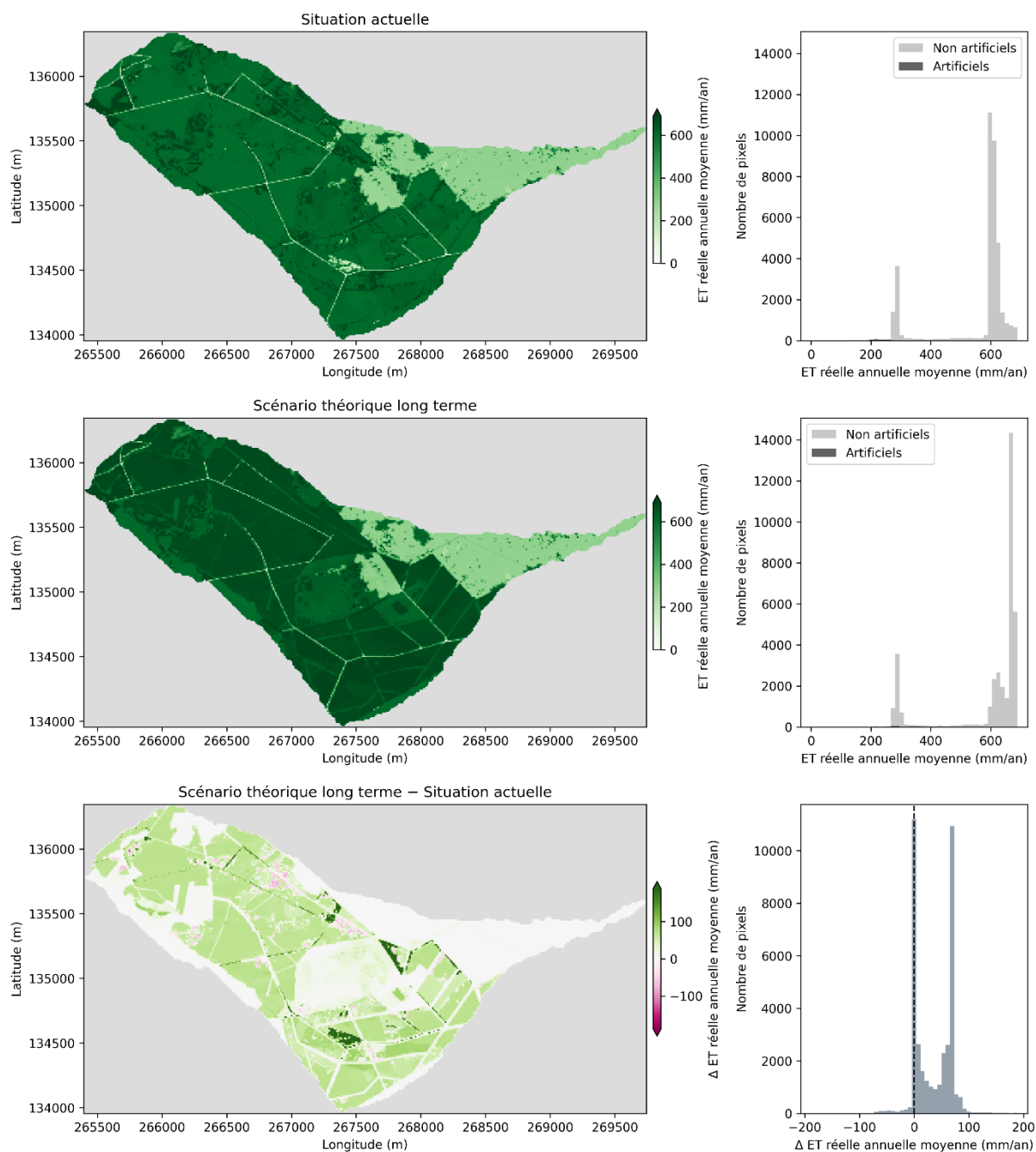


Figure 98 : Evapotranspiration réelle (ET_R) annuelle moyenne pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de l' ET_R par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de l' ET_R pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

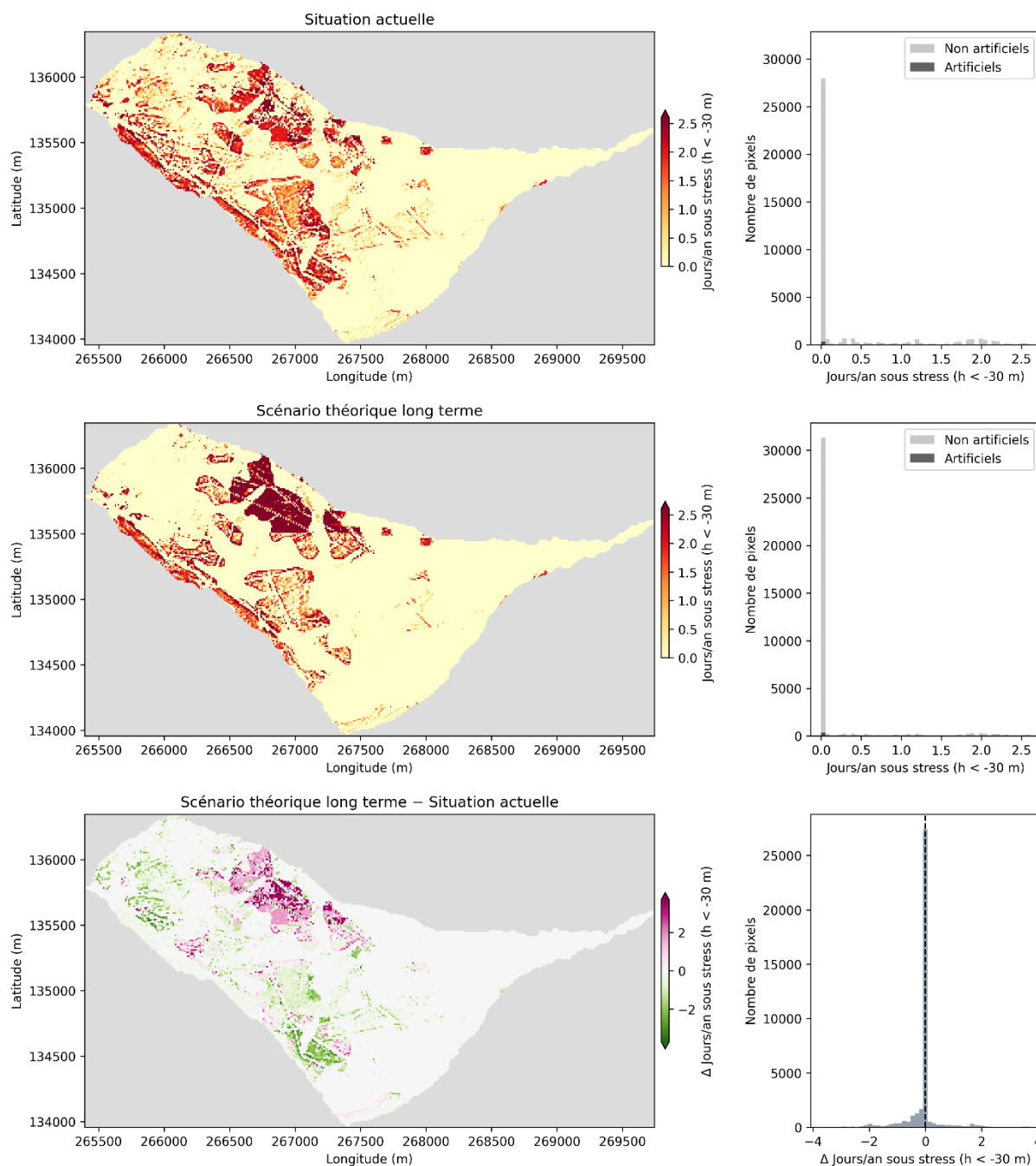


Figure 99 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

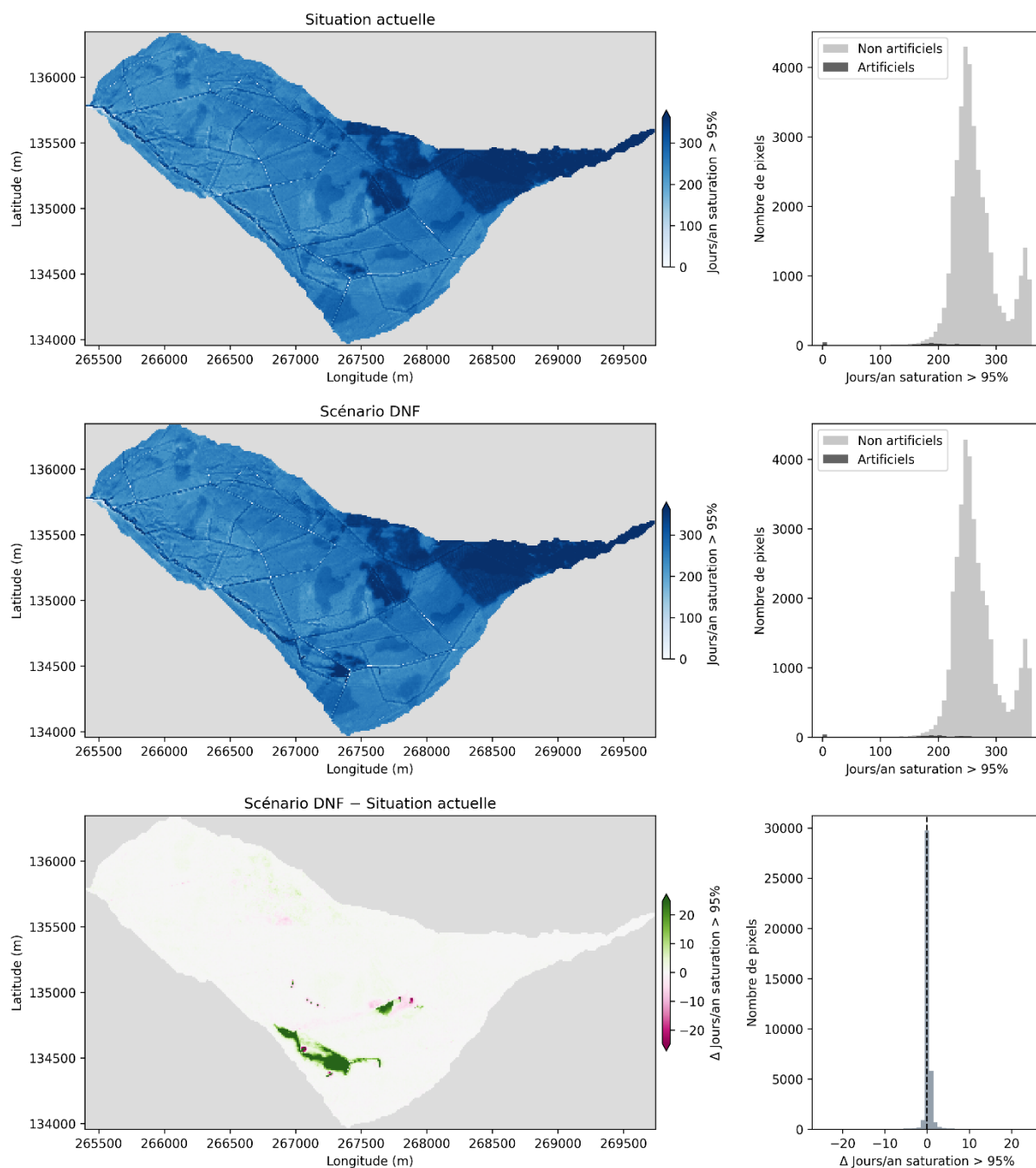


Figure 100 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario DNF (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario DNF induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

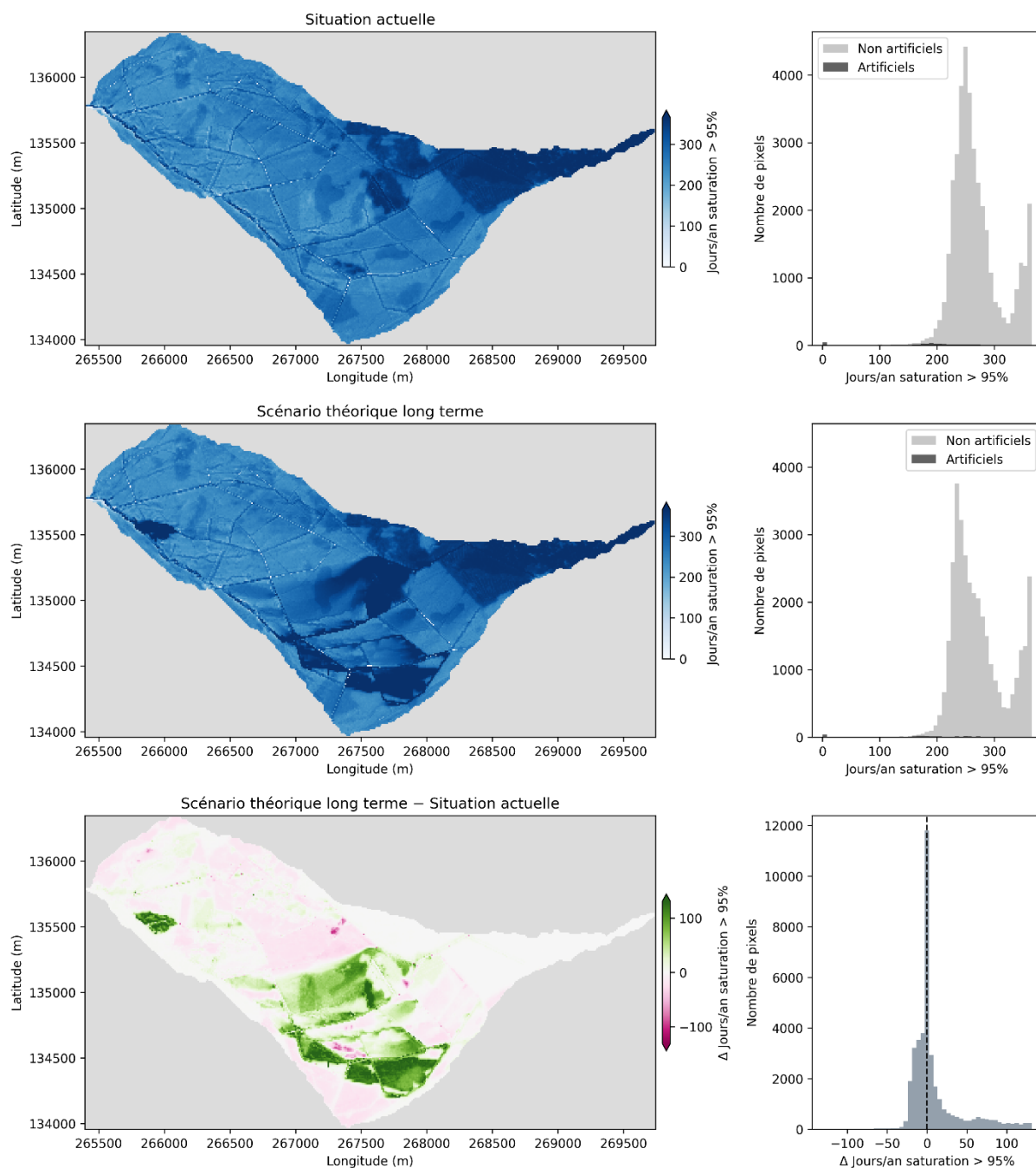


Figure 101 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique long terme (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique long terme induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

5.4.2.5. Efficacité des aménagements

L'interprétation de l'efficacité des aménagements doit être réalisée avec prudence, en particulier pour les scénarios théorique et théorique long terme qui reposent sur des hypothèses de modélisation plus nombreuses que le scénario DNF. Ce dernier constitue dès lors le scénario le plus représentatif des aménagements réellement envisageables sur le terrain.

Malgré ces limites, les différents résultats mettent en évidence des mécanismes cohérents quant au fonctionnement des aménagements. Ceux-ci agissent principalement en modifiant les chemins d'écoulement de l'eau au sein du bassin versant. Les déviations, zones de dispersion, mares et dispositifs de ralentissement permettent de déconnecter une partie des écoulements du réseau de fossés qui assure un transfert rapide vers l'exutoire. L'eau est ainsi maintenue plus longtemps dans le bassin versant, où elle peut être temporairement stockée, infiltrée ou restituée plus progressivement au réseau hydrographique.

Les cartographies des coefficients d'écoulement montrent que certains aménagements, notamment le bouchage des drains, peuvent localement conduire à une augmentation du ruissellement en raison d'un état de saturation plus fréquent des sols. Cette augmentation ne se traduit toutefois pas nécessairement par une hausse des débits à l'exutoire. Les résultats suggèrent au contraire que la déconnexion du réseau de drainage et la redistribution spatiale des écoulements limitent le transfert rapide de l'eau vers l'aval. L'efficacité des aménagements semble ainsi davantage liée à leur capacité à ralentir et à redistribuer les écoulements qu'à une diminution uniforme de la production de ruissellement à l'échelle du bassin versant.

5.4.3. Synthèse

Le travail mené sur le TIH de la Statte se distingue des deux autres territoires par son contexte particulier : à dominante forestière et majoritairement situé dans le domaine public, ce bassin versant a permis de travailler principalement avec un seul acteur gestionnaire, le Département de la Nature et des Forêts, en étroite collaboration avec la commune de Jalhay, propriétaire de l'essentiel des surfaces. Cette configuration a facilité la concertation et a permis d'aboutir rapidement à des scénarios d'aménagement. Les propriétaires privés, bien que conviés à participer, ne se sont pas manifestés, soulignant une fois encore la difficulté de mobiliser l'ensemble des acteurs fonciers d'un territoire.

Trois scénarios d'ambition croissante ont été élaborés et modélisés. Le scénario DNF, correspondant aux aménagements déjà planifiés, montre des effets modestes mais réels à l'aval immédiat des ouvrages, avec des réductions de débits de pointe de l'ordre de 14 %. Ces effets se diluent toutefois rapidement à l'exutoire du bassin versant, en raison de la faible emprise des aménagements, localisés à l'amont.

Le scénario théorique, combinant mares, redents, déviations, bouchage de drains et zones de dispersion, démontre une capacité de réduction des débits de pointe nettement plus importante, de l'ordre de 40 %. Le scénario théorique long terme, qui y intègre la conversion des peuplements existants vers des forêts mixtes ainsi qu'une aggradation des propriétés hydrodynamiques des sols, amplifie encore cet effet, avec des réductions des débits de pointe atteignant 50 %. Ces valeurs sont toutefois à interpréter avec prudence : les erreurs de bilan associées à ces deux scénarios sont élevées, et les événements les plus extrêmes ont dû être écartés de l'analyse.

Ces résultats confirment néanmoins le potentiel des milieux forestiers dans la gestion du cycle de l'eau. Ils confortent par ailleurs la direction prise par le DNF dans ses fiches d'investissements non productifs : les aménagements déjà planifiés vont dans le sens d'un amortissement du cycle hydrologique. Pour obtenir un effet hydrologique significatif à l'échelle du bassin versant, il conviendrait toutefois d'étendre leur emprise spatiale et d'y associer une plus grande diversité de mesures agissant sur des processus hydrologiques complémentaires.

Ces résultats soulèvent enfin la question de la temporalité. Les effets des aménagements hydrauliques peuvent être perceptibles à court terme, dès leur mise en œuvre. En revanche, les bénéfices liés à la transformation des peuplements forestiers s'inscrivent dans des échelles de temps bien plus longues, de plusieurs années à plusieurs décennies, impliquant un engagement durable des parties prenantes. Cet engagement est ici démontré comme rentable, et pourrait permettre de contrebalancer en partie l'évolution climatique en cours. La quantification de cet aspect dépasse le cadre du présent projet.

6. CONCLUSION

L'adaptation des territoires aux changements climatiques constitue un défi majeur de notre époque. Face à l'intensification des épisodes extrêmes, les solutions fondées sur la nature s'imposent comme des réponses à la fois efficaces et durables. L'intérêt hydrologique, mais également le caractère multifonctionnel de ces solutions n'est aujourd'hui plus à démontrer.

La question centrale n'est dès lors plus celle de leur pertinence, mais celle de leur mise en œuvre à l'échelle des bassins versants. Comment concevoir et implanter ces solutions de manière cohérente, tenant compte des spécificités biophysiques de territoires où s'entremêlent des usages, des activités et des enjeux multiples ? Comment quantifier les bénéfices que ces solutions apportent dans des contextes locaux variés, et ainsi disposer de chiffres solides pour conforter et orienter les décisions ? Comment garantir leur acceptation et leur appropriation par des acteurs aux intérêts et aux contraintes divergents ?

C'est à ces questions que le projet « ModRec 2-Hydrologie » a apporté des premiers éléments de réponse, en expérimentant une démarche structurée autour de bassins versants écoles, les « Territoires d'Innovation Hydrologique ». Ancrée dans les réalités locales de chaque territoire, cette approche repose sur une articulation itérative entre modélisation hydrologique et concertation avec les acteurs de terrain. La modélisation a permis de quantifier les bénéfices hydrologiques des scénarios envisagés, mais aussi de les rendre tangibles auprès des parties prenantes, en illustrant concrètement leurs effets potentiels. Ces allers-retours entre phases de simulation et phases de discussion ont constitué le cœur de la démarche, permettant d'affiner progressivement les scénarios en tenant compte des réalités des acteurs concernés. En se confrontant aux réalités du terrain, le projet a permis de tirer une série d'enseignements quant à la conception et à la mise en œuvre concrète de ces solutions.

La modélisation comme témoin de l'efficacité des mesures

Malgré leur emprise spatiale limitée, de l'ordre de 1 à 2 % des surfaces, les aménagements retenus dans les scénarios démontrent, par la modélisation, une capacité significative à réduire le risque d'inondation à l'exutoire des bassins versants. Certains scénarios, combinant différents types de mesures, montrent des réductions de débits de pointe pouvant atteindre 67 % lors des événements les plus extrêmes. Ces résultats constituent un argument fort en faveur de ces solutions, et illustrent le potentiel de l'hydrologie régénérative à l'échelle des versants.

Ces résultats reposent néanmoins sur des hypothèses de modélisation et des représentations simplifiées de la réalité. Certaines mesures, telles que le *keyline design* ou la fissuration des sols, restent peu documentées dans la littérature scientifique et leur représentation dans le modèle comporte une part d'incertitude, qu'il convient de mieux maîtriser.

Il apparaît donc indispensable d'assurer un suivi instrumental des TIH sur le long terme, afin de mesurer la réponse hydrologique réelle des bassins versants après la mise en œuvre des aménagements et de valider, ou d'ajuster, les hypothèses de modélisation. Ce suivi doit être envisagé dans la durée. Les aménagements traversent, en effet, une période de transition avant d'atteindre leur pleine efficacité.

Modéliser pour convaincre, concerter pour décider

La modélisation hydrologique inspire, illustre et conforte à travers des résultats chiffrés de l'efficacité des mesures envisagées. Néanmoins, les acteurs tranchent in fine sur la base de critères qui dépassent largement la seule performance hydrologique. Plusieurs dimensions entrent en effet en jeu de manière déterminante, et varient selon le type d'acteurs et les intérêts qui leur sont propres.

Dans le domaine privé, les contraintes économiques et foncières constituent souvent le premier frein : la perte de surface productive, le coût des travaux, l'incertitude sur les mécanismes de compensation et la dépendance vis-à-vis des propriétaires conditionnent fortement l'acceptabilité des aménagements. Les contraintes techniques pèsent également, qu'il s'agisse de la compatibilité avec des ouvrages et des modes d'exploitations existants, des difficultés liées au relief ou à la circulation des engins, ou encore des interrogations sur la pérennité et l'entretien à long terme des ouvrages. Ces aspects, difficilement quantifiables et spécifiques à chaque individu, sont pourtant déterminants dans la capacité d'une mesure à se concrétiser sur le terrain.

Dans ce contexte, une démarche de concertation davantage centrée sur des échanges individuels, appuyée par des visites de terrain et des propositions d'aménagement concrètes dès les premières étapes du projet, apparaît comme une condition favorable à l'appropriation des mesures proposées. Une clarification plus précoce du cadre financier aurait par ailleurs probablement permis d'instaurer un cadre plus clair et plus sécurisant pour l'ensemble des participants.

La co-construction et la concertation : deux processus exigeants mais incontournables

La co-construction et la concertation sont des processus longs et exigeants, mais ils constituent la seule voie permettant de garantir une réelle appropriation des mesures par les acteurs du territoire et, par conséquent, leur maintien à long terme. Ces processus requièrent un investissement humain considérable, tant du côté des porteurs de projet que des participants eux-mêmes, qui doivent pouvoir dégager du temps pour s'impliquer de manière effective. L'implication et la motivation des autorités communales se sont par ailleurs révélées décisives, légitimant la démarche aux yeux des participants.

Des aspects logistiques en apparence anodins, comme l'obtention des coordonnées des acteurs du territoire dans le respect du RGPD, peuvent s'avérer chronophages et freiner, voire empêcher, l'avancement d'un projet.

L'expérience du projet souligne l'importance d'apporter en amont de la co-construction des propositions d'aménagement concrètes, localisées sur les parcelles des acteurs concernés. Cette approche a permis d'ancrer rapidement les discussions dans la réalité du terrain, d'inspirer les participants et de donner corps à ces solutions. Chaque acteur a ainsi pu réagir, accepter, rejeter ou proposer des alternatives, accélérant sensiblement le processus de co-construction.

La gouvernance à l'échelle du bassin versant : un prérequis incontournable

La diversité des acteurs impliqués dans ce type de projet (agriculteurs, habitants, communes et gestionnaires publics) rend indispensable la présence d'un organe coordinateur capable de fédérer. Ce rôle, assuré ici par le CRV, s'est révélé déterminant pour maintenir une vision cohérente à l'échelle du bassin versant. Sans cette coordination, chaque acteur tend à raisonner dans le périmètre de ses propres compétences, rendant difficile l'émergence d'une approche intégrée.

Au-delà de la concertation, cet organe coordinateur est essentiel pour apaiser les postures contradictoires entre acteurs. L'exemple de l'imperméabilisation est à cet égard emblématique : investir dans des aménagements de rétention et d'infiltration d'un côté, tout en autorisant de nouvelles constructions dans des zones peu propices de l'autre, constitue une incohérence qui fragilise l'adhésion et la légitimité de l'ensemble de la démarche.

Des bénéfices collectifs, des efforts partagés

Les événements de juillet 2021, puis ceux du 30 mai 2026, sont là pour nous le rappeler : le changement climatique n'est plus une projection lointaine, mais une réalité à laquelle nos territoires sont déjà confrontés. Les acteurs du territoire de la Vesdre, témoins directs de ces événements, en ont pleinement pris la mesure. L'un des agriculteurs de Manihant-Ourcy résumait bien le défi collectif à relever : "Si chacun y met un peu du sien, il y a moyen d'améliorer la chose."

Ce projet confirme ce que le premier projet ModRec-Vesdre avait déjà mis en évidence : c'est surtout dans le domaine agricole, du fait de son emprise importante sur le territoire, que le potentiel d'amélioration hydrologique est le plus significatif. Or le secteur agricole, aujourd'hui, dispose de peu de marges de manœuvre. Les mesures mises en place sur les terres agricoles bénéficient avant tout à la collectivité, alors que leurs contraintes et leurs coûts reposent essentiellement sur les exploitants. Il est donc indispensable de renforcer et soutenir des mécanismes à la fois incitatifs et rémunérateurs, qui reconnaissent et compensent les externalités positives générées par ces aménagements. Cela implique non seulement une juste rétribution financière, mais également un accompagnement concret dans la mise en œuvre : simplification administrative, appui technique et logistique. Car si produire de la nourriture constitue le cœur du métier de nos agriculteurs et agricultrices, concevoir et réaliser des aménagements hydrologiques ne l'est pas encore. Or, la société a aujourd'hui un besoin urgent de reconnaître et de valoriser le rôle

largement multifonctionnel de l'agriculture : de l'hydrologie à la santé globale, en passant par de nombreux autres services rendus à la collectivité.

Les bases sont posées, maintenant l'action

Le projet ModRec 2-Hydrologie démontre qu'il est possible, sur des territoires complexes et multiusages, de construire collectivement une vision hydrologique cohérente et de la traduire en actions concrètes. Les outils, les méthodes et les enseignements développés ici constituent une base solide pour aller plus loin. La question n'est plus de savoir si ces solutions fonctionnent, mais de se donner collectivement les moyens de les déployer à la hauteur des enjeux. Cela suppose un engagement partagé entre pouvoirs publics, agriculteurs, gestionnaires et citoyens, et un cadre financier à la mesure des bénéfices collectifs attendus. Le temps de la démonstration laisse désormais place à celui du déploiement : c'est maintenant, et dans l'action collective, que se joue la capacité de nos bassins versants à faire face aux défis climatiques de demain.

TRAVAUX CITÉS

- Bourdoux, C. Université de Liège. (2025). *L'adaptation de la gestion des eaux pluviales au sein de lotissements périurbains. Application dans le bassin versant de la Vesdre*. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/22693>
- Brajkovic, J., Fettweis, X., Noël, B., Vyver, H. V. D., Ghilain, N., Archambeau, P., Pirotton, M., & Doutreloup, S. (2025). Increased intensity and frequency of extreme precipitation events in Belgium as simulated by the regional climate model MAR. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102399. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102399>
- Degré, A., Guillaume, B., Michez, A., Bonaventure, N., Leyh, E., Di Maggio, L., & Rabouli, S. (2024). *Modélisation Hydrologique du Bassin Versant de la Vesdre—Projet Modrec*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/314437>
- Del Carmen Ponce-Rodríguez, Ma., Carrete-Carreón, F. O., Núñez-Fernández, G. A., De Jesús Muñoz-Ramos, J., & Pérez-López, M.-E. (2021). Keyline in Bean Crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for Soil and Water Conservation. *Sustainability*, 13(17), 9982. <https://doi.org/10.3390/su13179982>
- Guillaume, B., Michez, A., & Degré, A. (2025). Leveraging soil diversity to mitigate hydrological extremes with nature-based solutions in productive catchments : An application and insights into the way forward. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(18), 4661-4688. <https://doi.org/10.5194/hess-29-4661-2025>
- Kristensen, K. J., & Jensen, S. E. (1975). A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Hydrology Research*, 6(3), 170-188. <https://doi.org/10.2166/nh.1975.0012>
- Laudon, H., Mosquera, V., Eklöf, K., Järveoja, J., Karimi, S., Krasnova, A., Peichl, M., Pinkwart, A., Tong, C. H. M., Wallin, M. B., Zannella, A., & Hasselquist, E. M. (2023). Consequences of rewetting and ditch cleaning on hydrology, water quality and greenhouse gas balance in a drained northern landscape. *Scientific Reports*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47528-4>
- Lepilin, D., Laurén, A., Uusitalo, J., Fritze, H., Laiho, R., Kimura, B., & Tuittila, E.-S. (2022). Response of vegetation and soil biological properties to soil deformation in logging trails of drained boreal peatland forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(4), 511-526. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0176>
- Maillen, C. (2025). *Caractérisation des haies dans les paysages agricoles : Typologie, paramètres pédologiques et végétatifs pour une modélisation hydrologique affinée* [Université de Liège]. <http://hdl.handle.net/2268.2/25035>
- Mollison, B. C. (1988). *Permaculture : A Designers' Manual*. Tagari Publications.
- Morris, P. J., Davies, M. L., Baird, A. J., Balliston, N., Bourgault, M.-A., Clymo, R. S., Fewster, R. E., Furukawa, A. K., Holden, J., Kessel, E., Ketcheson, S. J., Kløve, B.,

- Larocque, M., Marttila, H., Menberu, M. W., Moore, P. A., Price, J. S., Ronkanen, A.-K., Rosa, E., ... Wilkinson, S. L. (2022). Saturated Hydraulic Conductivity in Northern Peats Inferred From Other Measurements. *Water Resources Research*, 58(11), e2022WR033181. <https://doi.org/10.1029/2022WR033181>
- Mualem, Y. (1986). Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils : Prediction and Formulas. In A. Klute (Éd.), *SSSA Book Series* (1^{re} éd., Vol. 5, p. 799-823). Wiley. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c31>
- Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M. A., Bilyera, N., & Zamanian, K. (2021). Impacts of Logging-Associated Compaction on Forest Soils : A Meta-Analysis. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 780074. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.780074>
- Nyberg, M., Black, T. A., Ketler, R., Lee, S.-C., Johnson, M., Merkens, M., Nugent, K. A., & Knox, S. H. (2022). Impacts of Active Versus Passive Re-Wetting on the Carbon Balance of a Previously Drained Bog. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127(9), e2022JG006881. <https://doi.org/10.1029/2022JG006881>
- Richards, L. A. (1931). Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. *Physics*, 1(5), 318-333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Seiwa, K., Kunii, D., Masaka, K., Hayashi, S., & Tada, C. (2021). Hardwood mixture enhances soil water infiltration in a conifer plantation. *Forest Ecology and Management*, 498, 119508. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119508>
- Service public de Wallonie. (2003). *Plan P.LU.I.E.S. L'Environnement en Wallonie*. <https://environnement.wallonie.be/home/gestion-environnementale/risques-climatiques/inondations/directive-inondation/historique---plan-pluies.html>
- Service public de Wallonie. (2018). *Pluviométrie—État de l'environnement wallon*. Etat de l'environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/PHYS1.html>
- Szabó, B., Weynants, M., & Weber, T. K. D. (2021). Updated European hydraulic pedo-transfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14(1), 151-175. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>
- van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vesters, Y., Moreau, T., Thieffry, J., Leman, A., Degré, A., Renard, A.-C., Burton, C., Royen, L., Rompu, E. V., & Peeters, A. (2025). *Livraison 6. Programme d'adaptation de l'agriculture au changement climatique de la zone pilote en Wallonie picarde. Dans le cadre du projet n°104 du Plan de Relance de la Wallonie « Améliorer la gestion quantitative de l'eau en agriculture dans le contexte du changement climatique » (Rapport scientifique de l'Aménagement foncier rural, p. 177)*. Service Public de Wallonie.

ANNEXES

A. Paramétrisation du modèle

1. Occupation du sol et végétation

Tableau 23 : Paramètres de dynamique annuelle des variables biophysiques pour chaque classe de végétation.

Classe de végétation	Jour	<i>LAI</i>	<i>R_d</i>	<i>K_c</i>
		(-)	(cm)	(-)
Pas de végétation	0	0	0	0,25
Pas de végétation	365	0	0	0,25
Zone humide	35	1	100	0,5
Zone humide	135	1	100	0,5
Zone humide	235	1	100	0,8
Zone humide	335	1	100	0,8
Zone humide	365	0,8	100	0,5
Zone humide	0	0,8	100	0,5
Prairie intensive	0	1	300	0,5
Prairie intensive	45	2	300	0,5
Prairie intensive	105	4	300	0,9
Prairie intensive	255	4	300	0,9
Prairie intensive	305	2	300	0,5
Prairie intensive	365	1	300	0,5
Conifères	0	6	600	1
Conifères	365	6	600	1
Feuillus	0,25	0,5	1200	0,6
Feuillus	105	1	1200	0,6
Feuillus	140	6	1200	1,5
Feuillus	270	6	1200	1,5
Feuillus	330	1	1200	0,6
Feuillus	365	0,5	1200	0,6
Prairies naturelles	0	1	300	0,6
Prairies naturelles	45	2	300	0,6

Prairies naturelles	255	4	500	1,1
Classe de végétation	Jour	LAI	R_d	K_c
		(-)	(cm)	(-)
Prairies naturelles	305	2	300	0,6
Prairies naturelles	365	1	300	0,6
Prairies naturelles	105	4	500	1,1
Cultures	0	0,3	100	0,5
Cultures	170	0,3	100	0,5
Cultures	195	4	400	1,2
Cultures	220	4	400	1,2
Cultures	230	0,3	100	0,5
Cultures	365	0,3	100	0,5

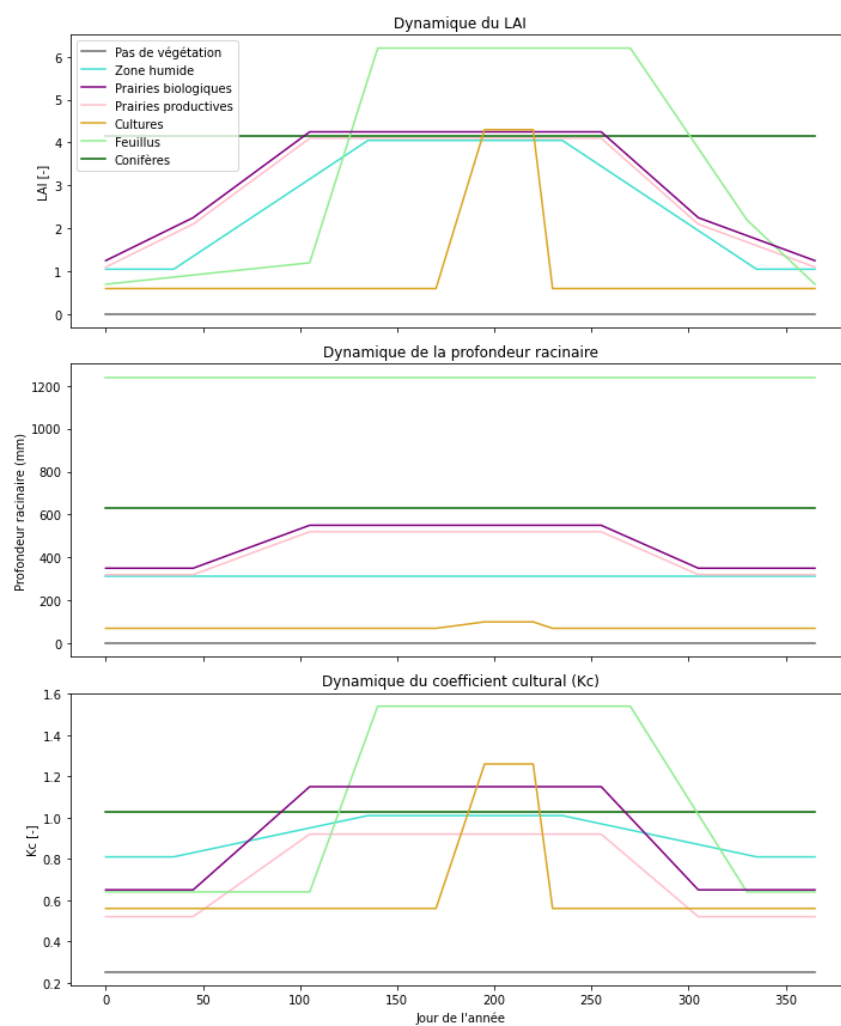


Figure 102 : Représentation de la dynamique temporelle annuelle des paramètres des classes de végétation.

2. Données de surface

Tableau 24 : Valeur du coefficient de Manning ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$) et du stock de rétention superficielle (mm) pour les classes d'occupation du sol.

Classe d'occupation du sol	<i>n</i>	Stock de rétention
	($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$)	(mm)
Eau de surface	0,030	1
Surfaces naturelles minérales avec couverture végétale < 10 %	0,018	1
Surfaces artificiellement imperméabilisées	0,011	1
Bâtiments, structures et infrastructures spécifiques	0,013	1
Formations herbacées en rotation annuelle (e.g., cultures)	0,130	2
Prairies à gestion intensive	0,150	3
Prairies et fourrés d'intérêt biologique	0,240	5
Végétation de zones récemment perturbées (e.g., coupe rase)	0,050	4
Prairies inondables et fourrés d'intérêt biologique	0,050	4
Peuplements résineux adultes (≥ 3 m)	0,400	3
Jeunes peuplements résineux (< 3 m)	0,400	3
Peuplements feuillus adultes (≥ 3 m)	0,800	5
Jeunes peuplements feuillus (< 3 m) et arbustes	0,800	5

3. Sols dans la zone saturée

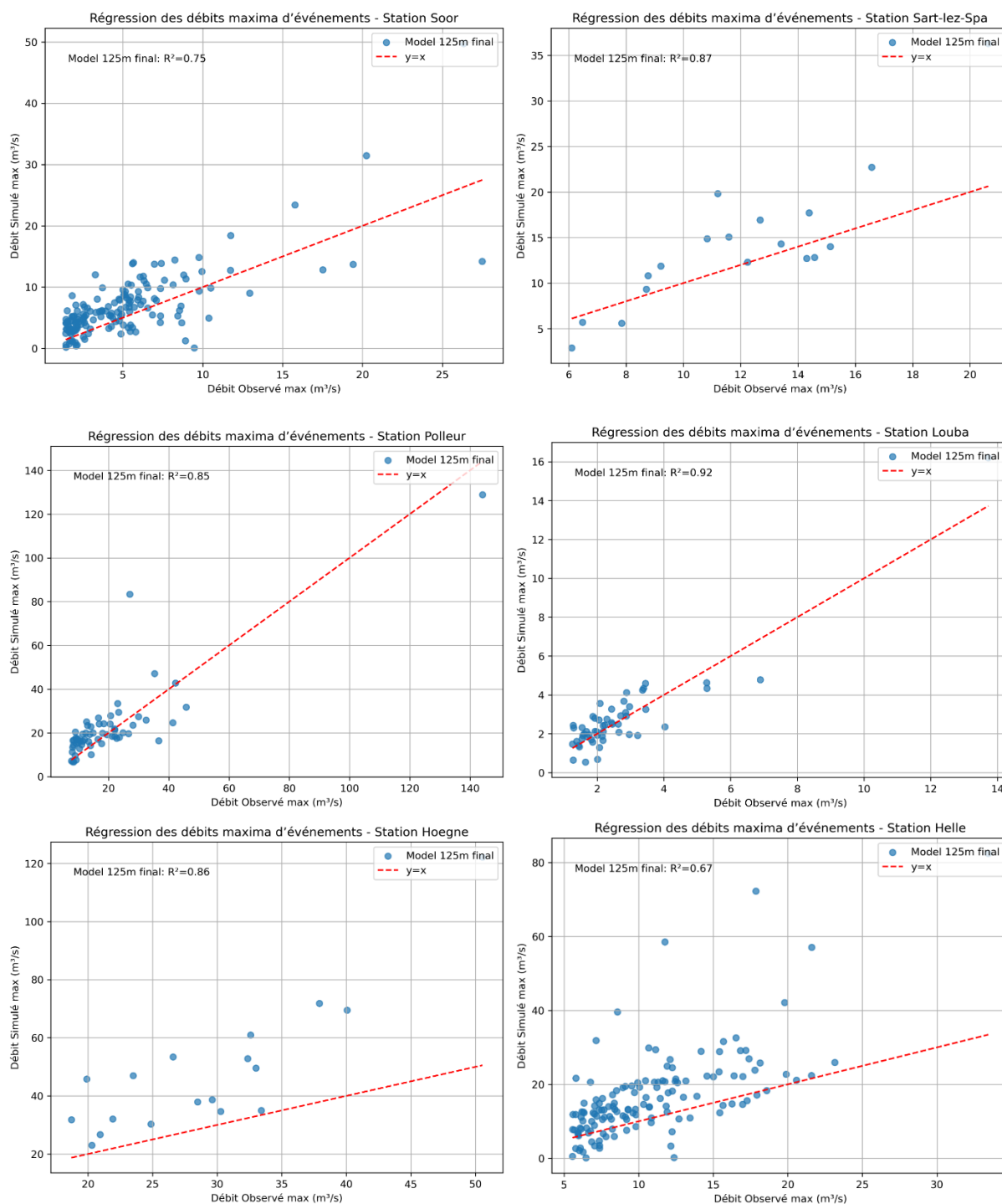
Tableau 25 : Conductivités hydrauliques à saturation verticale ($K_{s,V_{surface}}$, $K_{s,V_{profond}}$) et horizontales ($K_{s,H_{profond}}$) associées à chaque géocode. Les propriétés de surface et de profondeur se situent respectivement au-dessus et en dessous de la profondeur limite.

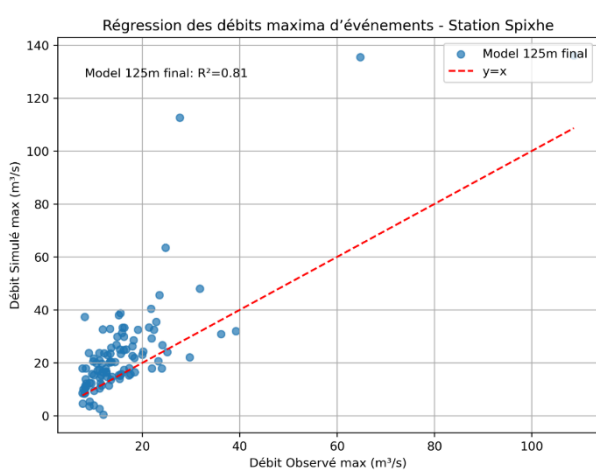
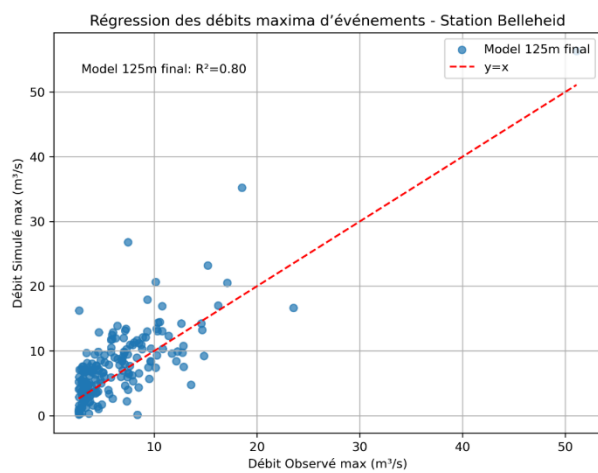
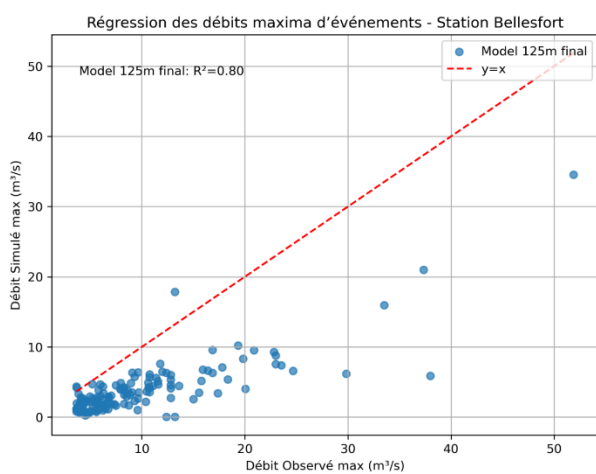
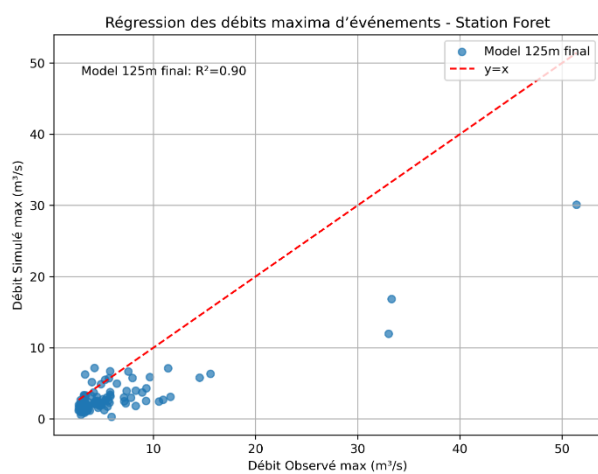
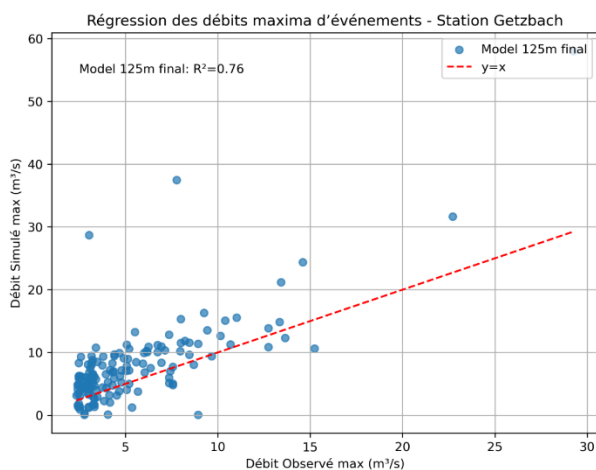
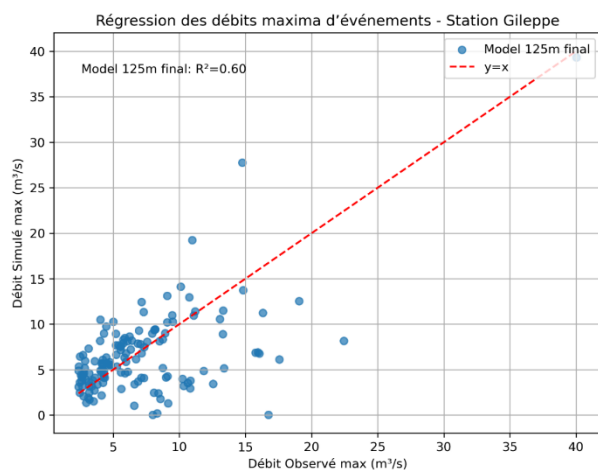
Géocode	$K_{s,V_{surface}}$ (m s ⁻¹)	$K_{s,V_{profond}}$ (m s ⁻¹)	$K_{s,H_{profond}}$ (m s ⁻¹)	Profondeur limite (m)
1	1,00E-06	5,00E-07	5,00E-06	6
3	1,00E-07	5,00E-06	5,00E-05	2
4	1,40E-07	1,00E-06	1,00E-05	5,5
6	1,40E-05	1,00E-06	1,00E-05	5,5
7	1,00E-07	5,00E-07	5,00E-06	5,5
9	1,00E-07	1,00E-06	1,00E-05	13,5
11	1,00E-07	5,00E-06	5,00E-05	1,75
15	3,00E-07	1,00E-08	1,00E-07	5,5
17	7,00E-09	1,00E-08	1,00E-07	7,75
116	7,00E-09	1,00E-08	1,00E-07	7,75
120	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-06	2,5
122	5,00E-10	6,00E-05	6,00E-04	5
125	5,00E-10	5,50E-06	5,50E-05	2,5
131	1,80E-06	1,00E-05	1,00E-04	5
132	1,80E-06	5,00E-06	5,00E-05	5
135	3,00E-09	6,00E-05	6,00E-04	2,5
136	9,18E-06	5,00E-08	5,00E-07	5
299	1,00E-06	5,00E-04	5,00E-03	1,25
139	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	13,5
274	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	13,5
305	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	13,5
306	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	13,5
313	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	13,5
399	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-05	13,5

B. Résultats

1. Modèle Vesdre

Annexe 1 : Régression linéaire des débits maxima observés et simulés pour le modèle 124m de la Vesdre sur les stations de la Soor, Sarz-lez-Spa, Polleur, Louba, Hoëgne, Helle, Gileppe, Getzbach, Forêt, Bellesfort, Belleheid et Spixhe.





2. Manihant-Ourcy

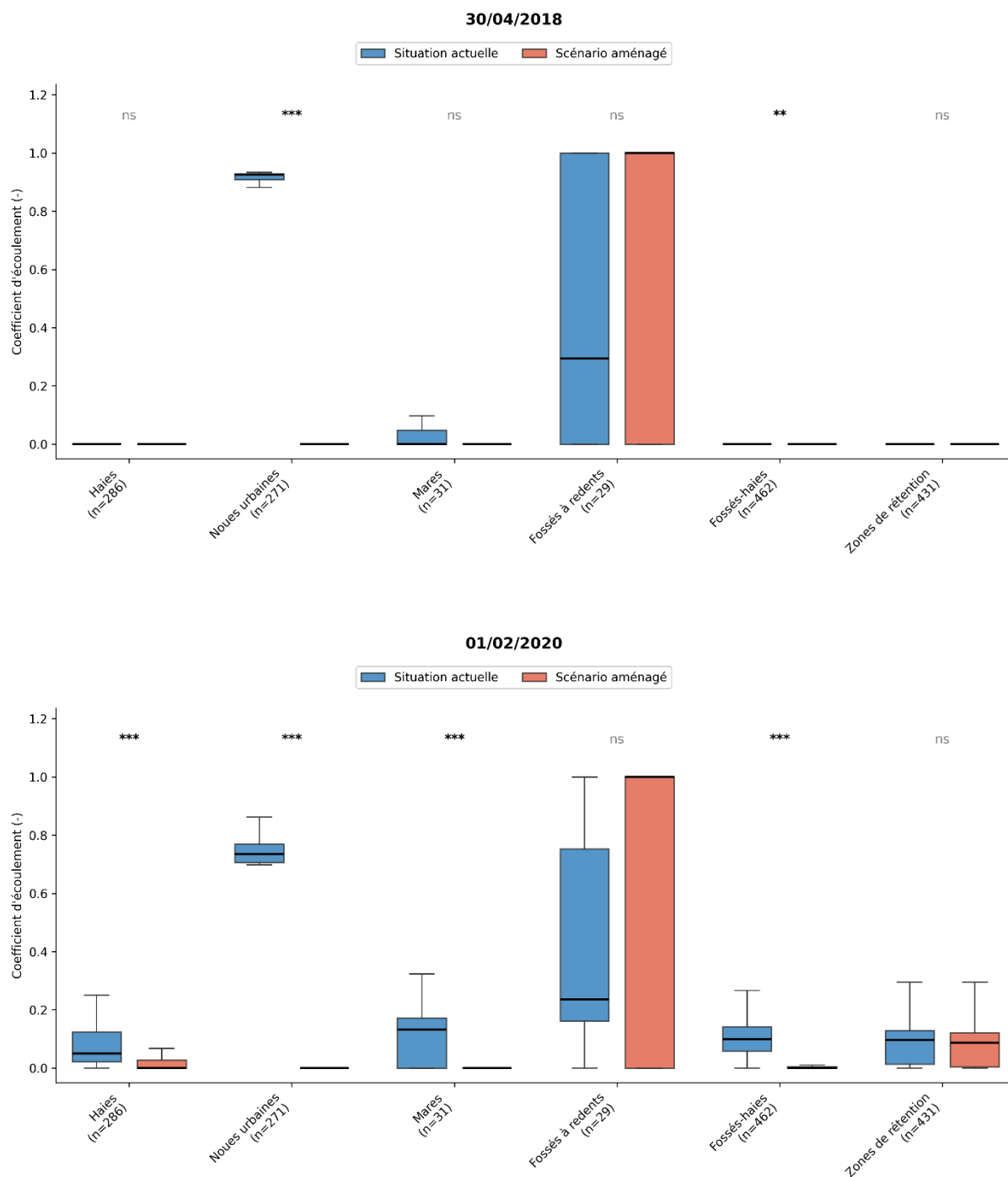


Figure 103 : Comparaison des coefficients d'écoulement entre la situation actuelle et le scénario aménagé pour les événements pluvieux (1) et (3) dans la Section 5.2.2.2 en fonction des différents types d'aménagement.

3. Pierreuchamps-Chawieumont

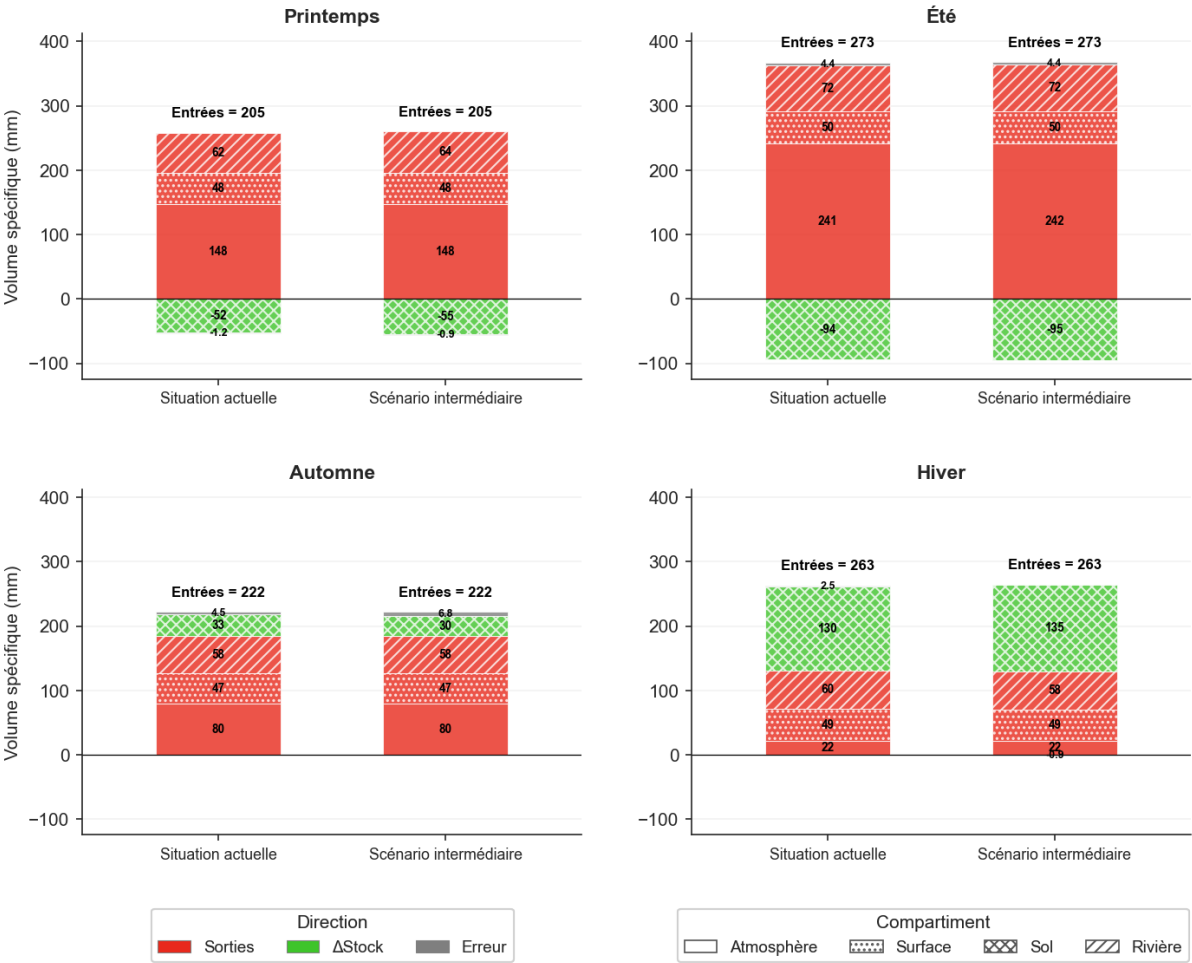


Figure 104 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de Pierreuchamps-Chawieumont par saison pour la situation actuelle et le scénario intermédiaire.

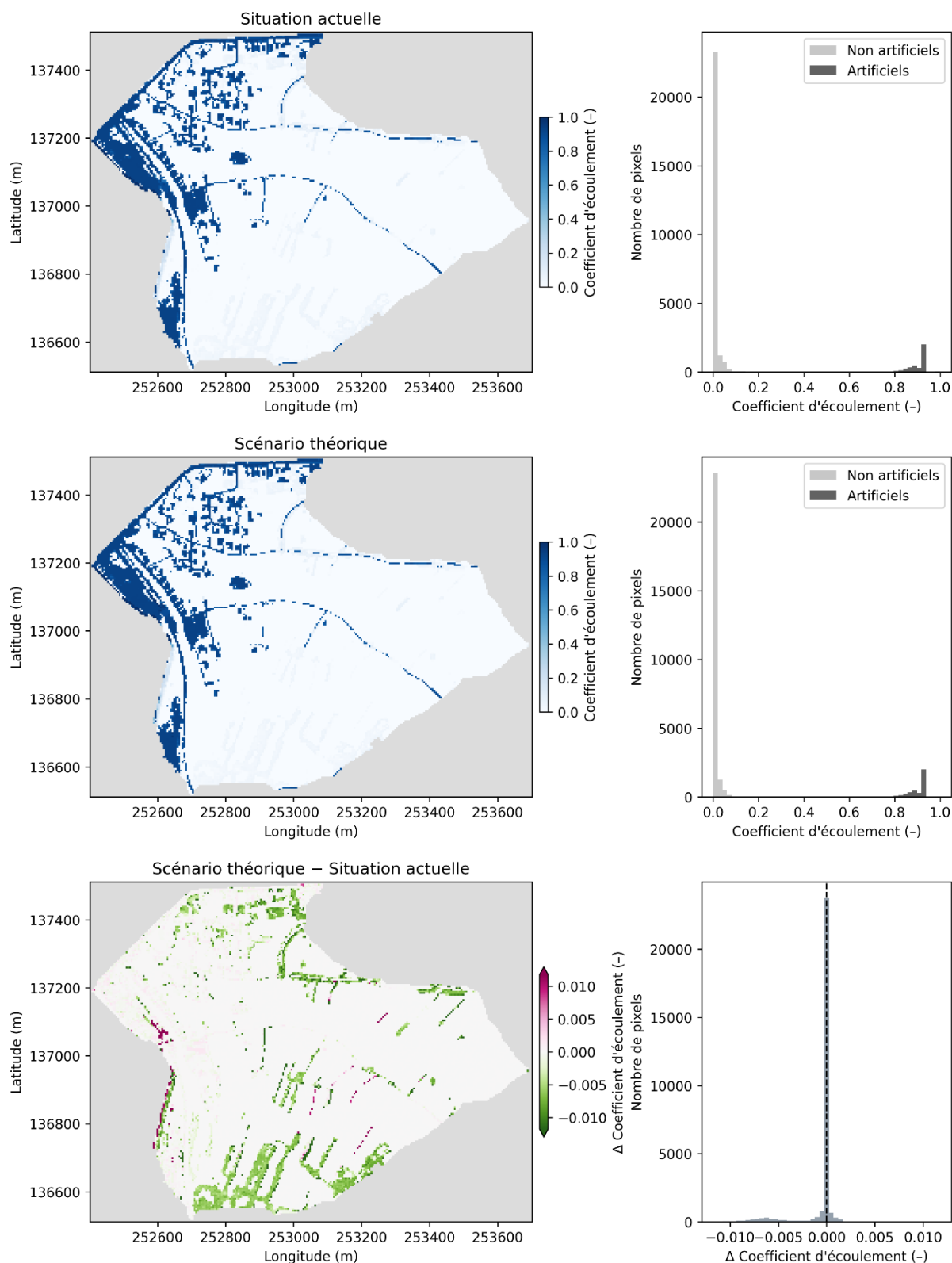


Figure 105 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (1) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

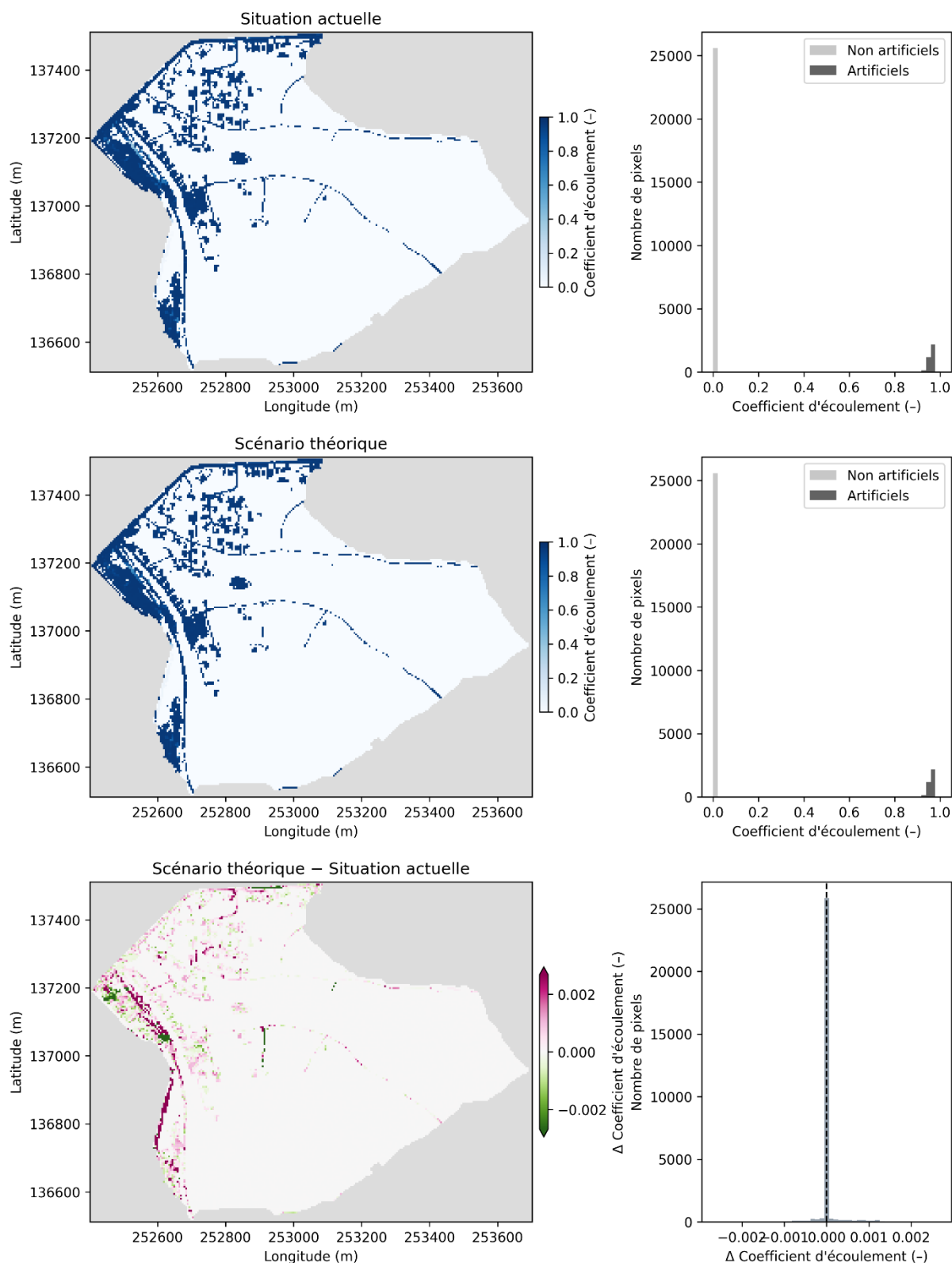


Figure 106 : Coefficient d'écoulement (CE) simulé lors de l'évènement (3) pour la situation actuelle (haut) et le scénario théorique (milieu). La carte de différence (bas) met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du CE par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de CE pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

4. Statte

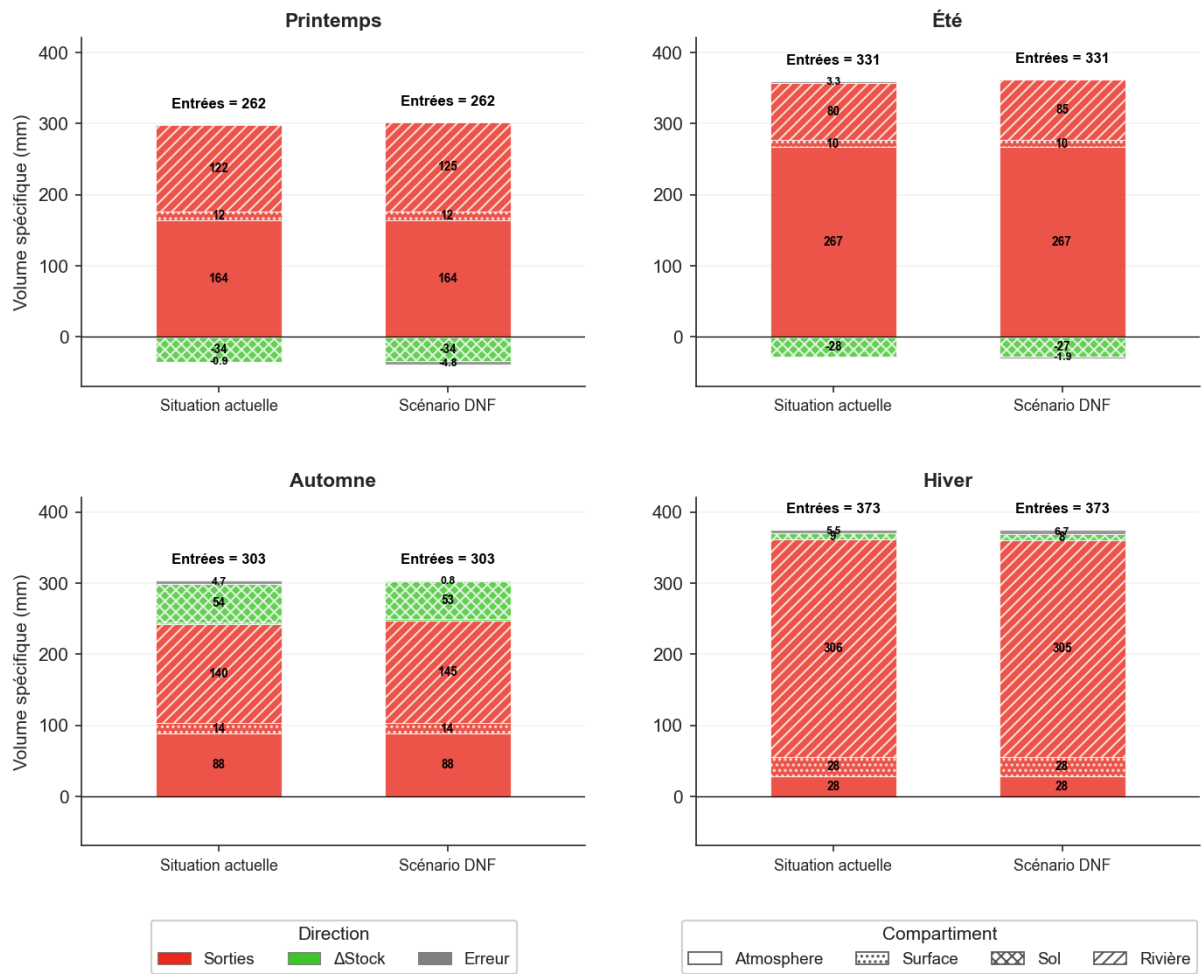


Figure 107 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de la Statte par saison pour la situation actuelle et le scénario DNF.

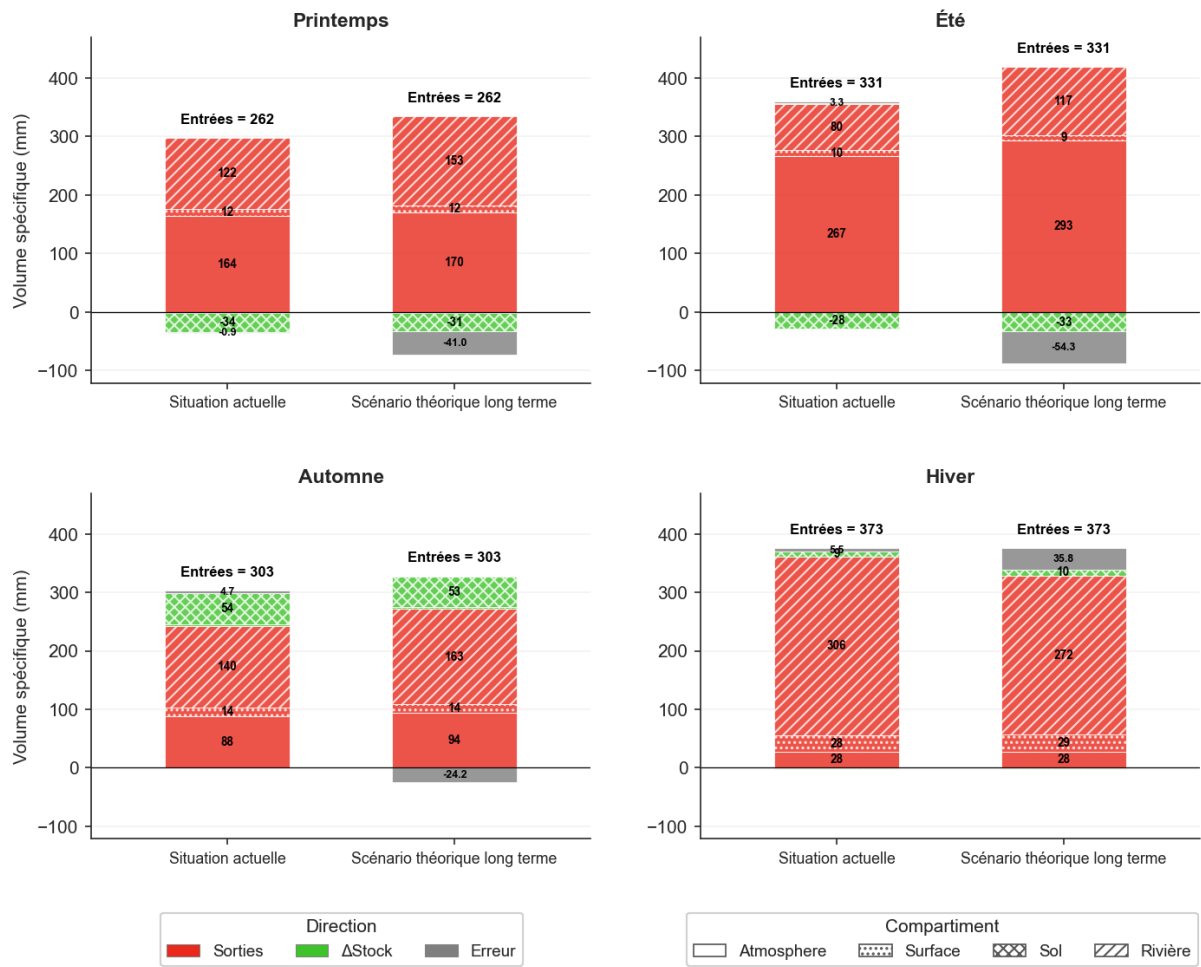
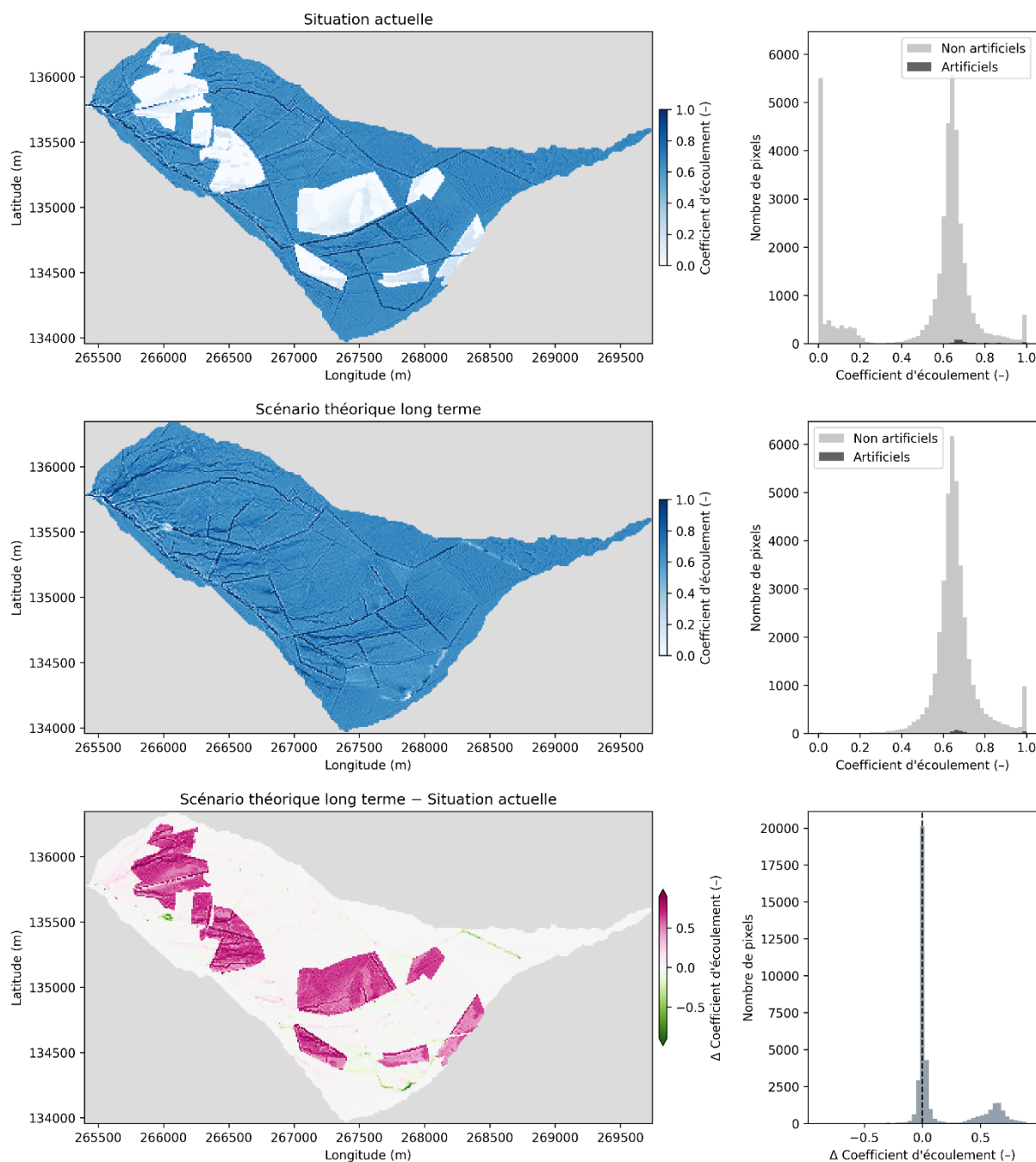


Figure 108 : Bilans en eau à l'échelle du TIH de la Statte par saison pour la situation actuelle et le scénario théorique long terme.



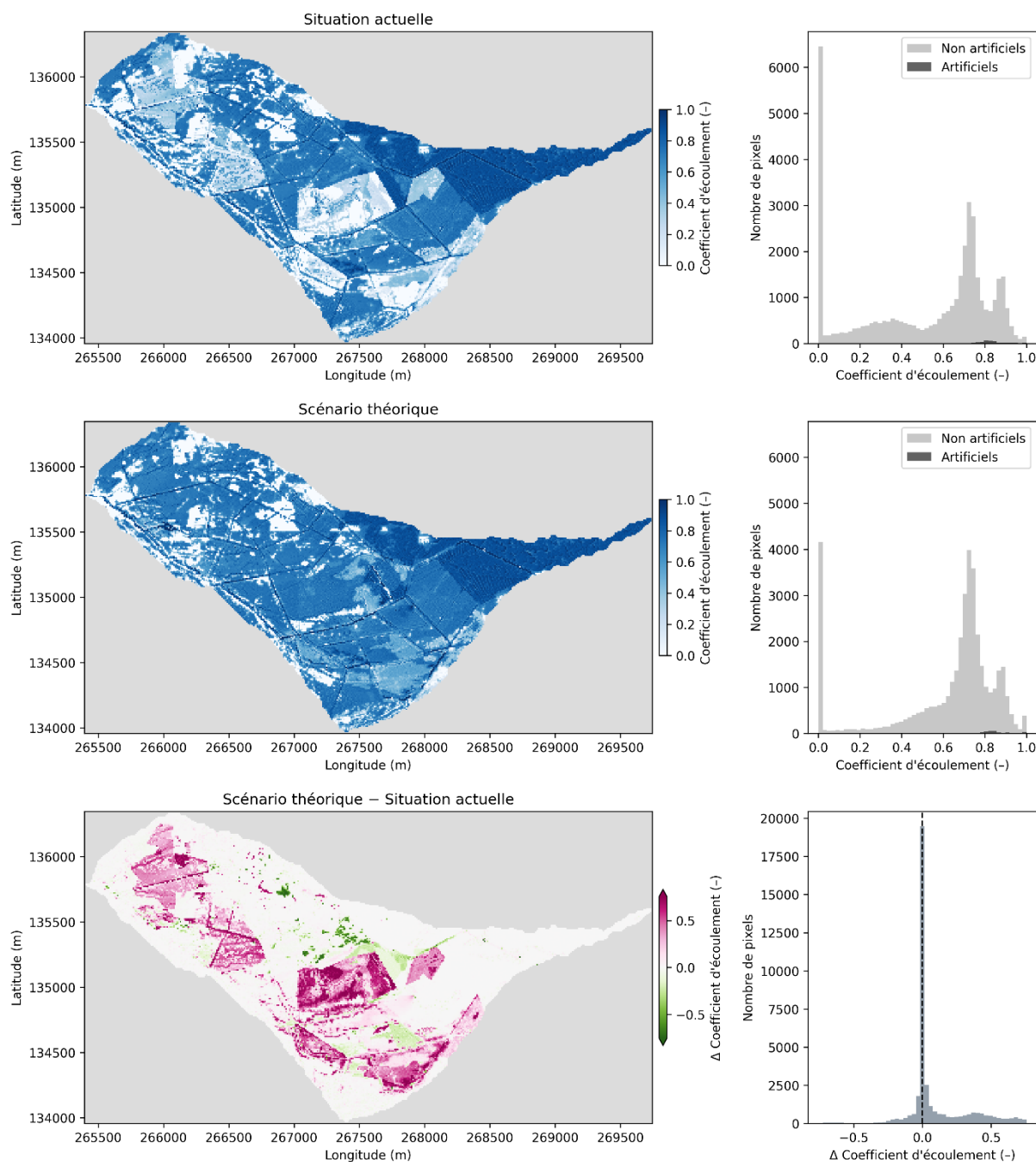


Figure 110 : Coefficient d'écoulement (*CE*) simulé lors de l'évènement (2) (cf. Tableau 22) pour la situation actuelle (haut), le scénario théorique (milieu) et leur différence (bas) sur le TIH de la Statte. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du *CE* par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de *CE* pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

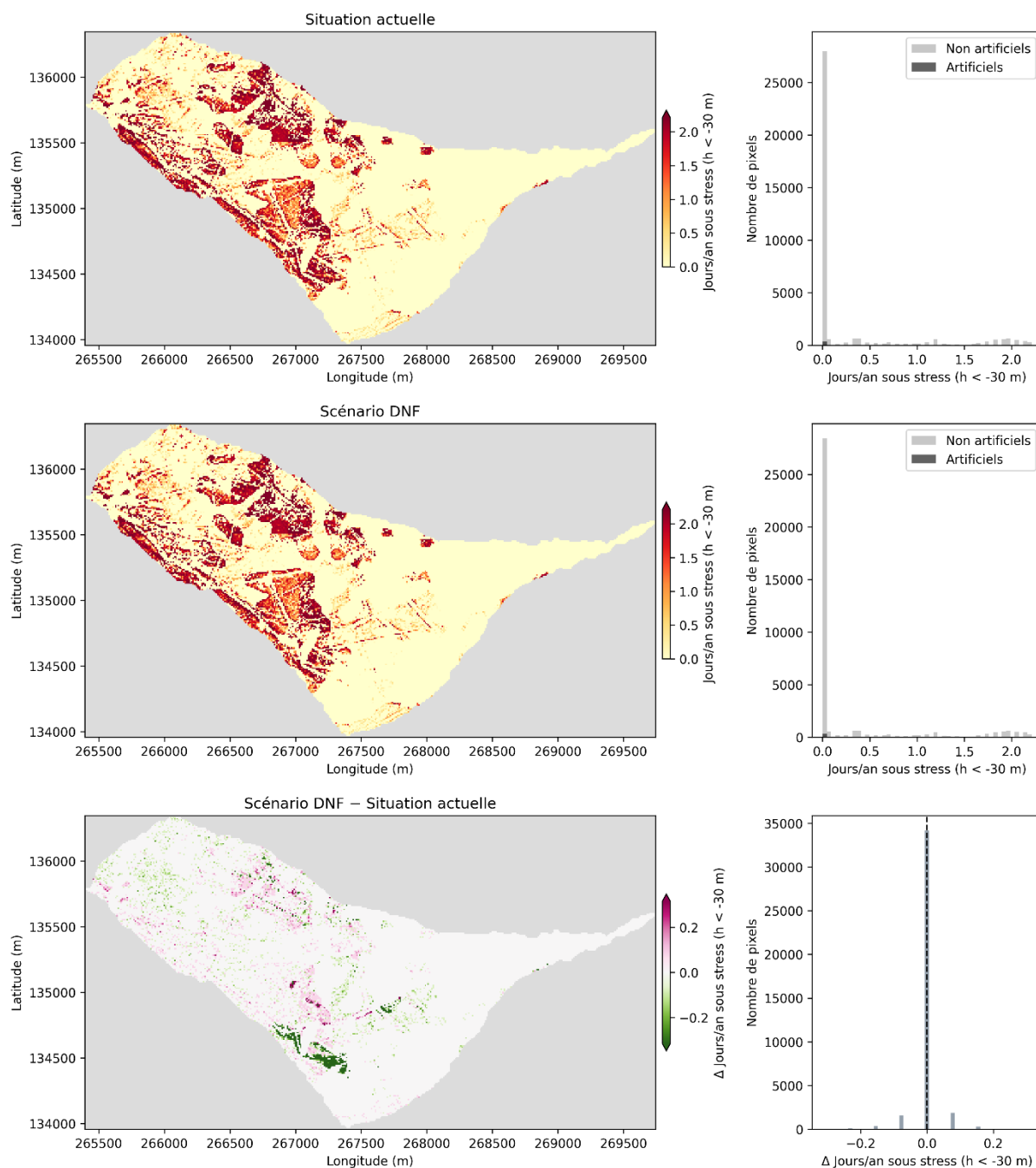


Figure 111 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle et le scénario DNF. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

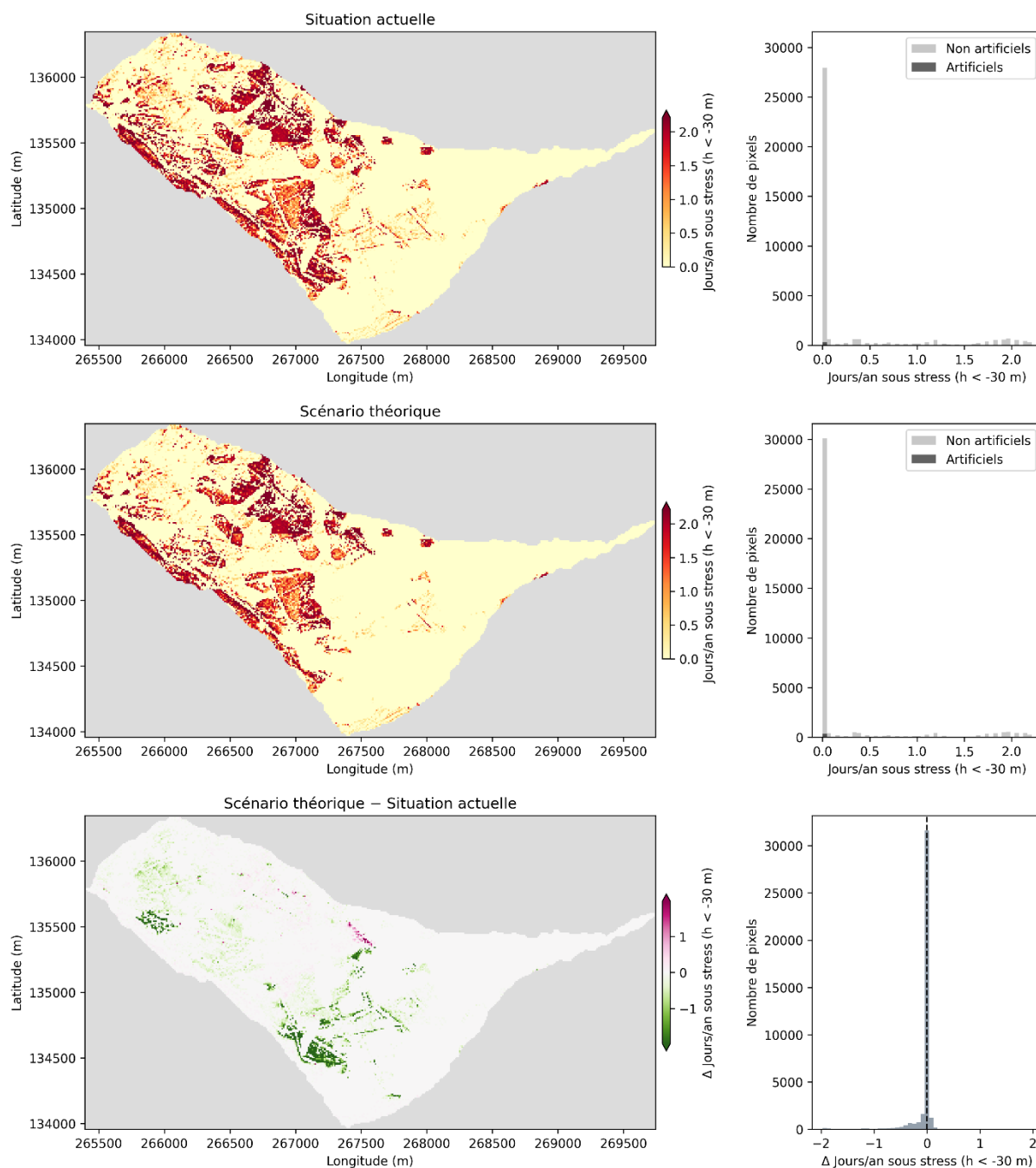


Figure 112 : Stress hydrique ($h < -30$ m) annuel moyen sur la profondeur racinaire pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle et le scénario théorique. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une réduction (vert) ou une augmentation (rose) du stress par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de stress pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

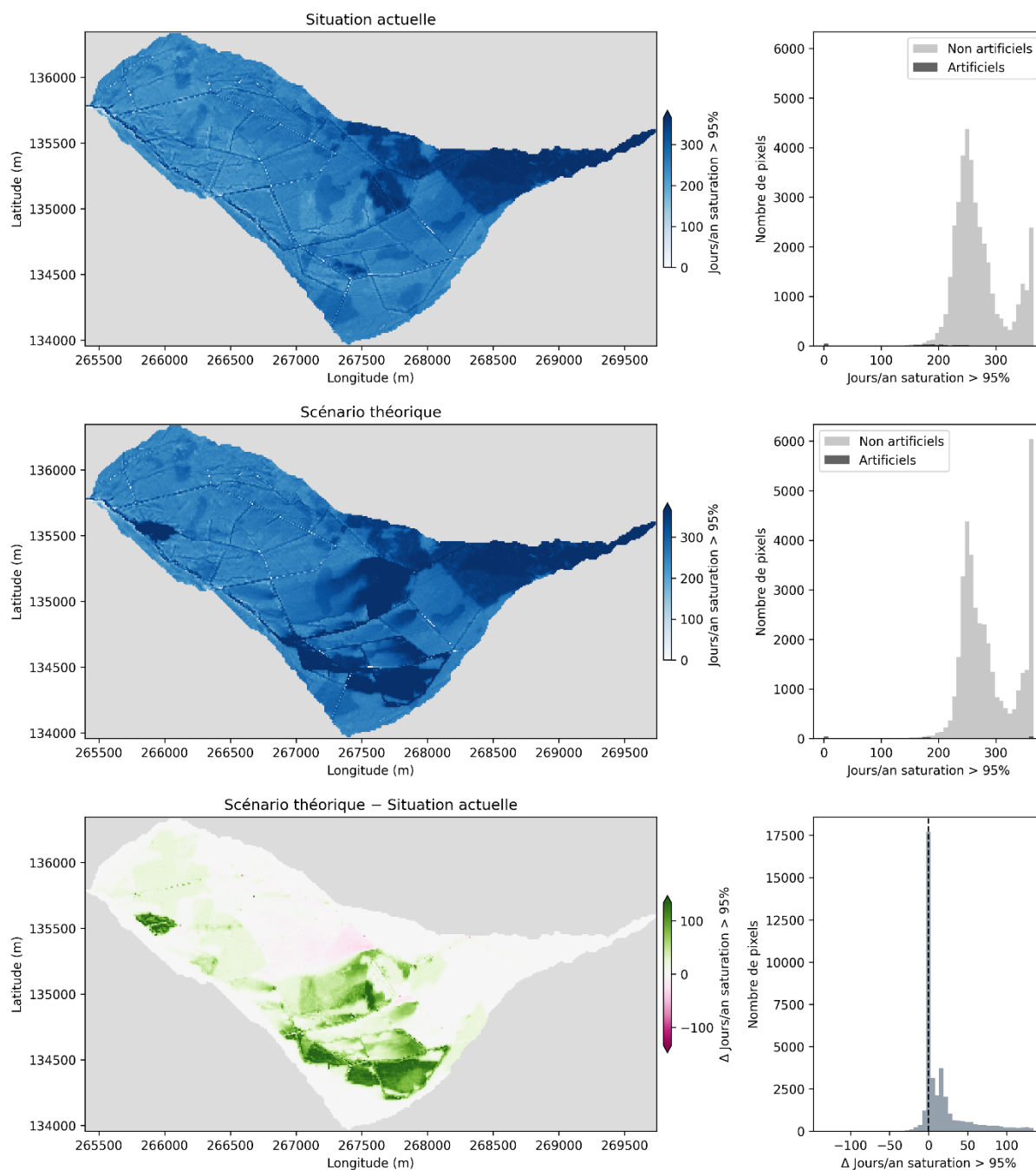


Figure 113 : Saturation annuelle moyenne des sols au-delà de 95 % sur 1m20 de profondeur pour le TIH de la Statte pour la situation actuelle et le scénario théorique. La carte de différence met en évidence les zones où le scénario théorique induit une augmentation (vert) ou une réduction (rose) de la saturation par rapport à la situation actuelle. Les histogrammes présentent la distribution des valeurs de la saturation pour les pixels non artificiels (gris clair) et artificiels (gris foncé).

C. Récapitulatif des rencontres

Tableau 26 : Rencontres avec les structures externes pour des sujets transversaux.

Organisme	Participants*	Dates	Objet
GISER	Caroline Ducobu Pierre Demarcin	15/10/2024	Communes à contacter pour prendre part au projet
AIDE	Jérôme Brixko	26/11/2024	Future collaboration de l'AIDE pour les zones urbanisées
DNF	Yves Pieper, Nicolas Denuit, Séverine Gaspar	29/01/2025	Identification des BV candidats sur base des actions prévues dans les cantonnements de Spa et Verviers (cf. PV en annexe)
Natagriwal	Louis de la Motte, Vyckie Moraux	04/02/2025	Retour d'expérience de méthode de concertations avec les agriculteurs
		11/12/2025	Quels subsides pour quels aménagements et contraintes liées ?
Parc naturel des Sources	Hélène Fauveaux, Paul Crismer	03/03/2025	Présentation de la démarche Modrec2 et partage de la charte paysage par le Parc naturel
DAFoR	Yvan Brahic Frédéric Robinet	11/03/2025	Partage d'expériences sur la consultation des parties prenantes concernées par un aménagement foncier
ULiège	Clotilde Bourdoux (étudiante en TFE de Pr. J. Teller)	13/03/2025	Etude d'un des lotissements dans le BV de Manihant dans le cadre d'un TFE en urbanisme
AWAF	Juliette Vermeulen	26/03/2025	Partage d'expériences sur aménagements réalisés & suivis
		12/12/2025	Protocole pour instrumenter le BV
Etats Généraux de l'eau à Bruxelles	Dominique Naplas	18/12/2025	Retour d'expérience sur la concertation et animation citoyenne dans un contexte urbain
Waterschap Limburg	Arno de Haas Kim Kloth	29/01/2026	Visite des aménagements de gestion des eaux pluviales dans la région de Maastricht.

*en plus des membres du CRV ou de l'ULiège

Tableau 27 : Rencontres avec les autorités communales.

Commune	Décideurs	Dates	Etat d'avancement
Herve	Bourgmestre (Marc Drouguet) et échevin de l'urbanisme (Bernard Allelyn)	1^{ère} réunion : 12/11/2024 Accord de principe : 12/12/2024 2^{ème} réunion : 13/02/2025 Accord officiel : 10/06/2025	Désignation d'un BV candidat (Manaihan – Ourcy) pour commencer les concertations des acteurs locaux et la modélisation hydrologique
Theux	Echevin travaux (Bruno Gavray) et directeur des travaux (Jean-Philippe Boutet)	1^{ère} réunion : 18/02/2025 Accord de principe : 28/02/2025 2^{ème} réunion : 27/03/2025 Accord officiel : 10/06/2025	Prise de contact et exploration de BV candidats
Soumagne	Echevin aménagement du territoire et environnement (Benoit Dethier)	1^{ère} réunion : 6/11/2024 2^{ème} réunion : 11/02/2025	Présentation de ModRec 1 & 2, en attente de l'accord de principe du collège communal
Jalhay	Bourgmestre (Victoria Vandeberg), Echevin de l'aménagement du territoire (Dimitri Houssa), Echevin des forêts et de l'environnement (Marc Ancion)	1^{ère} réunion : 13/11/2024 2^{ème} réunion : 25/03/2025 Accord officiel : 14/04/2025	Présentation de bassins versants candidats avec un avis préférentiel de Gembloux et du DNF vers la Statte, en attente de l'accord de principe du collège communal

Tableau 28 : Rencontres spécifiques pour Manaiant-Ourcy.

Types d'acteurs	Dates	Objet	Remarque
ULiège	21/03/2025	Visite de terrain BV	Images prises au drone
ULiège	13/05/2025	Visite bassin d'orage	
SPW-MI (Equipe Olivier Carlier d'Odeigne)	27/05/2025	Dimensions et entretiens du bassin d'orage	Bathymétrie partagée
GISER, CRV	09/07/2026	Préparation entretiens individuels agriculteurs	
Habitants	02/10/2025	Séance d'information publique	60 participant.e.s
SPGE & AIDE	14/10/2025	Eaux usées à Manaiant-Ourcy	Station d'épuration non prioritaire prévue
Agriculteurs exploitants, CRV	17/07/2025 18/07/2025(x2) 07/08/2025 18/08/2025 25/08/2025 28/08/2025	Entretiens individuels pour diagnostic territorial	
Agriculteurs exploitants, ULiège, CRV	15/04/2025	CETA	Bruyères : certains exploitants pas sur la zone et demande de venir avec une première proposition
Agriculteurs exploitants, ULiège, CRV, GISER, DAFoR, Natagriwal, GAL	21/10/2025	Réunion de concertation n°1	2 puis 3 exploitants
Agriculteurs exploitants, CRV	05/01/2026 – 30/05/2026	Entretiens individuels pour les exploitants absents	
Agriculteurs exploitants, ULiège, CRV, GISER, Natagriwal,	13/11/2025	Réunion de concertation n°2	5 exploitants Feu tricolore pour accord – freins - veto
Agriculteurs exploitants, CRV	20/11/2026 25/11/2026 27/11/2026	Entretiens individuels pour les exploitants absents	
Natagriwal, ULiège et CRV	01/12/2025	Discussion finances	

Types d'acteurs	Dates	Objet	Remarque
Agriculteurs exploitants, ULiège, CRV, GISER, DAFoR, Natagriwal, GAL, Echevin des travaux	16/12/2025	Réunion de concertation n°3	Exploitants Accord pour ceux présents
Agriculteurs exploitants, propriétaires, CRV	13/01/2026 19/01/2026 09/04/2026 24/04/2026 18/05/2026 (x3) 28/05/2026 (x2) 05/06/2026 (accompagné de Natagriwal)	Entretiens individuels pour les exploitants et les propriétaires	
ULiège, CRV, Ville de Herve	03/02/2026 24/03/2026	Rdv avec la commune pour voir quels aménagements en voirie	
ULiège, CRV, habitants du bassin versant	04/04/2026 14/04/2026	Balade de l'inondation et soirée d'échange autour de la question de la gestion de l'eau de pluie.	
ULiège, CRV, GISER, DAFoR, Natagriwal	30/01/2026	Types de conventions existantes	
ULiège, CRV, SPW DCENN	27/03/2026	Réunion financement et conventionnement	
ULiège, CRV	05/03/2026	Visite de terrain	Préparation balade hydrologique avec les habitants

Tableau 29 : Rencontres spécifiques pour Pierreuchamps-Chawieumont.

Types d'acteurs	Dates	Objet	Remarque
Commune de Theux	26/08/2025	Accord pour le TIH & Vi-site de terrain	
ULiège, CRV	05/03/2026	Visite de terrain	

Tableau 30 : Rencontres spécifiques pour la Statte.

Types d'acteurs	Dates	Objet	Remarque
ULiège	13/05/2025	Visites de terrain	
DNF	5/11/2025	Réunion avec Yves Pie-per	

D. ModRec à Herve - Diagnostique initial

1. Objectif du document

Ce document a pour but de dresser un état des lieux succinct en amont de la concertation. Il vise à :

- Identifier les participants à la concertation,
- Mettre en évidence, de manière anonyme, les problématiques soulevées.

Il s'appuie sur les entretiens semi-directifs menés auprès des exploitants du bassin de Manihant-Ourcy durant les mois de juillet et août 2025.

2. Objectifs des entretiens

Ces entretiens avaient pour finalité de :

- Rencontrer les exploitants du bassin versant et instaurer une relation de confiance,
- Présenter le projet, ses objectifs et ses implications,
- Relever les problématiques identifiées par les agriculteurs,
- Localiser sur la carte les parcelles travaillées par les exploitants ainsi que d'autres informations utiles non reprises sur les documents cartographiques (localisation des drain, mares, ...).

3. Propriétaires et exploitants :

3.1. Les exploitants agricoles

Ils sont au nombre de 11 à déclarer une activité agricole via la déclaration de superficie à la PAC.

EXPLOITANT	SURFACE
A	3.3 %
B	1.46 %
C	1.48 %
D	6.84 %
E	14.9 %
F	6.77 %
G	3.14 %

Les entretiens avec les exploitants se sont tenus au cours des mois de juillet et d'août 2025, et ont duré entre 30 minutes et 1h30. Avec certains d'entre eux, nous sommes également allés sur le terrain afin qu'ils puissent nous présenter directement quelques-unes de leurs parcelles.

Seul un exploitant, n'a pas souhaité être rencontré dans le cadre de ce projet. Il ne souhaite pas y participer mais a néanmoins demandé d'être tenu au courant des différentes étapes.

9,91 % des parcelles SIGEC restent non attribuées. Elles correspondent probablement à celles de l'exploitant non rencontré ainsi qu'à certaines omissions d'autres exploitants.

EXPLOITANT	SURFACE
H	0.71 %
I	0.42 %
J	51.07 %
K	?
Non identifié	9.91 %

3.2. Les propriétaires

Ils sont au nombre de 91, avec de nombreuses parcelles en copropriétés.

Une partie de ces propriétaires sont les agriculteurs et leurs familles proches, mais pas seulement. Il sera essentiel de faire des allers-retours avec eux afin de s'assurer qu'ils soient bien conscients de la mise en œuvre du projet dans un premier temps, notamment via l'invitation à la séance d'information, et obtenir un accord formel, si le projet leur convient, pour les aménagements prévus dans un second temps.

4. Résultats des entretiens

4.1. En général

De manière générale, le projet a été bien accueilli. L'ensemble des exploitants rencontrés ont donné leur accord pour participer au processus de co-construction du plan d'aménagement.

Voici quelques extraits qui viennent soutenir ceci :

« Vous pouvez m'inscrire, moi je suis tout à fait pour. »

« Moi je suis partant, mais qu'est-ce que je pourrais faire ? Il y a des solutions ? (...) Comme je vous ai déjà dit, je suis partant, mais je suis petit. (...) Avant il y avait des haies partout, j'ai connu un truc avec des cerisiers, (...) mon grand-père avait des pommiers, des poiriers, et puis on a payé des gens pour tout arracher, et maintenant on revient en arrière. Je suis contre ça (contre l'arrachage). Les haies qu'il y a, on essaye de les entretenir le mieux qu'on peut, qu'est-ce que je peux planter pour que ce soit dans la culture de Herve ? »

« Ça des haies, j'aime bien d'en remettre, si ce n'est que pour les vaches, pour l'ombre etc. (...) Recreuser le fossé là, ce serait une mare tampon qui ne me dérangerait pas, si ce n'est que ça, ça ferait du bien (...) moi ça ne me dérange pas de faire des efforts, mais qu'on ne vienne pas me dire qu'il faut planter une haie en milieu de prairie et que je ne

sache plus faucher, mais à part ça moi ça ne me dérange absolument pas (...) Si chacun y met un peu du sien, il y a moyen d'améliorer la chose. »

« Motivé oui, mais voilà il faut un minimum de contraintes pour un maximum de (bénéfices) (...) après il y a des zones humides, il y a peut-être moyen de faire des mares et ce ne sera jamais une prairie qui pourra produire énormément donc heu, voilà un peu. (...) On se rend compte que si personne ne fait rien bien... »

« C'est plutôt eux qui devront proposer ce qui est efficace vous voyez, et nous on va arranger le bazar, (...) Je vais dire heu, il faudra voir les contraintes par rapport à tout ça mais autrement je ne suis pas fermé du tout et puis voilà. »

« Moi ça ne me dérange pas ça dépend un peu de ce qu'on peut mettre comme aménagement mais je ne suis pas chez moi là et nous sommes sur le dessus, je ne sais pas ce qu'on pourrait faire. »

4.2 Inondations, sécheresse : des enjeux pris en compte dans les pratiques agricoles ?

Les agriculteurs évoquent peu les inondations et les sécheresses, qu'ils considèrent comme des problématiques éloignées puisqu'ils ne sont pas directement touchés. Ces questions se traduisent davantage par des choix de pratiques agricoles, qu'ils décident d'adopter ou non.

Voici ci-dessous, quelques extraits qui viennent traduire ces préoccupations :

« Oui, c'est 2022 qu'on a eu une bonne sécheresse, c'est ça qu'on se dit qu'on aime bien avoir des arbres pour les bêtes, sans ça elles ont des coups de soleil, pour moi c'est important. »

« Sur une deuxième parcelle qui n'est pas dedans, c'est une partie qui est fort humide et qui est en fauche tardive, il y a une mare au milieu et donc on s'arrête quelques mètres au-dessus pour tout ce qui est fertilisation et tout ça (...) cette partie-là je vais la faucher pour la première fois aujourd'hui pour faire la première coupe car on ne peut pas y aller avant le 15 juillet, pour moi c'est déjà quelque chose qui a son importance, il y a la mare et tout ce qu'il y a autour et le fait d'avoir des grandes herbes sur une parcelle ça permet de retenir un petit peu l'eau et on le voit bien c'est un morceau qui est quand même régulièrement humide (...) C'est le fait de la mare, ça retient l'eau mais ça diffuse aussi, on a jamais des trop-pleins 100 % efficaces. »

« Moi ce qui m'a fortement choqué, c'est que j'avais un beau bassin d'orage et juste après les inondations il a été construit, ça je ne comprends pas, c'était vraiment une zone humide qui faisait une belle zone tampon, maintenant les eaux de ma ferme vont directement sur Verviers et sur Dison, quand je vois ça, c'est bien les haies et des bazar mais quand je vois ça je me dis qu'il y a quand même un problème quoi. »

4.3 : Les freins au projet identifiés lors des entretiens

Les entretiens réalisés mettent en évidence plusieurs freins exprimés par les agriculteurs vis-à-vis du projet. Les contraintes les plus souvent citées concernent avant tout la taille réduite des parcelles, qui rendent difficile l'implantation de haies sans perte significative de surface agricole utile. Le manque de temps – lié à la charge de travail quotidienne, à la vie familiale ou à la participation à des réunions – constitue également un obstacle. Certains exploitants se sentent peu concernés car ils possèdent peu de parcelles dans la zone délimitée.

À cela s'ajoutent des inquiétudes plus techniques, comme la présence de drains qui pourraient être endommagés, ou le fait que les décisions appartiennent aux propriétaires plutôt qu'aux locataires. Enfin, plusieurs agriculteurs soulignent que les problèmes d'inondations ne dépendent pas uniquement de leurs pratiques, mais sont aussi liés à des facteurs extérieurs tels que l'urbanisation, les bassins d'orage ou les écoulements provenant des habitations et des routes et autoroutes.

Voici quelques extraits d'entretiens qui viennent appuyer ceci :

Peu de parcelles dans la zone : un frein à l'adhésion

« Dans un premier temps je ne me sens pas assez concerné par ce territoire, (...) Je suis d'accord pour dire que mes parcelles participent, (...) si jamais je suis concerné et qu'on veuille me mettre dedans, qu'on vienne me trouver à ce moment-là »

« Moi je suis impliqué de manière assez minimale, c'est très minime, à voir ce que vous proposez comme aménagement mais les réticences sont très minimes, je me doute que vous allez pas venir avec des gros aménagements mais bon j' imagine qu'il faut montrer l'exemple aussi donc heu, il faut que tout le monde y mette un peu du sien, pas se dire bien « non je m'en fous moi » »

La taille des parcelles :

« Bhe j'ai beaucoup de petites parcelles, je ne vais pas replanter des haies en milieu de parcelle, en bordure de parcelle oui je comprends. Ici je n'ai que des prairies parce que ça penche, on ne met pas de maïs sur les terrains qui penchent. »

« Faire le fossé avec les bandes, moi j'ai que des petites parcelles, c'est moins applicable, c'est bien que dans les grandes zones, (...) dans mes petites parcelles je perds trop de surface (si je mets en place ces aménagements-là). »

« Est-ce que avec les deux hectares que j'ai est ce que ça vaut la peine que j'aille aux réunions moi ? Je ne me sens pas très concerné mais par contre je reste ouvert si il y a quelque chose qui se passerait sur cette parcelle-là. Contactez moi qu'on en parle, qu'on

viennne me trouver à ce moment-là, mais dans un premier temps je crois que ça sert à rien que je me mêle »

Compréhension :

« Je ne vois pas comment est-ce qu'on pourrait contrer quand il tombe 150 litres du m². Par exemple, ici derrière la ferme, j'ai deux prairies, celle du dessous. Pendant les inondations, elle a été tout le temps inondée. Et on le sait bien, quand il pleut beaucoup, elle est inondée, on le sait bien. »

Les haies :

« On n'est pas fermé non plus à en mettre à gauche à droite, ça dépend où c'est. Des fois aussi c'est par rapport au talus, déjà qu'il n'est pas vraiment praticable avec le tracteur, si on rajoute une contrainte ça peut devenir dangereux, (...) les machines ne rétrécissent pas »

« Concernant les haies en bordure de routes je trouve que ce n'est pas forcément une mauvaise idée, pour la biodiversité et tout ça. Je pense que ce serait important d'avoir un peu plus de genre de bassins d'orage naturel comme moi j'ai, il suffit d'avoir un petit monticule de terre a un endroit avec un tuyau, pour que l'eau s'écoule moins vite lors d'un orage, pour ne pas contraindre trop les agriculteurs »

Disponibilité pour les réunions,

« J'ai des petits enfants en bas âges je n'ai pas beaucoup de temps, je ne suis pas contre votre projet mais mon temps est... Vous pouvez m'envoyer toute la documentation mais voilà je n'ai pas beaucoup de temps, je ne pourrai pas participer à toutes les réunions »

La décision finale dans les mains des propriétaires :

« Vous devriez faire ça avec le propriétaire, moi je suis locataire partout. (...) Pourquoi pas mais maintenant, voilà, contactez les propriétaires. »

Imperméabilisation et gestion des eaux de pluies et eaux usées :

« Moi ce qui m'a fameusement choqué, c'est que j'avais un beau bassin d'orage et juste après les inondations il a été construit, ça je ne comprends pas, c'était vraiment une zone humide qui faisait une belle zone tampon, maintenant les eaux de ma ferme vont directement sur Verviers et sur Dison, quand je vois ça, c'est bien les haies mais il y a quand même un problème quoi. »

« Moi je fais l'inverse là dans le fond, je veux ramener l'eau la vers un tuyau, mais bon a côté de ça je suis, il n'y a que des haies et des arbres, moi je ne peux pas faire beaucoup plus, a part mettre des haies au milieu des prairies je trouve que ici on est dans une zone ou vraiment ma partie je parle hein, et malgré ça il vient toujours des coups d'eau quand

il pleut car il y a des maisons, des terrasses, depuis que je suis né on dit que c'est le réchauffement climatique, mais je crois plus au bétonnage (comme responsable). »

« (...) L'eau des maisons, des 6/7 maisons, qui viennent dans ma prairie. Avant à l'époque de mon père, le précédent bourgmestre laissait tout faire, on s'en foutait, maintenant toutes les merdes sont dans les prairies. Il y a 40 ans que c'est comme ça. Je veux bien participer, je veux bien mais je veux être écouté aussi, dans le sens ou moi il faut trouver une solution pour ces eaux-là. »

« Il faut savoir que l'eau elle vient de l'autoroute là, il y a un bassin d'orage, et les maisons sont tout le temps inondées, pour moi l'autoroute c'est une question à part, à bras le corps, c'est une quantité énorme. »

5. Conclusion :

Cet état des lieux montre que les agriculteurs sont globalement disposés à s'engager dans la concertation, même si plusieurs contraintes et inquiétudes ressortent. Leur adhésion dépend surtout de la capacité à proposer des aménagements adaptés à la taille de leurs parcelles, à leur charge de travail et à leur situation foncière. Les principaux freins identifiés – petites surfaces, manque de temps, statut de locataire ou crainte pour les drains – devront être intégrés dans la réflexion pour aboutir à des solutions réalistes et acceptées. Par ailleurs, nombre d'agriculteurs rappellent que les phénomènes d'inondations et de sécheresse dépassent largement le cadre agricole et relèvent aussi de l'urbanisation et des infrastructures.

Comme l'exprime également l'un d'eux en parlant des aménagements, *« il y a le fait de convaincre les gens, de le faire et puis de le garder ! »* : une première étape est franchie, mais il reste encore de nombreuses questions à explorer afin de construire un projet solide et durable.

MODREC 2 – HYDROLOGIE

Laboratoire Vesdre : vers des territoires d'innovation hydrologique

À la suite des inondations de juillet 2021, le projet ModRec-Vesdre a mis en évidence le potentiel des solutions fondées sur la nature pour améliorer la résilience hydrologique du bassin versant de la Vesdre. Ce rapport s'inscrit dans la deuxième phase de cette démarche, ModRec 2–Hydrologie, avec pour ambition de passer de l'identification des enjeux à la mise en œuvre de solutions concrètes.

À partir d'une modélisation hydrologique à haute résolution, l'étude identifie les zones prioritaires pour l'implantation de solutions fondées sur la nature à l'échelle de la Vesdre. Trois Territoires d'Innovation Hydrologique (TIH), représentatifs des contextes agricole et forestier, ont ensuite fait l'objet d'une co-construction de scénarios d'aménagement avec les acteurs locaux. Leur efficacité est quantifiée afin de mesurer leur capacité à réduire les débits de pointe et à renforcer la résilience du territoire face aux événements hydrologiques extrêmes (crues et sécheresses).

Au-delà des résultats hydrologiques, ce rapport propose une démarche reproductible fondée sur la concertation, la planification territoriale et les solutions fondées sur la nature, afin d'accompagner les futurs projets de gestion intégrée des bassins versants en Wallonie.

Pour citer ce document :

Degré, A., Di Maggio, L., Guillaume, B., Heymans, M., Michez, A., Thami, A., & Wezel, C. (2026). *Laboratoire Vesdre : vers des territoires d'innovation hydrologique*. Rapport final du projet ModRec 2-Hydrologie. Contrat de Rivière Vesdre, Université de Liège (Gembloux Agro-Bio Tech).