

Etude des flux d'évapotranspiration et du confort extérieur du Village Olympique et Paralympique à l'horizon 2050



Date : 28.10.2020

Table des matières

1	Introduction.....	8
2	Présentation des modèles.....	10
2.1	Modèle de l'évapotranspiration potentielle	10
2.1.1	Définitions	10
2.1.2	Estimation des flux d'évapotranspiration	11
2.1.3	L'évapotranspiration des surfaces végétalisées du VOP	16
2.2	Définition de l'interface Atmosphère, Végétation et Sol.....	21
2.2.1	Fonctionnement hydrologique à l'interface AVS	21
2.2.2	Modélisation hydrodynamique de l'interface Atmosphère-Végétation-Sol.....	24
2.2.3	Choix du modèle.....	29
2.3	Présentation du modèle MARIE de Transfert Sol Végétation Atmosphère	30
2.3.1	Présentation de URBS-PROD	30
2.3.2	Adaptation d'URBS-PROD aux surfaces végétalisées du VOP	33
2.3.3	Paramétrisation et fonctionnement de MARIE	35
2.3.4	Comparaison de MARIE avec Hydrus	36
2.3.5	Bilan	53
2.3.6	Impact sur le choix de la loi de rétention pour l'étude du VOP	55
2.4	Modèle de micro-climatologie urbaine : Solene-Microclimat	56
2.4.1	Simulation radiative.....	57
2.4.2	Modèle des surfaces urbaines : sol, toit et façades	58
2.4.3	Simulation aéraulique	58
2.4.4	Représentation de la végétation	58
2.4.5	Indicateur de confort en ville	60
3	Présentation de la zone d'étude et de la méthodologie de modélisation.....	60
3.1	Le Village Olympique et Paralympique	60
3.2	Le Mail Finot.....	62
3.2.1	Espaces végétalisés.....	63
3.2.2	Schéma de gestion des eaux pluviales (EP).....	66
3.2.3	Caractéristiques des sols	67
3.3	Méthodologie de chainage des approches microclimatiques et hydrologiques	69
3.4	Paramétrisation des modèles.....	70
3.4.1	Données climatologiques	71
3.4.2	Paramétrisation du calcul de référence	74
3.4.3	Paramétrisation des calculs de sensibilité.....	83
4	Résultats et discussions.....	90
4.1	Simulation hydrologique de l'évapotranspiration réelle pour le cas de référence	90
4.1.1	Evapotranspiration de la strate haute.....	91

4.1.2	Evapotranspiration de la strate basse	94
4.1.3	Comparaison de l'évapotranspiration des deux strates végétales	96
4.1.4	Profils des teneurs en eau de la zone racinaire.....	98
4.1.5	Bilan	101
4.2	Etude de sensibilité du modèle hydrologique.....	103
4.2.1	À l'échelle du Mail Finot	103
4.2.2	À l'échelle des zones de calcul	108
4.2.3	Bilan	116
4.3	Discussions sur les simulations hydrologiques.....	117
4.4	Prise en compte de flux optimisés d'ET dans l'outil micro climatique : étude de confort des zones du Mail Finot	121
4.4.1	4.4.1 Principe de couplage entre le modèle hydrologique et microclimatique	121
4.4.2	4.4.2 Résultats de l'étude de confort	121
5	Conclusions.....	126

Liste des figures

Figure 1 Schéma du fonctionnement hydrologique du sol, les profils de teneur en eau sont donnés à la suite d'un épisode pluvieux	23
Figure 2 Représentation du modèle réservoir appliqué à la simulation des performances hydrologiques (sur le long termes) des toitures végétalisées. Ce modèle contient des compartiments de stockage de surface et de sub-surface permettant de représenter la capacité de rétention en eau des toitures végétalisées (Locatelli et al., 2014)	25
Figure 3 a) Schéma conceptuel du modèle force-restore ; b) Principales équations - Camalleri et al., 2010.....	26
Figure 4 Représentation schématique de la loi de Brooks et Corey et de la loi de Van Genuchten (Bastet, 1998).....	28
Figure 5 Schéma d'un profil vertical représentant le fonctionnement de URBS-PROD (Morena, 2004)	30
Figure 6 Schéma conceptuel du modèle MARIE	35
Figure 7 Flux d'évapotranspiration réelle simulée par MARIE (courbe rouge) et Hydrus (courbe bleue) pour les deux lois de rétention (a. loi Van Genuchten, b. loi Brooks et Corey)	38
Figure 8 Flux d'eau à la base de la ZNS (positif : recharge de la nappe ; négatif : remontées capillaires depuis la nappe) simulés par MARIE (courbe rouge) et Hydrus (courbe bleue) pour les deux lois de rétention (a. Loi Van Genuchten, b. Loi Brooks et Corey).....	39
Figure 9 Flux d'évapotranspiration simulés par les codes Hydrus et MARIE pour le cas réel 2019 (Limon)	42
Figure 10 Flux d'eau à la base de la ZNS simulés par le code MARIE et Hydrus pour l'année 2019 (Limon)	43
Figure 11 Teneurs en eau moyennes dans la zone racinaire pour les codes MARIE et Hydrus (année 2019, Limon).....	44
Figure 12 Flux d'ETR simulés par les codes MARIE et Hydrus sur une semaine de Juillet 2019 (Limon)	45
Figure 13 Flux d'évapotranspiration simulés par les codes Hydrus et MARIE pour le cas réel 2019 (Sable limoneux).....	47
Figure 14 Flux d'eau à la base de la ZNS simulés par le code MARIE et Hydrus pour l'année 2019 (Sable limoneux).....	48
Figure 15 Teneurs en eau moyennes dans la zone racinaire pour les codes MARIE et Hydrus (année 2019, Sable limoneux)	49
Figure 16 Cumuls mensuels d'évapotranspiration pour l'année 2019 simulée avec MARIE	50
Figure 17 Flux d'ETR simulés par les codes MARIE et Hydrus sur une semaine de Juillet 2019 (Sable limoneux).....	51
Figure 18 Teneurs en eau moyennes (pas de temps journalier) dans la zone racinaire pour les codes MARIE et Hydrus sur une semaine sèche de Juillet 2019 (Sable limoneux)	52
Figure 19 Profils de teneur en eau du 24/07/2019 simulés par MARIE et Hydrus avec les lois VG et BC (MARIE : teneurs en eau moyennes dans les réservoirs).....	54
Figure 20: 'le bonhomme confort' pour le calcul de la TRM à partir d'un point de la scène urbaine (fonction des températures de surface vues par le bonhomme (Ts) et du ciel (Tciel))	60
Figure 21 Localisation de la cité du Cinéma à Saint Ouen.....	61
Figure 22 Plan du VOP	62
Figure 23 Plan de la zone Mail Finot	63
Figure 24 Présentation des surfaces végétales du Mail Finot.....	64
Figure 25 Présentation des zones de travail du Mail Finot	65
Figure 26 Schéma de gestion des eaux pluviales du Mail Finot.....	66

Figure 27 Localisation des points de mesure et valeurs des perméabilités du sol (valeurs en m/s)	67
Figure 28 Cartes piézométriques de la zone d'implantation du VOP (Février 2019, document A5_Carte piézométrique_0219)	68
Figure 29 Cartes piézométriques de la zone d'implantation du VOP (Août 2019, document A5_Carte piézométrique_0819)	69
Figure 30 Comparaison de la température de l'air (°C) pour la période 2018-2019 et 2050 (données horaires)	73
Figure 31 Comparaison de l'humidité relative de l'air pour la période 2018-2019 et 2050 (données horaires)	73
Figure 32 Délimitation de la zone 3 en "ensemble strate haute + strate basse » pour les calculs hydrologiques.....	77
Figure 33 Surfaces d'alimentation des zones par ruissellement des eaux pluviales.....	78
Figure 34 Points de mesures de la perméabilité sur le Mail Finot.....	81
Figure 35 Profils racinaires moyens pour la strate haute	85
Figure 36 Profil de conductivité hydraulique hétérogène	86
Figure 37 Présentation des ensembles de végétation "strate haute + strate basse" (la strate haute n'est pas représentée par soucis de lisibilité)	91
Figure 38 Evolution temporelle des rapports f (ETR/ETP) pour les 5 zones du Mail Finot – Strate haute (période sèche surlignée en orange).....	93
Figure 39 Evolution temporelle des rapports f (ETR/ETP) pour les 5 zones du Mail Finot – Strate basse (période sèche surlignée en orange).....	95
Figure 40 Variations de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire (2 m) et des rapports ETR/ETP de la strate haute pour les 5 zones du Mail Finot – Période 2050.....	99
Figure 41 Variations de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire (40 cm) et des rapports ETR/ETP de la strate basse pour les 5 zones du Mail Finot – Période 2050.	101
Figure 42 Evolution temporelle des rapports f (ETR/ETP) pour les 5 zones du Mail Finot – Profil moyen (période sèche surlignée en orange).....	102
Figure 43 Variation des cumuls de l'ETP des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETP du calcul de référence) à l'échelle du Mail Finot.....	104
Figure 44 Variation des cumuls de l'ETR des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETR du calcul de référence) à l'échelle du Mail Finot	107
Figure 45 Variation des cumuls de l'ETP des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETP du calcul de référence) à l'échelle des zones (période 2050)	109
Figure 46 Variation des cumuls de l'ETR des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETR du calcul de référence) à l'échelle des zones (période 2050)	110
Figure 47 Variation des cumuls de l'ETR des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETR du calcul de référence) à l'échelle des zones (période sèche 2050)	112
Figure 48 Résultats de l'étude de sensibilité (teneur en eau moyenne des 40 premiers cm de la zone racinaire), temps passés en dessous de la teneur en eau de « réduction de l'ETR » (valeur du calcul de référence en rouge).....	113
Figure 49 Résultats de l'étude de sensibilité (teneur en eau moyenne de la zone racinaire), temps passés en dessous de la teneur en eau de « réduction de l'ETR » (valeur du calcul de référence en rouge)	115
Figure 50 Variation des rapports ETR/ETP des calculs de sensibilité (% de variation par rapport au rapport ETR/ETP du calcul de référence)	116
Figure 51: Température extérieure [°C]	122
Figure 52 : Températures [°C] des strates basses pour f = 0	125
Figure 53 : Températures [°C] des strates basses pour f = 1	125
Figure 54 : Flux solaire total reçu pour la zone 1	125

Liste des Tableaux

Table 1 Gammes de variation pour les facteurs du coefficient urbain (Costello and Jones, 2014)	15
Tableau 2 Paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle	17
Tableau 3 Paramètres hydrodynamiques de la loi de Brooks and Corey ($\alpha = hb$ et $n = b$, voir Équation 2.31 et Équation 2.32)	37
Tableau 4 Paramètres hydrodynamiques de la loi de Van Genuchten	38
Tableau 5 Bilans d'eau pour la comparaison de MARIE et Hydrus sur le cas théorique (Limon).....	40
Tableau 6 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour l'année 2019 avec un sol de type Limon	44
Tableau 7 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour la période de sécheresse de Juillet à Septembre de l'année 2019 avec un sol de type Limon	46
Tableau 8 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour l'année 2019 avec un sol de type Sable limoneux	49
Tableau 9 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour la période Juillet-Septembre de l'année 2019 avec un sol de type Sable limoneux.....	51
Tableau 10 Bilan de la comparaison entre Hydrus et la partie du code MARIE responsable de la modélisation des flux d'eau dans la ZNS. Les valeurs présentées sont des pourcentages de la différence entre les valeurs des flux simulés par les deux codes et la valeur du résultat simulé avec Hydrus (considéré comme le résultat de référence). Valeurs positives : surestimation de MARIE par rapport à Hydrus, valeurs négatives : sous-estimation de MARIE par rapport à Hydrus	53
Tableau 11 Bilan des conditions climatologiques de 2050 (valeurs calculées à partir des données horaires)	71
Tableau 12 Bilan des conditions climatologiques de 2018-2019 (a. 2018, b. 2019 ; valeurs calculées ç partir des données horaires)	72
Tableau 13 Valeurs moyennes (année 2050) du rayonnement global (Rg) affecté de l'ombrage des bâtiments et des arbres	75
Tableau 14 Paramètres des ensembles "strate haute + strate basse" de la zone 3	76
Tableau 15 Valeurs moyennes des paramètres de la végétation pour les 5 zones du Mail Finot (les valeurs de chaque ensemble "strate haute + strate basse" sont pondérées de la surface de chaque strate)	76
Tableau 16 Récapitulatifs des surfaces d'alimentation de chaque zone	78
Tableau 17 Epaisseurs moyennes de la zone non saturée des 5 zones du Mail Finot.....	79
Tableau 18 Rappel des paramètres hydrodynamiques de la loi de Brooks et Corey (valeurs indicatives pour différentes classes de sol, valeurs issues de Hydrus 1D)	80
Tableau 19 Répartition de la densité des racines dans les réservoirs de la ZNS.....	82
Tableau 20 Profondeurs moyennes des racines pour la strate haute et la strate basse de chaque zone	82
Tableau 21 Rappel des paramètres hydrodynamiques de la loi Van Genuchten	87
Tableau 22 Surfaces "optimisées" de ruissellement des eaux pluviales du calcul de sensibilité	88
Tableau 23 Synthèse des calculs de sensibilité	89
Tableau 24 Cumuls annuels (2050) de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) des zones du Mail Finot – Strate haute	92
Tableau 25 Cumuls de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) lors de la période sèche (26/08/2050 – 09/06/2050) – Strate haute	93
Tableau 26 Cumuls annuels (2050) de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) des zones du Mail Finot – Strate basse.....	94
Tableau 27 Cumuls de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) lors de la période sèche (26/08/2050 – 09/06/2050) – Strate basse	96
Tableau 28 Comparaison des cumuls d'évapotranspiration de la strate haute et de la strate basse – période 2050	96

Tableau 29 Comparaison des cumuls d'évapotranspiration de la strate haute et de la strate basse – période sèche (26/08/2050 – 09/06/2050).....	97
Tableau 30 : Cartographies de la température radiante par zone et pour les deux scénarios.....	123
Tableau 31 : Moyenne des températures radiantés pas zone et par scénario.....	126

1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le grand projet d'aménagement du futur village Olympique et Paralympique (VOP) de 2024. Ce village sera implanté à la limite des communes de Saint-Denis et Saint-Ouen (93) et sera par la suite réhabilité en quartier de vie (logements, bureaux, etc.). Ce projet d'aménagement, mené par la Solidéo, fait l'objet d'une politique environnementale exigeante axée sur une réduction optimale de l'empreinte écologique du futur village.

Un premier point important de cette politique environnementale est la lutte contre l'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène génère une augmentation de la température de l'air en milieu urbain (accumulation et réflexion de la chaleur sur les bâtiments, réduction des espaces verts, exposition au vent, ...). La bioclimatisation représente une solution très répandue pour lutter contre cet îlot de chaleur urbain. Cette technique consiste à favoriser l'implantation de la végétation pour baisser la température de l'air en milieu urbain. La végétation permet un rafraîchissement de l'air ambiant par l'ombrage qu'elle génère mais également par le flux d'évapotranspiration. Ce flux d'évapotranspiration correspond à une émission de vapeur d'eau par les feuilles de la végétation vers l'atmosphère. Cette eau est préalablement prélevée dans le sol par les racines des végétaux. Un second point important de la politique environnementale du projet d'aménagement du VOP est une utilisation maximale des eaux pluviales pour l'alimentation et l'entretien des surfaces végétalisées. Comme indiqué ci-dessus, la végétation joue un rôle important dans la lutte contre l'îlot de chaleur urbain. Cet objectif de rejeter le moins d'eaux pluviales vers les réseaux est donc cohérent avec la bioclimatisation. En effet, une bonne alimentation en eau est nécessaire afin de maintenir des conditions hydriques du sol favorable au flux d'évapotranspiration de la végétation.

Dans ce contexte, la Solidéo a missionné le CEREMA et l'entreprise Soleneos pour modéliser les flux d'évapotranspiration et le confort extérieur du futur village. Cette étude fait intervenir deux approches distinctes : (1) une approche microclimatique permettant de modéliser le climat et le confort extérieur et (2) une approche hydrologique utilisée pour modéliser les flux d'évapotranspiration de la végétation en tenant compte de l'état hydrique des sols. Le chaînage innovant de ces deux approches permet de mobiliser des compétences complémentaires : l'approche microclimatique urbain permet de tester l'impact du flux d'évapotranspiration sur les températures ambiantes simulées et l'approche hydrologique propose une estimation des flux d'évapotranspiration du futur VOP.

Cette étude est présentée en deux parties : (1) la première partie présente les simulations hydrologiques des flux d'évapotranspiration et la modélisation du confort extérieur du VOP pour deux conditions d'évapotranspirations extrêmes et (2) la seconde partie présente des simulations du climat urbain à partir de séquences de flux d'évapotranspiration simulés par l'approche hydrologique. La première partie de cette étude, est portée par les équipes BPE (Bâtiments Performants dans leur Environnement) et TEAM (Transferts et interactions liés à l'EAU en Milieu urbain) du Cerema. La seconde partie de cette étude est conduite par l'entreprise Soleneos chargée des simulations microclimatiques, et sera présentée dans un second rapport.

La première partie de cette étude est présentée dans ce rapport. Les définitions des processus importants, les modèles utilisés afin de simuler les flux d'évapotranspiration en tenant compte des conditions hydriques du sol et le modèle permettant de simuler le microclimat en milieu urbain sont

présentés en première partie. Une description de la zone étudiée ainsi que de la méthodologie de modélisation est ensuite proposée.

Les résultats et discussions des modélisations hydrologiques et microclimatiques sont exposés en quatrième partie. Enfin, les points importants de cette étude sont résumés en conclusion de ce rapport.

2 Présentation des modèles

2.1 Modèle de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration (ET) est un processus physique qui intervient à l'interface entre l'atmosphère et le sol. Cette notion intègre l'évaporation de l'eau depuis la surface du sol et des végétaux et la transpiration de l'eau par l'activité végétale. Toutes les notions essentielles à la compréhension du processus d'ET sont présentées dans la première partie de ce chapitre. La seconde partie présente les différentes approches existantes pour déterminer les flux d'évapotranspiration potentielle (ETP). Et enfin, la troisième partie expose le choix du modèle d'ETP pour l'étude des surfaces végétalisées du VOP.

2.1.1 Définitions

2.1.1.1 L'interface Atmosphère-Végétation-Sol

Le réservoir atmosphère agit comme le moteur du fonctionnement énergétique et hydrique à la surface du sol :

- Fonctionnement énergétique : les rayonnements solaires (visibles, infrarouges et ultraviolets, directs et diffus) représentent le flux moteur du bilan énergétique à la surface du sol. Ces rayonnements sont généralement inclus dans la valeur du rayonnement net (R_n ; *Allen et al., 1998*) qui correspond à la différence entre les rayonnements solaires visible et infrarouge entrants (incidents direct et diffus) et sortants (réfléchis). Le bilan énergétique (W/m^2) à la surface urbaine s'écrit ainsi (*Dupont et al., 2006*):

$$R_n + Q = H + LE + G$$

Équation 2.1

Avec Q le flux d'énergie généré par l'activité humaine, H le flux de chaleur sensible dans l'atmosphère, LE le flux de chaleur latente dans l'atmosphère et G le flux de chaleur diffusé dans le sol. La partie gauche de ce bilan représente les flux qui vont interagir avec la surface du sol et la partie droite décrit la réaction de la surface du sol avec H la quantité d'énergie qui est absorbée par la surface du sol avec une modification de la température de la surface, LE la quantité d'énergie qui est absorbée par la surface avec une modification de phase du corps absorbant et G l'énergie qui est absorbée dans le sol. La chaleur latente (LE) correspond au flux d'évapotranspiration de l'eau à la surface du sol et des végétaux.

- Fonctionnement hydrique : les précipitations sont le principal flux entrant du cycle de l'eau à la surface du sol (sauf dans le cas où l'irrigation joue un rôle majeur). Le bilan hydrique (en mm) du sol en milieu urbain s'écrit comme suit (*Grimmond et al., 1986*):

$$P + Irr = R + ET + I$$

Équation 2.2

Avec P les précipitations, Irr l'apport d'eau par irrigation, R le ruissellement de surface, ET l'évapotranspiration et I l'infiltration vers les couches plus profondes du sol. P et Irr représentent les flux alimentant la surface du sol.

Ainsi, l'eau alimentant la surface du sol pourra ruisseler, s'évapotranspirer (évaporation de surface + transpiration de la végétation) ou être infiltrée vers des horizons de sub-surface.

2.1.1.2 Le processus d'évapotranspiration et la notion d'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration décrit la quantité d'eau liquide présente en surface ou dans le sol, qui retourne vers l'atmosphère sous forme gazeuse par l'action directe du climat (évaporation) ou/et du fonctionnement de la végétation (transpiration). Il s'agit d'un flux important du bilan hydrique (Équation 2.2). En effet, le processus d'évapotranspiration peut représenter jusqu'à 60% (zone industrielle) voire 70% (toiture végétalisée) des précipitations annuelles en milieu urbain (Béchet et al., 2017). Ces dernières années sont marquées par une augmentation des études portant sur l'évapotranspiration en milieu urbain (Berthier et al., 2006 ; Ebrahimian et al., 2019 ; Gkatsopoulos, 2017 ; Grimmond and Oke, 1991 ; Jahanfar et al., 2018 ; Snyder et al., 2015 ; Taha, 1997) afin de lutter contre l'îlot de chaleur urbain (réchauffement de l'atmosphère causé par l'urbanisation).

L'évapotranspiration est conditionnée à la fois par la capacité de l'atmosphère à stocker de la vapeur d'eau (on parle alors de demande évapotranspiratoire caractérisée par le déficit de vapeur saturante) et par la quantité d'eau disponible pour répondre à cette demande évapotranspiratoire atmosphérique. La demande évapotranspiratoire est dépendante des conditions météorologiques locales (température de l'air, humidité de l'air, vitesse du vent et rayonnement solaire). La disponibilité en eau dépend des conditions hydriques de surface et du sol. Ainsi, on différencie la quantité d'eau qui va réellement retourner vers l'atmosphère par évapotranspiration (évapotranspiration réelle, ETR) de la quantité d'eau qui peut être évapotranspirée (évapotranspiration potentielle, ETP). L'ETP est estimée par des modèles de prédictions comme la demande évapotranspiratoire totale, qui dépend des paramètres météorologiques et de la surface considérée (y compris la végétation). Ces modèles de prédiction d'ETP considèrent que la quantité d'eau disponible dans le sol est suffisante pour répondre à cette demande. L'ETR peut être mesurée par dispositif expérimental et peut aussi être simulé par couplage avec des modèles hydrologiques du sol. En d'autres mots, l'ETP est une demande évapotranspiratoire totale que la surface serait capable d'évapotranspirer et l'ETR est la quantité d'eau qui réellement évapotranspirée en tenant compte du stock d'eau présent à la surface du sol et dans le sol.

2.1.2 Estimation des flux d'évapotranspiration

Le flux d'évapotranspiration peut être mesuré (ETR) ou calculé (ETP et ETR).

2.1.2.1 Mesures

Les études qui présentent des méthodes de mesure de l'évapotranspiration ne manquent pas dans la littérature. On retrouve par exemple l'utilisation d'un lysimètre pour quantifier l'eau qui est retournée vers l'atmosphère par évapotranspiration au sein d'un environnement reconstitué (Rafi et al., 2019 ; Sanchez et al., 2018 ; Widmoser and Wohlfahrt, 2018), la mesure du flux de sève des arbres qui est directement liée au fonctionnement de l'arbre et à sa capacité de transpiration (Chebbi et al., 2018 ; Marchionni et al., 2019) ou encore la mesure par covariance des turbulences (Rafi et al., 2019 ; Sanchez et al., 2018). Ces mesures sont importantes puisqu'elles constituent des points de comparaisons avec les résultats issus de simulations. Cependant dans le cas du VOP, les flux d'évapotranspiration que nous cherchons à estimer ne peuvent être mesurés sur la végétation concernée.

En effet, la construction du village n'a pas démarré et uniquement les arbres déjà existants pourraient faire l'objet de telles mesures. Néanmoins, au vu des grandes modifications à venir de l'environnement de ces arbres (construction de bâtiments, remaniements des sols, etc), on peut se demander si ces mesures d'évapotranspiration seraient représentatives du futur micro-climat du VOP. On s'intéresse donc à l'estimation des flux d'évapotranspiration des surfaces végétalisées du VOP par l'outil de la simulation numérique.

2.1.2.2 Modélisation

De nombreux modèles ont été développés afin d'estimer le flux d'évapotranspiration potentielle. Ces modèles sont basés sur des données météorologiques avec des complexités variées. Les principaux modèles que l'on retrouve fréquemment dans la littérature sont présentés ci-dessous :

- Des modèles simples expriment le flux d'ETP au pas de temps mensuel ou quotidien en fonction du moins de paramètres possible. En effet, certains sites disposent de peu de données climatiques. *Hargreaves et Samani (1982)* proposent une formule qui permet de calculer le flux d'évapotranspiration potentielle à partir de la température de l'air et du rayonnement solaire global incident :

$$ETP_{HS} = 0.0135R_s(T + 17.8)$$

Équation 2.3

Avec R_s le rayonnement solaire global (somme des rayonnements directs et diffus, W/m^2) et T la température de l'air ($^{\circ}C$).

Une adaptation de cette formule permet même de s'affranchir de la mesure du rayonnement solaire, pour le même pas de temps (*Hargreaves, 1981 ; Hargreaves and Samani, 1982*):

$$R_s = K_{RS}R_a(T_{min} - T_{max})$$

Équation 2.4

Où R_a correspond au rayonnement extra-terrestre (rayonnement solaire incident à la limite de l'atmosphère, ce paramètre ne nécessite pas d'être mesuré) et K_{rs} représente un coefficient empirique calé sur des mesures du ratio R_s/R_a pour une zone donnée.

D'autres modèles permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle journalière à partir des mesures de température et du rayonnement, comme par exemple la formule de Turc (Turc, 1961) :

$$ETP = a \times C \times (R_g + b) \times \frac{T}{T + 15}$$

Équation 2.5

Où l'ETP est exprimée en mm/j, T est la température moyenne journalière (°C) R_g la mesure du rayonnement solaire global quotidien ($MJ.m^2.j^{-1}$), a et b sont des coefficients empiriques ($m^2.MJ^{-1}.mm^{-1}$) ajustés pour le Sud de la France et l'Afrique du Nord et C un paramètre empirique variant avec la mesure de l'humidité relative quotidienne.

La formule de Thornthwaite (Thornthwaite, 1944) permet de calculer l'évapotranspiration potentielle mensuelle en s'affranchissant de la mesure du rayonnement solaire par l'utilisation d'un indice thermique ajusté régionalement :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10 \times T}{l} \right)^a \times k$$

Équation 2.6

Avec l'ETP exprimée en mm/mois, T la température moyenne mensuelle (°C), l l'indice thermique annuel, a un paramètre empirique dépendant de l et k un coefficient correctif dépendant de la latitude.

- Des modèles plus complexes avec une paramétrisation plus importante comme le modèle de Priestley-Taylor (PT ; Priestley and Taylor, 1972) qui calcule un flux d'évapotranspiration potentielle (mensuel à horaire) à partir des données de rayonnement net. La formule de l'évapotranspiration de PT se présente comme ci-dessous :

$$ETP_{PT} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$$

Équation 2.7

Avec ETP_{PT} le flux d'évapotranspiration (W/m^2), α le coefficient de Priestley-Taylor (1,26), R_n le rayonnement net (W/m^2), G le flux de chaleur du sol (W/m^2), Δ la pente de la courbe de pression de vapeur ($kPa/°C$) et γ la constante psychométrique ($kPa/°C$).

Ce modèle est un bon compromis, en termes de paramétrisation, entre le modèle simple de Hargreaves-Samani (HS) et le modèle de Penman-Monteith (PM ; *Allen et al., 2006*) qui apparaît comme le modèle qui combine le plus de paramètres météorologiques et qui inclut également des paramètres relatifs à la végétation :

$$ETP_{PM} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right) \rho_w \lambda}$$

Équation 2.8

Avec ETP_{PM} le flux d'évapotranspiration potentielle (m/s), Δ la pente de la courbe de pression de vapeur (Pa/°C), R_n le rayonnement net (W/m²), G le flux de chaleur du sol (W/m²), ρ_a la masse volumique de l'air (kg/m³), C_p la capacité thermique de l'air (J/kg.K), e_s et e_a la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur de l'air (Pa), r_a et r_s la résistance aérodynamique et la résistance stomatique (s/m), γ la constante psychométrique (Pa/°C), ρ_w la masse volumique de l'eau (kg/m³) et λ la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2,46 x 10⁶ J/kg). Cette formule est valable pour des pas de temps mensuels, quotidiens et horaires.

L'équation de PM est largement utilisée dans les domaines de l'agriculture et de l'hydrologie afin de calculer l'évapotranspiration de référence (ET_0), définie par la FAO (Food and Agricultural Organisation ; *Allen et al., 1998*) comme l'évapotranspiration potentielle d'un gazon bien irrigué, de 0,12 m de hauteur, ayant un albédo de 0,23 et une résistance stomatique de 70 s/m. Cette équation PM FAO se présente sous la forme ci-dessous :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}$$

Équation 2.9

Avec ET_0 le flux d'évapotranspiration potentielle de référence (mm/jour), u_2 la vitesse du vent mesurée à 2 m (m/s), C_n un coefficient (37 pour des calculs au pas de temps horaire, K.mm/s.mg.jour) et C_d un second coefficient (0,34 pour les calculs quotidiens et 0,24/0,96 pour le jour et la nuit dans le cas de calculs au pas de temps horaire ; s/m).

La FAO fournit les procédures permettant de calculer les différents paramètres nécessaires (Δ , γ , e_s et e_a) au calcul de l' ET_0 . Certains de ces paramètres sont présentés dans la dernière partie de ce chapitre.

Cette évapotranspiration potentielle de référence est largement utilisée dans les modèles hydrologiques comme évapotranspiration potentielle des sols (*Jahanfar et al., 2018 ; Jankowfsky et al., 2014 ; Ollivier et al., 2020 ; Robineau et al., 2018*).

Il existe des coefficients qui permettent de calculer un flux d'ETP à partir de ce flux d' ET_0 pour d'autres espèces végétales. Le plus connu de ces coefficients est le coefficient cultural (K_c) introduit par *Allen et al. (1998)* dans la FAO 56 :

$$ETP_c = K_c ET_0$$

Équation 2.10

Avec ETP_c le flux d'évapotranspiration potentielle des cultures (mm/j).

Ce coefficient permet de prendre en compte les différents stades de croissance des espèces cultivées, afin de fournir une estimation de l'évapotranspiration potentielle des cultures dans un besoin d'irrigation. Des tables de valeurs sont présentées dans la FAO 56 (*Allen et al., 1998*). Cependant, ces valeurs paraissent peu adaptées aux espèces que l'on trouve habituellement en milieu urbain.

Les méthodes de WUCOLS (Water Use Classifications of Landscape Species ; *Costello and Jones, 2014*) et LIMP (Landscape Irrigation Management Program ; *Snyder et al., 2015*) proposent un coefficient urbain K_L (landscape coefficient), plus adapté aux problèmes d'irrigation en milieu urbain. Dans ces deux méthodes, le K_L est constitué de plusieurs paramètres afin de bien représenter les différentes caractéristiques des surfaces végétalisées urbaines.

K_L WUCOLS :

$$K_L = k_s k_d k_{mc} \text{ avec } ETR = K_L \times ETP$$

Équation 2.11

Avec k_s le facteur d'espèce utilisé pour tenir compte des besoins en eau des différentes espèces, k_d le facteur de densité qui tient compte des variations de densité au sein d'une surface végétalisée et k_{mc} un facteur qui introduit la notion de microclimats urbains, générés par exemple par la présence de bâtiments. Ce facteur de microclimat fait écho au bilan énergétique présenté en première partie de ce chapitre et permet de prendre en compte les variations du microclimat urbain.

Table 1 Gammes de variation pour les facteurs du coefficient urbain (*Costello and Jones, 2014*)

	k_s	k_d	k_{mc}
très faible	< 0,1		
faible	0,1 - 0,3	0,5 - 0,9	0,5 - 0,9
moyen	0,4 - 0,6		1
fort	0,7 - 0,9	1,1 - 1,3	1,1 - 1,4

Ces trois facteurs ont leurs propres gammes de variation (Table 1), les valeurs de k_s , k_d et k_{mc} sont choisies arbitrairement, en fonction de la végétation, en suivant les conseils donnés dans le guide WUCOLS (2000). Dans le cas du facteur d'espèce (k_s), des valeurs pour quelques espèces sont présentées dans le guide (*Costello and Jones, 2014*).

K_L LIMP :

$$K_L = K_{mc} K_v K_d K_{sm} \text{ avec } ETR = K_L \times ETP$$

Équation 2.12

Dans cette équation, on retrouve le facteur de microclimat (K_{mc}), le facteur d'espèces de végétation (K_v), le facteur de densité (K_d) et un facteur de stress hydrique (K_{sm}) ajouté par cette méthode LIMP. Ce coefficient de stress hydrique permet d'affiner l'évapotranspiration potentielle par la prise en compte de la disponibilité de l'eau au sein de la surface végétalisée. Contrairement à la méthode WUCOLS, les valeurs des facteurs de la méthode LIMP sont calées par un ratio entre un flux d'évapotranspiration réelle mesuré et l'évapotranspiration potentielle de référence (ET_0). Par exemple, K_v s'exprime par le ratio ET_v/ET_0 où ET_v représente un flux d'évapotranspiration réelle pour l'espèce végétale considérée en condition idéale d'irrigation. Les valeurs de ce K_v ont donc une plus grande signification scientifique que les valeurs du K_L WUCOLS. Néanmoins, la méthode LIMP requiert l'utilisation de mesures de flux d'évapotranspiration réelle, ce qui rend cette méthode peu adaptée à notre étude.

Ainsi, l'utilisation des méthodes WUCOLS et LIMP permet d'estimer des flux d'ETR à partir de l'ETP en appliquant des coefficients d'ajustements.

2.1.3 L'évapotranspiration des surfaces végétalisées du VOP

Le premier paragraphe de cette partie présente les méthodologies envisageables pour l'estimation de l'évapotranspiration ainsi qu'une justification du choix effectué dans le cadre de cette étude. Le second paragraphe détaille précisément le calcul des paramètres du modèle sélectionné.

2.1.3.1 Méthodologies envisagées

On s'intéresse dans cette étude à l'estimation des flux d'évapotranspiration réelle (ETR) horaire des surfaces végétalisées du VOP en tenant compte du type de végétation et du stock d'eau présent dans le sol. Pour cela, deux protocoles peuvent être envisagés :

- Calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) par une des formules simples présentées ci-dessus, puis utiliser un coefficient (K_c ou K_L) pour estimer l'évapotranspiration réelle
- Calculer l'évapotranspiration potentielle directement pour le type de végétation considéré avec l'équation 8 (formule de Penman & Monteith, PM), puis utiliser un modèle hydrologique du sol pour déterminer les flux réels évapotranspirés en tenant compte des conditions hydriques du sol

La première proposition serait la moins gourmande en termes de paramétrisation et la plus simple dans le cas d'un calcul d'évapotranspiration potentielle (ETP) au pas de temps mensuel et/ou quotidien. En effet, ces formules peuvent être autant performantes que la formule de PM FAO pour des calculs mensuels et quotidiens (Allen *et al.*, 2006). Cependant ces formules ne sont pas adaptées à des calculs d'ETP au pas de temps horaire, surtout si l'on utilise des données de rayonnement solaire (le rayonnement incident étant nul la nuit et une partie de la journée).

De plus, nous disposons pour cette étude d'un grand nombre de paramètres climatiques au pas de temps horaire et des propriétés des végétaux (littérature) qui vont être implantés sur le VOP.

Notre choix se porte donc sur la seconde proposition avec l'utilisation en premier lieu de l'équation de PM pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, qui fournit en général de meilleurs résultats que les autres méthodes (Katul et al., 1992 ; ASCE, 2005). Puis, en second lieu, l'utilisation d'une approche hydrologique dans le sol pour calculer les flux réels d'évapotranspiration en tenant compte du stock d'eau dans le sol. Cette approche hydrologique du sol est présentée dans le chapitre suivant.

2.1.3.2 Détail du calcul de l'évapotranspiration potentielle

On utilise ici la formulation générale de l'équation de PM (voir Équation 2.13) afin de conserver les résistances aérodynamiques et stomatiques dans le but de tenir compte de la diversité des surfaces végétalisées. Les paramètres nécessaires à l'utilisation de cette formule sont regroupés dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 Paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle

Paramètres	Unités	Description
T air	°C	Température moyenne de l'air
P air	Pa	Pression moyenne de l'air
HR	%	Humidité relative moyenne de l'air
u	m/s	Vitesse moyenne de l'air
zref	m	hauteur de mesure de la vitesse de l'air
Rs	W/m ²	Rayonnement solaire global

Les formules permettant de calculer les différents paramètres viennent de la procédure FAO 56 (Allen et al., 1998) et sont détaillées ci-dessous.

$$ETP_{PM} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right) \rho_w \lambda}$$

Équation 2.13

ETP_{PM} : évapotranspiration potentielle (m/s)

R_n : rayonnement net (W/m²), voir Équation 2.14, Équation 2.15, Équation 2.16, Équation 2.17, Équation 2.18

G : flux de chaleur dans le sol (W/m²), voir équation Équation 2.19 et Équation 2.20

ρ_a : masse volumique de l'air (kg/m³)

γ : constante psychrométrique (Pa/°C), voir Équation 2.21

C_p : capacité thermique de l'air (J/kg.K), voir Équation 2.22

e_s : pression de vapeur saturante (Pa), voir Équation 2.23

e_a : pression de vapeur de l'air (Pa), voir Équation 2.24

r_a : résistance aérodynamique (s/m), voir Équation 2.25

r_s : résistance stomatique (s/m), voir Équation 2.26

ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m³)

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau (2,45 x 10⁶ J/kg).

Rayonnement net (R_n) :

Le rayonnement net est calculé avec l'unité utilisée dans la FAO 56 (MJ/m².h) puis converti en W/m² pour la formule de PM.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Équation 2.14

Avec R_{ns} le rayonnement net de courte longueur d'onde (ou visible) et R_{nl} le rayonnement net de grande longueur d'onde (ou infra-rouge, MJ/m².h).

$$R_{ns} = R_s(1 - \alpha)$$

Équation 2.15

Où R_s est le rayonnement solaire mesuré (rayonnement global incident, MJ/m².h) et α est l'albédo de la surface.

$$\text{Et } R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{min,k}^4 + T_{max,k}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Équation 2.16

σ la constante de Stefan-Boltzmann (4,903 E⁻⁹ MJ/K⁴.m².h) et R_{so} le rayonnement solaire global idéal (MJ/m².h), T_{min} et T_{max} les températures minimales et maximales du pas de temps (kelvin) :

R_{so} peut être estimé de la manière suivante :

$$R_{so} = (0,75 + 2.10^{-5}z)R_a$$

Équation 2.17

Avec z l'altitude de la station de mesure du rayonnement (m) et R_a le rayonnement extraterrestre (MJ/m².h)

$$R_a = \frac{R_s}{\left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right)}$$

Équation 2.18

Où $a_s + b_s$ représente la fraction des rayonnements extraterrestre atteignant la surface du sol (a_s et b_s sont des coefficients, les valeurs recommandées sont respectivement 0,25 et 0,5), n est la durée d'ensoleillement (h) et N la durée maximale d'ensoleillement d'une journée (h). La formule pour calculer N fait appel à d'autres paramètres. La procédure pour ce calcul est présentée dans le manuel de la FAO 56 (Allen et al., 1998).

Flux de chaleur dans le sol (G) :

L'approche utilisée dans cette étude est celle présentée par la FAO. Celle-ci présente une approche simplifiée pour le calcul de l'évapotranspiration de référence. La prise en compte du flux de chaleur dans le sol serait plus rigoureuse en adoptant une approche énergétique-radiative comme on peut le retrouver dans les travaux de Noilhan et Planton (*Noilhan and Planton, 1988*). Néanmoins, une telle méthodologie n'est pas envisagée dans cette étude puisque l'on s'intéresse d'avantage au bilan hydrique du sol.

Dans la FAO, l'expression de G (MJ/m².h) est égale à une fraction du rayonnement net. Cette fraction diffère en fonction du pas de temps et du moment de la journée. Pour le pas de temps horaire :

Pour la nuit, $G = 0,5R_n$

Équation 2.19

Et pour le jour, $G = 0,1R_n$

Équation 2.20

Constante psychométrique (γ) :

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda}$$

Équation 2.21

Où c_p est la capacité thermique de l'air (1013 J/kg.K pour des conditions atmosphériques moyennes), P la pression atmosphérique (Pa), ε le ratio de masse moléculaire entre la vapeur d'eau et l'air sec = 0.622 et λ la chaleur latente de vaporisation (2,45 10⁶ J/kg).

Le terme $\rho_a \times C_p$ (masse volumique de l'air x capacité thermique de l'air)

$$\rho_a C_p = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{1.01(T_{air} + 273)R}$$

Équation 2.22

Avec T_{air} la température de l'air (K) et R la constante des gaz parfait (287 J/kg.K)

Pression de vapeur saturante (e_s) :

L'expression de la vapeur saturante est tirée de la thèse de *J. Bouyer (2009)*,

$$e_s = 610.7 \left(1 + \sqrt{2} \sin \frac{T_{air}}{3} \right)^{8.827}$$

Équation 2.23

Avec T_{air} en °C et e_s en Pa.

Pression de vapeur de l'air (e_a) :

L'expression de la vapeur de l'air est tirée de la thèse de *J. Bouyer (2009)*,

$$e_a = e_s \frac{HR}{100}$$

Équation 2.24

Où HR est l'humidité relative de l'air (%).

Résistance aérodynamique d'un végétal (r_a) :

L'expression de la résistance aérodynamique est tirée de la thèse de *J. Bouyer (2009)*,

$$r_a = \frac{\left(\ln \left(\frac{z_{ref} - d_0}{z_0} \right) \right)^2}{k^2 u_{zref}}$$

Équation 2.25

Avec z_{ref} la hauteur de référence de mesure de la vitesse du vent (m), d_0 la hauteur de déplacement (0.7 fois la hauteur totale du végétal), z_0 la hauteur de rugosité (0.15 fois la hauteur totale du végétal), k la constante de Von Karman (0.41) et u_{zref} la vitesse du vent à la hauteur de référence (m/s).

Résistance stomatique (r_s) :

$$r_s = \frac{r_{sf}}{LAI}$$

Équation 2.26

Où r_{sf} est la résistance stomatique globale d'une feuille (s/m), qui s'exprime par l'inverse de la conductance stomatique (valeurs disponibles dans la littérature) et LAI est l'indice de surface foliaire de l'arbre (Leaf Area Index en anglais).

2.2 Définition de l'interface Atmosphère, Végétation et Sol

Ce chapitre présente en première partie un rappel sur le fonctionnement hydrologique à l'interface Atmosphère-Végétation-Sol (AVS) ainsi que les différents processus qui y ont lieu. Une seconde partie propose une revue bibliographique des différents modèles permettant de reproduire ce fonctionnement hydrologique tout en tenant compte du stock d'eau présent dans le sol. La troisième partie de ce chapitre introduit le modèle sélectionné pour le calcul de l'évapotranspiration réelle à l'interface Atmosphère, Végétation et Sol.

2.2.1 Fonctionnement hydrologique à l'interface AVS

Comme introduit précédemment, l'évapotranspiration potentielle constitue une demande idéale tenant compte du climat et du type de surface, y compris la végétation. L'évapotranspiration intervient dans les trois compartiments de l'interface AVS :

- Evaporation de l'eau à la surface des feuilles des végétaux (Végétation)
- Evaporation à la surface du sol (Atmosphère)
- Transpiration par les racines des végétaux (Sol)

Pour estimer la quantité d'eau qui va être réellement évapotranspirée (ETR), il faut tenir compte de l'état hydrique de ces différents compartiments. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des modèles permettant d'en reproduire le fonctionnement hydrodynamique : 1) Interception des précipitations par la canopée du végétal, 2) Redistribution des flux à la surface du sol et 3) Ecoulements d'eau dans le sol. De plus, ces modèles doivent représenter les processus qui, en plus de l'évapotranspiration, interviennent dans ces compartiments : le ruissellement de surface, l'infiltration de l'eau dans le sol et les mouvements d'eau dans le sol (drainage gravitaire, remontées capillaires, stockage, ...). Ces différents processus sont présentés ci-dessous.

2.2.1.1 Le ruissellement de surface

Ce terme de ruissellement de surface décrit généralement la quantité d'eau qui s'écoule sur des surfaces non perméables (ou très peu perméables) ou déjà saturées en eau. Par exemple, dans le cas des surfaces végétalisées du VOP, le ruissellement de surface intervient :

- Lorsque des surfaces imperméables et peu perméables sont hydrologiquement reliées à une surface végétalisée en aval : le ruissellement de surface constitue alors un flux d'eau entrant. Dans ce cas, le flux d'irrigation peut être ajouté à ce ruissellement de surface arrivant sur la surface végétalisée.
- Lorsque la surface végétalisée se sature en eau car l'apport d'eau (pluie, irrigation, ruissellement amont) devient supérieur à sa capacité d'infiltration (situation de refus d'infiltration) : le ruissellement de surface constitue un flux d'eau sortant.

2.2.1.2 L'infiltration

Le terme d'infiltration décrit l'eau qui pénètre les pores du sol. Si tous les pores du sol sont saturés en eau, l'eau ruisselle sur le sol jusqu'à pouvoir s'infiltrer/ou être évapotranspirée. Une fois dans les pores du sol, l'eau peut s'écouler par gravité jusqu'à la zone saturée ou être transpirée par les racines des végétaux.

2.2.1.3 Le drainage gravitaire

Il s'agit du phénomène naturel par lequel l'eau s'écoule par gravité à travers les pores saturés ou non saturés du sol, depuis la surface jusqu'à la zone saturée. Cet écoulement « gravitaire » (qui fait également intervenir des forces capillaires) dépend des propriétés physiques du sol (texture, porosité, perméabilité, ...) et de l'état hydrique du profil de sol (teneur en eau). L'écoulement d'eau en zone non saturée est largement décrit dans la littérature avec notamment la loi de Richards (Richards, 1931) et les lois de rétention en eau dans le sol de Van Genuchten (*Van Genuchten, 1980*) et Brooks and Corey (*Brooks and Corey, 1964*). Ces lois sont présentées plus tard dans ce chapitre.

2.2.1.4 Les remontées capillaires

Dans la partie racinaire de la zone non saturée, les plantes puisent l'eau disponible du sol (l'eau gravitaire) par leurs racines. Cette eau servira au développement de la plante et sera finalement évapotranspirée vers l'atmosphère. Ce flux d'eau remontant vers la surface entraîne, par effet de succion, une remontée de l'eau contenue dans les pores de la zone non saturée mais aussi de la zone saturée, lorsque celle-ci est peu profonde. Ce sont les remontées capillaires, elles dépendent fortement du type de sol, de l'épaisseur de la ZNS et de la succion motrice des remontées. En effet, les remontées capillaires peuvent atteindre la totalité de la zone non saturée dans le cas d'un aquifère crayeux (*Price et al., 2000*).

2.2.1.5 Schéma du fonctionnement hydrologique à l'interface Atmosphère-Végétation-Sol (AVS)

Le schéma ci-dessous (Figure 1) présente le fonctionnement général des transferts hydriques à l'interface AVS, dans le cas d'une surface végétalisée du type « prairie arborée » que l'on peut retrouver sur le VOP. Une partie des précipitations est interceptée par le végétal (arbres et gazon), cette quantité d'eau est soit drainée vers la surface du sol, soit évaporée.

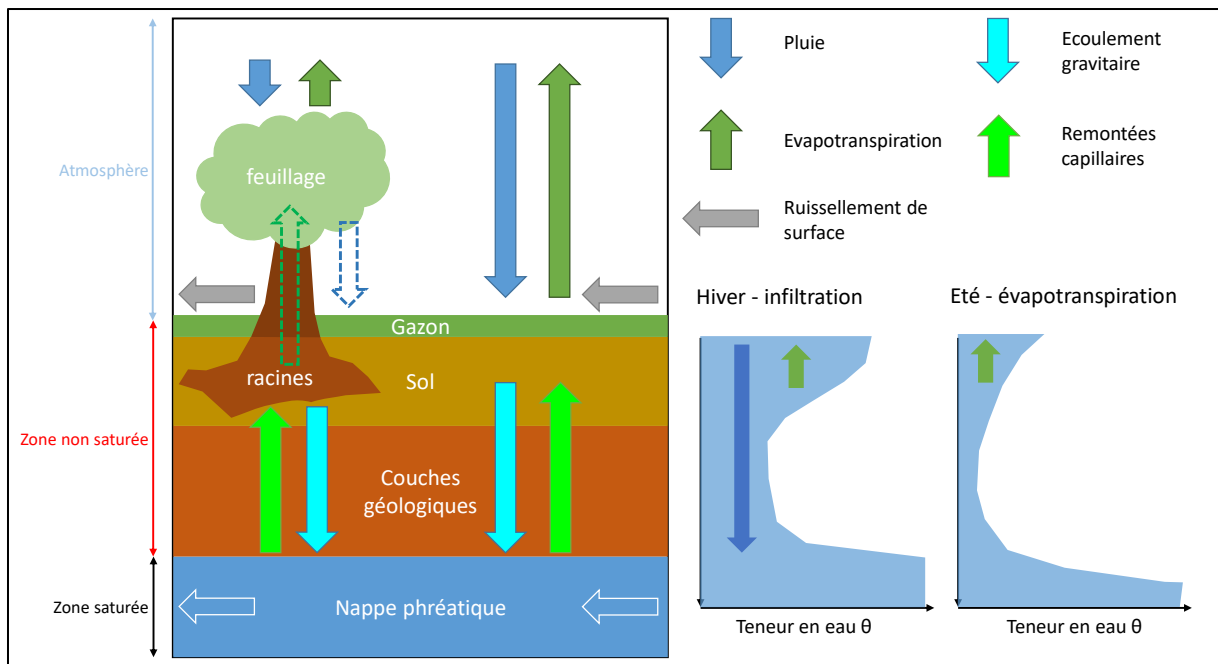


Figure 1 Schéma du fonctionnement hydrologique du sol, les profils de teneur en eau sont donnés à la suite d'un épisode pluvieux

L'eau de pluie non interceptée par la canopée, en plus de l'eau issue du ruissellement de surface en amonts, est soit infiltrée dans le sol, soit évaporée. La quantité d'eau excédentaire est alors stockée temporairement à la surface du sol, ou ruisselée, si cette quantité est supérieure à la capacité de stockage.

On peut observer une variabilité du fonctionnement du sol en fonction des saisons (Figure 1) :

- Printemps – été : les précipitations sont moins fréquentes (et plus intenses) et la demande évapotranspiratoire est importante. L'eau de pluie qui atteint le sol peut ainsi rapidement être transpirée ou absorbée par les racines des arbres. L'eau de la zone saturée peut être mobilisée par l'activité racinaire par remontée capillaire (lorsque la nappe n'est pas trop profonde). Il y a peu de recharge de la zone saturée, dont la profondeur a plutôt tendance à augmenter. Lors d'importants épisodes de pluie, la saturation rapide du sol génère du ruissellement de surface.
- Automne – hiver : les précipitations sont régulières et la demande évapotranspiratoire est moindre. L'eau de pluie peut ruisseler en surface lorsque le sol a atteint sa capacité maximale de stockage. Le reste de l'eau de pluie s'écoule par gravité vers la zone saturée dont le niveau remonte.

Ainsi, lorsque l'on s'intéresse aux flux réels d'évapotranspiration, il faut prendre en compte les processus qui ont lieu dans les trois compartiments de l'interface Atmosphère-Végétation-Sol. En effet, chacun de ces compartiments contribue au flux d'évapotranspiration réelle et possède son propre stock d'eau.

2.2.2 Modélisation hydrodynamique de l'interface Atmosphère-Végétation-Sol

Comme pour les modèles d'évapotranspiration, il existe de nombreuses approches afin de représenter le fonctionnement hydrodynamique des différents compartiments de l'interface entre l'atmosphère et le sol.

2.2.2.1 Modélisation hydrodynamique en surface

2.2.2.1.1 Interception des précipitations

Grimmond et al. (1991) ont développé un modèle physique d'interception de la pluie adapté aux surfaces urbaines en s'appuyant sur la comparaison entre le fonctionnement de la canopée d'une forêt et la canopée urbaine. Cette couche d'interception correspond à l'espace entre les bâtiments et les arbres du milieu urbain. La variation du stock de cette couche (C, mm) est représentée par l'équation ci-dessous (en mm/h) :

$$\frac{dC}{dt} = (P + Irr) - D - E$$

Équation 2.27

Avec P les précipitations (mm/h), Irr l'irrigation (mm/h), D le drainage de la canopée (mm/h) et E l'évapotranspiration (mm/h).

Dans ce modèle, l'évapotranspiration est calculée avec la formule de Penman & Monteith (cf. partie Modèle de l'évapotranspiration potentielle) et utilisée comme : 1) évaporation lorsque la surface du végétale est totalement recouverte d'eau, 2) évapotranspiration lorsque la surface du végétal est partiellement couverte d'eau, 3) transpiration lorsque la surface du végétal est totalement sèche.

Cette approche est souvent utilisée pour améliorer le bilan d'eau de surface en milieu urbain (*Jankowsky et al.*, 2014 ; *Jarvi et al.*, 2011 ; *Locatelli et al.*, 2014 ; *Morena*, 2004 ; *Rodriguez et al.*, 2008 ; *Rossmann and Huber*, 2016 ; *Willuweit and O'Sullivan*, 2013).

2.2.2.1.2 Bilan d'eau en surface

Grimmond and Oke (1986a) définissent le bilan d'eau de surface en milieu urbain comme ci-dessous :

$$P + Irr = R + E + \Delta S$$

Équation 2.28

Avec P les précipitations (mm), Irr l'irrigation des surfaces végétalisées (mm), R le ruissellement de surface (mm), E l'évapotranspiration et ΔS le changement du stock de surface (mm).

Dans leur bilan, la réserve en eau de surface est vidangée par ruissellement via le réseau de drainage jusqu'aux réseaux d'assainissements. Cette approche du bilan d'eau est peu adaptée aux surfaces végétalisées puisque le terme d'infiltration dans le sol est absent.

Une approche plus classique du bilan d'eau, que l'on retrouve aussi bien en contexte urbain que rural, est celle proposée par *Thorntwaite and Mather* (1957), le bilan s'écrit alors :

$$P = E + R + Inf + \Delta S$$

Équation 2.29

Avec *Inf* la quantité d'eau infiltrée (mm).

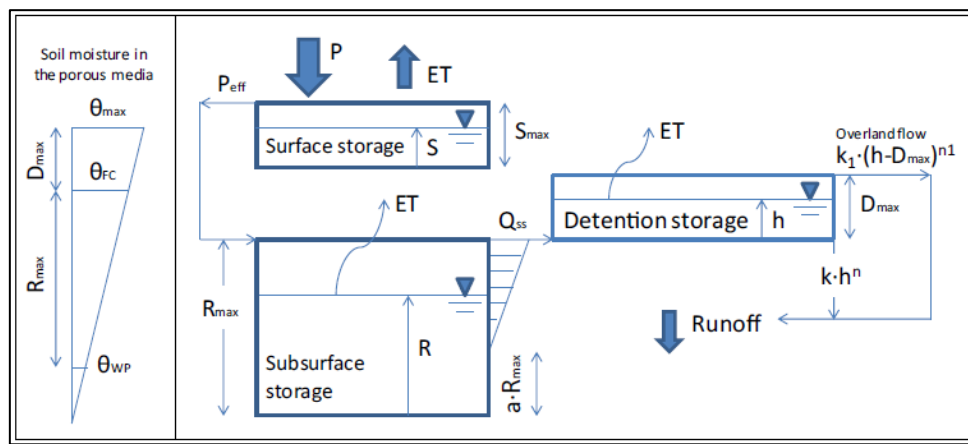


Figure 2 Représentation du modèle réservoir appliqué à la simulation des performances hydrologiques (sur le long termes) des toitures végétalisées. Ce modèle contient des compartiments de stockage de surface et de sub-surface permettant de représenter la capacité de rétention en eau des toitures végétalisées (Locatelli et al., 2014)

Ce bilan permet une redistribution des précipitations (ou des précipitations non interceptées par le végétal) à la surface du sol. De nombreux travaux appliquent un bilan similaire à la surface du sol pour estimer la quantité d'eau qui va s'infiltrer dans le sol (Dourado-Neto et al., 2010 ; Robineau et al., 2018), pour modéliser l'efficacité des toitures végétalisées dans la gestion des eaux pluviales en milieu urbains (Locatelli et al., 2014 - Figure 2 ; Ramier et al., 2008), ou encore pour modéliser le fonctionnement hydrodynamique de parcelles urbaines (Morena, 2004 ; Rodriguez et al., 2008).

2.2.2.1.3 Les modèles force-restore

Le modèle force-restore a initialement été développé à des fins de prédictions météorologiques (Deardorff, 1977). Le principe est de coupler le forçage atmosphérique (rayonnements solaires, vent, précipitation) à la capacité d'emmagasinement du sol. Il exprime l'humidité de l'air à la surface du sol en fonction des différents types de flux énergétiques (flux de chaleur latent, flux de chaleur sensible), de la température de surface du sol et des propriétés thermiques du sol.

Des paramètres d'ajustement sont également introduits en fonction des propriétés du sol. Le modèle force-restore est habituellement composé : 1) d'une première couche souvent peu épaisse qui agit comme un réservoir tampon pour le bilan d'eau et d'énergie en surface, 2) puis d'une d'autres couches (une ou plusieurs) de sub-surface décrites par leur teneur en eau moyenne.

Une adaptation de ce modèle par *Noilhan et Planton (1988)* permet d'intégrer un réservoir d'interception des précipitations par la canopée (Figure 3). Ce réservoir se vidange par évaporation de l'eau à la surface des feuilles et par un flux de ruissellement qui s'écoule vers la première couche du sol.

Cette approche force-restore est fréquemment rencontrée pour modéliser l'évolution de la teneur en eau du sol de sub-surface en milieu urbain (*Camalleri et al., 2010 ; Dupont et al., 2006 ; Noilhan and Mahfouf, 1995 ; Noilhan and Planton 1988*).

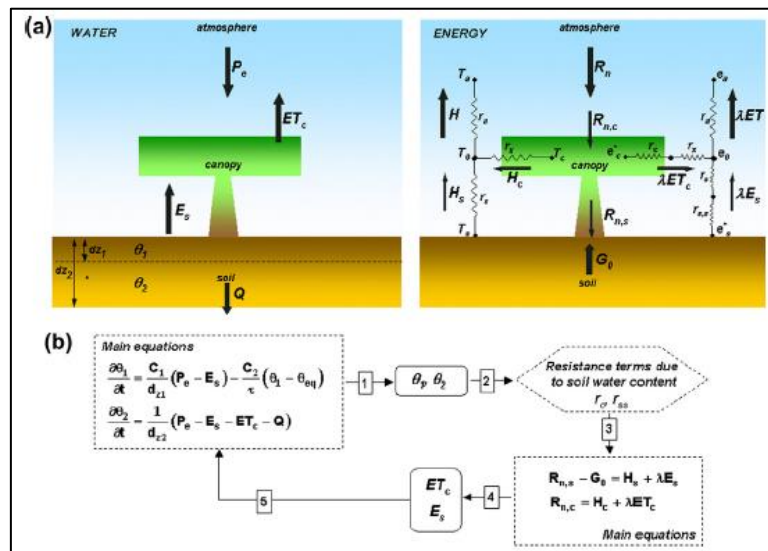


Figure 3 a) Schéma conceptuel du modèle force-restore ; b) Principales équations - *Camalleri et al., 2010*

Néanmoins, ce type de modèle requiert l'ajustement d'un certain nombre de paramètres (C_1 et C_2 dans l'exemple du modèle de *Camalleri et al., 2010 ; Figure 3*) à partir des propriétés physiques du sol.

2.2.2.2 Modélisation hydrodynamique du sol

Il existe des modèles réservoirs simples, sans fondements physiques, pour représenter les variations du stock d'eau dans le sol (cf Figure 2, *Locatelli et al., 2014 ; Willuweit and O'Sullivan, 2013*).

Ces modèles simples fournissent de bons résultats mais nécessitent d'ajuster des paramètres sur des données mesurées. Les modèles à base physiques requièrent une paramétrisation plus complexe mais permettent de tenir compte des lois physiques à l'œuvre dans un sol à saturation variable.

Dans ces modèles à base physique, on retrouve habituellement l'équation de Richards (1931) pour décrire les écoulements en zone non saturée (Berthier et al., 2004 ; Gerke and Van Genuchten, 1993a-b ; Philippe et al., 2011 ; Skala et al., 2020 ; Thiéry et al., 2015) et la loi de Darcy pour les écoulements en milieu saturé (Gerke and Van Genuchten, 1993a-b). L'équation de Richards décrit la variation de la teneur en eau en fonction de la conductivité hydraulique et de la charge de pression :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right)$$

Équation 2.30

Où θ est la teneur en eau volumétrique (m^3/m^3), t le temps (s), z la profondeur (m), K la conductivité hydraulique (m/s) et h la charge de pression (m). Pour être résolue, l'équation de Richards requiert une discrétisation spatiale (∂z) du milieu dans lequel elle est appliquée.

Cette description des écoulements en milieu non saturé (cf Équation 2.30) nécessite de tenir compte de la teneur en eau (θ) du milieu pour calculer les valeurs de la charge de pression (h) et la perméabilité (K). Il existe plusieurs lois qui permettent de décrire les relations $\theta(h)$ et $K(\theta)$, on s'intéresse ici aux deux lois les plus utilisées en hydrologie (Figure 4):

- La loi de Brooks and Corey (1964) exprime la variation de teneur en eau d'un sol en fonction de la charge de pression via la formule suivante :

$$\theta(h) = \frac{h^{-b}}{h_b^{-b}}$$

Équation 2.31

Avec θ la teneur en eau volumique du sol (m^3/m^3), h la charge (m) et h_b la charge hydraulique d'entrée d'air (m) et b un paramètre caractéristique de la nature du sol.

La relation donnant la perméabilité en fonction de la teneur en eau s'écrit :

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2b}$$

Équation 2.32

Où K est la perméabilité de la zone non saturée (m/s), K_s la perméabilité à saturation (m/s), θ la teneur en eau de la zone non saturée, θ_r et θ_s la teneur en eau résiduelle et à saturation du sol (ces valeurs dépendent du type de sol, m^3/m^3).

- La loi de Van Genuchten (1980) est la suivante :

$$\theta(h) = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^m$$

Équation 2.33

Avec α (cm^{-1}) et n sont des paramètres ajustés sur des courbes de rétention en eau (ces paramètres dépendent de la nature du sol) et $m = 1-1/n$.

La perméabilité s'écrit :

$$K(\theta) = K_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left(1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2$$

Équation 2.34

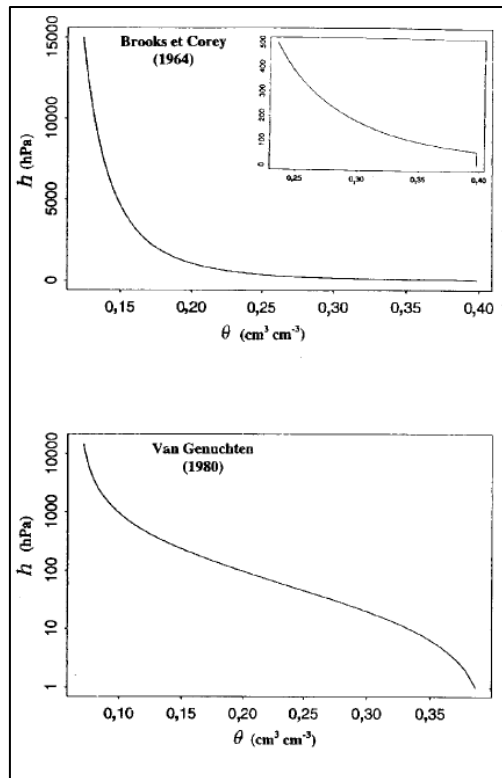


Figure 4 Représentation schématique de la loi de Brooks et Corey et de la loi de Van Genuchten (Bastet, 1998)

La prise en compte de l'état hydrique de la zone non saturée est très importante dans la simulation du fonctionnement du sol. En effet, des phénomènes de succions interviennent dans la zone non saturée et peuvent jouer un rôle important dans le fonctionnement hydrique du sol (remontées capillaires lorsque la nappe est peu profonde, cf. paragraphe 2.2.1.4).

La transpiration par les racines du sol est également une composante importante des processus qui ont lieu dans le sol. En effet, les végétaux présents à la surface du sol prélèvent, grâce à leurs racines, l'eau contenue dans les pores du sol pour leurs développements. Cette eau est ensuite transpirée vers l'atmosphère. Il existe de nombreuses approches de modélisation de l'extraction racinaire de l'eau du sol. Le modèle de Feddes est relativement simple et largement utilisé (Braud *et al.*, 2005 ; Feddes *et al.*, 2001) :

$$Tr = \frac{h_{racine} - h_{pf}}{h_{cc} - h_{pf}} \times d_{racine} \times ETP$$

Équation 2.35

Avec Tr la transpiration, h_{racine} la charge de pression dans la zone racinaire (m), h_{pf} la charge de pression correspondant au point de flétrissement des plantes (150 m), h_{cc} la charge de pression à la capacité au champ (3,3 m), d_{racine} la densité racinaire (%) et ETP l'évapotranspiration potentielle (m). La transpiration représente une partie importante du flux d'évapotranspiration réelle (ETR) décrit ci-dessus. Cette équation permet ainsi de déterminer la partie souterraine de l'ETR à partir de l'ETP et des conditions hydriques du sol.

La transpiration des végétaux est spatialement discrétisée dans le sol via la densité racinaire (variable en fonction de la profondeur) et dépend fortement de la quantité d'eau disponible dans les pores du sol. Ainsi, les modèles physiques apparaissent comme les plus représentatifs des phénomènes physiques qui interviennent dans le sol.

2.2.3 Choix du modèle

Comme indiqué précédemment, afin de modéliser les flux d'évapotranspiration réelle des surfaces végétalisées du VOP, plusieurs conditions doivent être respectées par le modèle hydrologique retenu:

- Interception des précipitations par la canopée du végétal et évaporation de l'eau présente sur la surface du végétal.
- Redistribution des flux d'eau en surface du sol avec prise en compte d'arrivées d'eaux de ruissellement de surface. Le modèle sélectionné devra être capable de déterminer la part d'eau infiltrée dans le sol, la part d'eau évaporée à la surface du sol et la part d'eau qui va ruisseler par refus d'infiltration.
- Ecoulements d'eau dans un sol (homogène ou hétérogène) à saturation variable dans le temps en tenant compte de la transpiration des végétaux par leurs racines, arrivées possible d'eau à une certaine profondeur provenant des réseaux ou du sol en amont.
- Evapotranspiration pour différentes strates végétales (arbres, plantes basses et gazon).

Dans le cadre de cette étude, une certaine importance est accordée à l'interception des précipitations par la canopée du végétal et au bilan d'eau en surface du sol. Les modèles force-restore paraissent attractifs pour représenter le fonctionnement hydrodynamique de ces compartiments, de par la prise en compte simultanée du bilan radiatif et hydrique à la surface du sol. Néanmoins, ces modèles comportent un grand nombre de paramètres qui nécessitent d'être ajustés sur des données de calage. De telles données ne sont pas disponibles pour le site du village olympique et paralympique. Une approche plus classique (cf paragraphe 2.2.2.1.1 et 2.2.2.1.2) est envisagée pour le bilan d'eau dans ces réservoirs.

Concernant la modélisation des écoulements d'eau et des variations de saturation en eau dans le sol, les modèles non-physiques sont mis de côté en raison de leur manque de représentativité physiques dans les processus de remplissage et de vidange des différents réservoirs. De plus, ces modèles ne permettent pas de modéliser de remontées capillaires dans le sol. Hors, la Seine étant proche du VOP, il paraît nécessaire de prendre en compte la potentielle remontée d'eau depuis la zone saturée (pour de faibles épaisseurs de ZNS) vers la zone racinaire, particulièrement en période estivale quand les précipitations sont plus rares ou principalement évaporées à la surface du sol.

Notre choix se porte donc sur les modèles physiques classiques et plus particulièrement sur une discrétisation de la zone non saturée en plusieurs couche afin d'appliquer l'équation de Richards.

L'approche sélectionnée basée sur le modèle URBS (*Morena, 2004 ; Pophillat, n.d*), ainsi que son adaptation pour cette étude, est présentée dans le chapitre suivant.

2.3 Présentation du modèle MARIE de Transfert Sol Végétation Atmosphère

Le modèle MARIE développé dans le cadre de cette étude est basé sur une partie du code URBS. La partie qui nous intéresse est celle dédiée à la modélisation des flux d'eau en surface (interception et surface du sol) et dans le sol. Le premier paragraphe de ce chapitre présente cette partie du code, le second paragraphe introduit les développements effectués afin d'adapter cette approche aux surfaces végétalisées du VOP et le troisième paragraphe propose une comparaison du code développé avec un modèle détaillé de référence largement utilisé dans les études hydrologiques (Hydrus, *Simunek et al.*, 2009).

2.3.1 Présentation de URBS-PROD

Le modèle URBS n'est pas utilisé tel quel pour le calcul des flux d'évapotranspiration réelle à l'échelle du VOP. En effet, ce modèle contient de nombreux modules (comme URBS-PROD présenté ici) dont les interactions viendraient ralentir les temps de calculs. De plus, dans le cas de notre étude, les calculs ne s'effectuent plus à l'échelle d'une parcelle urbaine (surface naturelle + surface urbaine + réseaux) mais seulement à l'échelle de surfaces naturelles végétalisées. D'où la proposition de travailler avec le module de production de URBS afin de modéliser uniquement les flux d'eau en surface et dans le sol, en limitant les interactions avec les autres modules présents dans URBS.

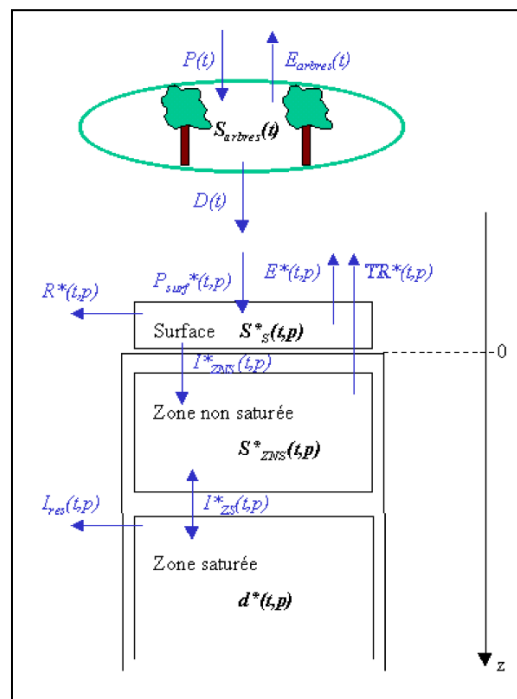


Figure 5 Schéma d'un profil vertical représentant le fonctionnement de URBS-PROD (Morena, 2004)

L'ensemble des équations de ce module URBS-prod sont présentés dans les travaux de *Morena* (2004) et de *Rodriguez et al.* (2008). L'objectif de ce paragraphe est de présenter les principales équations régissant l'actualisation du stock d'eau dans les différents réservoirs d'une unité spatiale (Interception, surface ZNS - Figure 5). Ce modèle permet de calculer les flux d'eau à l'interface Atmosphère-Végétation-Sol pour des surfaces urbaines imperméables ou perméables, végétalisées ou non).

2.3.1.1 Interception des précipitations par les végétaux

Le modèle utilisé pour décrire l'interception des précipitations par les végétaux est celui de *Calder* (1977). A chaque pas de temps, le réservoir se remplit par la pluie brute (P_{brute}) et se vidange par l'évaporation à la surface du végétal (E_{veg}) et par le drainage au travers de la canopée (P_{ssveg}). Ce réservoir possède une capacité maximale ($S_{int-max}$) de stockage (ex : 1,3 mm dans le cas d'un gazon ou 0,3 mm dans le cas du feuillage d'un arbre – valeurs issues de *Grimmond and Oke*, 1991). Tant que le stock d'eau (S_{int}) n'atteint pas cette capacité maximale, le réservoir stocke l'eau et seulement l'évaporation vidange le réservoir. L'évaporation est alors proportionnelle à la hauteur d'eau dans le réservoir (stock d'eau à l'instant t/stock d'eau maximal du réservoir ; *Viaud et al.*, 2005) et à l'évapotranspiration potentielle (Équation 2.36). Lorsque cette capacité maximale est atteinte, l'évaporation est égale à l'évapotranspiration potentielle (*Morena*, 2004), le surplus d'eau (D) est drainé sous la canopée du végétal jusqu'au réservoir à la surface du sol.

Pour résumer :

Si $S_{int}(t-1) \leq S_{int-max}$:

$$E_{veg}(t) = \min\left[\frac{S_{int}(t-1)}{S_{int-max}} \times ETP(t), S_{int}(t-1)\right]$$

Équation 2.36

$$D(t) = 0$$

Équation 2.37

Si $S_{int}(t-1) > S_{int-max}$:

$$E_{veg}(t) = \min[ETP(t), S_{int}(t-1)]$$

Équation 2.38

$$D(t) = a \times (S_{int}(t-1) - S_{int-max})$$

Équation 2.39

Avec a le paramètre de la loi de drainage (min^{-1})

Le paramètre $S_{int-max}$ est ajusté en fonction des saisons pour tenir compte des variations de la densité du feuillage (*Grimmond and Oke*, 1991) entre l'hiver (octobre-mars) et l'été (avril-septembre).

Le bilan de ce réservoir à chaque pas de temps s'écrit :

$$S_{int}(t) = S_{int}(t - 1) + P(t) - E_{veg}(t) - D(t)$$

Équation 2.40

2.3.1.2 Surface du sol

Les processus de surface sont représentés par un réservoir du même type que le réservoir d'interception des précipitations par les végétaux, avec également une capacité maximale de stockage ($S_{surf-max}$). Ce réservoir est directement alimenté par l'eau de pluie qui atteint la surface (P_{surf}) et vidangé par évaporation à la surface du sol (E_{surf}), par infiltration vers la zone non saturée du sol (Inf) et par ruissellement de surface (R).

A chaque pas de temps, le volume d'eau évaporé est calculé à partir du volume d'évapotranspiration potentielle (données d'entrée) proportionnellement à la hauteur d'eau dans le réservoir et au stock maximum.

Si $S_{surf}(t) \leq S_{surf-max}$:

$$E_{surf}(t) = \min\left[\frac{S_{surf}(t-1)}{S_{surf-max}} \times ETP(t), S_{int}(t - 1)\right]$$

Équation 2.41

Si $S_{surf}(t) > S_{surf-max}$:

$$E_{surf}(t) = \min[ETP(t), S_{int}(t - 1)]$$

Équation 2.42

Le réservoir de surface se vidange par infiltration vers la zone non saturée du sol uniquement lorsque le stock de surface n'est pas nul. L'infiltration est calculée en ne considérant que les forces gravitaires. Ainsi, l'infiltration vers la zone non saturée est limitée :

- Soit par la capacité d'infiltration de surface, qui représente la quantité d'eau qui peut être infiltrée par gravité dans le sol durant un pas de temps. Cette capacité d'infiltration dépend donc directement de la conductivité hydraulique à saturation du sol (paramètre du modèle) et de la capacité de stockage de la zone non saturée (capacité de stockage max de la ZNS – stock d'eau actuel de la ZNS).
- Soit par la quantité d'eau disponible dans le réservoir de surface $S_{surf}(t-1)$.

Le réservoir de surface peut se vidanger par ruissellement de surface (R) lorsque celui-ci atteint sa capacité maximale de stockage :

$$R(t) = \max[0, S_{int}(t - 1) - S_{max}]$$

Équation 2.43

Ainsi, l'équation de bilan de ce réservoir s'écrit (le volume d'eau infiltré est calculé dans la partie ZNS) :

$$S_{surf}(t) = S_{surf}(t - 1) + P_{surf}(t) - E_{surf}(t) - Inf(t) - R(t)$$

Équation 2.44

2.3.1.3 Représentation du sol

La fonction de production de URBS présentée dans les travaux de *Morena* propose une description relativement simple de l'état hydrique de la zone non saturée (ZNS). Celle-ci est modélisée par un unique réservoir de teneur en eau moyenne qui échange de l'eau avec un réservoir de zone saturée (ZS). De récentes implémentations sur le code URBS permettent de discrétiser la ZNS (ainsi que la ZS ; *Pophillat et al., n.d*) en différents réservoirs d'épaisseurs et propriétés physiques variables. Cette meilleure prise en compte de l'état hydrique de la ZNS permet de décrire plus précisément les flux d'eau qui l'affectent, et notamment l'évapotranspiration.

Les échanges entre les différentes couches de la ZNS s'effectuent suivant la loi de Darcy (gradient de pression entre les deux réservoirs). La conductivité hydraulique de la ZNS est calculée en tenant compte de l'état de saturation par la loi de *Brooks and Corey* (1964), présentée précédemment.

La zone non saturée se vidange suivant deux processus :

- Le flux d'échange entre la ZNS et la ZS, il peut être positif (alimentation de la ZS) ou négatif (remontées capillaires depuis la ZS). Ce flux d'échange est calculé à partir de la loi de Darcy en milieu non saturé appliquée entre un point représentatif de la ZNS (centre des réservoirs de la ZNS) et la profondeur moyenne de la ZS. Les épaisseurs des réservoirs de la ZNS sont de l'ordre de quelques dizaines de cm.
- La transpiration de la végétation, l'eau contenue dans le sol peut être prélevée par les racines des végétaux pour leur développement. Cette eau est ensuite transpirée vers l'atmosphère. Le flux de transpiration (T) est calculé à chaque pas de temps par l'équation de *Feddes* (2001), introduite dans la partie précédente.

Ainsi, à chaque pas de temps, le modèle URBS calcule l'évapotranspiration réelle d'une surface (évaporation sur le végétal et à la surface du sol, transpiration du végétal), le ruissellement de surface, les variations hydriques de la ZNS à différentes profondeurs et le flux d'échange entre la ZNS et la ZS.

2.3.2 Adaptation d'URBS-PROD aux surfaces végétalisées du VOP

On fait ici l'hypothèse d'un niveau de zone saturée fixe en raison de la proximité du VOP à la Seine (limite à potentiel imposé). Cette hypothèse permet de ne pas s'encombrer de la modélisation des variations du niveau de la zone saturée et ainsi de simplifier les interactions entre la zone saturée et la zone non saturée.

Ainsi, quelques modifications sont apportées à la fonction de production de URBS afin de prendre en compte la présence de strates végétales multiples sur les surfaces végétalisées du VOP. Ce nouveau code est renommé **MARIE** pour **Modelling Actual Runoff Infiltration Evapotranspiration**.

2.3.2.1 Ajout de la loi de Van Genuchten

Le code URBS calcule les conductivités hydrauliques des différentes couches du sol en fonction de leurs états hydriques (charge de pression) à partir de la loi de Brooks and Corey (1964) précédemment présentée (cf partie modélisation hydrodynamique). Cette loi de type puissance présente la particularité de linéariser la courbe $h(\theta)$ à l'approche de la saturation.

La loi de Van Genuchten and Mualem (1980) est largement utilisée en hydrologie et hydrogéologie pour la modélisation des écoulements de surfaces et souterrains en milieu à saturation variable. Il est possible de trouver dans la littérature des valeurs des paramètres de cette loi pour un grand nombre de matériaux. La loi de Van Genuchten est donc ajoutée au code MARIE. Cet ajout permet d'élargir le panel de comportements hydrodynamique pouvant être modélisés.

L'utilisation de la loi de Van Genuchten implique une modification du flux d'échange entre la zone non saturée (ZNS) et la zone saturée (ZS) par rapport à la loi de Brooks et Corey.

En effet, un des paramètres propres à la loi de Brooks et Corey est la succion d'entrée d'air, qui caractérise la frange capillaire au-dessus de la ZS. Dans le cas où la loi de Van Genuchten est sélectionnée, ce terme est supprimé de l'expression du flux entre la ZNS et la ZS.

Flux d'échange avec Brooks et Corey :

$$flux\ échange = K \times \left(1 + \frac{\psi_E - \psi}{\frac{épaisseur\ réservoir}{2}} \right)$$

Équation 2.45

Avec K la conductivité hydraulique calculée pour une saturation variable (m/s), ψ_E la succion d'entrée d'air à la base de la ZNS (m) et ψ la succion dans le dernier réservoir de la ZNS (m), l'épaisseur du réservoir prise en compte dans cette équation est celle du dernier réservoir de la ZNS.

Flux d'échange avec Van Genuchten :

$$flux\ échange = K \times \left(1 - \frac{\psi}{\frac{épaisseur\ réservoir}{2}} \right)$$

Équation 2.46

Du fait de l'absence de frange capillaire au-dessus de la ZS, l'expression du flux d'échange avec la loi Van Genuchten pourrait conduire à une surestimation de ce flux (remontées capillaires ou recharge de la nappe) par rapport à une paramétrisation équivalente avec la loi de Brooks-Corey. Les tests présentés dans le chapitre suivant, entre ce nouveau code (MARIE) et un code de référence en hydrologie, permettront de quantifier cette surestimation.

2.3.2.2 Prise en compte de strates végétales multiples

Le code URBS permet de calculer l'ET à l'échelle d'une parcelle urbaine en prenant en compte l'interception de la pluie par les arbres. Mais l'interception de la pluie par les plantes basses (gazon, vivaces et arbustes) n'est pas explicitement représentée.

Dans le code MARIE, la végétation est séparée en deux strates : strate haute (arbres) et strate basse (gazon, plantes basses et arbustes). Pour chaque espace végétalisé, les surfaces occupées par ces deux strates sont identifiées (la strate haute et la strate basse ne se superposent pas, Figure 6). Le code calcule les flux d'eau sur une même colonne 1D en différenciant l'interception et la transpiration de chacune des deux strates. Un profil racinaire différent est défini pour chacune de ces strates. La densité racinaire des deux profils est renseignée dans les réservoirs de la zone racinaire. La transpiration de chaque strate est donc en partie dépendante de son profil racinaire et du rapport de surface entre la superficie de la strate et la surface totale de la zone végétalisée.

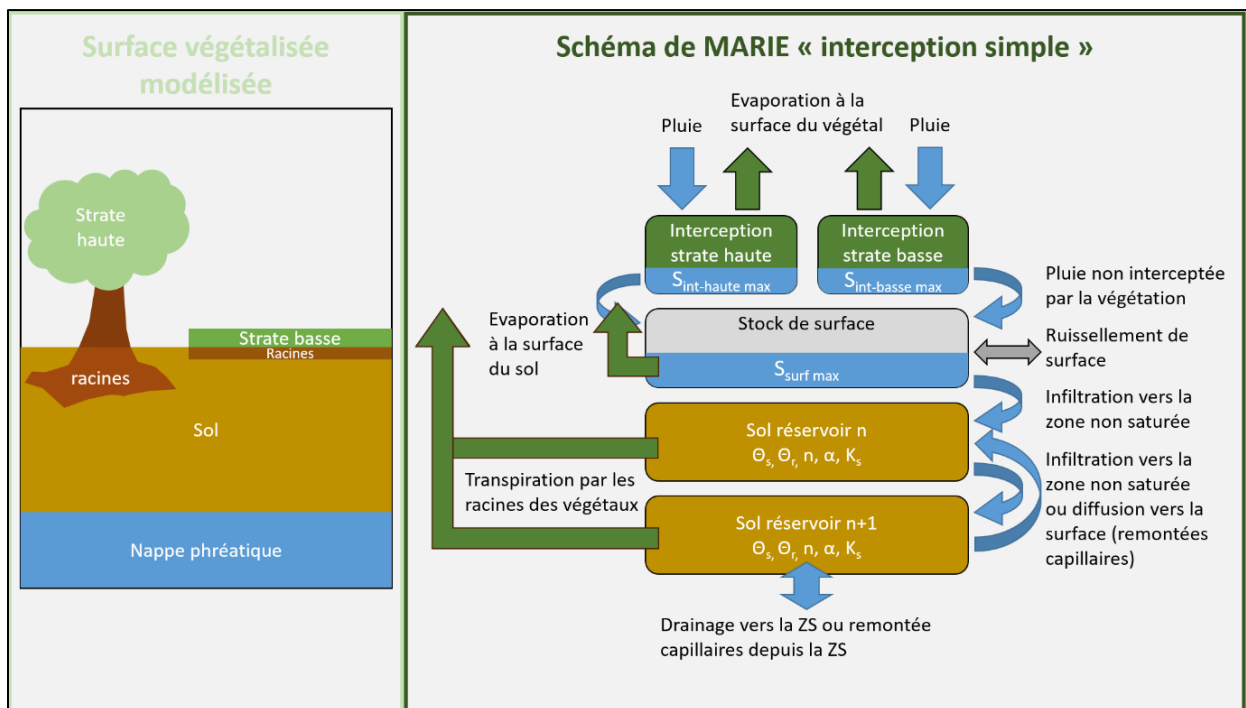


Figure 6 Schéma conceptuel du modèle MARIE

2.3.3 Paramétrisation et fonctionnement de MARIE

Les principaux paramètres utilisés dans le code MARIE sont issus du code URBS (stocks maximums des réservoirs interception et surface) et des lois physiques permettant de calculer la conductivité hydraulique du sol sous saturation variable (loi de Van Genuchten et loi de Brooks-Corey).

Le pas de temps de calcul peut être changé par l'utilisateur. Les données d'entrées sont fournies au pas de temps horaire pour cette étude. Une réduction du pas de temps peut être effectuée jusqu'au pas de temps d'une minute.

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) utilisée dans le code MARIE sont issues du calcul de l'ETP par la formule de Penman-Monteith (voir description de la méthode dans la partie 1 de ce rapport). Le rayonnement net utilisé dans cette formule est calculé à partir du rayonnement global fourni par Météo France, éventuellement corrigé pour tenir compte des ombrages des bâtiments et des arbres (voir paragraphe 3.4.2.1.1). L'ETP est calculée pour chaque strate. La demande évapotranspiratoire totale du modèle est la somme de l'ETP de chaque strate pondérée des surfaces occupées par ces deux groupes de végétation.

Pour chaque pas de temps, l'architecture du calcul est la suivante :

- Calcul du bilan d'eau dans les réservoirs d'interception de la strate haute et de la strate basse (évaporation à la surface du végétal, stock et drainage vers le réservoir sous-jacent)
- Calcul du bilan d'eau dans le réservoir de surface (arrivée d'eau depuis les réservoirs d'interception et depuis les surfaces de ruissellement en amont, évaporation à la surface du sol, stock, infiltration possible vers la ZNS et ruissellement)
- L'actualisation des teneurs en eau de la ZNS se fait depuis le dernier réservoir (à l'interface ZNS-ZS) jusqu'au réservoir de surface. Ce sens d'actualisation des teneurs en eau permet de calculer la disponibilité de la ZNS avant l'infiltration depuis le réservoir de surface et ainsi de mieux représenter les flux dans la ZNS lors de fortes précipitations
- Infiltration depuis le réservoir de surface vers la ZNS en fonction de la quantité d'eau disponible dans le premier réservoir de la ZNS, actualisation de la teneur en eau du premier réservoir de la ZNS

2.3.4 Comparaison de MARIE avec Hydrus

Une comparaison avec Hydrus 1D est effectuée afin de s'assurer que les développements précédemment présentés, notamment l'implémentation de la loi de Van Genuchten, n'ont pas eu d'impact sur la capacité du code à représenter le fonctionnement hydrodynamique du sol, et aussi que MARIE représente correctement les transferts d'eau au sein de la ZNS. Hydrus 1D est un code de modélisation qui résout par la méthode des éléments finis les équations des écoulements d'eau et du transport de soluté dans un milieu 1D à saturation variable.

Deux types de condition météorologique sont soumis aux deux codes sur une colonne de sol homogène :

- Un cas théorique avec une alternance d'épisodes pluvieux et de périodes d'évapotranspiration, suivie d'une période d'assèchement de la colonne par évapotranspiration.

- Un cas réel qui correspond à des données météorologiques mesurées à la station du Bourget sur la période 2019.

Dans ce chapitre, le terme d'évapotranspiration correspond uniquement à la transpiration des végétaux, l'interception et l'évaporation à la surface du sol étant désactivées dans cette version du code MARIE.

2.3.4.1 Cas théorique

Ce premier test a pour objectif de confronter le code MARIE à un cas extrême durant lequel la colonne de sol sera soumise à un flux entrant proche de la conductivité hydraulique à saturation (K_s) du sol. Ce test dure 200 jours avec deux périodes :

- 50 jours d'alternance entre 5 jours de pluie proche de K_s ($K_s = 7,6$ mm/h, pluie = 5,3 mm/h) sans ETP et 5 jours d'ETP à 0,2 mm/h sans pluie.
- 150 jours sans pluie avec uniquement de l'ETP à 0,2 mm/h.

On s'intéresse ici à la comparaison entre le code Hydrus et la partie du code MARIE qui représente les transferts d'eau dans la ZNS. Ainsi, les réservoirs d'interception des précipitations par la canopée du végétal sont retirés. L'eau de pluie atteint directement le réservoir de surface qui possède une capacité maximale identique à celle définie dans Hydrus (1 mm). Au-delà de cette capacité maximale, l'eau ne peut être stockée et ruisselle hors du modèle. On se concentre sur le fonctionnement de la ZNS, l'évaporation du réservoir de surface est également désactivée, de telle sorte que la transpiration soit la seule composante de l'évapotranspiration dans MARIE et Hydrus.

La zone non saturée (ZNS) fait 4 mètres de profondeur. Un sol de type Limon (Tableau 3 et Tableau 4) est choisi sur l'ensemble de la colonne (conductivité hydraulique intermédiaire entre le sable et l'argile) avec une profondeur des racines de 50 cm. Dans le code MARIE, cette zone non saturée est divisée en plusieurs réservoirs de 25 cm d'épaisseur (16 réservoirs).

L'ensemble des racines de la végétation se situe ainsi dans les deux premiers réservoirs de la ZNS. Pour Hydrus, les 4 m de ZNS sont discrétisés en mailles de 5 cm.

Tableau 3 Paramètres hydrodynamiques de la loi de Brooks and Corey ($\alpha = hb$ et $n = b$, voir Équation 2.31 et Équation 2.32)

Type de sol	θ_r	θ_s	α (1/m)	n	K_s (m/s)
Sable limoneux	0,035	0,437	0,087	2,11	1,70E-05
Loam sableux	0,041	0,453	0,147	3,106	7,19E-06
Limon	0,015	0,501	0,207	4,74	1,89E-06
Argile sableuse	0,109	0,479	0,29	5,95	3,33E-07
Argile limoneuse	0,056	0,475	0,342	7,87	2,50E-07

Tableau 4 Paramètres hydrodynamiques de la loi de Van Genuchten

Type de sol	θ_r	θ_s	α (1/m)	n	Ks (m/s)
Sable limoneux	0,057	0,41	12,4	2,28	4,05E-05
Loam sableux	0,065	0,41	7,5	1,89	1,23E-06
Limon	0,034	0,46	1,6	1,37	6,94E-07
Argile sableuse	0,1	0,38	2,7	1,23	3,33E-07
Argile limoneuse	0,07	0,36	0,5	1,09	5,55E-08

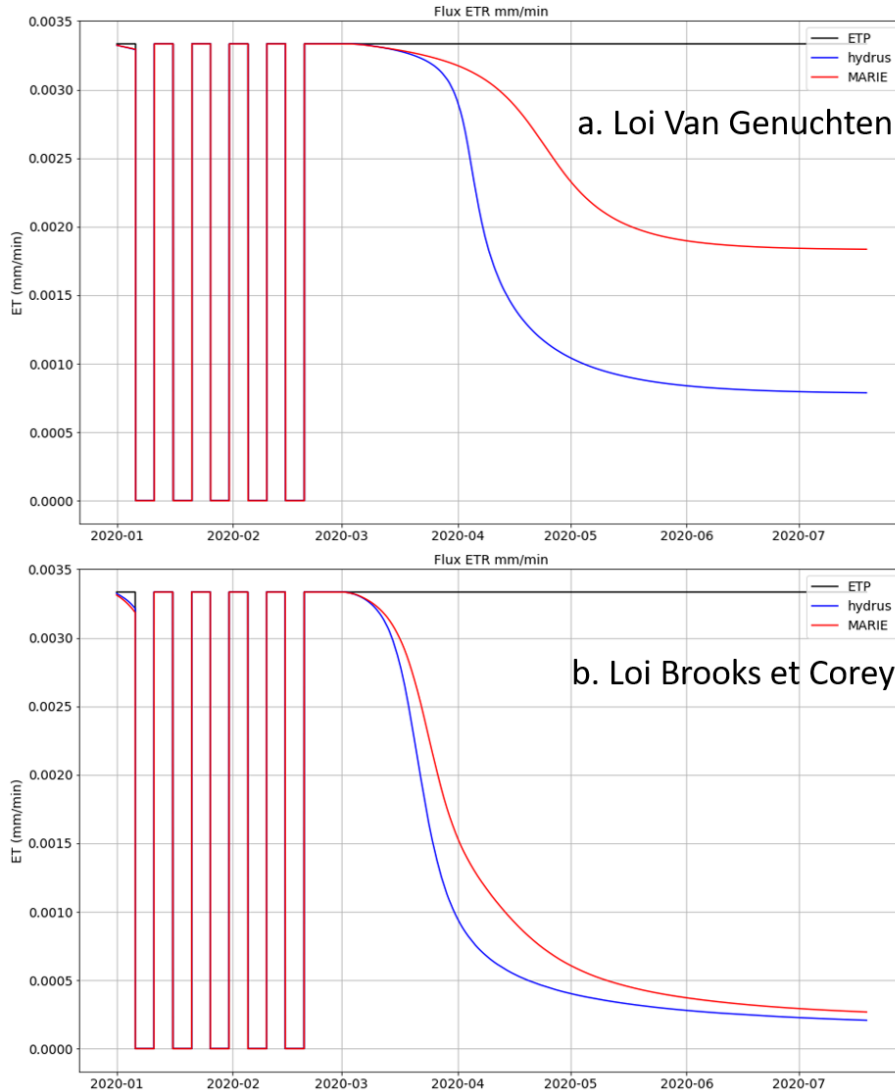


Figure 7 Flux d'évapotranspiration réelle simulée par MARIE (courbe rouge) et Hydrus (courbe bleue) pour les deux lois de rétention (a. loi Van Genuchten, b. loi Brooks et Corey)

Les premiers calculs ont montré que le pas de temps horaire n'était pas suffisamment fin pour représenter correctement la dynamique du sol dans MARIE (oscillations importantes des teneurs en eau dans les réservoirs de la ZNS). Le pas de temps de calcul de MARIE est donc affiné à 1 minute afin de mieux représenter les variations rapides de la teneur en eau lors de l'arrivée des précipitations.

Les résultats pour cette première simulation sont présentés (Figure 7) pour les deux lois (Brooks et Corey - BC, Van Genuchten - VG). On choisit une perméabilité à saturation du sol identique pour les

deux lois de rétention du sol (K_s Limon = 2,12E-06 m/s). La première date de simulation est assimilée au 01/01/2020 afin de simplifier la lecture des graphiques (Figure 7).

L'évapotranspiration réelle simulée par les deux codes est identique lors des 50 premiers jours, et cela pour les deux lois de rétention en eau du sol. Le sol transpire via les racines à un flux équivalent à l'évapotranspiration potentielle (ETP, courbe noire sur la Figure 7). Une fois la période de pluie terminée (50 j), l'évapotranspiration réelle des deux modèles devient inférieure à l'ETP à partir du mois de Mars.

Bien que le schéma de transpiration de l'eau par les racines du sol soit le même pour les deux codes, deux comportements différents sont observables lors de la période de séchage en fonction de la loi considérée :

- Loi de Van Genuchten (Figure 7a) : L'ETR simulée par le code MARIE est nettement supérieure à celle simulée par le code de référence (Hydrus).
- Loi de Brooks et Corey (Figure 7b) : Les deux codes simulent une ETR semblable.

L'ETR simulée par Hydrus est différente en fonction de la loi considérée. L'utilisation de la loi BC donne une ETR plus faible en fin de simulation par rapport à celle simulée avec la loi VG.

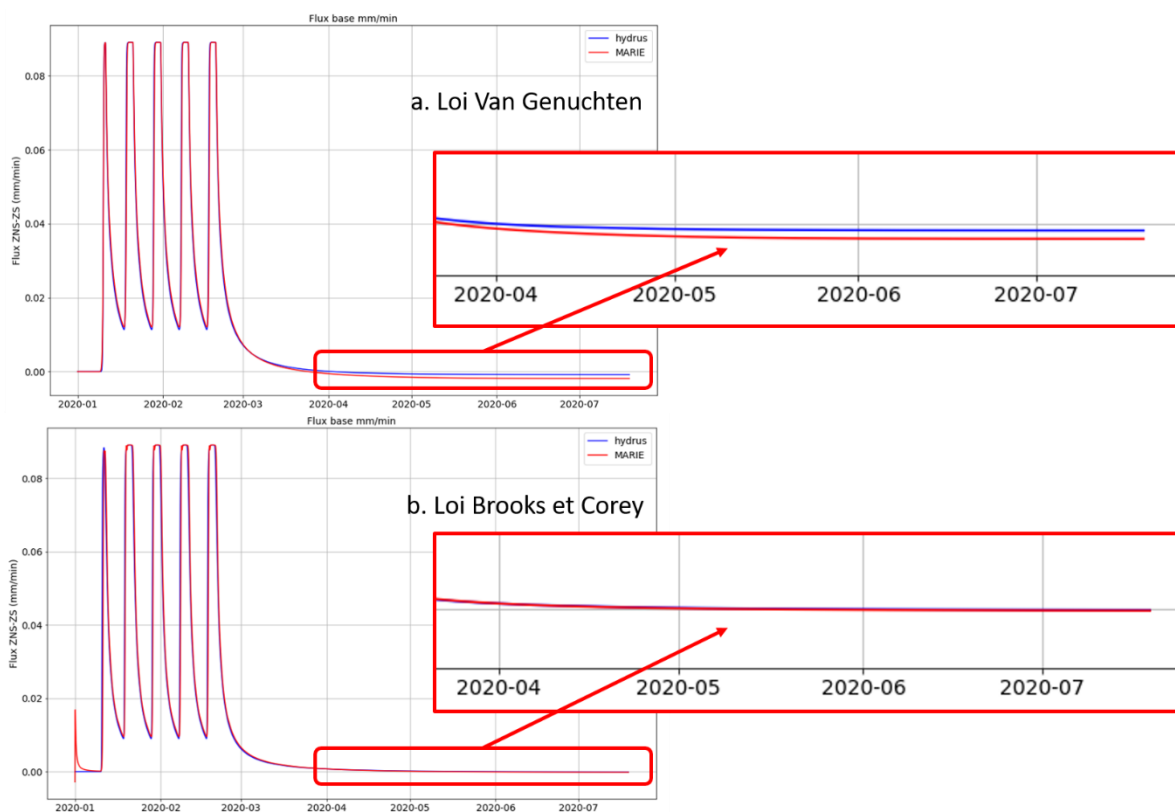


Figure 8 Flux d'eau à la base de la ZNS (positif : recharge de la nappe ; négatif : remontées capillaires depuis la nappe) simulés par MARIE (courbe rouge) et Hydrus (courbe bleue) pour les deux lois de rétention (a. Loi Van Genuchten, b. Loi Brooks et Corey)

La Figure 8 illustre l'impact de cette différence entre les deux lois sur le flux d'eau à l'interface ZNS-ZS. En effet, la loi VG (Figure 8a, Tableau 5) génère d'avantage de remontées capillaires (flux négatif) que

la loi BC (Figure 8b, Tableau 5). Ces remontées capillaires peuvent alimenter la zone racinaire en eau et ainsi supporter le flux de transpiration.

Les remontées capillaires générées avec la loi VG sont plus élevées avec le code MARIE qu'avec le code Hydrus (Figure 8a, Tableau 5). Cela peut s'expliquer par la différence de discrétisation spatiale de la ZNS entre les deux modèles. En effet, le code MARIE discrétise la ZNS en réservoir de 25 cm tandis que Hydrus discrétise la ZNS en maille de 5 cm. La représentation de la courbe de VG par Hydrus est ainsi plus fine que celle de MARIE. Un surdimensionnement de la taille des réservoirs pourrait alors conduire à une surestimation des flux d'eau dans la ZNS et à l'interface ZNS-ZS. Ce problème de surdimensionnement de la taille des réservoirs ne génère pas autant de différence entre les deux codes puisque la loi BC est plus linéaire que la loi VG.

Tableau 5 Bilans d'eau pour la comparaison de MARIE et Hydrus sur le cas théorique (Limon)

Cas théorique (Limon)				
mm	Van Genuchten		Brooks et Corey	
	Hydrus	MARIE	Hydrus	MARIE
Pluie	3205	3205	3205	3205
ETR	478	656	334	374
Recharge	2879	2984	2980	2988
Remontées capillaires	99	252	3	10

Pour conclure sur les résultats de ce cas théorique (Tableau 5) :

- Les flux à l'interface ZNS-ZS (recharge de la nappe et remontées capillaires) et les flux d'ETR sont plus élevés avec le code MARIE qu'avec le code Hydrus. On suppose que la discrétisation spatiale plus grossière dans le code MARIE provoque une surestimation de ces flux. Cela est d'autant plus vrai à proximité de l'interface ZNS-ZS dans le cas de la loi VG pour laquelle la courbe $h(\theta)$ est fortement non linéaire par rapport à la loi de BC.
- La loi de VG génère des remontées capillaires plus importantes que la loi de BC. Ces remontées capillaires semblent alimenter la zone racinaire en eau et supporter le flux de transpiration.
- Les calculs avec la loi BC donnent des résultats qui coïncident pour les deux codes.

2.3.4.2 Cas réel

L'objectif de ce second cas est de tester le code MARIE avec des données météorologiques correspondant à la réalité et confronter les résultats simulés par ce code aux résultats simulés par le code de référence Hydrus. Comme pour le cas théorique, les lois de Van Genuchten (VG) et de Brooks et Corey (BC) sont testées (cf. Tableau 3 et Tableau 4 pour les paramètres de ces lois). Les données de précipitations mesurées au pas de temps horaire sur la station du Bourget sont utilisées. Les données d'évapotranspiration potentielle utilisées ont été calculées par la méthode décrite dans la partie 1 à partir des données météorologiques mesurées sur la station du Bourget. Deux années sont simulées à partir de ces données (2018-2019), mais les résultats ne sont présentés que pour l'année 2019 (période sèche intense de Juillet à Septembre).

Les résultats seront donc présentés pour l'année 2019 entière et sur la période de sécheresse qui permet de tester le code MARIE lors d'un stress hydrique.

Les mêmes paramètres de calcul (pas de temps) et de la ZNS (discrétisation spatiale, profondeur racinaire) sont conservés pour ce second cas test. Un sol de type Limon est premièrement testé (cas théorique), puis un sol de type sable limoneux sera utilisé afin d'expérimenter le code avec un sol de plus faible capacité de rétention de l'eau.

2.3.4.2.1 Limon

Le type de sol du précédent cas (Limon) est ici testé en conditions météorologiques réelles. Les résultats sont présentés dans un premier temps pour la période complète puis pour la période de sécheresse qui nous intéresse.

Période complète

Les flux d'ETR simulés par les codes Hydrus et MARIE (Figure 9) diffèrent en fonction de la loi considérée :

- Loi VG : on distingue deux droites sur lesquelles les points s'alignent. Une première droite $y = x$ qui indique une bonne correspondance entre les flux d'ETR simulés par les deux modèles. Tous les points qui se situent sur cette droite (en bleu) correspondent aux données de la période Octobre-Juin (comprends les mois suivants : 01, 02, 03, 04, 05, 06, 10, 11, 12). La majorité des points en rouge (valeurs de Juillet à Septembre) se trouvent sous la première droite (valeurs d'Octobre à Juin) ce qui témoigne d'une surestimation des flux d'ETR par le code MARIE par rapport au code Hydrus. Cette surestimation des flux d'ETR par MARIE intervient donc principalement en période estivale (Figure 9), lorsque la demande évapotranspiratoire est forte et déclenche des remontées capillaires pour alimenter la zone racinaire. Cette observation est en accord avec le bilan des flux (Tableau 6) : les remontées capillaires simulées par le code MARIE sont supérieures aux remontées capillaires simulées par Hydrus.
- Loi BC : on retrouve la droite $y=x$ sur laquelle s'alignent toutes les données de la période Octobre-Juin (Figure 9). Les flux d'ETR simulés par les deux codes sont très proches sur cette période. Les données de la période Juillet-Septembre (points rouges) se répartissent de part et d'autre de la droite $x=y$. A la différence de la loi VG, on n'observe pas de déviation systématique des flux simulés avec MARIE par rapport à ceux obtenus avec Hydrus pour la période Juillet-Septembre (Figure 9).

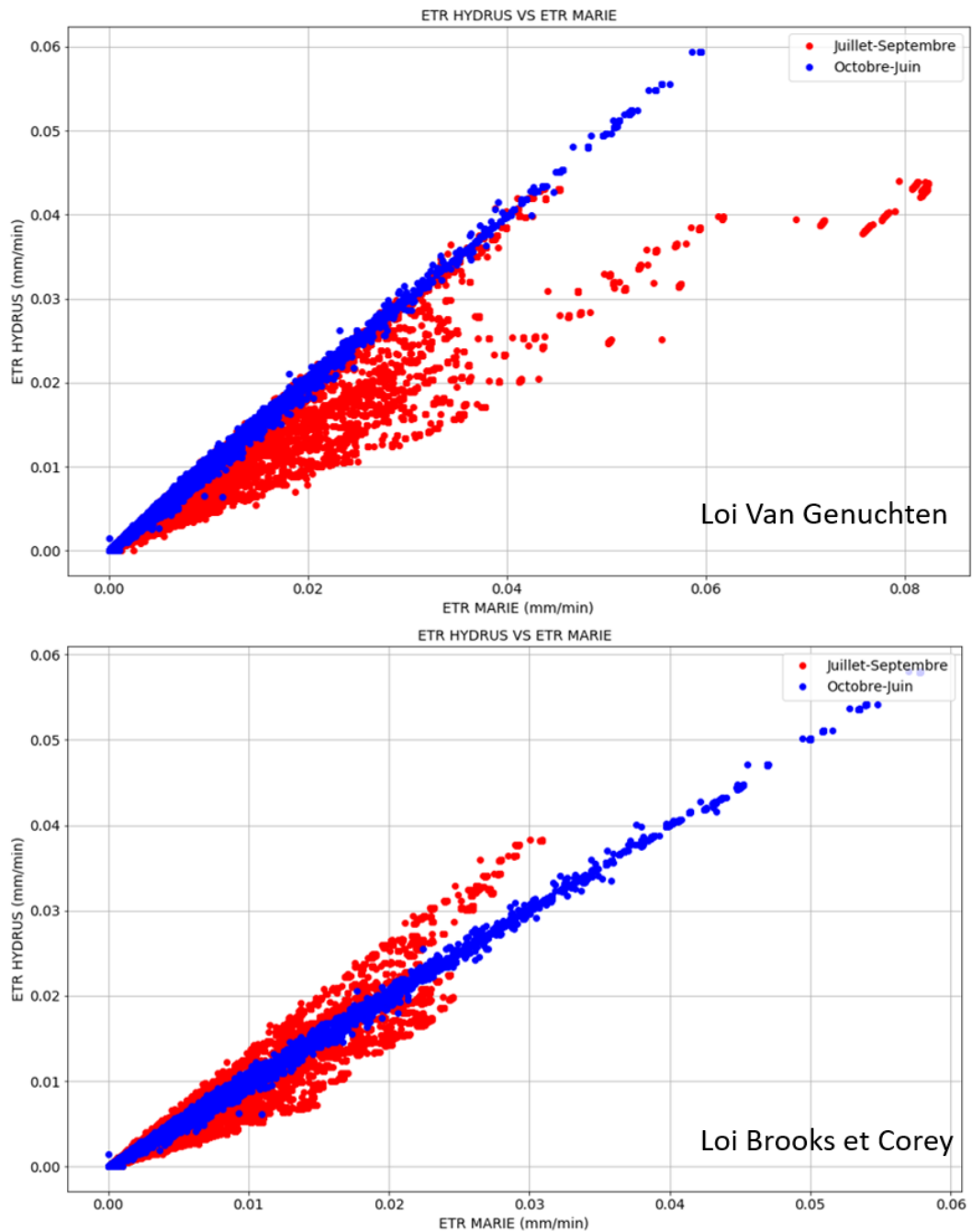


Figure 9 Flux d'évapotranspiration simulés par les codes Hydrus et MARIE pour le cas réel 2019 (Limon)

Les flux à la base de la ZNS simulés par les deux codes (Figure 10) présentent une dynamique semblable. Les flux simulés sont globalement plus élevés avec le code MARIE (Tableau 6) mais dans une moindre mesure lorsque la loi BC est utilisée.

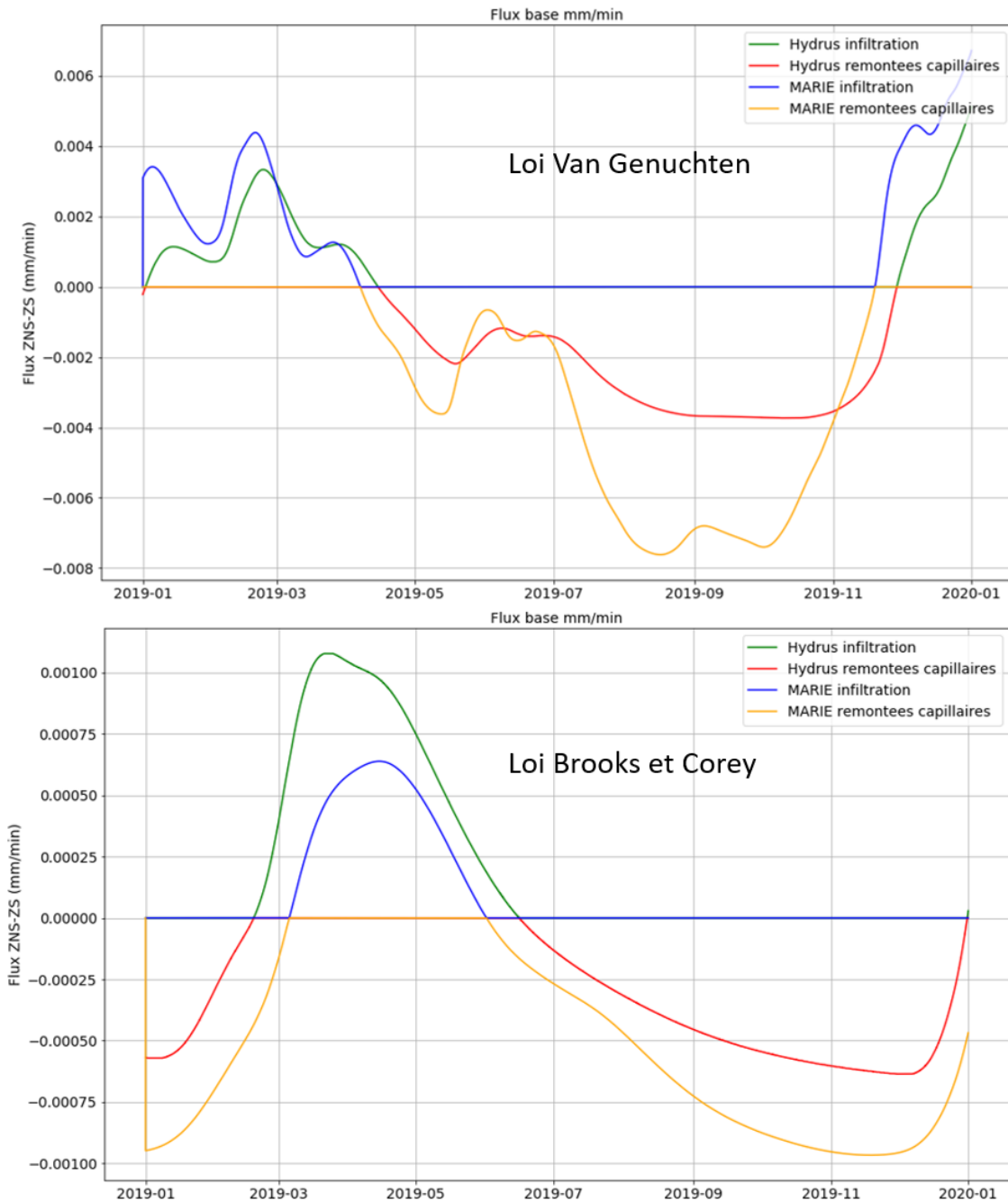


Figure 10 Flux d'eau à la base de la ZNS simulés par le code MARIE et Hydrus pour l'année 2019 (Limon)

Les teneurs en eau moyennes simulées dans la zone racinaire avec la loi BC et la VG présentent une très bonne correspondance entre les deux codes (Figure 11). On note un meilleur ajustement des teneurs en eau entre les deux codes avec la loi BC.

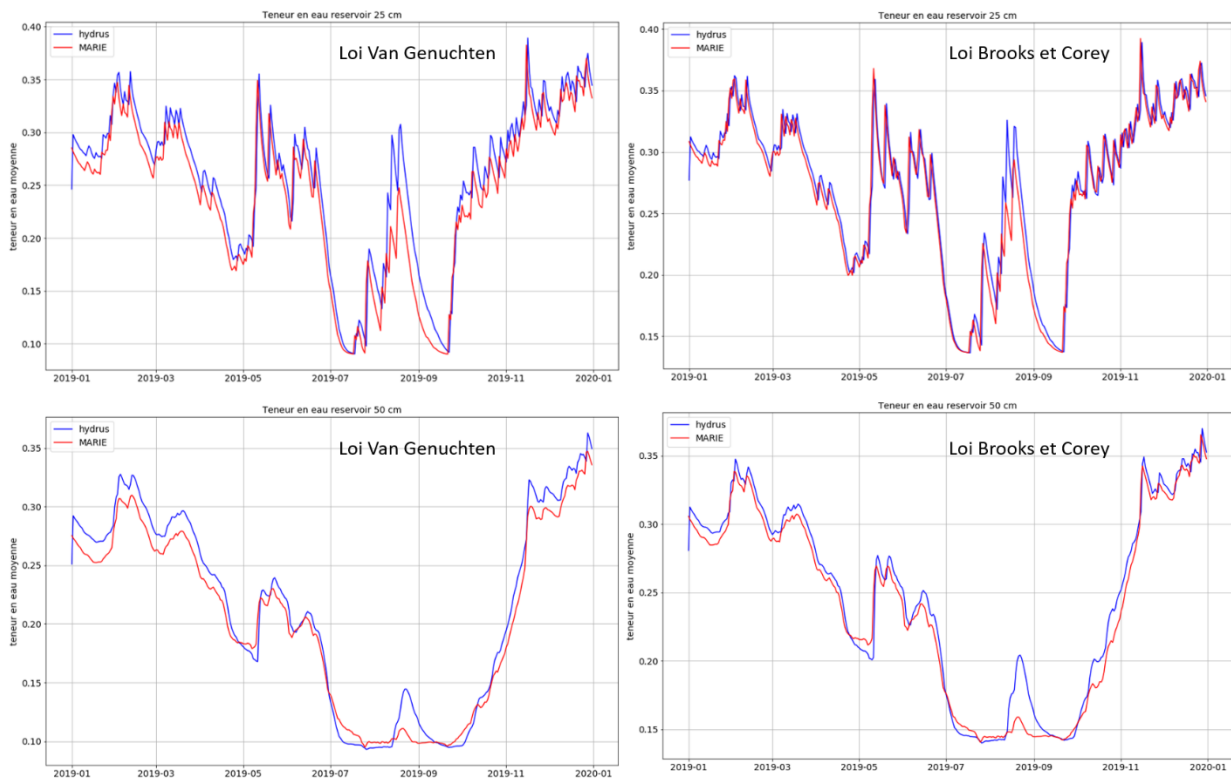


Figure 11 Teneurs en eau moyennes dans la zone racinaire pour les codes MARIE et Hydrus (année 2019, Limon)

L'utilisation de la loi VG génère des flux plus importants à la base de la ZNS (recharge de la nappe et remontées capillaires) que les flux simulés par la loi BC (Tableau 6). Les remontées capillaires plus importantes simulées par la loi VG permettent de soutenir la demande transpiratoire dans la zone racinaire. Les flux d'ETR simulés par la loi VG sont donc plus élevés que ceux simulés par la loi BC.

Tableau 6 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour l'année 2019 avec un sol de type Limon

Cas réel 2019 (Limon)				
mm	Van Genuchten		Brooks et Corey	
	Hydrus	MARIE	Hydrus	MARIE
Pluie	678	678	678	678
ETR	720	793	601	613
Recharge	67	112	21	10
Remontées capillaires	166	276	30	52

On note une surestimation des flux à la base de la ZNS simulés par le code MARIE (Figure 10) comparé aux flux simulés par le code Hydrus (Tableau 6). Comme indiqué dans le paragraphe précédent, on suppose que cette surestimation des flux par le code MARIE serait due à sa discrétisation spatiale plus grossière des réservoirs de la ZNS (25 cm) par rapport à la discrétisation spatiale plus fine du code Hydrus (5 cm).

En effet, la loi VG est fortement non-linéaire à proximité de la saturation, son utilisation pourrait donc nécessiter une discrétisation plus fine de la ZNS. A l'interface ZNS-ZS, de faibles écarts de teneur en eau peuvent se traduire par d'importants écarts de potentiels et donc des erreurs sur les flux simulés (Figure 10).

Période de sécheresse Juillet-Septembre 2019

Les graphiques de comparaison des flux d'évapotranspiration réelles sont présentés sur une courte période (une semaine en Juillet) afin de mieux apprécier les différences d'ETR simulées par ces deux codes (Figure 12).

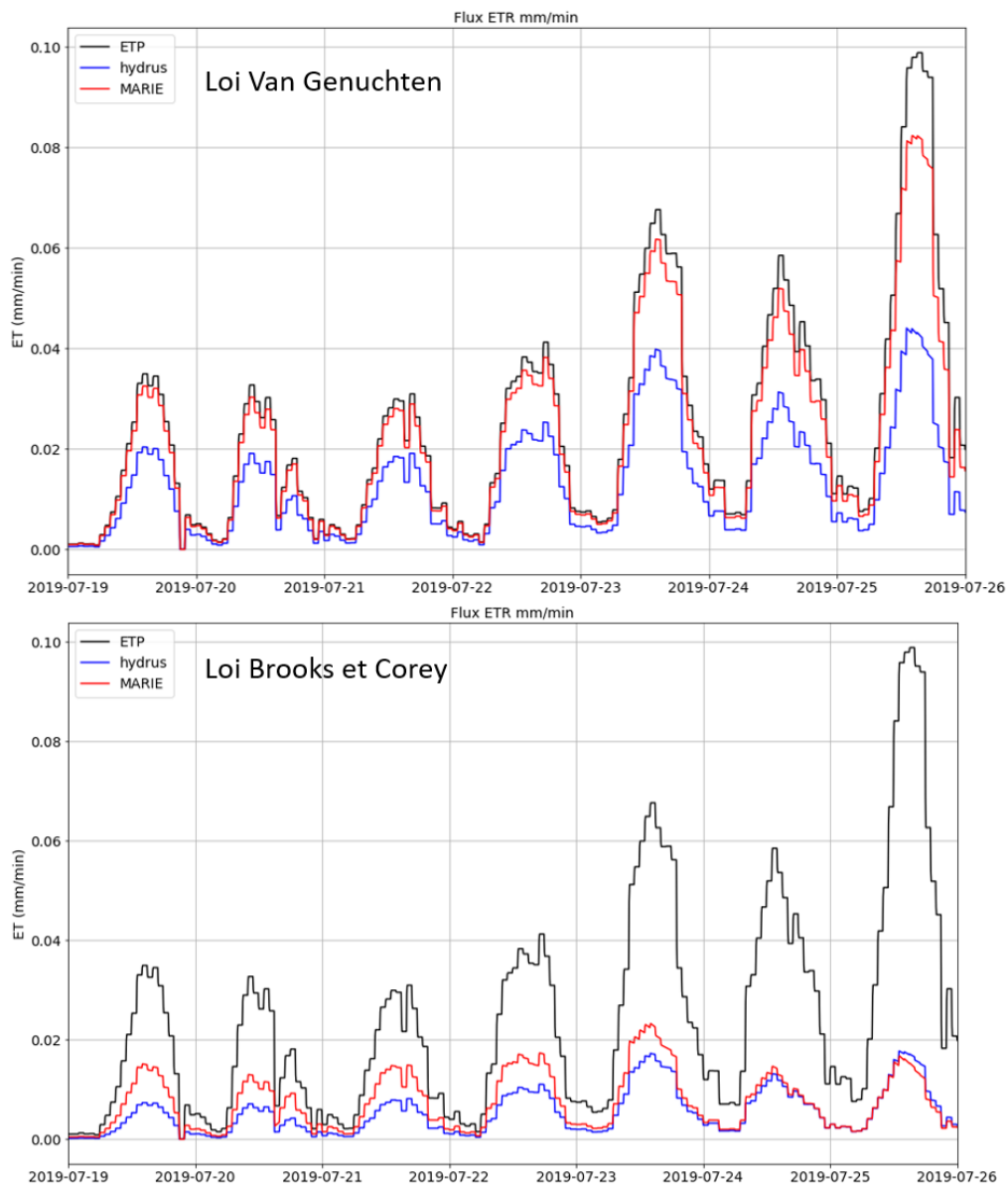


Figure 12 Flux d'ETR simulés par les codes MARIE et Hydrus sur une semaine de Juillet 2019 (Limon)

Le bilan des flux de chaque modèle, avec la loi VG et la loi BC, est présenté dans le Tableau 7. Les flux d'évapotranspiration simulés avec la loi VG sont plus élevés (pour les deux codes) que ceux simulés avec la loi BC (Figure 12 et Tableau 7), comme indiqué précédemment. Il en va de même pour les flux de remontées capillaires. Les flux d'ETR et de remontées capillaires simulés par MARIE sont plus élevés que ceux simulés par Hydrus (en particulier avec la loi VG).

Tableau 7 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour la période de sécheresse de Juillet à Septembre de l'année 2019 avec un sol de type Limon

Cas réel Juillet - Septembre 2019 (Limon)				
mm	Van Genuchten		Brooks et Corey	
	Hydrus	MARIE	Hydrus	MARIE
Pluie	4,10	4,10	4,10	4,10
ETR	26,41	43,51	10,88	15,28
Recharge	0,00	0,00	0,00	0,00
Remontées capillaires	5,21	11,65	0,54	0,80

2.3.4.2.2 Sable limoneux

Pour ces simulations, les paramètres hydrodynamiques du sable limoneux sont utilisés pour la loi de Van Genuchten (VG, Tableau 4) et la loi de Brooks et Corey (BC, Tableau 3). Une perméabilité à saturation identique est utilisée pour les deux lois pour une meilleure comparaison des résultats. On retiendra la valeur la plus élevée parmi les perméabilités à saturation des deux lois ($K_s = 4,05E-05$ m/s) afin de faciliter le drainage de la ZNS.

Les résultats sont d'abord présentés pour l'année 2019 puis pour la période de stress hydrique (sécheresse en Juillet-Août 2019).

Période complète

Contrairement au cas précédent, on n'observe pas de déviations systémiques des flux d'ETR simulés par MARIE par rapport au flux d'ETR simulés par Hydrus pour les deux périodes identifiées (Figure 13) :

- Loi VG : Plusieurs alignements des points peuvent être observés :
 - Un alignement qui suit une droite $y=x$ et qui indique un bon ajustement des flux d'ETR simulés par les deux codes
 - Un alignement qui suit une droite verticale à $x=0$ indiquant une surestimation des flux d'ETR simulés avec Hydrus par rapport aux flux d'ETR simulés par MARIE
 - Plusieurs alignements autour de la droite $y=x$ qui indiquent une surestimation ou une sous-estimation des flux d'ETR simulés par Hydrus par rapport aux flux simulés par MARIE. Aucune tendance particulière ne peut être dégagée à partir de ces droites.

- Loi BC : La plupart des points s'alignent sur et autour de la droite $y=x$ avec une dispersion des points nettement plus faible que celle observée pour la loi VG

On observe de nouveau une meilleure correspondance des flux simulés par les deux codes avec la loi BC.

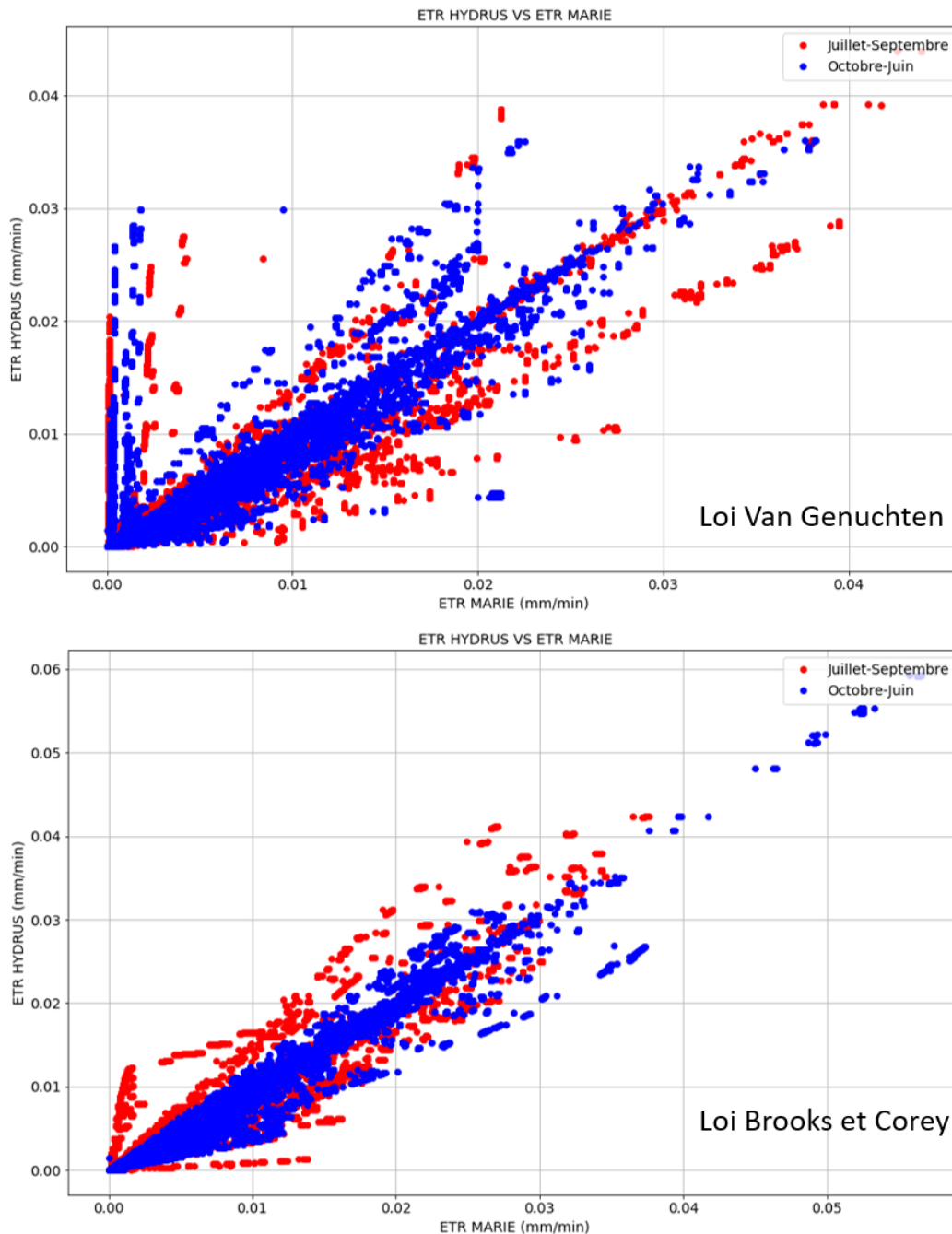


Figure 13 Flux d'évapotranspiration simulés par les codes Hydrus et MARIE pour le cas réel 2019 (Sable limoneux)

La Zone non saturée (ZNS) composée d'un sol sable limoneux (Tableau 8, Figure 14) est d'avantage drainée que la ZNS composée d'un sol limoneux (Tableau 6, Figure 10).

Le drainage plus important (recharge de la nappe) et l'absence de remontées capillaires (matériau trop grossier) sur ce sable limoneux impactent significativement les flux de d'évapotranspiration : il y a moins d'eau disponible dans la zone racinaire.

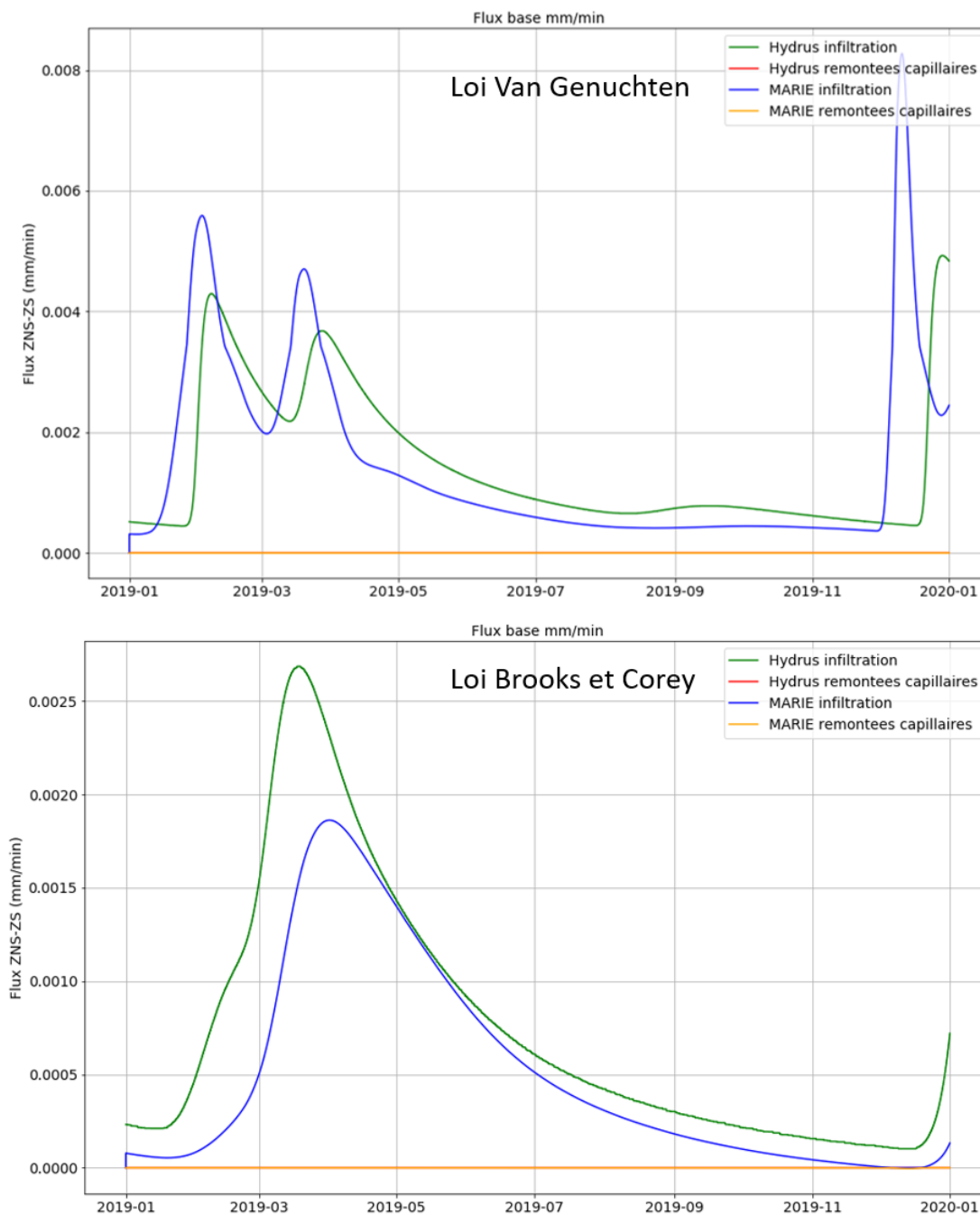


Figure 14 Flux d'eau à la base de la ZNS simulés par le code MARIE et Hydrus pour l'année 2019 (Sable limoneux)

On remarque en ce sens que la teneur en eau moyenne dans la zone racinaire du sol sableux limoneux (Figure 15) est plus basse que la teneur en eau moyenne de la zone racinaire du sol limoneux (Figure 11). De même, la teneur en eau moyenne du sable limoneux est proche du point de flétrissement (VG : 0,09 ; BC : 0,12) sur une plus longue durée (Figure 15) que la teneur en eau moyenne du sol limoneux (Figure 11).

On note également une nette différence entre les dynamiques de variation de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire des deux types de sol en raison des différences de conductivités hydrauliques des deux types de sol (Tableau 3, Tableau 4, Figure 11 et Figure 15).

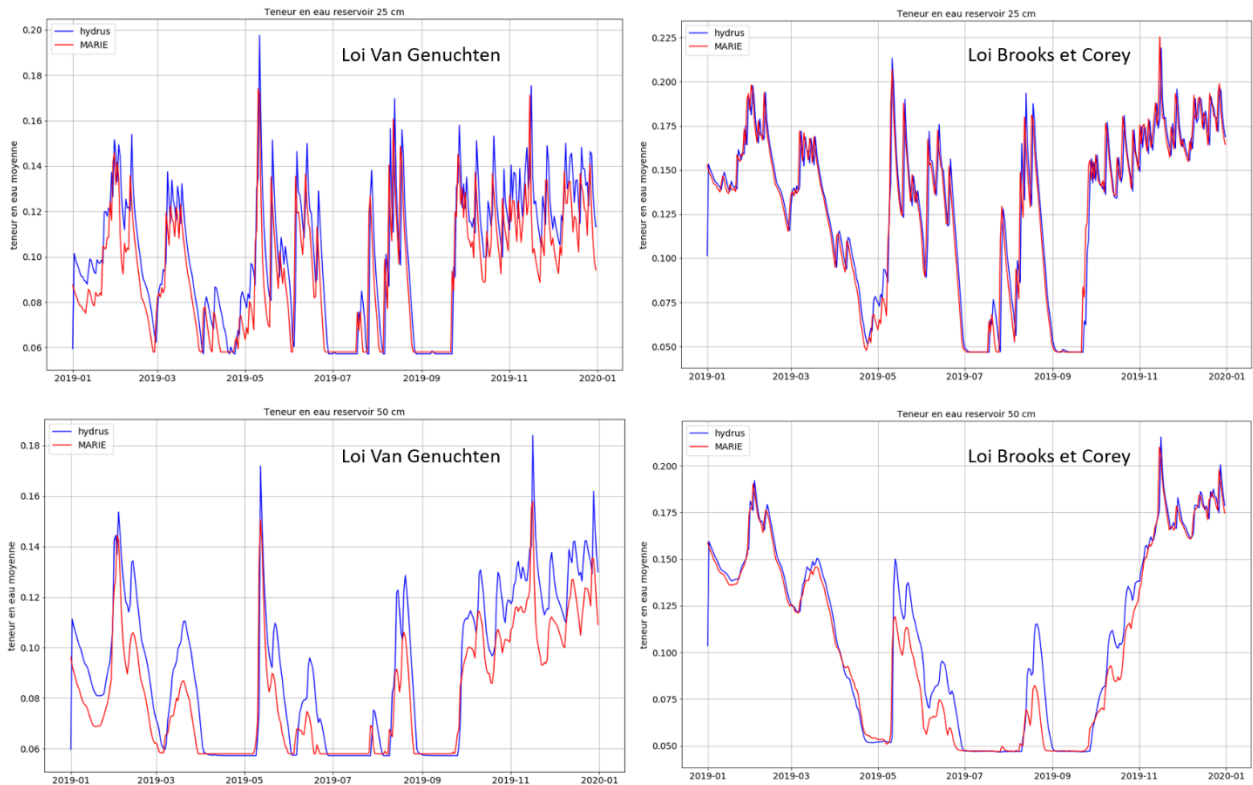


Figure 15 Teneurs en eau moyennes dans la zone racinaire pour les codes MARIE et Hydrus (année 2019, Sable limoneux)

Les cumuls des flux simulés par Hydrus et MARIE sont très semblables (Tableau 8). On observe une légère surestimation de l'ETR par MARIE, par rapport à Hydrus (que ce soit avec la loi VG ou la loi BC) et une petite surestimation de la recharge par Hydrus, par rapport à MARIE, avec la loi BC.

Tableau 8 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour l'année 2019 avec un sol de type Sable limoneux

Cas réel 2019 (Sable limoneux)				
mm	Van Genuchten		Brooks et Corey	
	Hydrus	MARIE	Hydrus	MARIE
Pluie	678	678	678	678
ETR	459	471	520	549
Recharge	152	156	78	52
Remontées capillaires	0	0	0	0

Les cumuls mensuels d'ETR simulée par MARIE pour les calculs avec le limon et le sable limoneux sont présentés pour les deux lois dans la Figure 16. Les mois les plus chauds de l'année (Juin, Juillet et Septembre) montrent les plus gros contrastes entre l'ETR simulé avec un sol limoneux et l'ETR simulé avec un sol sableux limoneux. Le mois d'Août n'est pas concerné par ces différences de l'ETR simulé pour les différents types de sol en raison des fortes précipitations (70 mm) qui ont permis de recharger la zone racinaire (Figure 15). Cette période sèche estivale marque le contraste entre un sol limoneux capable de conserver suffisamment d'eau dans la zone racinaire en été pour alimenter la transpiration des racines et un sol à caractère plus drainant qui manque d'eau en été pour la transpiration des racines.

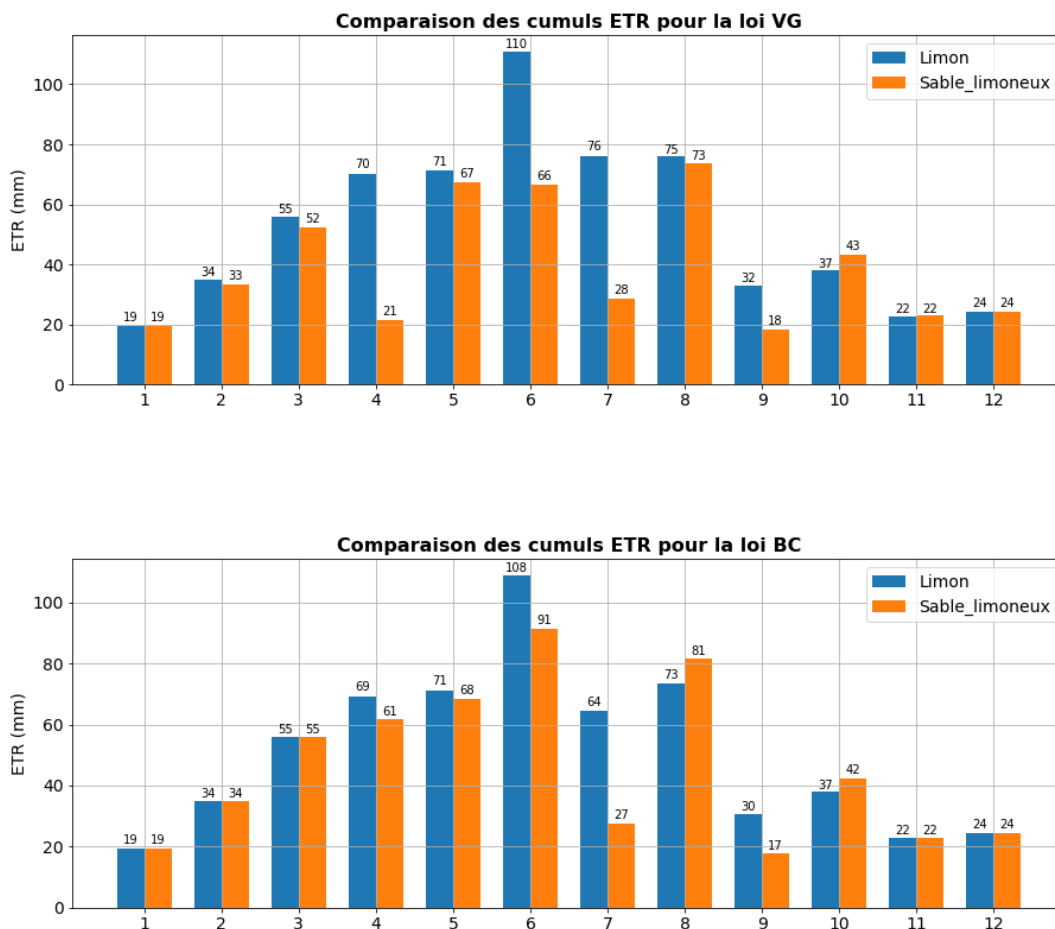


Figure 16 Cumuls mensuels d'évapotranspiration pour l'année 2019 simulée avec MARIE

Période de sécheresse Juillet-Septembre 2019

Les bilans d'eau montrent un bon ajustement entre Hydrus et MARIE pour les deux lois considérées (Tableau 9). On note une très légère surestimation de l'ETR simulé par MARIE (par rapport à l'ETR simulée par Hydrus) et une légère surestimation de la recharge simulée par Hydrus (par rapport à la recharge simulée par MARIE).

Tableau 9 Bilans d'eau des modèles Hydrus et MARIE (lois Van Genuchten et Brooks et Corey) pour la période Juillet-Septembre de l'année 2019 avec un sol de type Sable limoneux

Cas réel Juillet - Septembre 2019 (Sable limoneux)				
mm	Van Genuchten		Brooks et Corey	
	Hydrus	MARIE	Hydrus	MARIE
Pluie	4,10	4,10	4,10	4,10
ETR	8,62	8,69	9,24	9,64
Recharge	1,47	0,96	0,94	0,72
Remontées capillaires	0,00	0,00	0,00	0,00

Les graphiques présentant les flux d'évapotranspiration réelle sont présentés sur une courte période (une semaine en Juillet) afin de mieux apprécier les différences d'ETR simulées par ces deux codes (Figure 17).

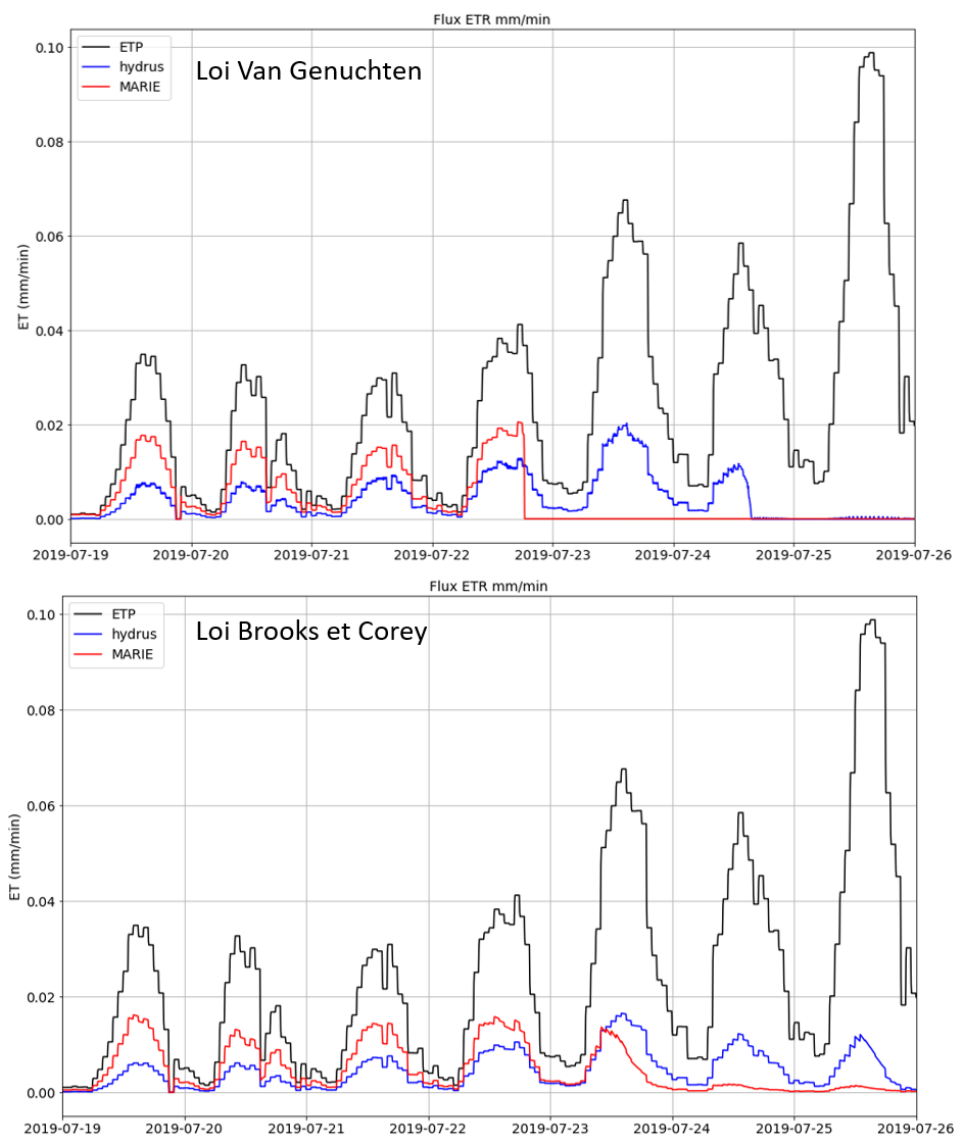


Figure 17 Flux d'ETR simulés par les codes MARIE et Hydrus sur une semaine de Juillet 2019 (Sable limoneux)

L'évapotranspiration simulée par le code MARIE est supérieure à celle simulée par le code Hydrus sur les trois premières journées de la semaine de sécheresse (Figure 17). Lors de la quatrième journée (ou la cinquième journée pour la loi BC), l'évapotranspiration simulée par MARIE devient nulle (ou très faible pour la loi BC) avant l'évapotranspiration simulée par Hydrus. Cette baisse du flux d'ETR est due à un épuisement des réserves d'eau dans la zone racinaire (Figure 18). Cette limite intervient prématurément avec MARIE par rapport à Hydrus puisque le flux d'ETR simulé par MARIE est légèrement supérieur à celui simulé par Hydrus (Figure 17 et Tableau 9). L'eau de la zone racinaire est donc utilisée plus rapidement dans le calcul avec le code MARIE.

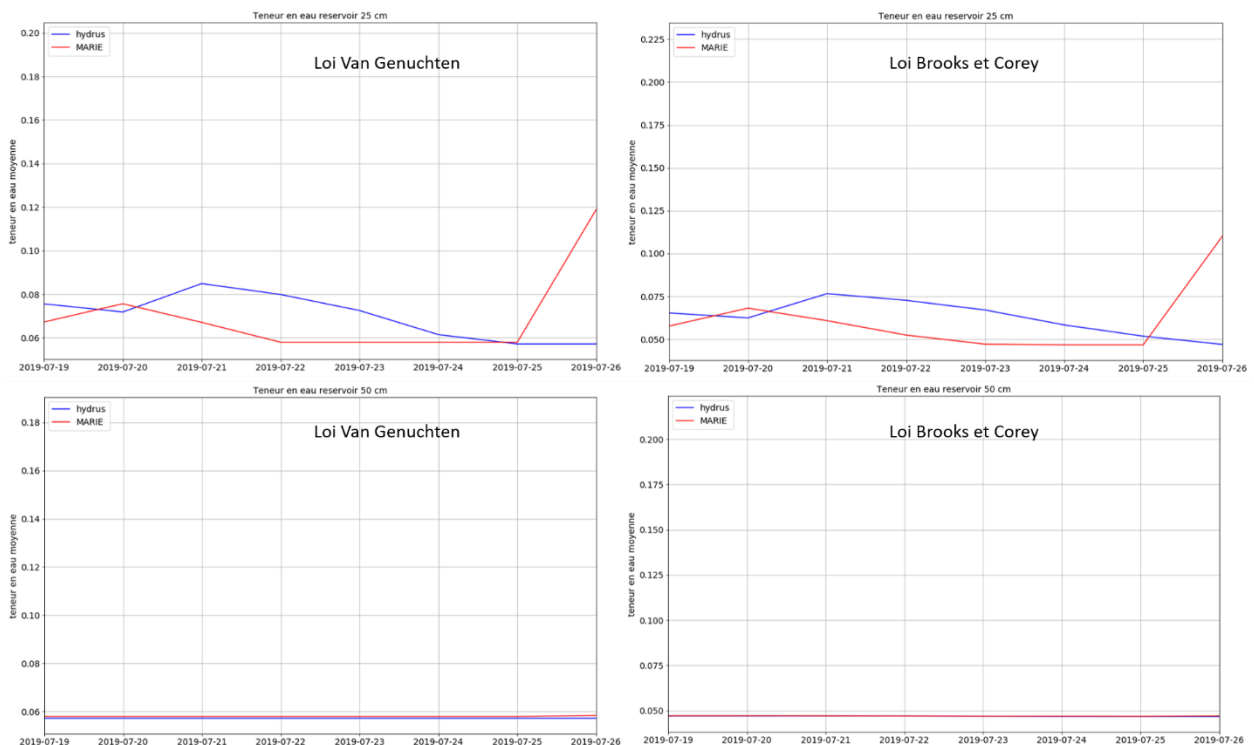


Figure 18 Teneurs en eau moyennes (pas de temps journalier) dans la zone racinaire pour les codes MARIE et Hydrus sur une semaine sèche de Juillet 2019 (Sable limoneux)

Dans le cas de la loi VG, la teneur en eau moyenne dans le second réservoir de la ZNS (25-50 cm) atteint le point de flétrissement des plantes (pour les deux codes) pendant la semaine sèche de Juillet (Figure 18). La teneur en eau moyenne simulée par MARIE atteint également cette valeur de flétrissement le 22/07/2050 dans le premier réservoir (0-25cm) expliquant la chute brutale de l'ETR simulée par MARIE ce même jour (Figure 17).

Pour la loi BC, La teneur en eau moyenne du second réservoir simulée par les deux codes (0,046) est légèrement au-dessus du point de flétrissement des plantes (0,04). Dans le premier réservoir de la zone racinaire (Figure 18), la teneur en eau moyenne simulée par MARIE (0,047) se rapproche du point de flétrissement (sans l'atteindre). Le flux d'ETR simulé par MARIE est également impacté par cette faible teneur en eau de la zone racinaire mais en moindre mesure par rapport au calcul avec la loi VG : l'évapotranspiration n'est pas nulle mais limitée.

2.3.5 Bilan

Cette comparaison entre le code Hydrus 1D et la partie du code MARIE responsable de la modélisation du sol a pour objectif de tester la loi de Van Genuchten en suivant la conceptualisation du sol de URBS-PROD. Pour rappel, le code URBS utilise habituellement la loi de Brooks et Corey pour calculer les conductivités hydrauliques et gradients de pression dans la ZNS.

Tableau 10 Bilan de la comparaison entre Hydrus et la partie du code MARIE responsable de la modélisation des flux d'eau dans la ZNS. Les valeurs présentées sont des pourcentages de la différence entre les valeurs des flux simulés par les deux codes et la valeur du résultat simulé avec Hydrus (considéré comme le résultat de référence). Valeurs positives : surestimation de MARIE par rapport à Hydrus, valeurs négatives : sous-estimation de MARIE par rapport à Hydrus

Flux	Calculs	% Erreur MARIE/Hydrus	
		Loi Van Genuchten	Loi Brooks et Corey
ETR	Cas théorique	37,24	6,10
	Cas 2019 Limon	10,14	1,51
	Cas 2019 Sable limoneux	2,61	6,16
Recharge	Cas théorique	3,65	0,27
	Cas 2019 Limon	67,16	-9,82
	Cas 2019 Sable limoneux	2,63	-16,67
Remontées capillaires	Cas théorique	154,55	2,78
	Cas 2019 Limon	66,27	7,97
	Cas 2019 Sable limoneux	0,00	0,00

Le cas théorique et les cas réels mettent en avant des observations similaires sur les résultats simulés (Tableau 10):

- Loi Van Genuchten (VG):
 - o MARIE surestime les flux à la base de la ZNS et les flux d'ETR par rapport à Hydrus (Tableau 10). La différence de discrétisation spatiale entre les deux codes pourrait en être la cause (Figure 19).
 - o Les remontées capillaires sont plus importantes (pour Hydrus et MARIE) que celles simulées avec la loi BC. Cela peut être dû à la différence de paramétrisation des deux lois : la forme de la courbe $h(\theta)$ de la loi VG est fortement non linéaire par rapport à celle de la loi BC.
- Loi Brooks et Corey (BC) :
 - o MARIE surestime légèrement les flux par rapport à Hydrus (Tableau 10). La différence de discrétisation spatiale des deux codes semble moins impacter les résultats avec cette loi de rétention (Figure 19).
 - o Les cumuls des flux montrent une meilleure correspondance entre les deux codes.
 - o Sous-estimation de la recharge

Les profils de teneur en eau du 24/07/2019 avec un sol sableux limoneux (Figure 19) illustrent l'impact de la différence de discrétisation des deux modèles sur les résultats simulés.

De par sa discrétisation spatiale très fine (5 cm), Hydrus représente le profil de teneur en eau de la ZNS avec plus de précisions par rapport à MARIE (réservoir de 25 cm).

Dans cet exemple du 24/07/2019, MARIE n'est pas capable de représenter avec autant de précision l'augmentation de la teneur en eau dans le sol à la base de la zone racinaire (0,5 m), ce qui génère par la suite un décalage de la teneur en eau simulée entre les deux modèles.

L'impact de cette différence de discrétisation spatiale est particulièrement marqué à proximité de la base de la ZNS (4 m). En effet, la discrétisation spatiale de MARIE n'est pas adaptée pour représenter la variation de la saturation de la ZNS à l'approche de la ZS avec autant de précision que Hydrus. Ce résultat est d'autant plus marqué avec la loi VG qui est fortement non linéaire à proximité de la ZS. Cette observation semble coïncider avec les résultats présentés pour la loi Van Genuchten (Tableau 10).

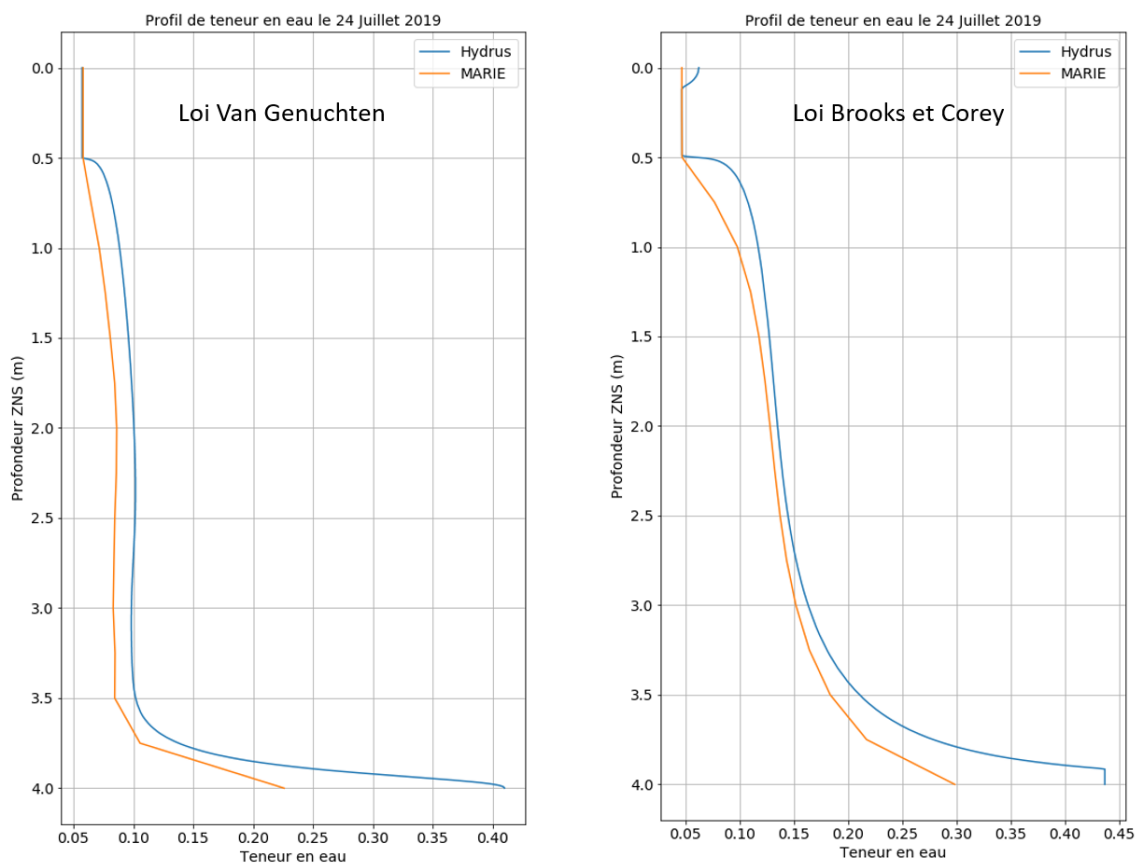


Figure 19 Profils de teneur en eau du 24/07/2019 simulés par MARIE et Hydrus avec les lois VG et BC (MARIE : teneurs en eau moyennes dans les réservoirs)

Pour conclure, les résultats simulés par MARIE avec la loi de Van Genuchten (1980) sont, en moyenne sur les trois cas simulés (Tableau 10), significativement différents (en particulier pour le cas théorique qui met en jeu des flux conséquents) de ceux simulés par Hydrus. Ainsi, la discrétisation spatiale de la ZNS du code MARIE semble peu adaptée à l'utilisation de la loi de Van Genuchten. Par ailleurs, l'utilisation de la loi de Brooks et Corey (1964) présente de meilleures correspondances entre les

résultats simulés par Hydrus et MARIE (Tableau 10). Le choix de la loi de rétention est discuté dans le paragraphe suivant.

2.3.6 Impact sur le choix de la loi de rétention pour l'étude du VOP

Comme présenté ci-dessus, la loi Van Genuchten semble favoriser les flux à la base de la ZNS (en particulier pour les tests avec un sol limoneux). Pour ces cas test, les écarts (Tableau 10) entre les résultats simulés par MARIE et ceux simulés par Hydrus avec la loi VG sont probablement accentués par l'utilisation d'un type de sol favorisant les remontées capillaires (limon). De plus, la faible épaisseur de la ZNS (4 m) pourrait également participer à creuser ces écarts en facilitant également les flux de remontées capillaires. Enfin, ces écarts entre les deux modèles sont particulièrement élevés dans le cas du test théorique en raison des flux importants (pluviométrie à K_s et évapotranspiration potentielle à 0,2 mm/h) appliqués au modèle.

Dans le cadre de la modélisation des flux d'évapotranspiration du VOP, les profondeurs de ZNS des zones modélisées vont de 9 m à 13 m. Ces épaisseurs de ZNS nettement plus élevées ne devraient pas générer de remontées capillaires (ou très peu). Ainsi, le choix de la loi de rétention en eau devrait avoir moins d'impact sur les flux d'ETR simulés avec MARIE. Ce choix sera d'ailleurs l'objet de calculs dans l'étude de sensibilité de MARIE présentée plus tard dans ce rapport.

Néanmoins, les tests effectués lors de cette comparaison ont prouvé la capacité du code MARIE à représenter les flux d'eau dans la ZNS avec la loi de Brooks et Corey. Cette loi est donc sélectionnée pour les calculs de références de l'évapotranspiration réelle du VOP, présentés dans la suite de ce rapport.

2.4 Modèle de micro-climatologie urbaine : Solene-Microclimat

Solene-microclimat est un outil de simulation numérique qui permet de modéliser le climat urbain à l'échelle du quartier et les conditions de confort extérieures. Cet outil de recherche permet d'étudier l'influence du choix des matériaux, de la forme urbaine, de la végétation, des solutions de rafraîchissement comme l'humidification des chaussées ou la présence de bassins d'eau sur l'îlot de chaleur urbain et le confort thermique ainsi que sur les consommations énergétiques des bâtiments (Musy et al., 2015).

Cet outil permet de considérer des géométries complexes représentant des formes fidèles à la réalité. Le niveau de détail permet de descendre à un niveau de maillage très fin, avec des mailles de l'ordre de 1m². Un tel niveau de détail permet de représenter différents types de surfaces urbaines (sol, rue, gazon, toit, parc, etc.) plus ou moins grandes et hétérogènes avec des propriétés thermiques et radiatives différentes. En sortie de calcul, il est par exemple possible d'accéder aux températures de surfaces de toutes les mailles de la scène urbaine ainsi qu'aux températures d'air dans le quartier.

Il est possible de tenir compte :

- 1) des transferts radiatifs incluant les grandes longueurs d'onde ;
- 2) de la conduction et le stockage dans les murs et les sols ;
- 3) des écoulements d'air et les échanges convectifs ;
- 4) de l'évapotranspiration des surfaces naturelles telles que la végétation ;
- 5) de la demande énergétique et les conditions de confort dans un bâtiment de la zone étudiée.

Ces différentes fonctionnalités peuvent être utilisées séparément ou couplées, selon l'application visée. Le point 1 correspond à SOLENE, le modèle radiatif historique, tandis que les Points 1+2 correspondent au modèle thermo-radiatif basé sur SOLENE et les Points 1+2+3+4+5 à ce que nous nommons SOLENE-microclimat (Figure 20).

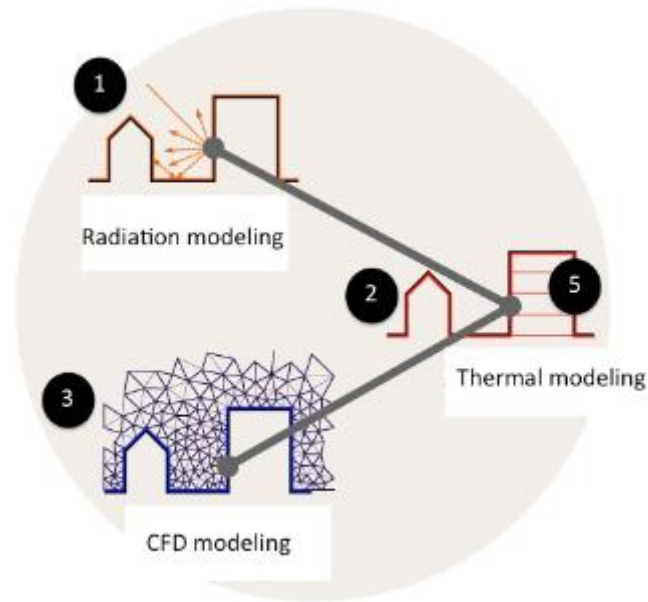


Figure 20: Modèles couplés dans Solene-Microclimat

2.4.1 Simulation radiative

Le flux radiatif net est le bilan des échanges radiatifs à la surface du sol. On réalise la somme des flux radiatif de courte longueur d'onde (CLO) (le rayonnement solaire K_{\uparrow} , K_{\downarrow}) et grande longueur d'onde (GLO) ou infrarouges (le rayonnement infrarouge L_{\uparrow} , L_{\downarrow}) (Figure 21).

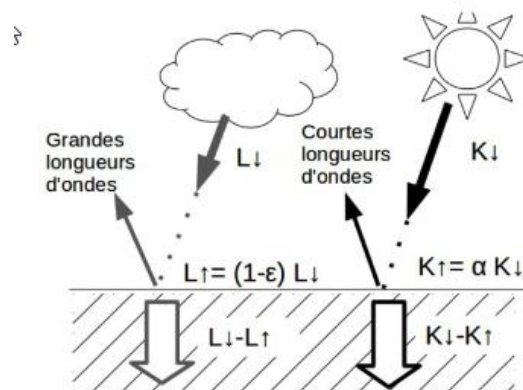


Figure 21: Flux radiatif net

A chaque pas de temps, le rayonnement CLO absorbé par chaque facette est calculé comme étant le résultat du rayonnement solaire direct et diffus reçu par la facette directement à partir à la fois du soleil et du ciel, plus les réflexions provenant de toutes les autres facettes vues, moins le flux réfléchi par la surface fonction de son albédo. Les facettes sont des mailles triangulaires et constituent une donnée descriptive essentielle du modèle, dont elle caractérise la résolution.

Le flux GLO est celui-ci fonction des émissivités des matériaux et températures des surfaces urbaines et du ciel.

2.4.2 Modèle des surfaces urbaines : sol, toit et façades

Pour l'étude des conditions de confort extérieur des piétons, un module thermique qui inclut le rayonnement de grandes longueurs d'onde, la conduction et le stockage de la chaleur dans les surfaces urbaines a été intégré.

- Le modèle de sol est un modèle mono dimensionnel à 4 nœuds avec en surface un bilan énergétique comme suit (1) :
- Le flux radiatif net R_{net} ;
- Le flux de chaleur sensible H ;
- Le flux de chaleur latente LE ;
- Le flux de chaleur conduit dans le sol Q_s , fonction des propriétés thermiques du sol.

$$R_{net} = Q_{cond} + H + LE. \quad (1)$$

La température à la profondeur de référence du sol est supposée constante au cours de la journée.

- Le modèle de toit et façade est un modèle R2C (modèle basé sur l'analogie électrique pour la résolution de problèmes thermiques) avec en condition au limite extérieur le bilan des flux exprimé en équation 1 et une température fixe ou pouvant évoluer sur l'autre condition aux limites. Il est possible de rajouter de la végétation sur les toits et façades.

En couplant ces modules avec le calcul radiatif, le bilan énergétique peut alors être calculé pour toutes les facettes, en écrivant l'équilibre du flux solaire absorbé, du flux infrarouge net, du flux de chaleur échangé avec l'air par convection et du flux de chaleur transmis par conduction à travers les matériaux à l'arrière de la facette.

2.4.3 Simulation aéraulique

Le Code Saturne utilisé est un code de calcul de mécanique des fluides numérique générique développé par EDF avec en entrées des modèles spécifiques utilisés pour représenter l'atmosphère urbaine, notamment les profils verticaux en entrée de veine.

Le flux de chaleur par convection dans l'atmosphère est calculé en utilisant la différence de température entre la surface et l'air et un coefficient de transfert de chaleur par convection (h_c), qui peut ensuite être affecté d'une valeur constante ou dépendante de la vitesse du vent en un point dans le cas d'un couplage avec un code CFD (computational fluid dynamics).

2.4.4 Représentation de la végétation

Les effets des arbres sont représentés à la fois dans le modèle thermo-radiatif (sous forme d'une surface) et dans modèle CFD (sous forme d'un volume poreux : cette géométrie est obtenue par la construction d'une forme géométrique en 3D, reprenant au plus juste la forme théorique du houppier de l'arbre, en négligeant le tronc), tandis que les autres éléments de végétation (sol, toitures, façades) sont des surfaces et leur comportement est représenté dans SOLENE seulement et leurs effets transmis au code CFD.

Concernant les phénomènes solaires et infrarouges thermiques, le feuillage est plutôt représenté comme une enveloppe surfacique semi-transparente et continue. Une partie du rayonnement solaire

direct incident sur l'enveloppe de l'arbre est réfléchi de manière totalement diffuse, une partie pénètre la couronne de l'arbre où une fraction γ est absorbée et la partie restante traverse complètement la couronne, et atteint les surfaces environnantes de la scène urbaine. Pour déterminer les proportions des trois quantités précédentes par rapport au flux incident, nous attribuons des propriétés solaires et thermiques à l'enveloppe de l'arbre. L'atténuation du rayonnement solaire par l'arbre est ensuite calculée en fonction de l'indice foliaire.

La température de la surface de végétation n'est pas calculée dans Solene mais imposée en entrée ; elle détermine seulement la contribution de la surface au bilan de flux GLO. Ceci permet d'imposer à la surface, soit la « température d'air équivalente » calculée dans Fluent dans le cas d'une simulation couplée, soit la température d'air météorologique.

Les effets des arbres sur l'air sont intégrés dans les cinq équations du modèle thermo-aéroulque (l'équation de quantité de mouvement, les deux équations de turbulence, l'équation de transport d'humidité et celle du bilan d'énergie au moyen de termes source ou puits pour les cellules du maillage qui correspondent au volume occupé par l'arbre). Les équations sont détaillées dans la thèse de Julien Bouyer (Bouyer, 2009).

Le modèle de sol végétalisé repose sur un modèle de conduction à 4 nœuds. Il tient compte non seulement des flux radiatifs et convectifs mais aussi de flux latent. Ce dernier est le produit de la chaleur latente avec le taux d'évapotranspiration du sol, soit le terme $\varphi_{lat,f}$. Tout d'abord il est nécessaire de calculer l'évapotranspiration potentielle climatique (ETP_c). La formule semi-empirique de Penman-Monteith est utilisée à ce titre (p.115-116 ; Malys, 2012). Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas faire la distinction entre l'eau transpirée par les feuilles et celle évaporée à la surface du substrat. Finalement, un ratio correspondant à la part d'évapotranspiration des plantes, noté α_{lat} , a été utilisé pour réaliser cette répartition. D'autre part, le stress hydrique n'est pas pris en compte dans cette formulation de l' ETP_c qui est estimé pour des conditions de teneur en eau du sol et des plantes idéales. Le taux d'évapotranspiration f a donc été utilisé, qui varie entre une valeur nulle pour l'absence totale d'eau et peut dépasser 100% après des épisodes pluvieux.

Au final, les flux latents prélevés aux nœuds de végétation et de surface du substrat s'écrivent :

$$\varphi_{lat,f} = \alpha_{lat} f ETP_c$$

Pour résumer, le calcul du flux latent dépend des variables climatiques suivantes, l' ETP_c étant calculée à chaque maille de la scène urbaine modélisée :

- rayonnement solaire et infrarouge ;
- température des feuilles, utilisée dans le calcul du rayonnement thermique net ;
- température de l'air au sein du feuillage, pour le calcul de la pression de vapeur saturante et de la pente de la courbe de pression de vapeur ;
- humidité spécifique de l'air, entrant en jeu dans le calcul de la pression partielle de vapeur d'eau ;
- vitesse du vent, pour le calcul des résistances aéroulques et stomatiques.

2.4.5 Indicateur de confort en ville

Plusieurs modèles de confort thermique ont été mis en œuvre. Pour commencer, ils exigent le calcul de la température radiante moyenne (TRM) de la scène, en définissant le « bonhomme confort ».

$$MRT^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n}$$

MRT est la température moyenne radiante du 'bonhomme', T_n les températures des surfaces vues par le bonhomme, F_{p-n} l'angle de vue entre le corps et les surfaces vues par le corps.

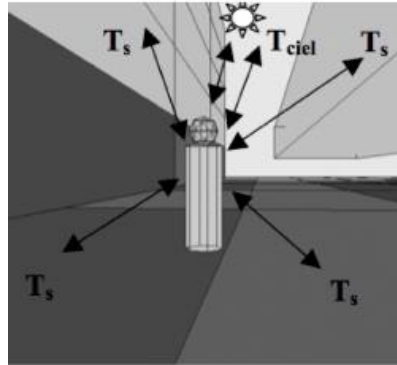


Figure 22: 'le bonhomme confort' pour le calcul de la TRM à partir d'un point de la scène urbaine (fonction des températures de surface vues par le bonhomme (T_s) et du ciel (T_{ciel}))

3 Présentation de la zone d'étude et de la méthodologie de modélisation

La première et la seconde partie de ce chapitre présentent le contexte général du Village Olympique et Paralympique de 2024 ainsi que les caractéristiques de la zone étudiée dans ces travaux de simulations. Cette étude de modélisation du confort urbain du VOP est l'objet d'une coopération innovante des approches microclimatiques et hydrologiques. Les modalités de ce chaînage sont présentées en troisième partie. La dernière partie de ce chapitre présente les paramétrisations du modèle de l'évapotranspiration potentielle et du modèle hydrologique pour le calcul de référence et les calculs de l'étude de sensibilité.

3.1 Le Village Olympique et Paralympique

La ville de Paris accueillera les Jeux Olympiques d'été en 2024. A cette occasion, un village des athlètes sera construit pour les athlètes et leurs familles. Ce village proposera également toutes les commodités nécessaires à la vie des sportifs mais aussi des lieux de détente, de convivialité et des lieux dédiés aux activités sportives. Le village construit sera ensuite réhabilité pour devenir un quartier habité et respectueux de son environnement à l'horizon 2050.

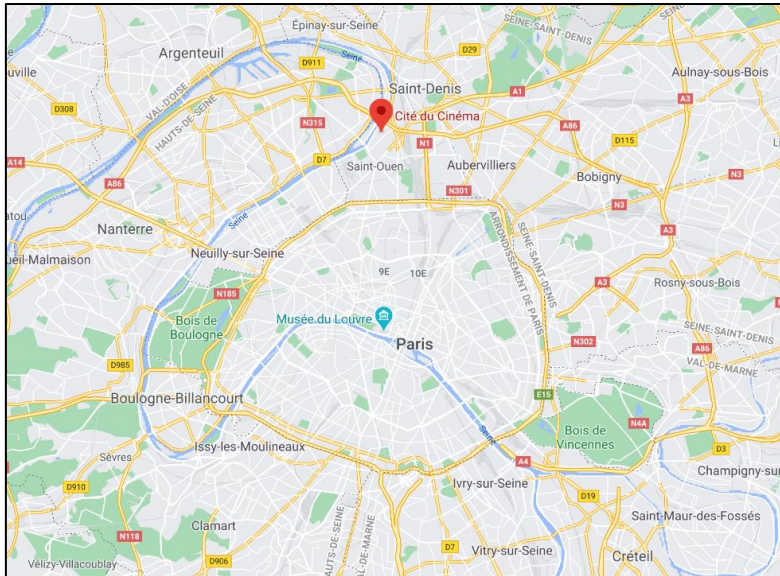


Figure 23 Localisation de la cité du Cinéma à Saint Ouen

Ce Village Olympique et Paralympique (VOP) se situera au Nord de Paris, à la limite des communes de Saint Ouen et Saint Denis (93), en bord de Seine à proximité de la cité du Cinéma (Figure 23). Un des principaux objectifs de ce projet de construction du VOP est d'utiliser au maximum la végétation en place. Les espaces verts existants seront donc conservés et revalorisés.

Il s'agit par exemple des espaces boisés qui bordent le VOP (Figure 24) : entre l'A86 et la limite Nord du village, à l'Est par le Parc Ampère et à la limite avec la Seine au Sud-Ouest. En plus de ces espaces boisés ré-agrémentés, de nombreux espaces végétalisés seront créés sur le futur VOP.

Parmi ces nouveaux espaces, le Mail Finot constituera un espace végétalisé d'ouverture sur la Seine (Figure 24). Ce sera un lieu de promenade, de détente et de convivialité qui associe parfaitement la végétation avec le milieu urbain.

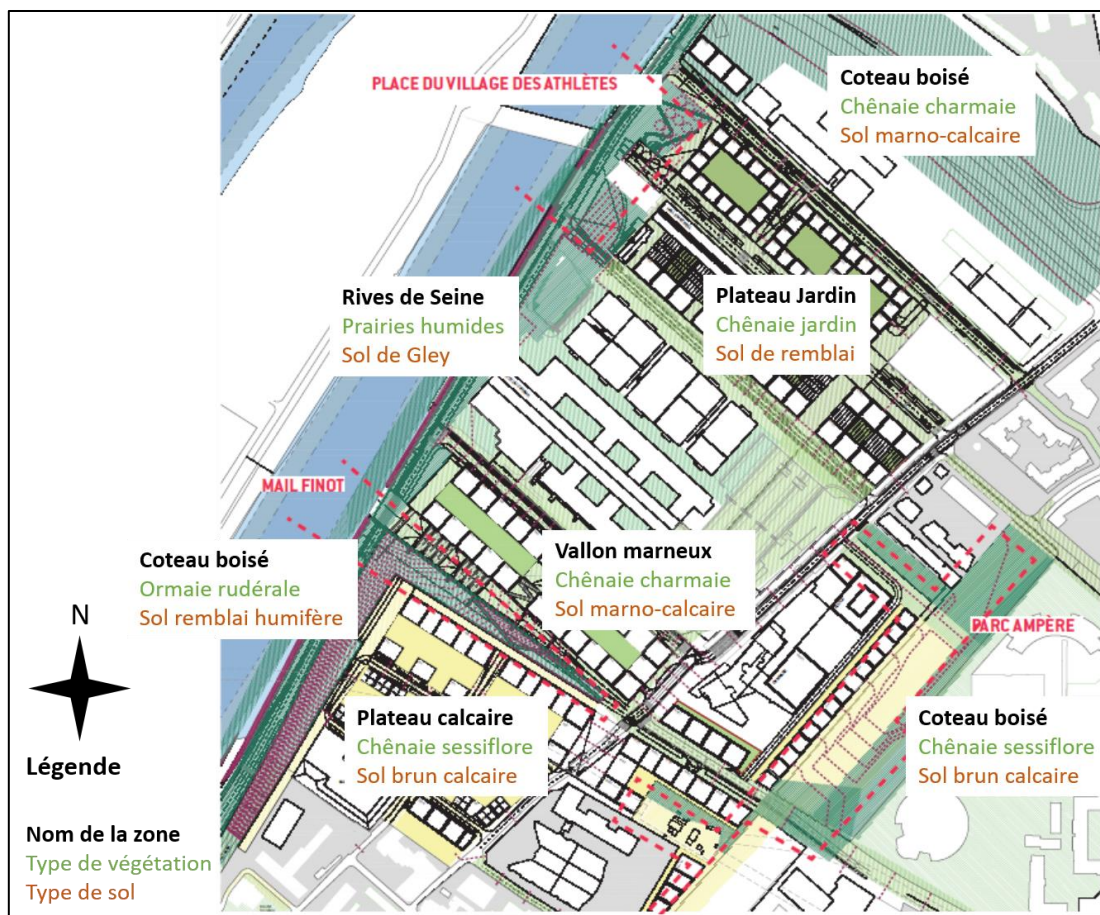


Figure 24 Plan du VOP

Le Mail Finot est identifié comme une zone d'intérêt pour les simulations de confort commandées par la maîtrise d'ouvrage. Ainsi, les simulations hydrologiques de l'évapotranspiration et les simulations microclimatiques se concentreront sur cette zone du VOP.

3.2 Le Mail Finot

Le Mail Finot, situé dans la partie Sud du VOP (Figure 24), constitue une descente de 300 m de long jusqu'à la Seine, pour un dénivelé total de 12 m. Cette zone est divisée en deux parties (Figure 25) :

- Partie urbaine : le sol de cette partie sera principalement composé de dalles en bétons aux teintes claires avec quelques plateformes en bois pouvant servir d'assises et parfois plantées (Ail des ours, Anémone sauvage, etc.). Cet espace bétonné accueillera quelques espèces d'arbres, communes avec celles du vallon marneux (Charme 60 %, Merisier 40 % ; cf. VO_AVP_TECH_02_Notice Paysagère).
- Partie végétalisée (remontée du coteau boisé) : un sol composé de remblais humifères accueillera une végétation de type Ormaie Rudérale où l'on retrouvera en strate haute des Ormes (40 %), des Bouleaux (30 %) et des Charmes (30 %). La strate arborée moyenne (Aubépines), arbustive (Troènes, Ronces et Groseilliers) et l'herbacée (Géraniums, Lierres,

Alliaires) permettront de faire une liaison entre le boisement et la partie urbaine du Mail Finot. Au pied de ce talus végétalisé se trouvera une prairie d'infiltration qui recueillera les eaux pluviales et le ruissellement provenant de la partie bétonnée du Mail Finot. Cette eau sera soit utilisée par la végétation pour la demande en évapotranspiration, soit acheminée vers la prairie d'inondation située à l'aval du Mail Finot.

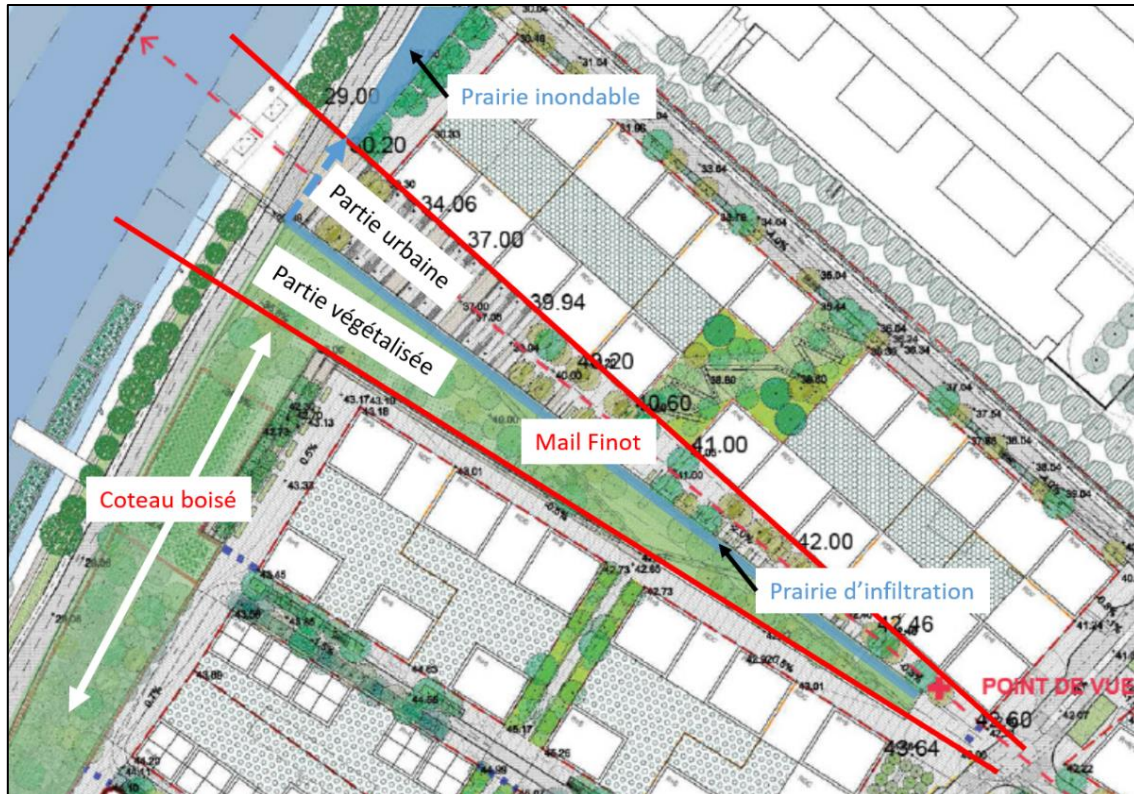


Figure 25 Plan de la zone Mail Finot

Une description plus détaillée du Mail Finot est proposée dans la suite de ce paragraphe. Les informations présentées concernent uniquement les espaces publics. Les informations sur les îlots privés présents au sein du Mail Finot ne sont pas encore disponibles.

3.2.1 Espaces végétalisés

L'ensemble des espèces végétales prévues pour le Mail Finot sont présentées ci-dessous (Figure 26).

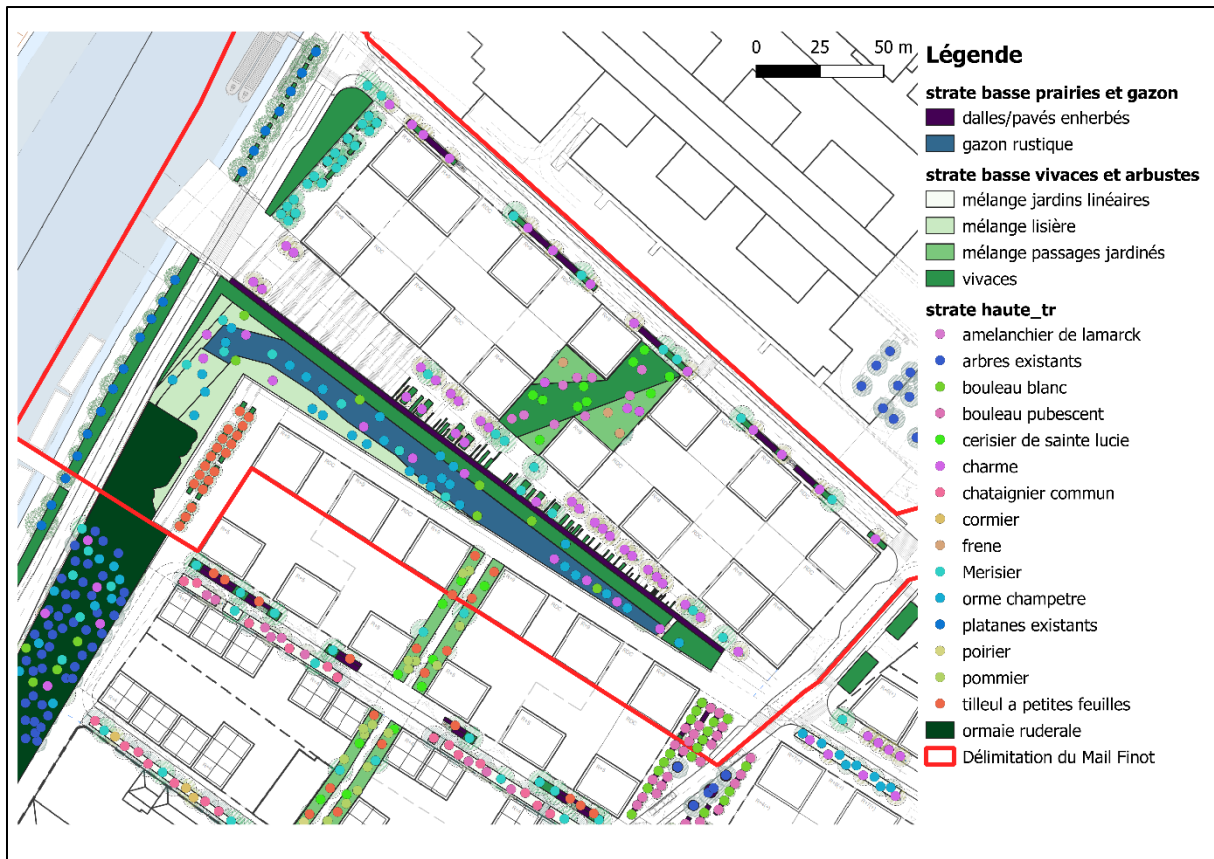


Figure 26 Présentation des surfaces végétales du Mail Finot

La végétation est divisée en deux ensembles :

- Strate haute : arbres
- Strate basse : plantes basses, gazons et arbustes.

La distinction de la végétation en deux ensembles est importante pour la suite de cette étude. En effet, les arbres et les plantes basses n'ont pas les mêmes propriétés, notamment lorsqu'il s'agit de la capacité évapotranspiratoire. La paramétrisation de la végétation dans le modèle est présentée dans le paragraphe 3.4.2.1.2 de ce chapitre.

La délimitation du Mail Finot proposée dans la Figure 26 correspond à la zone de travail pour la simulation de l'évapotranspiration et du confort urbain. Au sein de cette zone, la répartition de la végétation permet d'effectuer un second zonage. Travailler à l'échelle de zones plus restreintes permet de simuler les processus hydrologiques en tenant compte des propriétés locales (végétation, sol, conditions climatiques).

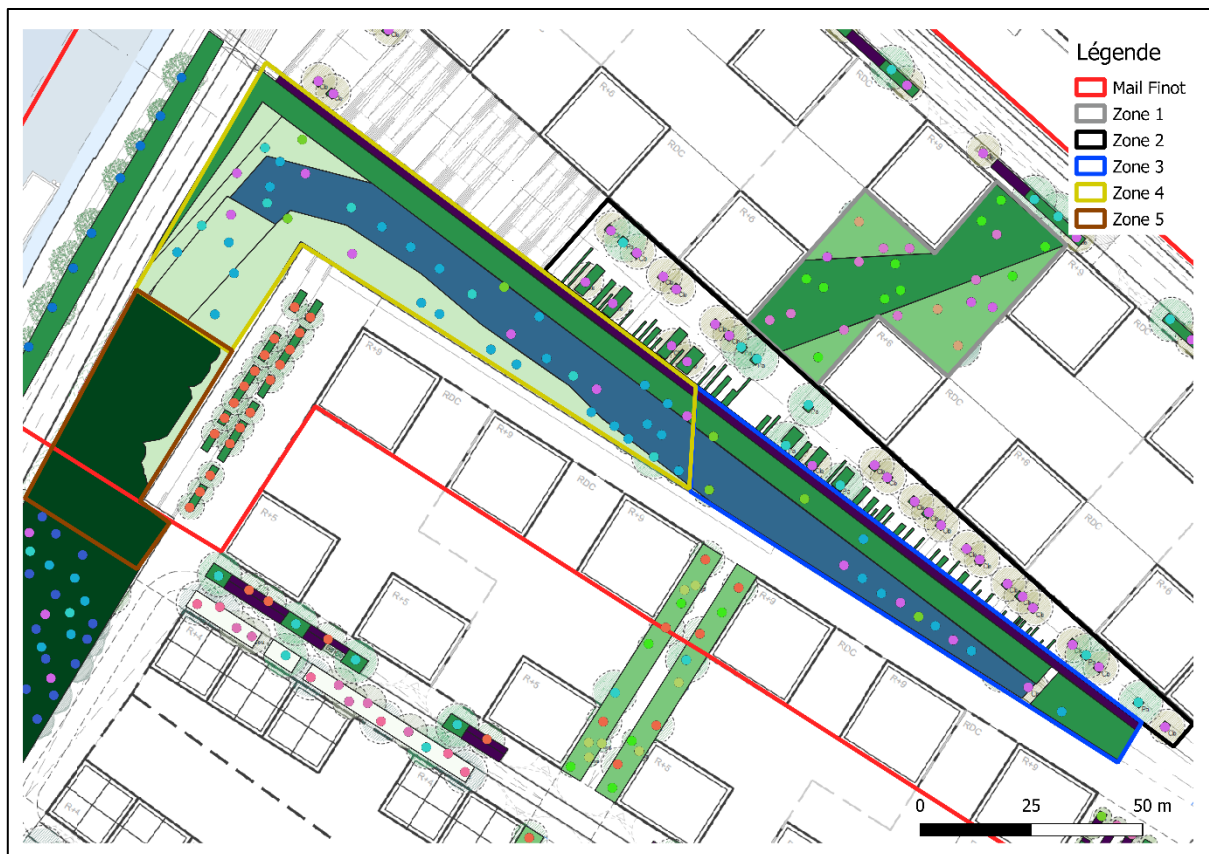


Figure 27 Présentation des zones de travail du Mail Finot

La **zone 1** est un passage entre le Mail Finot et une rue au Nord du Mail (Figure 27). Cette zone est composée de deux types de végétation basse : des plantes vivaces au centre du passage et un mélange de plantes vivaces (60%) et arbustes (40%) sur les côtés du passage. Pour la strate haute, on retrouve principalement des arbres de faible hauteur (environ 4 m) tels que le Cerisier de Sainte Lucie ou l'Amelanchier de Lamarck et des arbres de grande taille comme le Frêne (plus de 20 m) ou le Charme (entre 10 et 20 m).

La partie minérale du Mail est représentée par la **zone 2**, on y retrouve des jardinières (bac de plantation) de plantes vivaces et des arbres (Merisier et Charme) en fosses.

La **zone 3** et la **zone 4** correspondent à la partie végétalisée du Mail Finot. Cette partie est divisée en deux zones en raison de la différence de densité de la strate haute : la strate arborée de la zone 4 est plus dense que celle de la zone 3. Les espèces d'arbres sont les mêmes pour ces deux zones.

Pour la strate basse, on retrouve une étendue de gazon rustique et de plantes vivaces sur presque toute la longueur des deux zones. La partie Nord-Ouest de la zone 4 est composée d'un mélange de plantes vivaces (50%) et d'arbustes (Troène commun, Aubépine ; 50%) composant la lisière du coteau boisé. Une bande de dalles/pavés enherbés borde la limite de la partie végétalisée avec la partie urbaine du Mail. Cette bande s'étend sur les zones 3 et 4, elle permet la collecte et l'infiltration des eaux de ruissellement.

La **zone 5** correspond à l'espace boisé du coteau qui borde la route le long de la Seine. Ce bois est une Ormaie Rudérale composée d'Ormes, de Charmes, de Bouleaux, de Merisiers et d'Erables.

La strate basse est composée du même mélange de lisière que celui de la zone 4 et d'un semis de plantes herbacées. Une partie de la strate basse de cette zone n'est pas recouverte par les arbres de la strate haute.

3.2.2 Schéma de gestion des eaux pluviales (EP)

La politique environnementale des JO 2024 prône une meilleure utilisation des eaux pluviales (EP), notamment pour l'alimentation des surfaces végétalisées. Ainsi, des aménagements sont prévus afin d'optimiser la récupération des EP et leur acheminement vers les surfaces végétalisées les plus proches. Cette alimentation en eau constituera une ressource importante pour le bon développement et la pérennité de la végétation sous climats futurs. Le plan de gestion des EP (cf. VO_AVP_PG_12 - Plan d'assainissement Projet) prévu par la maîtrise d'ouvrage pour le Mail Finot est présenté ci-dessous (Figure 28).

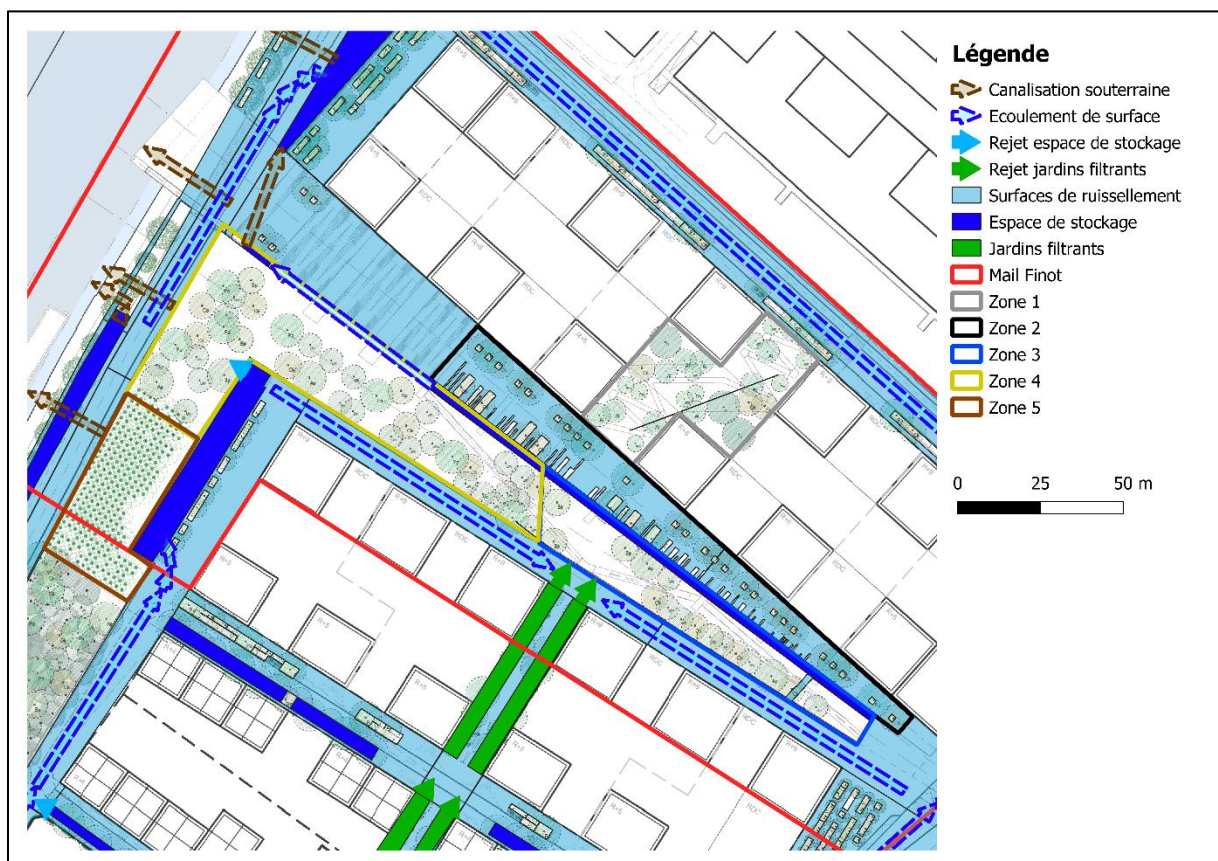


Figure 28 Schéma de gestion des eaux pluviales du Mail Finot

Les surfaces bétonnées sont présentées comme des surfaces de ruissellement des eaux pluviales. Ce sont principalement des lieux de circulation (routes et passages piétons). Le schéma de gestion des EP (Figure 28) présente les directions des écoulements qui tiennent compte de la pente des surfaces. Des

ouvrages sont prévus afin de stocker temporairement les eaux pluviales (jardinières et jardins filtrants, Figure 28) avant leur infiltration ou leur rejet vers des surfaces végétalisées.

La zone de collecte et d'infiltration des EP, située entre la partie végétalisée et la partie urbaine du Mail Finot (Figure 28), est reliée par une canalisation enterrée à une plaine d'inondation au Nord du Mail Finot. Lors d'importants épisodes pluvieux, des canalisations permettent un rejet des EP vers la Seine. Ce schéma de gestion des EP permet de déterminer les surfaces d'alimentation de chaque espace végétalisé des zones précédemment définies. Ces surfaces sont présentées, pour chaque zone, dans le paragraphe 0.

3.2.3 Caractéristiques des sols

La zone du Mail Finot repose sur un sol marno-calcaire. Des essais de perméabilité de type Porchet (de 0 à 1 m de profondeur) et en piézomètre (de 1 à 2 m de profondeur) ont été conduits. Parmi ces essais, un sondage décrit la lithologie du premier mètre dans la partie Nord du Mail Finot :

- 0,0 à 0,60 m : Remblais limoneux ;
- 0,60 à 1,0 m : Sable argileux verdâtre à passés marneux.

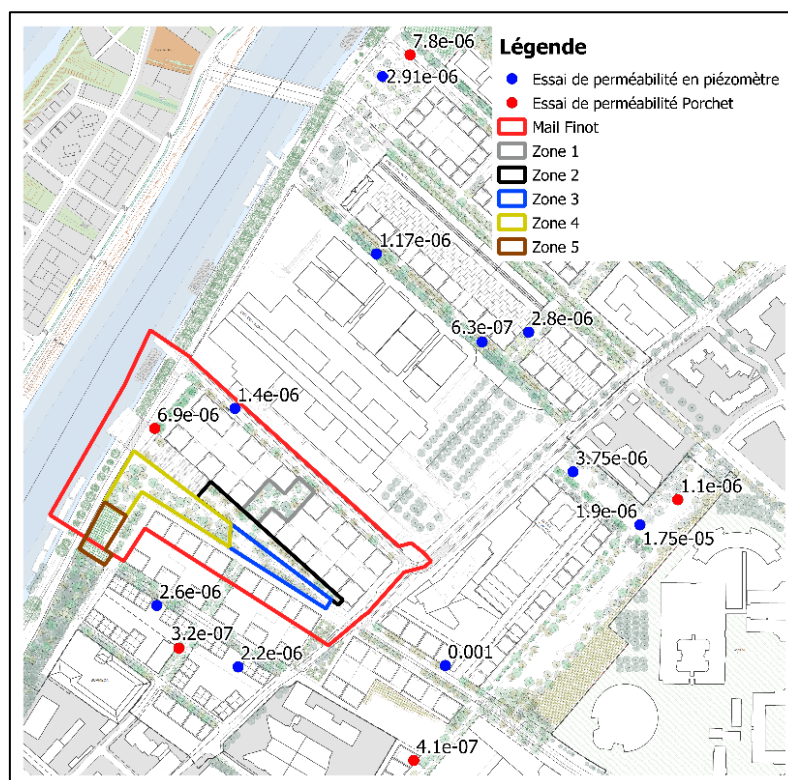


Figure 29 Localisation des points de mesure et valeurs des perméabilités du sol (valeurs en m/s)

Ces données donnent des informations importantes sur la texture et la nature du sol qui permettront de déterminer les propriétés hydrodynamiques du sol. De plus, ces essais de perméabilités donnent des valeurs de conductivité hydraulique du sol (Figure 29), paramètre essentiel pour la modélisation des transferts d'eau dans le sol.

Des sondages piézométriques ont également été réalisés dans le cadre de la phase avant-projet du VOP. Ces sondages ont permis de dresser une carte piézométrique au niveau du futur VOP.

Deux campagnes permettent d'avoir une image de la nappe sur deux périodes différentes : Février 2019 (Figure 30) et Août 2019 (Figure 31). La profondeur de la nappe phréatique au niveau du Mail Finot est d'environ 25 mNGF sur ces deux périodes avec un gradient plus important en hiver qu'en été.

La paramétrisation du milieu souterrain est présentée dans le paragraphe 4.2.3.2.

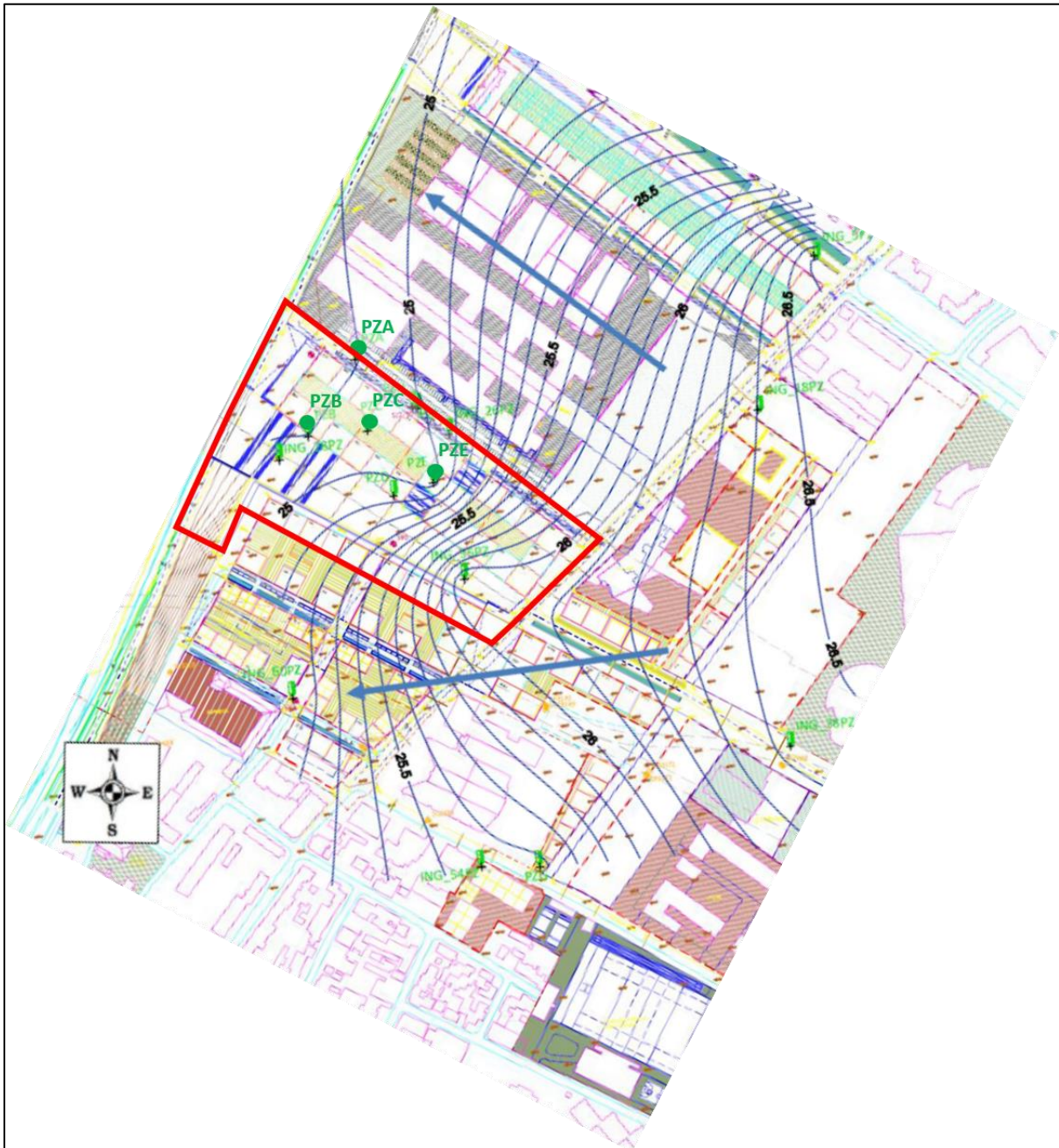


Figure 30 Cartes piézométriques de la zone d'implantation du VOP (Février 2019, document A5_Carte piézométrique_0219)

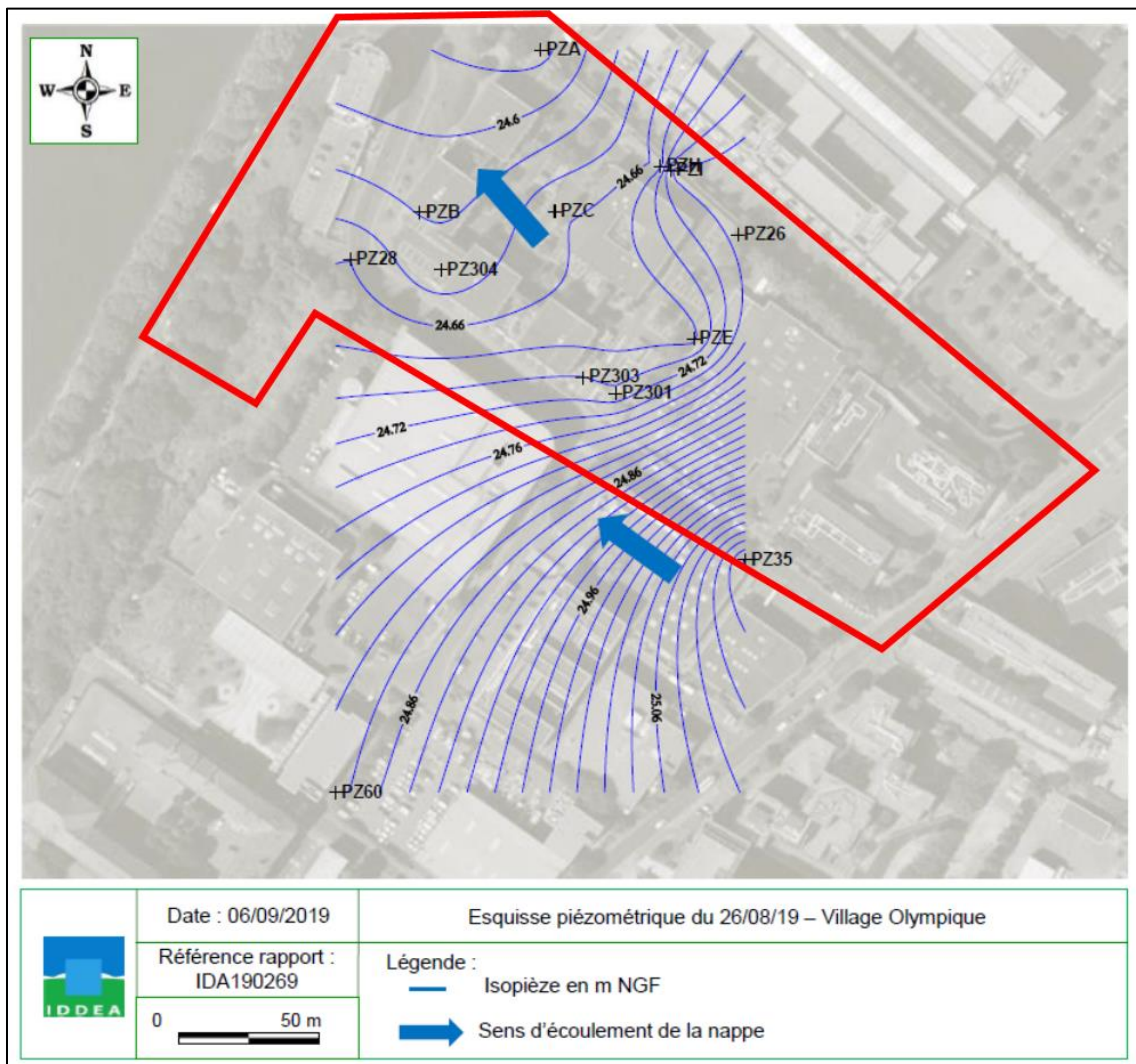


Figure 31 Cartes piézométriques de la zone d'implantation du VOP (Août 2019, document A5_Carte piézométrique_0819)

3.3 Méthodologie de chaînage des approches microclimatiques et hydrologiques

Deux approches complémentaires sont menées conjointement dans cette étude du confort urbain du prochain VOP :

- Une approche microclimatique modélise le climat urbain à l'échelle du quartier et les conditions de confort extérieur

- Une approche hydrologique modélise le fonctionnement hydrologique du continuum Atmosphère-Végétation-Sol et simule ainsi des flux d'évapotranspiration tenant compte de la disponibilité en eau dans le sol.

Des échanges de données sont nécessaires pour aboutir à un résultat satisfaisant ces deux approches. Ce chainage intervient en deux étapes :

- Le modèle microclimatique est utilisé afin de déterminer l'influence de l'environnement urbain (bâtiments et arbres) sur le rayonnement solaire perçu par les strates végétales. Ces premiers calculs thermo-radiatifs sont basés sur une maquette 3D précise du VOP qui représente la géométrie des bâtiments et de la végétation. Cette maquette inclut les matériaux prévus pour les bâtiments et les différents types de revêtements au sol mais aussi la disposition et les dimensions des différentes espèces végétales. Cette prise en compte de l'ombrage créé par les bâtiments et les arbres est présentée dans le paragraphe 3.4.2.1.1.
- Le modèle hydrologique simule des flux d'évapotranspiration réelle qui tiennent compte de l'ombrage urbain, de l'évolution des conditions hydriques du sol, des propriétés de la végétation, du recyclage des eaux pluviales et des potentiels échanges avec la nappe. Ces flux d'évapotranspiration réelle vont ensuite servir comme données de forçage pour un calcul du climat urbain couplant le calcul des vitesses de vent pour un instant donné et les calculs thermo-radiatifs du VOP. La méthodologie employée pour cette seconde étape du chainage des deux approches est présentée dans la section 4.3).

3.4 Paramétrisation des modèles

Cette partie présente la paramétrisation du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du modèle MARIE pour les calculs de l'évapotranspiration réelle (ETR) sur la zone du Mail Finot. Deux étapes sont présentées pour les simulations hydrologiques :

- Un calcul de référence est effectué en intégrant toutes les données disponibles sur les aménagements prévus pour le Mail Finot. Ces données concernent la végétation, le type de revêtement du sol, les sens des écoulements du schéma de gestion des EP (Figure 28), la nature des sols naturels et la profondeur de la nappe. Pour ce calcul, les projections climatologiques fournies par météo France pour 2050 sont utilisées en entrée de modèle. Ces données permettront de tenir compte des conditions climatologiques futures et de déterminer l'état hydrique des sols et les flux d'évapotranspiration du quartier réhabilité après les JO 2024.
- Une étude de sensibilité du calcul de l'ETP et de l'ETR est proposée. Cette étude porte donc à la fois sur la paramétrisation du modèle d'ETP et du modèle hydrologique (ETR). L'objectif est de tester l'impact de ces paramètres sur les flux d'évapotranspiration réelle et l'état hydrique des sols.

Les données climatologiques utilisées dans le calcul de référence et l'étude de sensibilité sont premièrement présentées. La paramétrisation du calcul de référence et les différentes paramétrisation de l'étude de sensibilité sont ensuite présentées.

3.4.1 Données climatologiques

Deux sets de données climatologiques sont utilisés dans cette étude : les données climatologiques de 2050 du calcul de référence de l'ETR et des données climatologiques actuelles (2018-2019). Les données de 2018-2019 seront utilisés pour tester l'influence des conditions climatologiques sur les flux d'ETR simulés.

3.4.1.1 Simulations climatologiques de 2050

Des simulations climatologiques ont été effectuées par Météo France dans le cadre de l'étude du confort urbain du futur quartier (VOP 2050). Ces calculs suivent le scénario RCP8.5 du dernier rapport du GIEC. 200 années « 2050 » pouvant statistiquement survenir ont été réalisées. Parmi ces 200 simulations, une année particulièrement chaude est sélectionnée. Cette année correspond au 3^{ème} quartile des années les plus chaudes des 200 simulations. Ces données (Tableau 11) permettront de simuler le confort urbain (et l'ETR) dans des conditions climatologiques futures et extrêmes.

Tableau 11 Bilan des conditions climatologiques de 2050 (valeurs calculées à partir des données horaires)

Variables	Cumuls	Minimums	Moyennes	Maximums
Précipitation (mm)	684	0	0,08	20
Température de l'air (°C)		0,06	16	42
Humidité relative (%)		2	51	78
Vitesse du vent (m/s)		0,2	3,5	15,4
Rayonnement global (W/m ²)	1128507	0	129	948

3.4.1.2 Conditions climatologiques 2018-2019

Les données climatologiques 2018-2019 sont utilisées dans les calculs de l'étude de sensibilité. Les flux d'évapotranspiration et l'état hydrique calculés pour le climat actuel (2018-2019) seront comparés aux résultats du calcul de référence sous climat 2050. Ces données (Tableau 12) sont mesurées à la station

du Bourget pour les précipitations, la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative. Le rayonnement global est mesuré à la station de Roissy.

Tableau 12 Bilan des conditions climatologiques de 2018-2019 (a. 2018, b. 2019 ; valeurs calculées ç partir des données horaires)

Variables	Cumuls	Minimums	Moyennes	Maximums
Précipitation (mm)	716 ^a	0 ^a	0,08 ^a	16 ^a
	678 ^b	0 ^b	0,08 ^b	16 ^b
Température de l'air (°C)		-8,5 ^a	13 ^a	36 ^a
		-4,4 ^b	13 ^b	42 ^b
Humidité relative (%)		19 ^a	72 ^a	99 ^a
		15 ^b	71 ^b	98 ^b
Vitesse du vent (m/s)		0 ^a	3,4 ^a	12 ^a
		0 ^b	3,6 ^b	15 ^b
Rayonnement global (W/m ²)	1192713 ^a	0 ^a	136 ^a	900 ^a
	1202119 ^b	0 ^b	137 ^b	978 ^b

3.4.1.3 Comparaison des conditions climatologiques futures et actuelles

Les bilans des conditions climatologiques des deux périodes (Tableau 11, Tableau 12) montrent une différence notable sur la température de l'air (Figure 32) et l'humidité relative (Figure 33). Les données climatologiques de 2050 sont issues de simulations. Ainsi, les différences d'humidité relative moyennes observées entre la période 2018-2019 et la période 2050 découlent des écarts de températures moyennes observées entre ces deux mêmes périodes. En effet, plus l'air est chaud et plus il peut contenir d'eau sous forme de vapeur. L'écart d'humidité relative moyenne de 20% (Figure 33, Tableau 11, Tableau 12) avec le climat actuel est donc représentatif de l'écart de température moyenne de +3°C (Figure 32, Tableau 11, Tableau 12) avec 2050. La vitesse du vent et le rayonnement solaire ne présentent pas d'écarts significatifs entre ces deux périodes (Tableau 11 et Tableau 12).

Une attention particulière sera portée sur la comparaison des flux d'évapotranspiration simulés avec ces deux climats (chapitre 5).

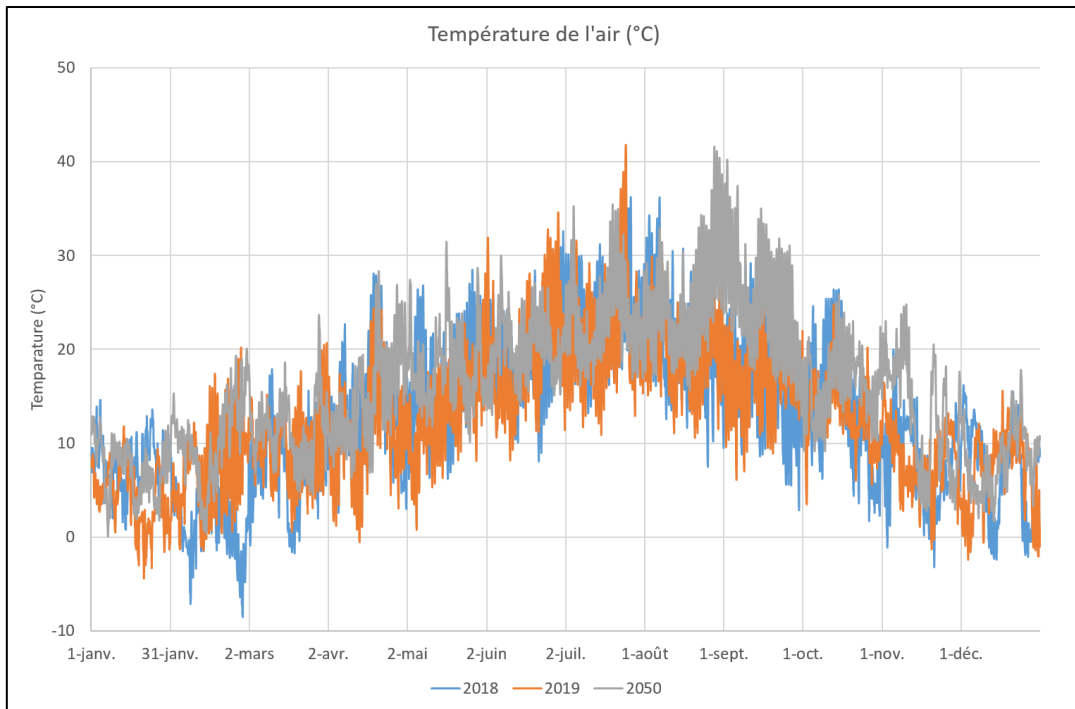


Figure 32 Comparaison de la température de l'air (°C) pour la période 2018-2019 et 2050 (données horaires)

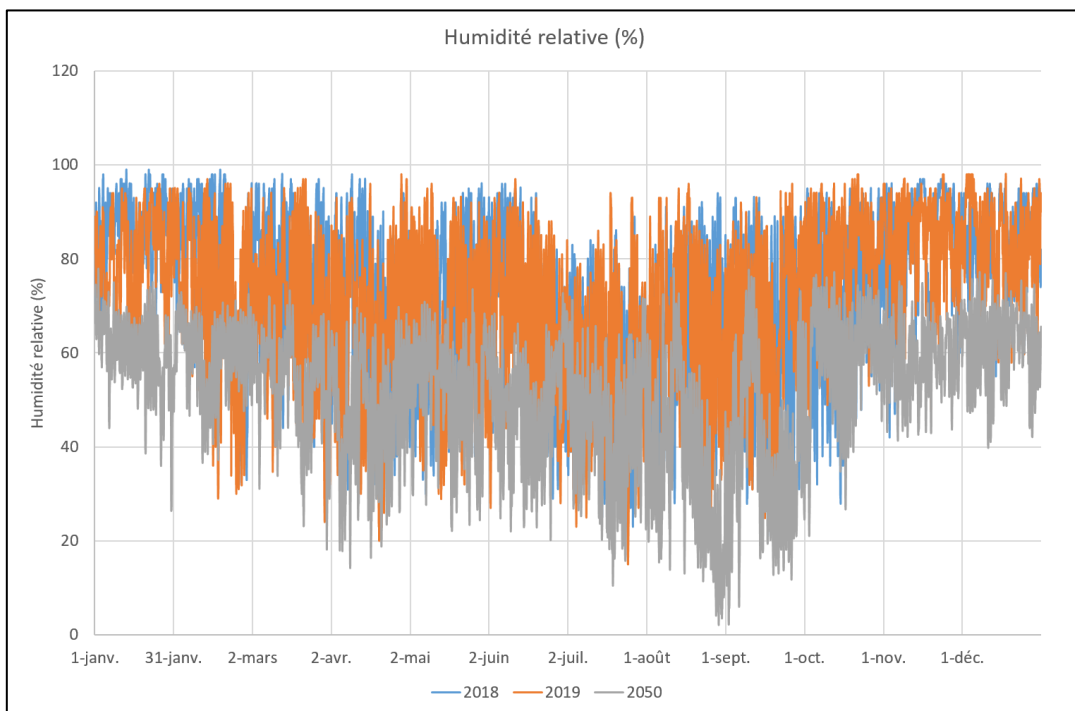


Figure 33 Comparaison de l'humidité relative de l'air pour la période 2018-2019 et 2050 (données horaires)

3.4.2 Paramétrisation du calcul de référence

On appelle calcul de référence le calcul intégrant toutes les informations disponibles sur l'aménagement du VOP et les conditions climatologiques de 2050. Il correspond donc au calcul se rapprochant le plus des conditions du quartier post-VOP en 2050 (au vue des informations actuellement disponibles). Ce calcul servira également de référence pour l'étude de sensibilité des paramètres du modèle hydrologique. De nombreuses informations sont nécessaires pour une paramétrisation optimale des calculs (sol, végétation, schéma de ruissellement des EP). Cependant, les simulations ont lieu sur un projet futur, le manque d'information est donc compensé par des hypothèses de travail justifiées.

3.4.2.1 Calcul de l'ETP multi-strate

Comme indiqué précédemment, la végétation est divisée en deux groupes : la strate haute (arbres) et la strate basse (gazons, plantes basses, arbustes). Le modèle hydrologique développé pour cette étude (MARIE) permet de prendre en compte des données d'ETP pour chacune de ces deux strates.

Le calcul de l'ETP tient compte des paramètres climatologiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement solaire) mais également des paramètres de la végétation (résistance stomatique des feuilles, indice foliaire et hauteur de la végétation).

3.4.2.1.1 Prise en compte de l'ombrage des bâtiments et des arbres

Afin de tenir compte de l'environnement et de la disposition des différentes strates végétales, le rayonnement solaire est affecté de l'ombrage des bâtiments et des arbres. Ainsi, la strate haute et la strate basse perçoivent un rayonnement différent.

Des simulations microclimatiques et thermo-radiatives effectuées avec le modèle Solene ont été menées. Ces simulations s'appuient sur une maquette 3D du VOP et donnent un rayonnement solaire par zone qui tient compte de l'ombrage des bâtiments et des arbres pour les deux strates végétales. Ce rayonnement est calculé au pas de temps horaire pour une journée de chaque mois de l'année 2050. Ces rayonnements solaires « ombragés » sont ensuite comparés (pour les 12 journées types de l'année 2050) avec un rayonnement solaire « non ombragé » (correspondant au rayonnement solaire perçu par une zone non ombragée) issu de ces mêmes simulations.

Pour les 12 journées types de 2050, un coefficient de rayonnement horaire perçu par chaque strate végétale est alors déduit pour chacune des 5 zones du Mail Finot. Les coefficients horaires de ces journées types sont affectés à toutes les journées de chaque mois. Ce coefficient est ensuite utilisé pour calculer un rayonnement global « ombragé » à partir des données de rayonnement global simulées par Météo France pour 2050.

Les valeurs moyennes de ces rayonnements, pour l'année 2050, sont présentées dans le Tableau 13. On peut voir qu'en moyenne la strate basse perçoit moins de rayonnement que la strate haute.

La strate basse de la zone 1 présente le rayonnement solaire le plus faible tandis que la strate basse de la zone 5 présente le rayonnement solaire le plus élevé. Une partie de la strate basse de la zone 5 n'est pas recouverte par la strate haute (Figure 27) et cette zone est la mieux exposée au rayonnement solaire. Malgré une couverture végétale partielle, la strate basse de la zone 5 apparaît la plus ensoleillée du Mail Finot.

Tableau 13 Valeurs moyennes (année 2050) du rayonnement global (R_g) affecté de l'ombrage des bâtiments et des arbres

Strate végétale	Zone 1 (W/m^2)	Zone 2 (W/m^2)	Zone 3 (W/m^2)	Zone 4 (W/m^2)	Zone 5 (W/m^2)	Rg non ombragé (W/m^2)
Strate Haute	65	80	84	96	129	129
Strate Basse	49	47	75	74	84	129

Ce rayonnement global ombragé est ensuite utilisé pour calculer le rayonnement net (voir méthode de calcul dans le paragraphe 2.1.3.2) intervenant dans la formule de Penman pour le calcul de l'ETP.

3.4.2.1.2 Paramétrisation de la végétation

On suppose qu'un arbre et du gazon ne génèrent pas les mêmes flux d'évapotranspiration en raison des différences de taille, de feuillage et de physiologie. La séparation de la végétation en strate haute et en strate basse permet ainsi de tenir compte de ces différences de propriétés affectant l'évapotranspiration. De multiples espèces végétales composent ces deux strates et chacune de ces espèces végétales possède des propriétés différentes. Parmi les multiples propriétés des végétaux, on s'intéresse ici aux paramètres importants dans le calcul de l'ETP :

- La résistance stomatique des feuilles, r_{sf} (s/m). La résistance stomatique correspond à la contrainte physiologique imposée par la végétation au mouvement de vapeur d'eau depuis la plante vers l'air (Bouyer, 2009).
- L'indice foliaire, LAI. Cet indice représente la surface cumulée des faces supérieures des feuilles sur toute (ou en partie) la hauteur du couvert et par unité de surface de sol sous-jacent (Bouyer, 2009). Le LAI caractérise donc la surface couverte par le feuillage sur une unité de surface donnée.
- La hauteur du végétal (m).

Les valeurs de la résistance stomatique et du LAI peuvent varier selon les saisons et le développement du végétal. Ces deux paramètres ont fait l'objet d'une recherche bibliographique afin de trouver des valeurs moyennes pour les espèces végétales présentes sur le Mail Finot. Un tableau récapitulatif des valeurs trouvées pour ces paramètres et des références associées est présenté en Annexe 1. Peu de valeurs sont disponibles dans la littérature, en particulier pour les plantes basses qui ne sont pas des cultures. Toutefois, les valeurs trouvées permettent d'avoir un ordre de grandeur des paramètres du calcul de l'ETP pour certaines espèces présentes sur le Mail Finot.

Une représentation détaillée et localisée de la végétation n'est pas souhaitée dans cette étude afin de ne pas complexifier inutilement les calculs. En effet, les rapport ETR/ETP de chaque zone, simulés par l'approche hydrologique, sont utilisés dans le modèle microclimatique Solène. Il paraît donc nécessaire, au sein de chaque strate (et chaque zone), de moyenner les propriétés des différentes espèces végétales.

Au sein de chaque zone, de nouveaux ensembles « strate haute + strate basse » sont créés. Ces ensembles ont pour objectif de définir des espaces homogènes dans MARIE en moyennant les propriétés de chaque espèce végétale (pour les deux strates). Cette nouvelle division des zones peut être assimilée comme une discrétisation spatiale visant à mieux tenir compte de l'hétérogénéité spatiale des espèces végétales. Cette délimitation est faite en suivant les surfaces de la strate basse. Une illustration de cette délimitation est proposée dans la Figure 34.

Dans cet exemple, deux ensembles sont identifiés pour la strate basse en distinguant les plantes vivaces (en vert clair) et le gazon (en violet, Figure 34). Ce découpage conditionne ensuite celui de la strate haute sus-jacente (en orange pour la strate haute au-dessus du gazon et en jaune pour la strate haute au-dessus des plantes vivaces).

Les propriétés sont ensuite pondérées au sein de chaque ensemble par un ratio de surface ($S_{\text{végétal}}/S_{\text{strate}}$). Les propriétés moyennées pour les deux ensembles « strate haute + strate basse » de la zone 3 sont présentées dans le Tableau 14. Les paramètres des ensembles des autres zones sont présentés en Annexe 2. Les valeurs moyennes par zones des paramètres de la végétation sont présentées dans le Tableau 15. Le rapport r_s/r_a (résistance stomatique/résistance aérodynamique ; voir paragraphe 2.1.3.2) présente une valeur moyenne des paramètres de la végétation. Le modèle MARIE effectue une simulation par ensemble « strate haute + strate basse ».

Tableau 14 Paramètres des ensembles "strate haute + strate basse" de la zone 3

	Zone 3			
	Haute + gazon		Haute + vivaces	
	Ste Haute	Ste Basse	Ste Haute	Ste Basse
LAI	4,2	2,8	4,1	3,0
rsf (s/m)	425,2	42,0	426,8	303,0
hveg (m)	15,9	0,1	17,3	0,5
Surface (m ²)	509	585	253,7	487

Tableau 15 Valeurs moyennes des paramètres de la végétation pour les 5 zones du Mail Finot (les valeurs de chaque ensemble "strate haute + strate basse" sont pondérées de la surface de chaque strate)

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute	Basse
LAI	4,0	3,0	6,0	3,0	4,2	2,9	4,4	2,9	4,5	3,0
rsf (s/m)	322,7	303,0	534,4	303,0	425,7	147,3	399,2	178,1	476,7	263,8
hveg (m)	13,1	0,7	15,6	0,5	16,3	0,3	21,1	0,8	20,0	1,6
rs/ra	49,8	17,4	58,0	15,1	66,8	6,2	63,9	11,2	73,7	22,1
Surface (m ²)	844	821	1385	327	763	1071	1927	1946	1256	115

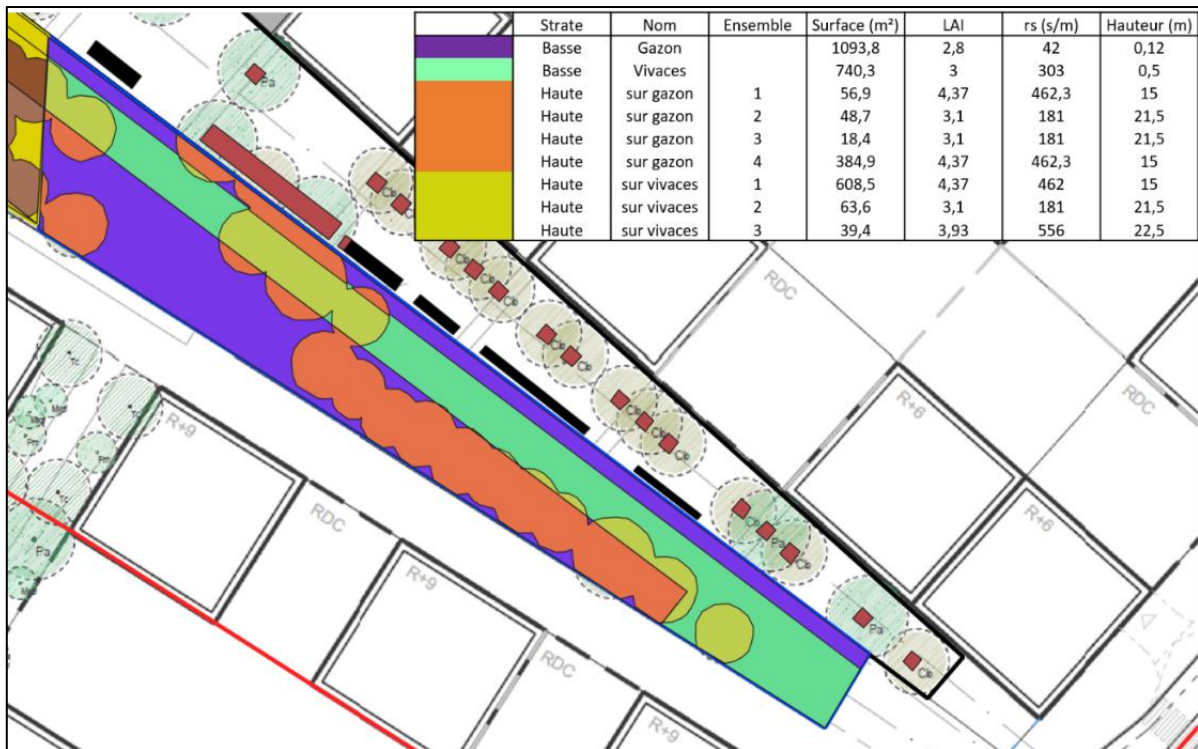


Figure 34 Délimitation de la zone 3 en "ensemble strate haute + strate basse » pour les calculs hydrologiques

3.4.2.2 Surfaces de ruissellement des eaux pluviales

Le schéma de gestion des eaux pluviales (EP) prévoit une redirection des EP vers les surfaces végétalisées les plus proches. Ces surfaces d'alimentation en eau par ruissellement sont donc définies pour chaque zone en suivant le schéma de gestion des EP précédemment présenté pour le Mail Finot (Figure 35).

La zone 2 est incluse dans la zone d'alimentation de la zone 3. La zone 1 est alimentée par les eaux pluviales qui ruissellent sur la route et les trottoirs au Nord du Mail Finot. La zone 4 est alimentée par la partie Nord minérale du Mail et les terrasses supérieures qui se déversent directement sur les surfaces végétalisées de la zone 4. Les eaux de pluie qui ruissellent sur ces terrasses n'alimentent donc pas la zone 5.

Les lames d'eau de pluie ruisselées sont calculées à chaque pas de temps à partir des surfaces d'alimentation et de leurs coefficients de ruissellement. Ces coefficients de ruissellement dépendent du type de revêtement. Des valeurs de ces coefficients sont proposées dans l'étude de gestion des crues décennales et centennales menée pour le projet du VOP (coefficient de ruissellement : béton = 0,8 ; pavés béton = 0,5 ; pleine terre = 0).

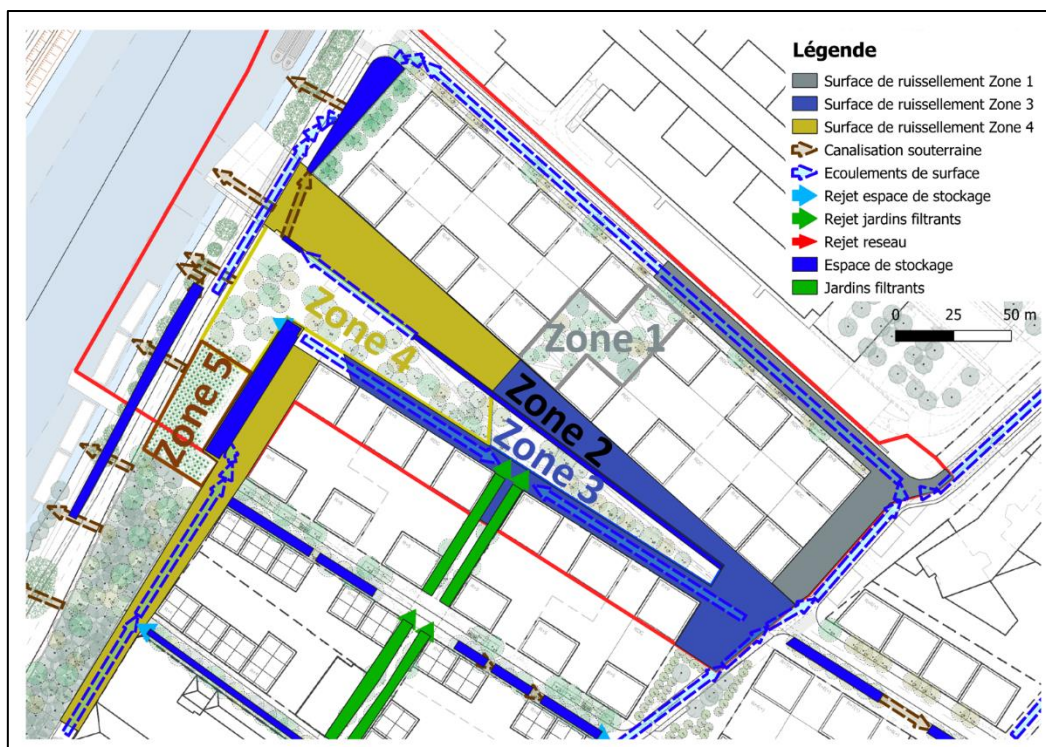


Figure 35 Surfaces d'alimentation des zones par ruissellement des eaux pluviales

Une valeur moyenne de ce coefficient est calculée pour chaque surface d'alimentation en effectuant une pondération par la superficie occupée par chaque matériau. Ces valeurs, ainsi que les surfaces de ruissellement pour chaque zone, sont présentées dans le Tableau 16.

Tableau 16 Récapitulatifs des surfaces d'alimentation de chaque zone

Paramètres	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Surface de la zone (m ²)	1665	1385	1834	3873	1371
Surface d'alimentation (m ²)	2459	0	4939	5808	0
Coefficient de ruissellement	0,8	0	0,5	0,47	0

3.4.2.3 Paramétrisation du milieu souterrain

Le modèle hydrologique MARIE permet une discrétisation du milieu souterrain en réservoir d'épaisseurs variables (voir paragraphe 2.3.1.3). Des propriétés hydrodynamiques différentes peuvent ainsi être affectées à chaque réservoir. Cette discrétisation permet également de présenter un profil racinaire variable pour les différentes strates végétales.

3.4.2.3.1 Zone non saturée

La zone non saturée (ZNS) désigne la partie du milieu souterrain dans laquelle les pores des matériaux (sol, roche) ne sont pas totalement saturés en eau. Cette zone s'étend donc de la surface jusqu'à la nappe (zone saturée, ZS). Comme indiqué par les cartes piézométriques (Figure 30 et Figure 31), la nappe a une profondeur moyenne de 25 mNGF au niveau du Mail Finot. L'épaisseur de la ZNS dépend également de la côte du sol. Les épaisseurs moyennes de ZNS sont présentées pour les 5 zones dans le Tableau 17.

Tableau 17 Epaisseurs moyennes de la zone non saturée des 5 zones du Mail Finot

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4 Partie Mail	Zone 4 Partie Coteau	Zone 5
Epaisseur ZNS (m)	13	3	16	14	9	9

Comme indiqué dans le paragraphe 3.2.1, la végétation de la zone 2 est implantée dans des jardinières (strate basse) ou des fosses (strate haute). On suppose que ces fosses sont très peu perméables et ne sont donc pas reliées à la nappe sous-jacente. L'épaisseur de la ZNS de la zone 2 correspond alors à la profondeur des fosses qui est supposée de 3 m (pour permettre un bon développement du système racinaire). La zone 4 est située sur la partie du Mail où le dénivelé est le plus élevé, l'épaisseur de la ZNS y est donc fortement variable. La partie boisée au Nord-Ouest de la zone 4 est significativement plus basse que la partie Sud-Est (Tableau 17). Cette différence d'épaisseur de ZNS est prise en compte dans le modèle : l'épaisseur plus faible de ZNS de la partie coteau de la zone 4 est affectée à l'ensemble « strate haute + strate basse » correspondant.

3.4.2.3.2 Propriétés hydrodynamiques du sol

Les propriétés hydrodynamiques du sol utilisées pour la modélisation des transferts d'eau en milieu insaturé sont présentées dans le paragraphe 2.2.2. Ces propriétés sont définies dans la littérature pour différentes classes de texture de sol (argile, limon, sable...). Dans le cadre de cette étude, des sondages et essai de perméabilité ont été effectués et donnent des informations sur la nature des sols. Parmi ces sondages, la reconnaissance du type de sol lors d'un essai de perméabilité par la méthode Porchet indique la présence de remblai limoneux dans la partie Nord du Mail Finot (paragraphe 3.2.3, Figure 29).

Le terme remblai désigne un matériau remanié par l'activité humaine et composé de matériaux divers (déchets de construction, béton, etc). Cette hétérogénéité de la composition du sol ne peut être représentée par le modèle MARIE. En effet, le modèle MARIE est utilisé pour simuler les transferts d'eau dans un milieu poreux homogène. De plus, les propriétés hydrodynamiques de ces matériaux hétérogènes sont très peu étudiées dans la littérature puisqu'elles dépendent fortement des éléments qui les compose.

Néanmoins, cette information lithologique nous indique que les propriétés du sol du Mail Finot peuvent être apparentées aux propriétés d'un sol limoneux. Ces propriétés hydrodynamiques sont rappelées ci-dessous (pour la loi hydrodynamique sélectionnée dans cette étude, cf. paragraphe 2.3.6):

Tableau 18 Rappel des paramètres hydrodynamiques de la loi de Brooks et Corey (valeurs indicatives pour différentes classes de sol, valeurs issues de Hydrus 1D)

Type de sol	θ_r	θ_s	α (1/m)	n	K_s (m/s)
Sable limoneux	0,035	0,437	0,087	2,11	1,70E-05
Loam sableux	0,041	0,453	0,147	3,106	7,19E-06
Limon	0,015	0,501	0,207	4,74	1,89E-06
Argile sableuse	0,109	0,479	0,29	5,95	3,33E-07
Argile limoneuse	0,056	0,475	0,342	7,87	2,50E-07

La valeur de conductivité hydraulique d'un limon (1,9E-06 m/s) peut être comparée aux mesures de conductivité hydraulique effectuées sur le VOP (Figure 36). La valeur de conductivité hydraulique d'un limon, pour la loi Brooks et Corey (Tableau 18), est du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées sur le Mail Finot.

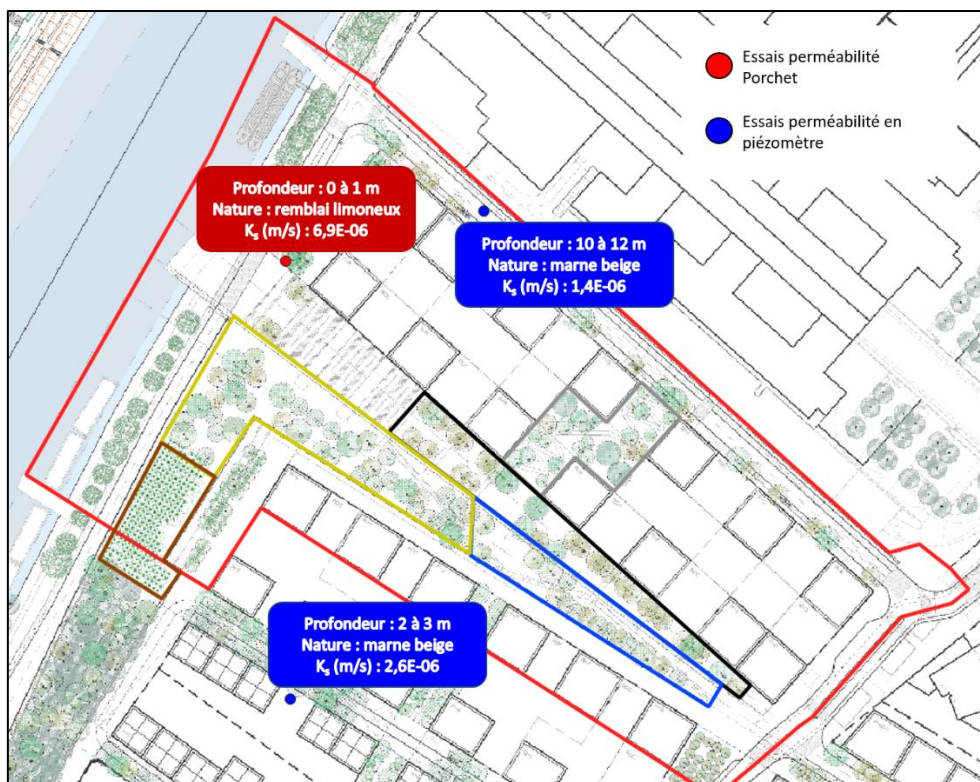


Figure 36 Points de mesures de la perméabilité sur le Mail Finot

Par ailleurs, il est important de noter que les sols du VOP seront probablement remaniés lors de la phase de travaux. Faute d'information sur la composition finale des sols du VOP (et pour ne pas complexifier inutilement l'interprétation des résultats de cette étude), les propriétés hydrodynamiques du limon seront affectées sur toute l'épaisseur de la ZNS.

Cette hypothèse ne devrait pas avoir d'incidence sur les échanges entre la végétation et la nappe au vu de l'importante épaisseur de ZNS du Mail Finot (de 9 à 16 m). Deux autres types de sol (=propriétés hydrodynamiques différentes) seront testés lors de l'étude de sensibilité.

3.4.2.3.3 Profil racinaire de la végétation

Le modèle MARIE permet de discrétiser le profil racinaire de la végétation pour les calculs du bilan hydrologique du sol. Ce profil racinaire est présenté ci-dessous pour les différents types de végétation (Tableau 19). Les valeurs présentées ne sont pas issues de la littérature (aucune valeur spécifique pour les espèces que nous considérons n'a été trouvée) et sont donc sujettes à discussion. Néanmoins, ces profondeurs racinaires paraissent cohérentes avec ce que l'on peut trouver dans la nature et permettent de tenir compte de la diversité des espèces végétales qui seront présentes sur le Mail Finot.

Tableau 19 Répartition de la densité des racines dans les réservoirs de la ZNS

Epaisseur réservoir (m)	Profondeur ZNS (m)	Strate basse			Strate haute
		Gazon et semis sous-bois	Vivaces et mélange passages jardinés	Mélange lisière	
0,2	0,2	100%	50%	25%	10%
0,2	0,4		50%	25%	10%
0,2	0,6			25%	10%
0,2	0,8			25%	10%
0,2	1,0				10%
0,5	1,5				25%
0,5	2,0				25%

On considère ici que les différentes espèces arborées possèdent un profil racinaire similaire qui atteint 2 m de profondeur. Le groupe « mélange des passages jardinés » est composé à 60% de plantes vivaces et 40% d'arbustes, son profil racinaire se rapproche donc de celui des plantes vivaces. Les espèces arbustives envisagées dans le groupe mélange de lisière (50% vivaces et 50% arbustes) ont une hauteur pouvant atteindre 1,5 m à 4 m de hauteur. Il est donc supposé que leurs profils racinaires s'étendent plus en profondeur. Les profondeurs moyennes des racines des strates hautes et strates basses des (zones sont présentées dans le Tableau 20.

Tableau 20 Profondeurs moyennes des racines pour la strate haute et la strate basse de chaque zone

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute	Basse
Prof. Rac (m)	2,0	0,2	2,0	0,4	2,0	0,3	2,0	0,4	2,0	0,7
Surface (m ²)	844	821	1385	327	763	1071	1927	1946	1256	115

3.4.3 Paramétrisation des calculs de sensibilité

Une étude de sensibilité est menée sur les paramètres du calcul de l'ETP et les paramètres du modèle hydrologique MARIE. Les paramètres concernés peuvent être regroupés en 4 catégories :

- Les paramètres liés à la végétation
- Les propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée (ZNS)
- Les aménagements liés à la gestion des EP
- Les conditions climatologiques

20 calculs différents ont été effectués dans le cadre de cette étude de sensibilité. Les variables observées pour chacun de ces calculs sont :

- **L'évapotranspiration potentielle (ETP)**, qui traduit la capacité maximale de la végétation à évapotranspirer l'eau de pluie et l'eau du sol (en l'absence de stress hydrique) et dépend des propriétés des végétaux et des conditions climatiques.
- **L'évapotranspiration réelle (ETR)**, traduit la quantité d'eau qui a vraiment été évapotranspirée par la végétation et dépend de la quantité d'eau disponible dans le sol (paramètres de la zone non saturée, alimentation par ruissellement des EP) et de la profondeur des racines.
- **Le ratio f (ETR/ETP)**, traduit le déficit d'évapotranspiration réelle par rapport à la quantité d'eau qui était potentiellement évapotranspirable. Les valeurs de f inférieures à 1 indiquent un manque d'eau pour que la végétation évapotranspire à sa capacité maximale (ETP). Des valeurs seuils de ce ratio f sont proposées (50 % et 20 %) afin de calculer des durées aux cours desquelles l'ETR représente 50 % et 20 % de l'ETP. Ces seuils peuvent être envisagés comme des indicateurs simplifiés d'un stress hydrique subit par la végétation.
- **La teneur en eau moyenne dans la zone racinaire**, correspond à la quantité d'eau directement disponible pour la végétation. Deux calculs de cette teneur en eau moyenne de la zone racinaire sont effectués : (1) une moyenne dans les 40 premiers centimètres de la zone racinaire qui traduirait principalement l'évolution de la teneur en eau dans la zone racinaire de la strate basse, et (2) une moyenne sur la totalité de la zone racinaire (strate basse + strate haute). Pour ces deux valeurs de teneur en eau moyenne, plusieurs seuils critiques peuvent indiquer un déficit d'eau significatif pour le développement de la végétation :
 - Le point de flétrissement de la plante correspond à la teneur en eau du sol au-delà de laquelle la plante n'est plus capable de puiser l'eau du sol. La teneur en eau correspondant au point de flétrissement de la plante est calculée à partir des propriétés hydrodynamiques du sol et d'une charge de pression caractéristique de ce point de flétrissement ($h_{PF} = -150m$).
 - Un premier seuil intermédiaire est proposé et correspond à une teneur en eau au-delà de laquelle la plante ne transpire plus à sa capacité maximale.

Ce seuil est appelé dans la suite de ce rapport « point de réduction de l'ETP ». La teneur en eau du « point de réduction de l'ETP » est également calculée à partir des propriétés hydrodynamiques du sol et d'une charge de pression qui peut varier en fonction de l'espèce végétale considérée. Des exemples de ces valeurs sont disponibles dans les paramètres « par défaut » du logiciel HYDRUS1D.

Parmi ces valeurs, on retiendra la charge de pression $h_{PF2} = -3$ m au-delà de laquelle le gazon et les orangers ne peuvent plus évapotranspirer à leurs capacités potentielles. Le gazon est largement présent sur le VOP et l'oranger est la seule espèce présente dans cette banque de données pouvant s'apparenter un à un arbre.

- Un second seuil intermédiaire appelé « point de réduction de l'ETR » correspondrait à la teneur en eau au-delà de laquelle la plante ne pourrait plus évapotranspirer au-delà d'une valeur seuil de l'évapotranspiration. Une valeur seuil de l'évapotranspiration de 0,1 cm/jour, pour une charge de pression de -10 m (pour le gazon et l'oranger), est présentée dans le logiciel HYDRUS1D. On s'intéresse exclusivement à la valeur de la charge de pression (-10 m) qui permet de calculer une teneur en eau au-delà de laquelle la plante subirait une seconde limitation de sa capacité d'évapotranspiration.

Ces valeurs seuils des teneurs en eau (point de flétrissement, point de réduction de l'ETP et point de réduction de l'ETR) ne sont pas paramétrées dans le modèle pour influencer le taux d'évapotranspiration de la végétation. Ces valeurs servent uniquement d'indicateurs de stress hydrique subit par la végétation.

Les paramètres des 20 calculs de sensibilités sont présentés ci-dessous (Tableau 23).

3.4.3.1 Propriétés de la végétation

On s'intéresse dans cette étude de sensibilité à 3 paramètres intervenant sur les flux d'évapotranspiration des végétaux : l'indice foliaire (LAI), la résistance stomatique et la profondeur des racines.

3.4.3.1.1 LAI et résistance stomatique

Des valeurs de LAI et de résistance stomatique de différentes espèces végétales (cultures, plantes basses, arbustes et arbres) sont disponibles dans la littérature scientifique (Annexe 1). Des valeurs « extrêmes » de ces paramètres sont affectées à la végétation (strate haute et strate basse) afin de tester l'impact de ces paramètres sur l'évapotranspiration potentielle et réelle. La valeur maximale de ces paramètres correspond au double de la valeur de référence et la valeur minimale est la valeur de référence divisée par 2. Ces valeurs « extrêmes » utilisées dans les calculs de sensibilité sont présentées en Annexe 3 et 4.

Ces valeurs minimales et maximales respectent la gamme de valeurs trouvées dans la littérature et sont calculées à partir des valeurs du cas de référence (voir paragraphe 3.4.2.1.2).

3.4.3.1.2 Profondeur des racines

Des réductions et des extensions de la zone racinaire sont testées sur la strate haute et la strate basse de chaque zone. Ces tests ont pour objectif de présenter la sensibilité des flux d'évapotranspiration réelle face à une extension ou une réduction de la réserve en eau directement utilisable par la végétation. Pour rappel, ces profils racinaires ne sont pas issus de la littérature et représentent des hypothèses de travail permettant de discrétiser la densité des racines dans les différents réservoirs de la zone non saturée.

La réduction ou l'extension de la zone racinaire est effectuée pour chaque strate en enlevant ou en rajoutant 50 % de la profondeur de la zone racinaire du calcul de référence. La profondeur de la zone racinaire de la strate haute est de 2 m (voir paragraphe 3.4.2.3.3).

Ainsi, des profils racinaires moyens de 1 m et de 3 m sont générés pour la réduction et l'extension de la zone racinaire de la strate haute (Figure 37).

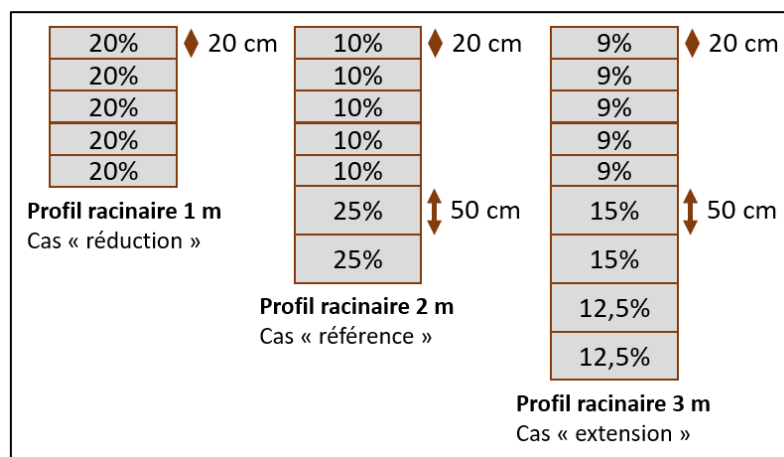


Figure 37 Profils racinaires moyens pour la strate haute

Ces réductions et extensions sont également effectuées pour les profils racinaires de la strate basse présentées dans le paragraphe 3.4.2.3.3.

3.4.3.2 Propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée

Les propriétés hydrodynamiques de la ZNS affectent la capacité de rétention en eau du sol et la vitesse des transferts d'eau dans le sol. Différentes paramétrisations sont testées.

3.4.3.2.1 Types de sol

Comme indiqué précédemment, les propriétés hydrodynamiques des sols sont liées à la nature et la texture du sol. Un sol sablo limoneux et un sol argileux ont des propriétés hydrodynamiques différentes (Tableau 18). Le sol sablo limoneux possède une conductivité hydraulique et une teneur en eau à saturation plus élevées que celles du sol limoneux mais une teneur en eau résiduelle plus faible. Le sol sablo limoneux est donc caractérisé par une faible capacité de rétention en eau par rapport au sol limoneux. A l'inverse, l'argile limoneuse se distingue des sols limoneux et sablo limoneux par sa plus forte capacité de rétention en eau et sa faible valeur de conductivité hydraulique.

Les propriétés hydrodynamiques des sols sablo limoneux et argilo limoneux sont donc affectées dans chaque réservoir de la ZNS.

3.4.3.2.2 Profil de conductivité hydraulique à saturation

Les premiers mètres d'un sol peuvent être caractérisés par un profil de conductivité hydraulique hétérogène. Cette hétérogénéité est souvent liée à la nature des matériaux qui composent les différents horizons des sols, à la compaction de ces horizons et au développement du végétal en surface. Un profil de conductivité hydraulique hétérogène est donc construit (Figure 38) avec une conductivité hydraulique à saturation plus élevée en surface ($K_s = 1,0E-05$ m/s). Cette conductivité hydraulique suit une loi linéaire décroissante le long de la zone racinaire de la strate haute jusqu'à atteindre la conductivité hydraulique du limon ($K_s = 1,86E-06$ m/s). Cette hypothèse de conductivité hydraulique décroissante est assez fréquente en hydrologie urbaine (Pophillat et al., n.d ; Rodriguez et al., 2007).

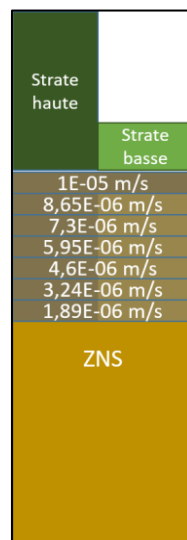


Figure 38 Profil de conductivité hydraulique hétérogène

3.4.3.2.3 Loi Van Genuchten

La loi hydrodynamique de Van Genuchten est testée afin de calculer les conductivités hydrauliques en fonction des teneurs en eau de la zone non saturée. La loi de Brooks et Corey était préférée dans le calcul de référence en raison d'une discrétisation de la ZNS jugée peu adaptée à la loi de Van Genuchten. Néanmoins, cette observation est issue de la comparaison entre le modèle hydrologique MARIE et le modèle HYDRUS 1D à partir d'un cas test de faible profondeur (voir paragraphe 2.3). De plus, comme indiqué précédemment, le choix de la loi hydrodynamique ne devrait ici pas avoir autant d'impact sur les flux d'évapotranspiration en raison des fortes profondeurs de la ZNS comparés à la faible profondeur du cas test (4 m). La loi de Van Genuchten est donc testée, à la place de la loi Brooks et Corey, pour un sol limoneux (Tableau 21) en suivant la même paramétrisation que celle du cas de référence.

Tableau 21 Rappel des paramètres hydrodynamiques de la loi Van Genuchten

Type de sol	θ_r	θ_s	α (1/m)	n	Ks (m/s)
Sable limoneux	0,057	0,41	12,4	2,28	4,05E-05
Loam sableux	0,065	0,41	7,5	1,89	1,23E-06
Limon	0,034	0,46	1,6	1,37	6,94E-07
Argile sableuse	0,1	0,38	2,7	1,23	3,33E-07
Argile limoneuse	0,07	0,36	0,5	1,09	5,55E-08

3.4.3.3 Aménagements liés à la gestion des eaux pluviales

La politique de gestion des EP du VOP 2024 vise à optimiser l'alimentation des surfaces végétalisées par les eaux pluviales. Cette optimisation pourrait s'apparenter à une modification des surfaces de ruissellement alimentant ces zones végétalisées ou bien à l'utilisation de l'eau de pluie provenant des toitures végétalisées et non végétalisées des îlots privés. Par ailleurs, des contraintes d'infiltrations ont été identifiées sur l'emprise du Mail Finot. Ces contraintes d'infiltration et des modifications des zones d'alimentation sont également testées dans cette étude de sensibilité.

3.4.3.3.1 Surfaces de ruissellement

Chaque zone précédemment définie possède sa propre surface d'alimentation par ruissellement des eaux pluviales (voir paragraphe 0). Ces zones d'alimentation sont supposées très importantes puisqu'elles déterminent, à chaque pas de temps, la quantité d'eau qui atteint les surfaces végétalisées. Un premier calcul sans surfaces d'alimentation est effectué afin de montrer l'importance de l'alimentation des zones végétalisées par ruissellement des EP. Un second calcul montre l'impact d'une augmentation de ces surfaces d'alimentation (« surfaces optimisées ») pour chaque zone (Tableau 22).

On considère ici des surfaces plus étendues mais l'effet de cette hypothèse peut globalement être interprété comme celui d'une augmentation des apports en eau sur chaque zone.

D'un point de vue aménagement des espaces publics, l'augmentation de ces surfaces peut être assimilée à une redirection d'un système de collecte des EP (ex : toitures végétalisées, gouttières, ...) vers les surfaces végétalisées.

Tableau 22 Surfaces "optimisées" de ruissellement des eaux pluviales du calcul de sensibilité

Paramètres	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Surface de la zone (m ²)	1665	1385	1834	3873	1371
Surface d'alimentation "référence" (m ²)	2459	0	4939	5808	0
Surface d'alimentation "optimisée" (m ²)	4124	1385	6763	9681	1371
Coefficient de ruissellement	0,8	0 (0,5)	0,5	0,47	0 (0,3)

3.4.3.3.2 Imperméabilisation de la ZNS

Le VOP sera implanté sur une ancienne zone industrielle. L'activité passée de cette zone a laissé des traces d'hydrocarbures et de benzène dans les sols et la nappe. Un plan de contrainte d'infiltration est donc en place sur cette zone afin de lutter contre l'infiltration de matières polluantes dans la nappe de la Seine (cf. 2019_11_P04134.14-LOT 2- CONTRAINTES). Des simulations ont été effectuées avec une limite imperméable située à 2 ou 3 m de profondeur. Ces calculs permettront de présenter l'impact de telles contraintes sur les flux d'évapotranspiration et l'état hydrique du sol.

3.4.3.4 Conditions climatologiques

Les conditions climatologiques intervenant dans le calcul de l'ETP (et donc de l'ETR) sont :

- La température de l'air,
- L'humidité relative de l'air,
- La vitesse du vent
- Le rayonnement solaire
- Les précipitations

Ces paramètres ne sont pas testés indépendamment comme le sont les paramètres de la végétation et de la zone non saturée. Néanmoins, l'étude de sensibilité intègre des calculs des flux d'évapotranspiration réelle sous climat actuel (2018-2019). Le rayonnement solaire sans ombrages des bâtiments et des arbres est également testé dans cette étude de sensibilité.

3.4.3.4.1 Climat actuel

Une comparaison des conditions climatiques actuelles (2018-2019) et futures (2050) est présentée dans le paragraphe 3.4.1. Cette comparaison montre un écart significatif de la température moyenne et de l'humidité relative moyenne (+3 °C et -20% entre 2018-2019 et 2050 ; voir Tableau 11, Tableau 12, Figure 32 et Figure 33). Le rayonnement global mesuré par Météo France pour cette période est également affecté de l'ombrage des bâtiments et des arbres (voir paragraphe 3.4.2.1.1) avant d'être utilisé pour calculer le rayonnement net. Les calculs sous climat actuel permettront de mettre en avant l'impact d'un tel changement de conditions climatologiques sur les flux d'évapotranspiration et l'état hydrique des sols dans le futur.

3.4.3.4.2 Rayonnements sans ombrages

Le rayonnement solaire global simulé par Météo France pour l'année 2050 est directement utilisé (sans être affecté des coefficients d'ombrage précédemment présentés) dans le calcul du rayonnement net puis de l'évapotranspiration potentielle. La comparaison de ces résultats avec les résultats du calcul de référence permettra d'apprécier l'impact de la prise en compte de l'ombrage des bâtiments et des arbres sur les flux d'évapotranspiration simulés.

Tableau 23 Synthèse des calculs de sensibilité

Cas	LAI +	LAI -	LAI Saison	Res.Sto +	Res.sto -	Rac.Haute.1m	Rac.Haute.3m	Rac.Basse.-	Rac.Basse.+
Description	2 x LAI ref	LAI ref / 2	LAI x 2 en été	2 x Res.Sto ref	Res.Sto ref / 2	Profondeur max = 1 m	Profondeur max = 3 m	Prfondeur ref - 50 %	Profondeur ref + 50 %
Cas	Type de sol		Profil.Ks	Loi VG	Surf-	Surf+	Imper2m	Imper3m	2018-2019
Description	Argile, Limon, Sable		Ks ↘	Loi différente	Suppression des surfaces	Ajout de surfaces	Fin ZNS 2 m	Fin ZNS 3 m	Climat 2018-2019

4 Résultats et discussions

Les résultats des simulations hydrologiques et microclimatiques sont présentés dans cette partie. Les simulations hydrologiques de l'évapotranspiration sont présentées pour le calcul de « référence » puis pour l'étude de sensibilité des paramètres du modèle hydrologique. Cette étude de sensibilité sera également le moyen de lancer une discussion sur les possibilités d'aménagements de la zone du Mail Finot visant à améliorer les flux d'évapotranspiration. Des scénarios extrêmes d'évapotranspiration issus de l'étude de sensibilité seront utilisés pour les simulations microclimatiques. Ces simulations donneront lieu à une discussion du confort urbain de la zone du Mail Finot à l'horizon 2050. Les résultats de la modélisation du climat avec couplage des simulations aérodynamiques et thermo-radiatives, utilisant les données d'évapotranspiration réelles du calcul de référence, sont présentés dans un second rapport.

4.1 Simulation hydrologique de l'évapotranspiration réelle pour le cas de référence

Les simulations hydrologiques sont menées au sein de chaque zone sur des ensembles de végétation « strate haute + strate basse » (voir paragraphe 3.4.2, Figure 39). Les flux d'évapotranspiration simulés pour ces ensembles sont ensuite moyennés (avec une pondération par la surface de ces ensembles) à l'échelle des zones du Mail Finot, en conservant une distinction des flux de chaque strate végétale. Les flux calculés sur les différentes zones sont donc présentés pour la strate haute et la strate basse. Les flux des deux strates sont comparés et des valeurs moyennes par zone sont également calculées.

Enfin, une présentation des profils de teneur en eau moyens dans la zone racinaire des deux strates permet de rendre compte de l'état hydrique des sols lors des simulations hydrologiques de ce calcul de référence.

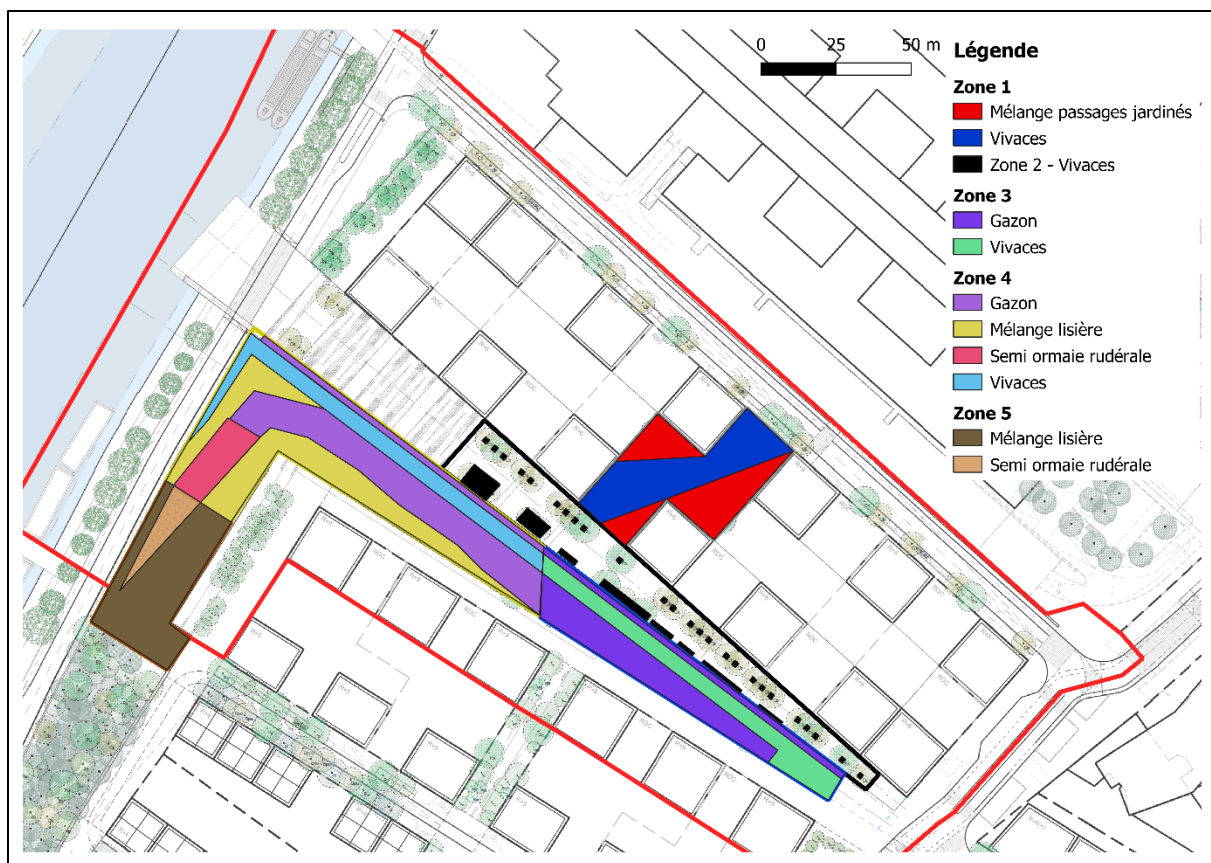


Figure 39 Présentation des ensembles de végétation "strate haute + strate basse" (la strate haute n'est pas représentée par soucis de lisibilité)

4.1.1 Evapotranspiration de la strate haute

Les graphiques présentant l'évolution temporelle des flux de l'évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP) sont présentés en Annexe. Le Tableau 24 présente les cumuls annuels de ces flux pour la strate haute. Les valeurs d'ETP des strates hautes des 5 zones sont peu différentes. Les strates hautes des zones 3 et 5 ont les plus faibles valeurs d'ETP et la strate haute de la zone 1 est caractérisée par les plus fortes valeurs. La strate haute de la zone 1 possède la plus faible valeur du rapport r_s/r_a (résistance stomatique/résistance aérodynamique de la végétation) tandis que les strates hautes des zones 3 et 5 présentent les plus fortes valeurs de ce ratio r_s/r_a . Ce ratio intègre l'ensemble des paramètres de la végétation (résistance stomatique des feuilles, LAI et hauteur de la végétation). Ces différences des valeurs d'ETP sont donc dues aux propriétés de la végétation. Les valeurs d'ETR de la strate haute montrent une hétérogénéité spatiale liée à la disponibilité en eau de chaque zone. Cette différence de disponibilité en eau n'est pas causée par le profil racinaire de la strate haute puisque celui-ci est identique pour toutes les zones (voir paragraphe 3.4.2.3.3).

Tableau 24 Cumuls annuels (2050) de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) des zones du Mail Finot – Strate haute

Variables	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
ETP (mm)	1264,3	1204,0	1076,5	1205,7	1092,7
ETR (mm)	1221,8	1056,0	1033,2	1010,9	725,0
ETP-ETR (mm)	42,4	148,0	43,2	194,8	367,7
ETR/ETP	0,97	0,88	0,96	0,84	0,66

Le rapport $f = ETR/ETP$ rend compte de la proportion d'eau réellement évapotranspirée par rapport à la capacité maximale d'évapotranspiration de la surface végétalisée considérée. Une valeur de 1 indique que l'ETR est égale à la valeur maximale (ETP). Ainsi, des valeurs inférieures à 1 devraient indiquer que la végétation est en manque d'eau pour satisfaire la demande évapotranspiratoire maximale. Les variations temporelles de ce rapport f sont présentées dans la Figure 40.

Les valeurs moyennes (Tableau 24) et variations temporelles (Figure 40) de ces rapports f permettent de classer les zones par fonctionnement similaire :

- Les zones 1 et 3 ont un rapport f moyen proche (0,97 et 0,96). Les valeurs de f ne descendent pas en dessous de la valeur 0,75 : l'ETR est supérieur ou égal à 75% de l'ETP au cours de l'année. La baisse du rapport ETR/ETP ne dure pas plus d'un mois. Une valeur proche de 1 est de nouveau atteinte avant la fin de l'année.
- Les zones 2 et 4 ont un rapport f moyen assez proche (0,88 et 0,84) et qui descend entre 0,5 (zone 2) et 0,25 (zone 4). La période au cours de laquelle le rapport f est significativement différent de 1 s'étend sur plusieurs mois jusqu'à la fin de l'année. Le rapport f de la zone 2 est égal à 1 en début de simulation, ce qui n'est pas le cas des rapport f des autres zones. Cette différence est due à une configuration différente de la ZNS : la zone 2 à une épaisseur de ZNS de 3 m (voir paragraphe 3.4.2.3.1), la teneur en eau initiale de cette zone est ainsi plus élevée que celle des autres zones qui ont une épaisseur de ZNS plus importante (supérieure à 9 m). Cette teneur en eau plus élevée permet d'alimenter la végétation en eau et donc de maintenir un rapport $ETR/ETP = 1$.
- La zone 5 a le rapport f moyen le plus faible (0,66). Ce rapport descend en dessous de 0,25 au cours de l'année. Cette zone présente les valeurs du rapport ETR/ETP les plus basses avec une période d'environ 5 mois durant laquelle le rapport f est inférieur à 0,5.

La zone 5 puis la zone 4 et la zone 2, apparaissent comme les zones les plus concernées par ce déficit d'eau limitant les flux d'évapotranspiration de la strate haute.

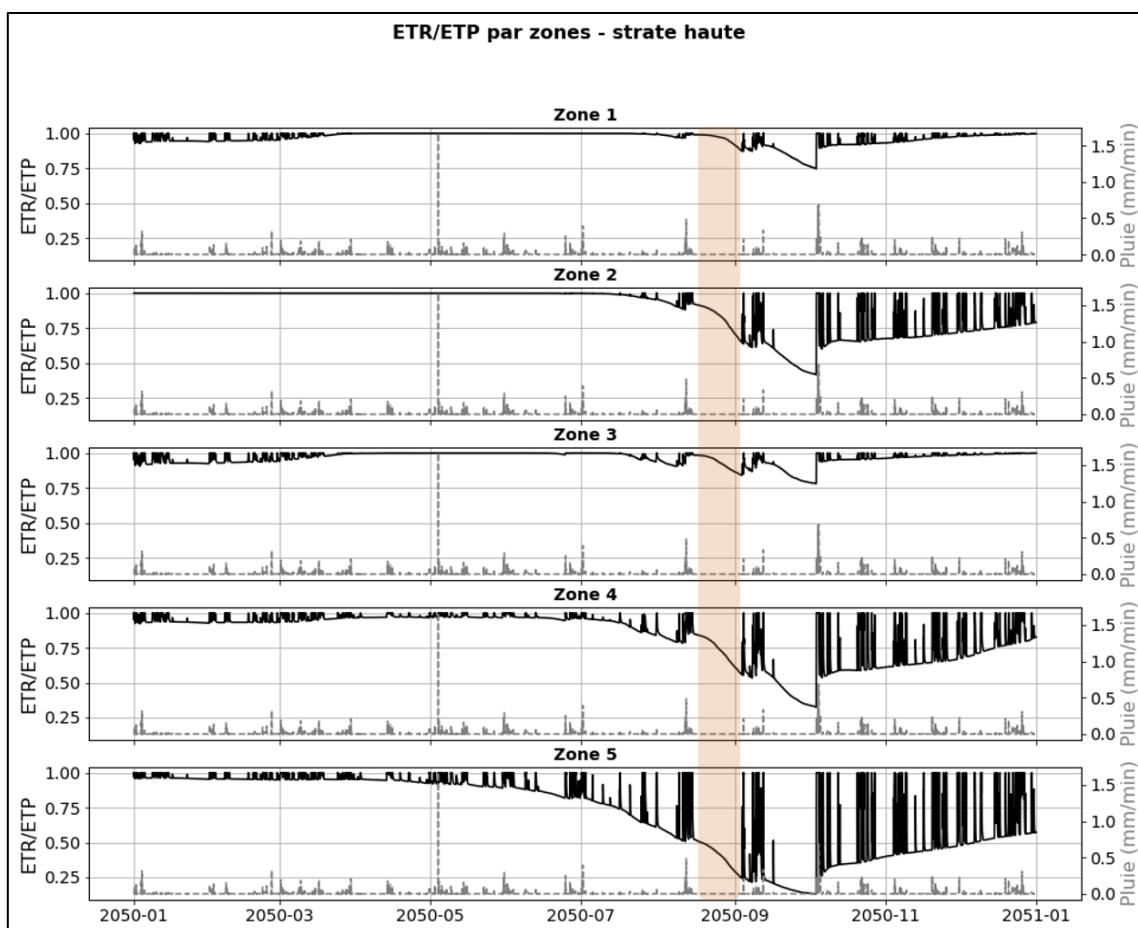


Figure 40 Evolution temporelle des rapports f (ETR/ETP) pour les 5 zones du Mail Finot – Strate haute (période sèche surlignée en orange)

Une période chaude et sans pluie est identifiée entre le 26/08/2050 et le 06/09/2050 (en orange sur la Figure 40). Cette période sert de référence dans l'étude des flux d'évapotranspiration et des indices de confort extérieurs en conditions climatiques extrêmes. Les cumuls de l'ETP et de l'ETR de cette période (Tableau 25) montrent un écart significatif entre la valeur de l'ETR et celle de l'ETP pour la zone 5 (71,3 mm). Cette zone présente le plus gros déficit en eau pour satisfaire la demande évapotranspiratoire maximale (ETP). Les rapports moyens ETR/ETP de la période sèche montrent une organisation spatiale similaire du déficit d'eau de la strate haute de la période annuelle (2050).

Tableau 25 Cumuls de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) lors de la période sèche (26/08/2050 – 09/06/2050) – Strate haute

Variables	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
ETP (mm)	114,6	111,9	101,7	113,3	104,8
ETR (mm)	105,9	81,8	90,3	75,1	33,5
ETP-ETR (mm)	8,7	30,1	11,4	38,2	71,3
ETR/ETP	0,92	0,73	0,89	0,66	0,32

4.1.2 Evapotranspiration de la strate basse

Les valeurs de l'ETP de la strate basse présentent également une hétérogénéité spatiale (Tableau 26). Les valeurs les plus élevées sont celles de la zone 3 et la zone 4 : la strate basse de ces zones possède des propriétés favorables à l'évapotranspiration (rapports r_s/r_a les plus faibles, cf. Tableau 15). Les strates basses des zones 1 et 2 présentent les plus faibles valeurs de l'ETP en raison de faibles valeurs de rayonnement global moyen (cf. Tableau 13) et des valeurs plus élevées du ratio r_s/r_a . La strate basse de la zone 5 possède les propriétés les moins favorables à l'ETP (ratio r_s/r_a le plus élevé). Cependant, la strate basse de cette zone est la plus ensoleillée (cf. Tableau 13). Cet ensoleillement fournit des conditions d'évapotranspiration plus favorables (par rapport à la strate basse des zones 1 et 2) malgré un ratio r_s/r_a élevé.

On observe une organisation spatiale des valeurs d'ETR de la strate basse similaire à celle de la strate haute. Cette hétérogénéité spatiale est liée à la disponibilité en eau qui est, dans le cas de la strate basse, dépendante du profil racinaire (voir Tableau 20) et des surfaces d'alimentation (voir Tableau 16) par ruissellement des eaux pluviales (EP).

Les rapports moyens ETR/ETP (Tableau 26) montrent des valeurs assez proches pour l'ensemble des zones avec une valeur minimale pour la zone 4 et une valeur maximale pour la zone 1.

Tableau 26 Cumuls annuels (2050) de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) des zones du Mail Finot – Strate basse

Variables	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
ETP (mm)	878,8	848,1	1264,0	1217,5	1088,5
ETR (mm)	830,3	732,3	1087,7	1008,4	975,4
ETP-ETR (mm)	48,5	115,7	176,4	209,1	113,1
ETR/ETP	0,94	0,86	0,86	0,83	0,90

Les variations temporelles des rapports ETR/ETP de la strate basse sont présentées dans la Figure 41. Ce rapport est égal à 1 (ou très proche de 1) excepté pour la période fin Juin - début Novembre où les valeurs deviennent plus faibles. Lors de cette période, on retrouve globalement les mêmes variations temporelles du rapport f pour toutes les zones. On note que les valeurs les plus faibles de f sont atteintes par les zones 2, 3 et 4. La baisse du rapport f intervient également plus tôt (fin Juin) pour ces trois zones par rapport aux autres zones (fin Juillet).

La zone 5 présente une dynamique des variations de f différente des autres zones: la baisse du rapport ETR/ETP est plus lente. De plus, le rapport f ne retrouve pas une valeur égale à 1 (ou proche de 1) immédiatement après les précipitations de début Octobre (Figure 41). Les autres zones retrouvent cette valeur de 1 rapidement après ces mêmes précipitations.

Cela indiquerait donc (pour les zones 1, 2, 3 et 4) que ces précipitations alimenteraient suffisamment les surfaces végétalisées pour permettre à l'évapotranspiration de se rapprocher de la valeur potentielle. Dans le cas de la strate basse de la zone 5, ces précipitations (début Octobre) ne seraient pas suffisantes pour combler le manque d'eau responsable de la limitation de l'évapotranspiration.

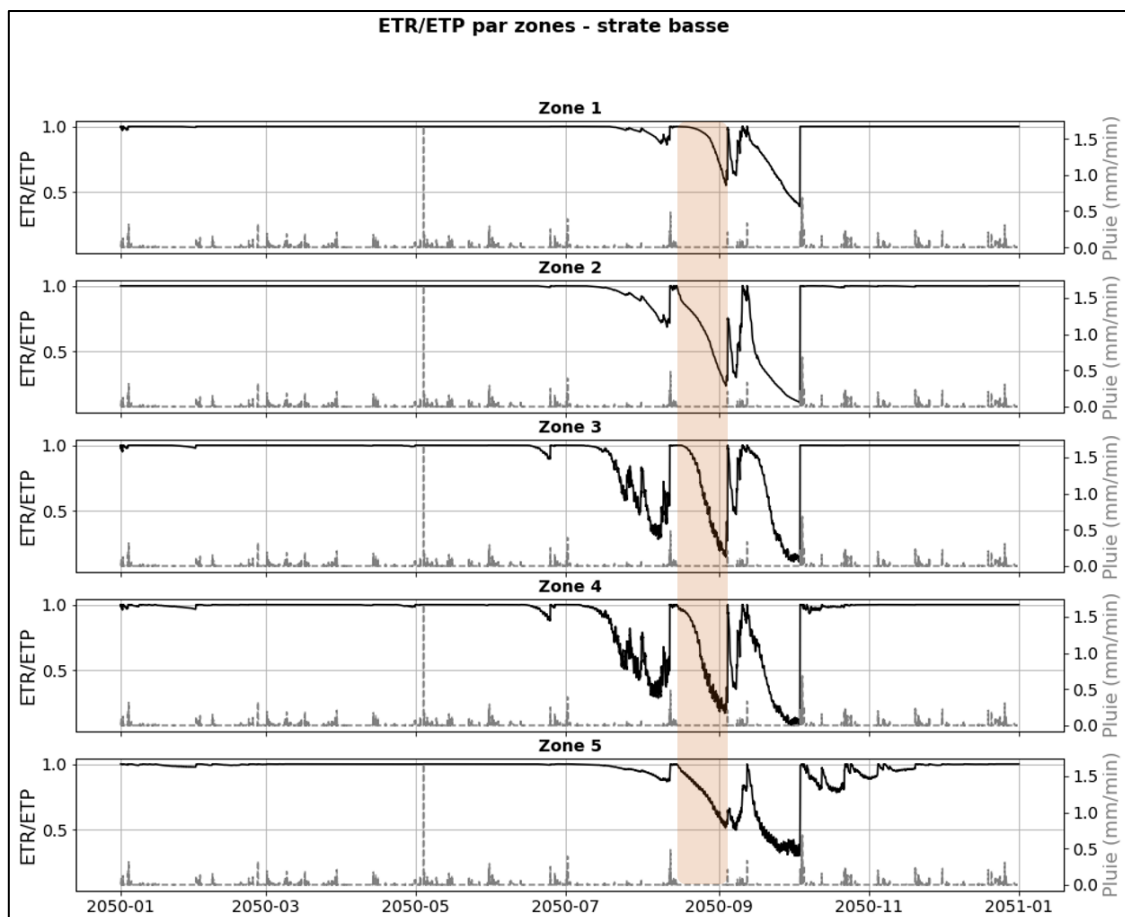


Figure 41 Evolution temporelle des rapports f (ETR/ETP) pour les 5 zones du Mail Finot – Strate basse (période sèche surlignée en orange)

La période sèche précédemment introduite (26/08/2050 – 09/06/2050) ne correspond pas à la période durant laquelle les valeurs de f atteignent leurs valeurs minimales (en orange sur la Figure 41). Cependant, les cumuls présentés sur cette période (Tableau 27) permettent de quantifier les flux d'évapotranspiration lors d'une période chaude sans précipitations. Les strates basses des zones 2, 3 et 4 montrent les valeurs du rapport f les plus faibles sur cette période. A l'inverse, les strates basses des zones 1 et 5 sont caractérisées par les valeurs d'ETR les plus proches des valeurs d'ETP. Comme indiqué ci-dessus, la disponibilité en eau de la strate basse est contrôlée par la profondeur des racines et les surfaces d'alimentation par ruissellement des EP. Ces deux paramètres permettent d'expliquer les différences sur les valeurs d'ETR observées (Tableau 26 et Tableau 27) :

- La zone 1 présente une alimentation en eau par ruissellement des EP satisfaisante à l'échelle de l'année (808 mm, cf. Tableau 16). Cette alimentation annuelle augmente la réserve en eau de la zone racinaire. Lors de la période sèche, la végétation dispose alors d'un stock d'eau suffisant pour survenir à ses besoins. La zone 5 ne possède pas de surfaces d'alimentation par ruissellement des EP mais les racines de la strate basse de cette zone ont une profondeur moyenne de 70 cm. Cette profondeur du système racinaire de la strate basse donne accès à un stock d'eau plus important (comparé aux profils racinaires des strates basses des autres zones).

- Les strates basses des zones 2, 3 et 4 présentent une profondeur des racines similaires. Les contrastes observés sur les flux d'ETR s'expliquent par des conditions différentes de disponibilité en eau pour la végétation. La zone 4 est moins alimentée en eau, à l'échelle de l'année, par ruissellement des EP (482 mm, cf. Tableau 16) que la zone 3 (921 mm, cf. Tableau 16). Le stock d'eau disponible pour la végétation lors de la période sèche est donc plus important pour la strate basse de la zone 3 que pour la strate basse de la zone 4. La zone non saturée de la zone 2 est imperméabilisée à 3 m (fosses de plantations et jardinières, voir paragraphe 3.4.2.3.1). L'eau du sol de la zone 2 est donc davantage disponible pour la végétation.

Tableau 27 Cumuls de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) lors de la période sèche (26/08/2050 – 09/06/2050) – Strate basse

Variables	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
ETP (mm)	88,0	49,8	90,2	88,2	134,4
ETR (mm)	69,6	22,5	38,6	26,9	102,7
ETP-ETR (mm)	18,3	27,3	51,6	61,3	31,7
ETR/ETP	0,79	0,45	0,43	0,31	0,76

4.1.3 Comparaison de l'évapotranspiration des deux strates végétales

Le Tableau 28 et le

Tableau 29 présentent une comparaison des flux de l'évapotranspiration potentielle et réelle de la strate haute avec les flux de la strate basse pour la période 2050 et la période sèche.

Les valeurs d'ETP des strates hautes des zones 1, 2 et 5 sont supérieures aux valeurs d'ETP des strates basses. Les strates basses des zones 3 et 4 ont des valeurs d'ETP supérieures à celles des strates hautes. Comme indiqué précédemment, ces différences d'ETP sont causées par des propriétés différentes de la végétation (résistance stomatique des feuilles, LAI, hauteur de végétation) et des conditions variables d'ensoleillement.

Tableau 28 Comparaison des cumuls d'évapotranspiration de la strate haute et de la strate basse – période 2050

Variables	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse
ETP (mm)	1264,3	878,8	1204,0	848,1	1076,5	1264,0	1205,7	1217,5	1092,7	1088,5
ETR (mm)	1221,8	830,3	1056,0	732,3	1033,2	1087,7	1010,9	1008,4	725,0	975,4
ETP-ETR (mm)	42,4	48,5	148,0	115,7	43,2	176,4	194,8	209,1	367,7	113,1
ETR/ETP	0,97	0,94	0,88	0,86	0,96	0,86	0,84	0,83	0,66	0,90

Tableau 29 Comparaison des cumuls d'évapotranspiration de la strate haute et de la strate basse – période sèche
(26/08/2050 – 09/06/2050)

Variables	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse	Strate haute	Strate basse
ETP (mm)	114,6	72,9	111,9	69,0	101,7	84,2	113,3	86,1	104,8	90,4
ETR (mm)	105,9	57,1	81,8	31,2	90,3	32,4	75,1	29,3	33,5	58,2
ETP-ETR (mm)	8,7	15,8	30,1	37,8	11,4	51,8	38,2	56,8	71,3	32,2
ETR/ETP	0,92	0,78	0,73	0,45	0,89	0,38	0,66	0,34	0,32	0,64

Le rapport ETR/ETP moyen de la strate basse des zones 1, 2, 3 et 4 est plus faible, en particulier lors de la période sèche, que le rapport moyen ETR/ETP de la strate haute (Tableau 28 et

Tableau 29). Cette observation indique que la strate basse est plus affectée par le manque d'eau que la strate haute, ce qui semble cohérent avec la profondeur des racines des deux strates végétales. En effet, la strate haute a un profil racinaire plus profond que celui de la strate basse (Tableau 20). La strate haute dispose donc d'une réserve en eau plus importante que celle de la strate basse.

A l'inverse, la zone 5 présente un rapport moyen ETR/ETP de la strate basse plus élevé que le rapport moyen ETR/ETP de la strate haute (pour les deux périodes étudiées, Tableau 28 et

Tableau 29). Ce comportement particulier serait lié à une compétition entre la strate haute et la strate basse pour l'accès à l'eau du sol : la strate basse capte en priorité l'eau infiltrée à la suite des précipitations. Cette hiérarchisation du prélèvement de l'eau du sol a probablement lieu sur toutes les zones mais elle serait davantage marquée pour la zone 5. En effet, la zone 5 ne possède pas de zone d'alimentation par les eaux pluviales. De plus, les racines de la strate basse de cette zone ont une profondeur moyenne de 70 cm (profondeur moyenne des racines de la strate basse la plus élevée, voir Tableau 20). Ainsi, la strate basse et la strate haute de la zone 5 ont une réserve commune en eau sur les 70 premiers centimètres du sol. L'ensemble des racines de la strate basse se trouvent dans ces 70 premiers centimètres et environ 35 % des racines de la strate haute se situent dans cette réserve d'eau commune. De ce fait, la strate haute de la zone 5 dispose d'une quantité d'eau limitée par rapport à la strate basse.

4.1.4 Profils des teneurs en eau de la zone racinaire

La teneur en eau du sol correspond au pourcentage de la porosité du sol qui est saturée en eau. Cette teneur en eau est suivie pour chaque réservoir du modèle et en particulier dans la partie du sol occupée par les racines de la végétation. Deux valeurs de cette teneur en eau moyenne de la zone racinaire sont calculées :

- Une première moyenne de la teneur en eau du sol est calculée sur toute l'épaisseur de la zone racinaire (2 m, profondeur des racines des arbres). Cette moyenne intègre donc les variations de la teneur en eau dans la zone racinaire de la strate haute et de la strate basse. La profondeur maximale de la zone racinaire de la strate basse est de 80 cm à l'échelle du Mail Finot (Tableau 19). On peut considérer que les variations de cette teneur en eau moyenne seront principalement liées aux flux d'évapotranspiration de la strate haute.
- Une seconde moyenne de la teneur en eau du sol est calculée sur les 40 premiers cm du sol. Les variations de la teneur en eau dans ces 40 premiers cm du sol sont contrôlées par les flux d'évapotranspiration de la strate basse. Ainsi, les variations de cette teneur en eau moyenne du sol seront liées aux flux d'évapotranspiration de la strate basse.

Ces teneurs en eau moyennes de la zone racinaire sont présentées pour les 5 zones et comparées aux variations des rapports ETR/ETP de la strate haute (Figure 42) et de la strate basse (Figure 43).

La teneur en eau initiale de la zone 2 diffère des teneurs en eau initiales des autres zones (Figure 42 et Figure 43). Ces teneurs en eau initiales sont calculées en début de simulations et dépendent fortement de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS). L'épaisseur de la ZNS de la zone 2 est de 3 m (fosses et jardinières) tandis que les épaisseurs de ZNS des autres zones sont comprises entre 9 et 16 m (Tableau 17).

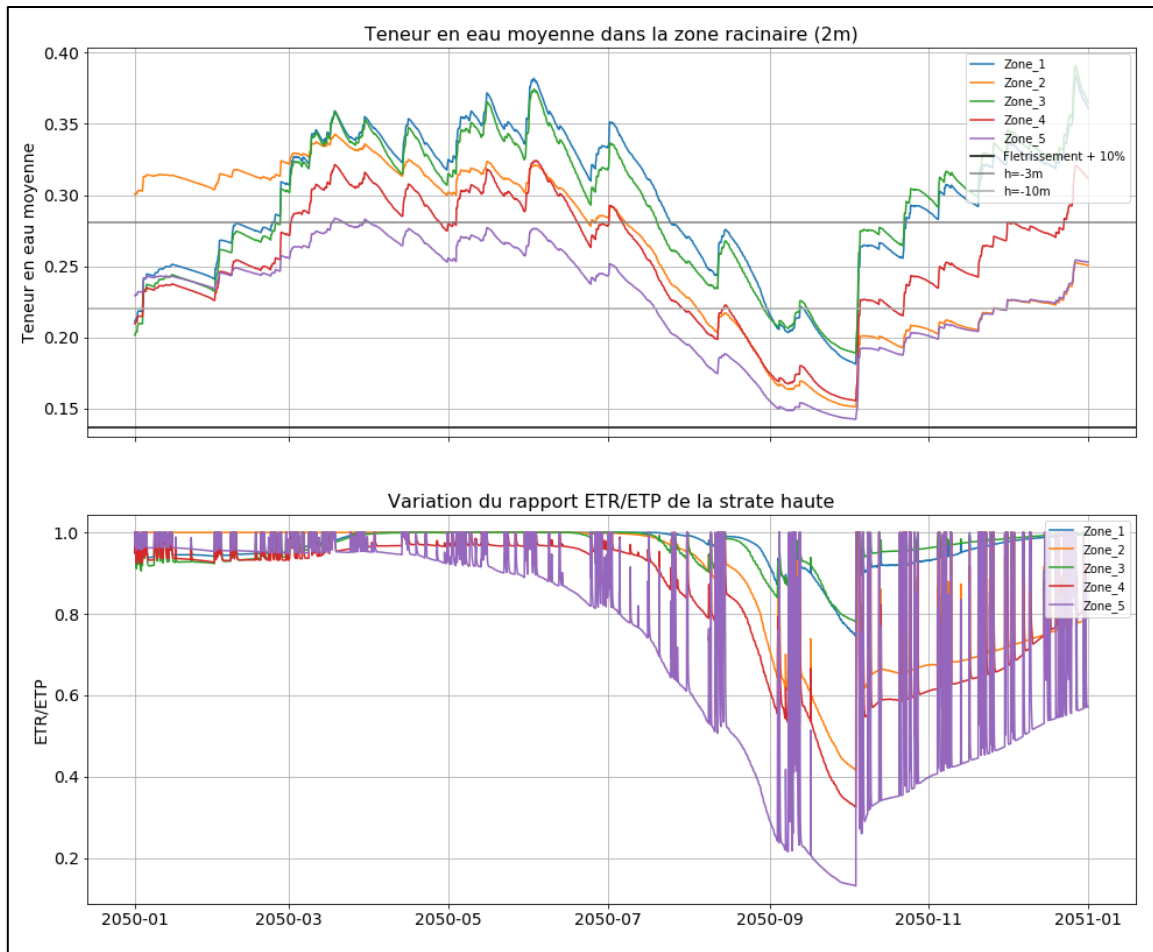


Figure 42 Variations de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire (2 m) et des rapports ETR/ETP de la strate haute pour les 5 zones du Mail Finot – Période 2050.

On remarque également que les teneurs en eau initiales des 5 zones sont différentes des teneurs en eau en fin de simulation (31/12/2050). Une période de calage simulée en amont de l'année 2050 permettrait d'avoir un profil de teneur en eau plus équilibré en condition initiale.

Cette phase d'équilibrage a lieu sur les 3 premiers mois de 2050 (Figure 42 et Figure 43). La prise en compte de conditions initiales plus équilibrées pourrait changer légèrement les cumuls mais la dynamique des variations temporelles de l'évapotranspiration et du profil de teneur en eau de la zone racinaire ne devrait pas (ou très peu) être impactée.

Trois valeurs de teneur en eau (voir paragraphe 3.4.3), représentées par des droites sur les graphiques des teneurs en eau (Figure 42 et Figure 43), sont utilisées en tant que valeurs seuils pour l'interprétation des résultats :

- La teneur en eau de « réduction de l'ETP », correspondant à une charge de pression de -3 m, est utilisée comme seuil au-delà duquel la végétation n'évapotranspire plus à sa valeur potentielle.
- La teneur en eau de « réduction de l'ETR », correspondant à une charge de pression de -10 m, est utilisée comme seuil au-delà duquel l'évapotranspiration est de nouveau contrainte par le

manque d'eau. Cette teneur en eau sera utilisée dans l'étude de sensibilité comme indicateur de stress hydrique de la végétation.

- La teneur en eau du point de flétrissement (charge de pression = -150m) indique la teneur en eau au-delà de laquelle le végétal n'est plus capable de puiser l'eau du sol.

L'analyse des variations temporelles de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire et des variations temporelles du rapport ETR/ETP montre (Figure 42 et Figure 43):

- Une baisse de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire en dessous du point de « réduction de l'ETP » cohérente avec des valeurs du rapport ETR/ETP inférieures à 1.
- Des valeurs minimales du rapport ETR/ETP lorsque la teneur en eau de la zone racinaire approche du point de flétrissement.
- Une dynamique plus rapide des variations de la teneur en eau moyenne sur 40 cm (profil racinaire de la strate basse) par rapport à la dynamique des variations de la teneur en eau sur 2 m (profil racinaire de la strate haute). Cette différence de dynamique se retrouve aussi sur les variations des rapports ETR/ETP de la strate haute et de la strate basse.

Ces résultats montrent que le rapport ETR/ETP est un bon indicateur du besoin en eau des strates végétales.

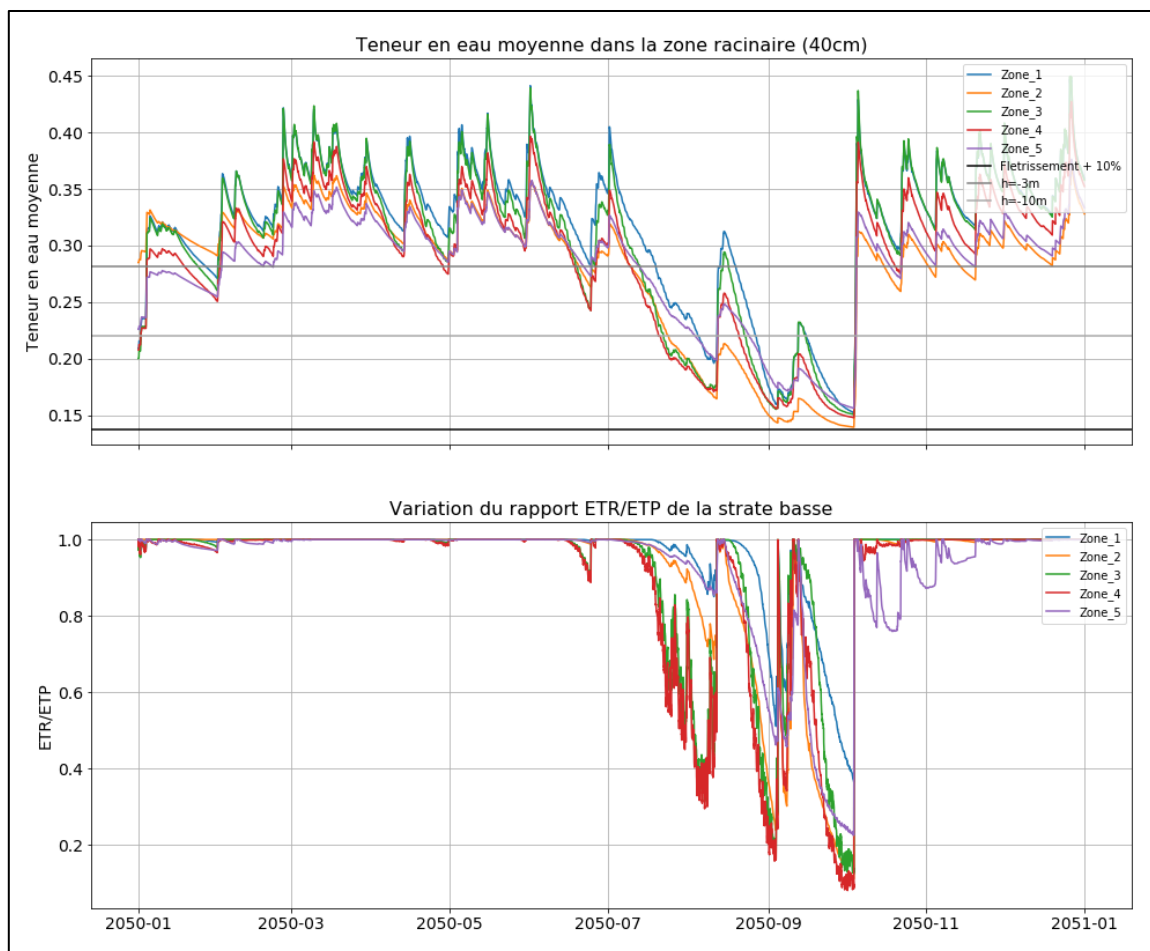


Figure 43 Variations de la teneur en eau moyenne de la zone racinaire (40 cm) et des rapports ETR/ETP de la strate basse pour les 5 zones du Mail Finot – Période 2050.

4.1.5 Bilan

Ces simulations de référence proposent un aperçu des flux d'évapotranspiration de la végétation mais également des conditions hydriques des sols d'une zone d'intérêt du VOP sous climat futurs (2050). La Figure 44 présente une moyenne (pondérée des surfaces) des flux d'évapotranspiration (ETR et ETP) des deux strates. Le rapport ETR/ETP est utilisé comme indicateur du besoin en eau de la végétation : la plante n'évapotranspire plus à sa capacité maximale par manque d'eau lorsque ce rapport à une valeur inférieure à 1.

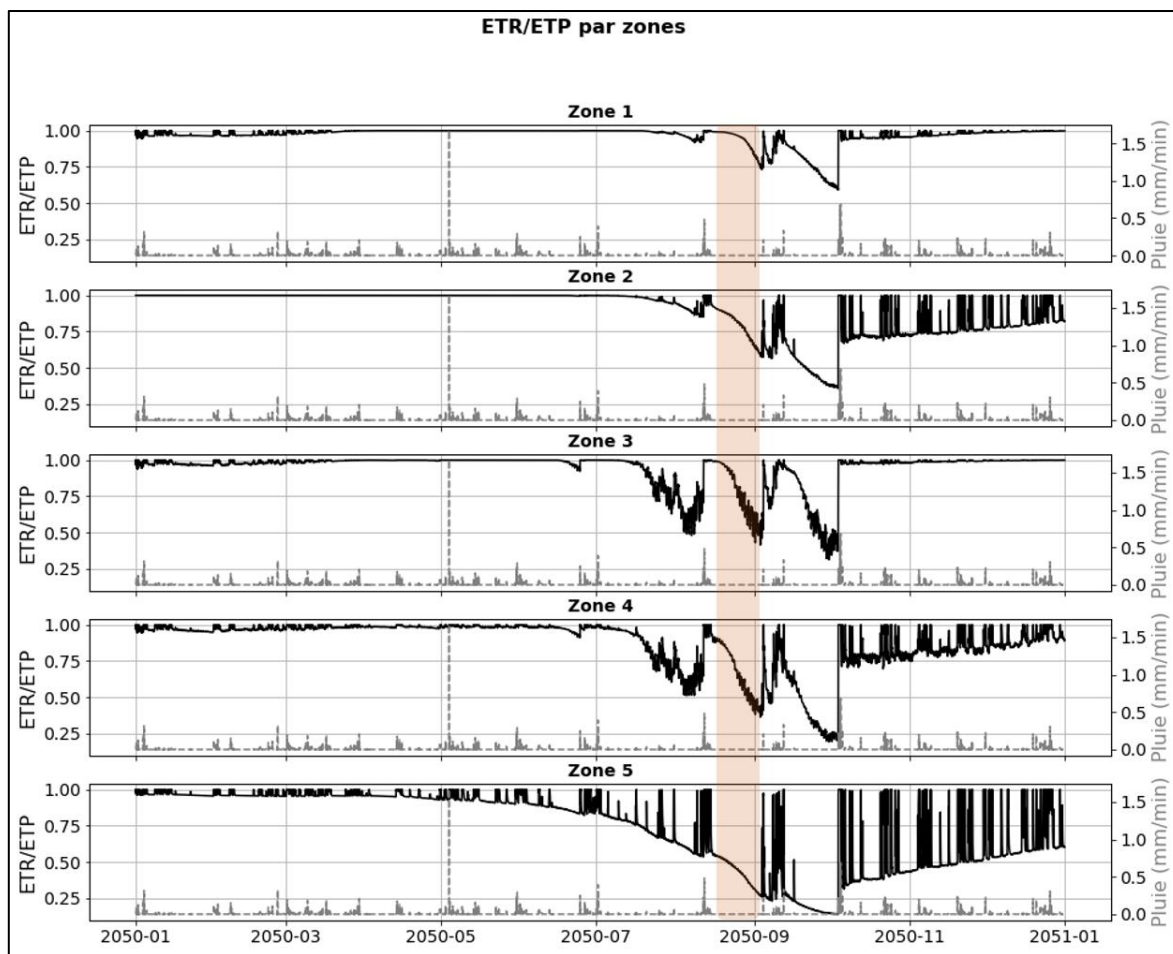


Figure 44 Evolution temporelle des rapports f (ETR/ETP) pour les 5 zones du Mail Finot – Profil moyen (période sèche surlignée en orange)

Ces premiers résultats montrent que le climat particulièrement chaud et sec de 2050 génère des flux d'évapotranspiration réelle limités par une végétation en manque d'eau. Ces calculs n'intègrent aucune politique d'irrigation des espaces végétalisés. Les seules alimentations en eau prises en compte dans ces simulations sont issues des précipitations (eau de pluie directe et ruissellement) et des échanges potentiels avec la nappe. Une comparaison de ces simulations avec des simulations sous climat actuel est proposée dans la partie suivante.

L'analyse des résultats de ces simulations de référence pour le climat 2050 montre que :

- La zone du Mail Finot présente de nombreuses espèces végétales (propriétés physiologiques) et d'une diversité d'aménagements urbains (disposition de la végétation et exposition au soleil). Ces conditions sont responsables d'une hétérogénéité spatiale des flux d'évapotranspiration potentielle à l'échelle de la zone étudiée.
- Les flux d'évapotranspiration réelle des strates végétales sont contrôlés par le stock en eau dans la zone racinaire du sol. La dynamique des variations de ce stock en eau est différente pour ces deux strates :

- Strate basse : l'eau de pluie atteint rapidement les premiers centimètres de la ZNS. Cette eau peut être rapidement absorbée par les racines de la strate basse puis évapotranspirée. Le stock d'eau de la zone racinaire de la strate basse est faible et varie rapidement mais il possède une alimentation fréquente en eau de pluie.
- Strate haute : La zone racinaire de la strate haute possède une plus grande capacité de stockage en eau mais l'arrivée d'eaux de pluie y est plus longue et moins fréquente. En effet, une partie de l'eau de pluie est interceptée par la zone racinaire de la strate basse. L'eau de pluie atteint seulement cette partie profonde de la zone racinaire de la strate haute lors d'importants événements pluvieux.

4.2 Etude de sensibilité du modèle hydrologique

Les paramétrisations du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du modèle hydrologique font intervenir de nombreux paramètres. Les flux d'évapotranspiration simulés ont des sensibilités variables aux modifications de ces paramètres. L'influence de ces paramètres est testée via 20 nouvelles simulations. Les paramétrisations de ces nouveaux calculs sont présentées dans le paragraphe 3.4.3. Les résultats sont analysés dans un premier temps à l'échelle du Mail Finot. Pour chacun de ces calculs, les flux d'évapotranspiration sont comparés aux résultats du calcul de référence présentés ci-dessus. L'impact de ces différentes paramétrisations (sur les flux d'évapotranspiration) est ensuite analysé à l'échelle des 5 zones du Mail Finot.

4.2.1 À l'échelle du Mail Finot

Les flux d'évapotranspiration des 5 zones sont moyennées à l'échelle du Mail Finot. Ces flux d'évapotranspiration moyens permettent une première comparaison globale de l'impact des paramètres du calcul de l'ETP et du modèle hydrologique sur les flux d'évapotranspiration simulés. Des tableaux des flux d'évapotranspiration cumulés pour l'année 2050 des 20 calculs sont présentés en Annexe. Ces résultats sont présentés dans cette partie sous forme de graphiques afin de faciliter l'analyse de cette étude de sensibilité. Les flux cumulés (ETP et ETR) de ces 20 calculs sont comparés aux flux cumulés du calcul de référence. Les valeurs affichées sont des pourcentages de variation entre les valeurs des cumuls de ces 20 nouvelles simulations et les cumuls du calcul de référence.

4.2.1.1 Evapotranspiration potentielle

La Figure 45 présente l'influence des paramètres du calcul de l'ETP sur les cumuls d'ETP de l'année 2050. Les valeurs affichées sont des pourcentages de variations des cumuls de l'ETP de ces nouvelles simulations par rapport au cumul de l'ETP de la simulation de référence. L'impact de ces paramètres est présenté sur l'année 2050 et sur la période sèche précédemment introduite (26/08/2050 – 06/09/2050) :

- **Année 2050** : L'augmentation de la valeur du LAI (double de la valeur de référence) de la strate haute et de la strate basse conduit à une augmentation de l'ETP de 54 % par rapport au calcul de référence. La réduction de la résistance stomatique des deux strates (valeur de référence /2) conduit également à cette augmentation de 54% de l'ETP. A l'inverse, la baisse de la valeur du LAI (valeur de référence /2) et l'augmentation de la résistance stomatique (double de la valeur de référence) des deux strates végétales mènent à une réduction des cumuls d'ETP simulés de 38 % par rapport au calcul de référence. Par ailleurs, la prise en compte d'une variation saisonnière de la valeur du LAI (augmentation du LAI en été) génère une augmentation de l'ETP de 26 % par rapport au calcul de référence.

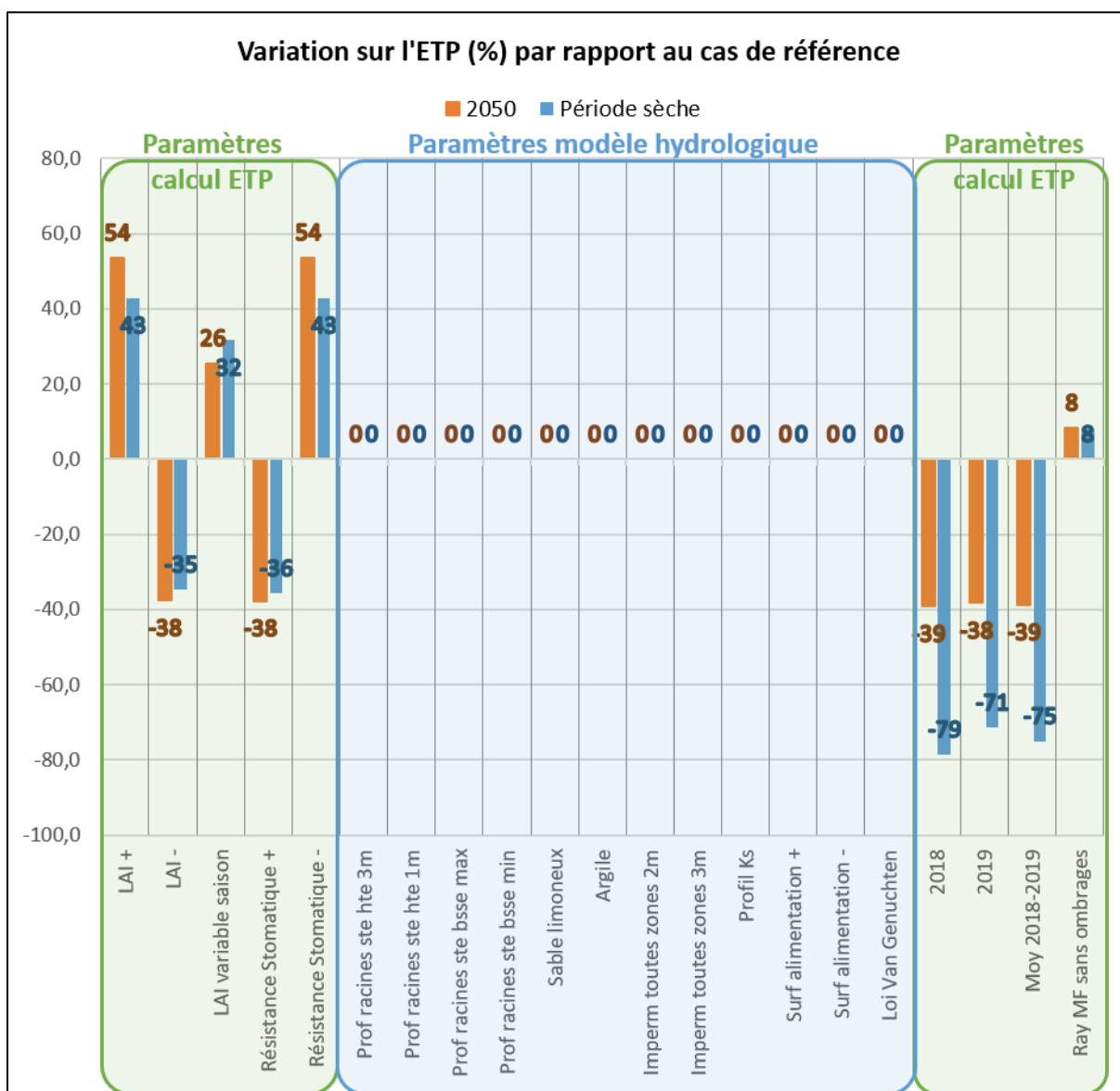


Figure 45 Variation des cumuls de l'ETP des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETP du calcul de référence) à l'échelle du Mail Finot

L'utilisation des conditions climatologiques actuelles (2018-2019) dans le calcul de l'ETP conduit à une réduction de l'ETP de 39 % par rapport au cumul de l'ETP de 2050 (calcul de référence). Les écarts de températures et d'humidités relatives de l'air entre ces deux périodes (voir paragraphe 3.4.1.3) pourraient être la cause de cette différence sur les valeurs de l'ETP. La prise en considération de l'ombrage des bâtiments et des arbres sur les profils de rayonnement solaire est responsable d'une différence de 8 % sur les cumuls de l'ETP.

- **Période sèche** : Les variations des cumuls d'ETP observées sur cette période sèche sont comparables à celles observées sur l'année 2050 pour le LAI et la résistance stomatique. Cependant, les cumuls d'ETP simulés avec les conditions climatologiques actuelles (2018-2019) sont presque deux fois plus faibles (-75 %) sur la période sèche que sur la période annuelle 2050 (-39 %). Cette différence significative des cumuls moyens d'ETP des périodes sèches de 2018-2019 avec les cumuls d'ETP de la période sèche de 2050, serait l'image des écarts importants de températures et d'humidités relatives de l'air entre ces deux périodes. Ces écarts des températures et humidités relatives sont plus important pendant la période sèche que sur l'année moyenne.

4.2.1.2 *Evapotranspiration réelle*

Les variations de l'ETR, par rapport à l'ETR du calcul de référence, sont présentées dans la Figure 46. L'analyse de ces résultats est scindée en deux parties:

- **Impact des paramètres du calcul de l'ETP**
 - **Année 2050** : L'influence de ces paramètres (LAI, résistance stomatique et conditions climatologiques actuelles) sur l'ETR (Figure 46) est similaire à l'influence des paramètres sur l'ETP (Figure 45) mais avec des amplitudes plus faibles : les paramètres du calcul de l'ETP ont une incidence plus faible sur l'ETR que sur l'ETP.
 - **Période sèche** : L'impact des paramètres sur l'ETR (Figure 46) est différent de l'impact des paramètres sur l'ETP (Figure 45) pour les calculs concernés par une hausse de l'ETP (LAI +, résistance stomatique – et rayonnement sans ombrage). En effet, ces paramétrisations génèrent une réduction significative de l'ETR (+58 %) par rapport au calcul de référence. Cette baisse significative de l'ETR par rapport à l'ETR de référence est liée à un manque d'eau pour la végétation. Ce manque d'eau pendant la période sèche est probablement causé par un prélèvement de l'eau du sol par la végétation plus important au cours de l'année (valeurs d'ETP plus importante que celles du cas de référence).
- **Impact des paramètres du modèle hydrologique**

Les paramètres du modèle hydrologiques sont classés par catégorie :

 - **Profondeurs des racines** : La profondeur des racines de la strate haute présente une influence plus grande que la profondeur des racines de la strate basse.

L'impact de ces paramètres est plus important (pour les deux strates végétales) lors de la période sèche. Une réduction de la profondeur des racines provoque une réduction de l'ETR simulé (plus importante dans le cas de la strate haute) par rapport à l'ETR de référence. Tandis qu'une hausse de la profondeur des racines des strates végétales génère une hausse de l'ETR simulé par rapport à l'ETR de référence. La profondeur des racines est directement liée au stock d'eau disponible pour la végétation : plus les racines sont profondes, plus la végétation a accès à un stock d'eau important et est capable d'évapotranspirer.

○ **Propriétés hydrodynamiques :**

- **Type de sol :** Les deux types de sol testés dans cette étude de sensibilité montrent une réduction significative de l'ETR par rapport à l'ETR de référence. Ces deux types de sols possèdent des propriétés hydrodynamiques différentes (paragraphe 3.4.3.2.1) par rapport au sol limoneux du calcul de référence. Le calcul avec un sol argileux génère les plus faibles valeurs d'ETR de toute l'étude de sensibilité (-68 %). L'argile est un matériau moins perméable et moins poreux que le limon. L'eau de pluie s'y infiltre plus lentement et en plus faible quantité. Les résultats du calcul avec un sol argileux montrent en ce sens une importante quantité d'eau ruisselée à la surface du sol. Cette limitation de l'infiltration de l'eau dans la zone racinaire crée ainsi un manque d'eau pour la végétation. D'autant plus que la ZNS est trop épaisse pour que des remontées capillaires alimentent cette zone racinaire depuis la nappe. Le sol sableux est plus perméable mais moins poreux que l'argile et le limon. Les sols sableux sont connus pour leur capacité drainante. Ainsi, l'eau de pluie s'infiltre plus facilement à la surface d'un sol sableux qu'à la surface des sols limoneux et argileux (cela se vérifie avec les lames d'eau ruisselés de ces trois calculs). Par ailleurs, la comparaison des résultats des calculs de référence avec ceux du sol sableux montre une différence significative des volumes d'eau drainés hors de la zone racinaire. Le sol limoneux du calcul de référence a une meilleure capacité de rétention en eau, l'eau reste disponible par la végétation dans la zone racinaire. Dans le cas du sol sableux, l'eau de pluie est davantage drainée hors de cette zone racinaire. En conséquence, la zone racinaire du sol sableux dispose d'un volume d'eau moins important que la zone racinaire du sol limoneux : l'ETR du sol sableux est donc plus faible que l'ETR du sol limoneux (calcul de référence).
- **Le profil de conductivité hydraulique** créé pour cette étude ne génère pas de modifications importantes des flux d'ETR.

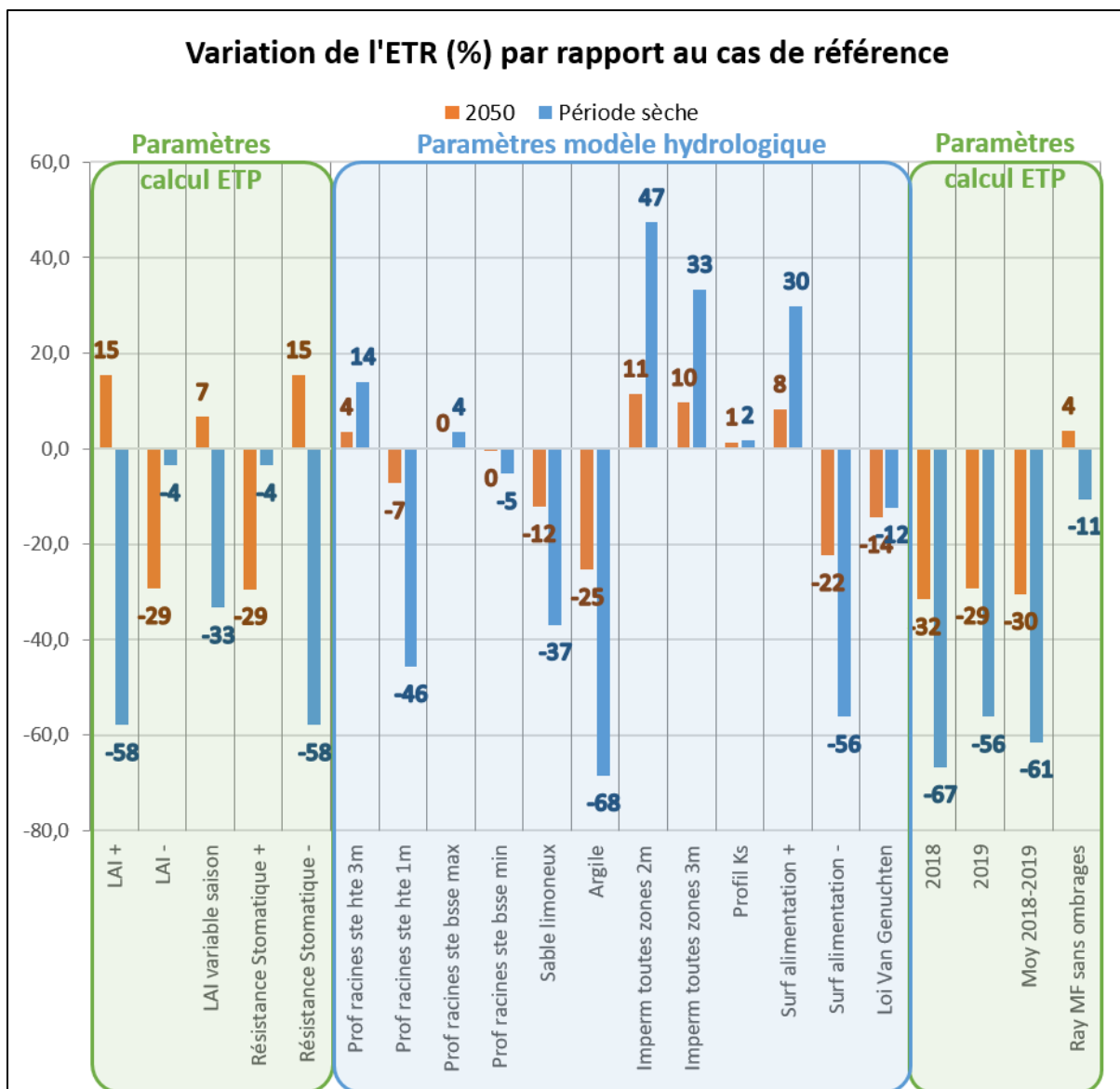


Figure 46 Variation des cumuls de l'ETR des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETR du calcul de référence) à l'échelle du Mail Finot

- Les flux d'ETR simulé avec la **loi hydrodynamique Van Genuchten** sont plus faibles que ceux simulés avec la loi Brooks et Corey (-14 % et -12 %, calcul de référence). Cet écart serait probablement lié à la différence de conductivité hydraulique à saturation du limon entre la loi de Brooks et Corey (1,86E-06 m/s) et la loi de Van Genuchten (6,94E-07 m/s). Comme pour le cas de l'argile, une plus faible conductivité hydraulique limite la recharge en eau de la zone racinaire.
- **Aménagements de gestion des EP**: Cette catégorie regroupe les cas d'imperméabilisation de la ZNS et de modification des surfaces de ruissellement des eaux pluviales. Ces calculs montrent des modifications significatives des flux d'ETR.
 - **L'imperméabilisation de la ZNS** à 2 ou 3 m de profondeur génère une hausse de l'ETR par rapport à l'ETR du calcul de référence (+10 %). Cette hausse de l'ETR est plus importante lors de la période sèche (+47 % et +33 %).

L'imperméabilisation de la ZNS permet de retenir l'eau du sol dans la zone racinaire (2 m de profondeur). Ceci explique une hausse plus importante de l'ETR simulé avec une imperméabilisation à 2 m qu'avec une imperméabilisation à 3 m.

- La suppression des **surfaces de ruissellements** alimentant les espaces végétalisés entraîne une réduction significative de l'ETR (-22 %) par rapport à l'ETR du cas de référence. Cette réduction est plus marquée lors de la période sèche (- 56 %). A l'inverse, une extension de ces surfaces de ruissellement des EP entraîne une hausse des flux d'évapotranspiration réelle par rapport à l'ETR de référence (+8 %). Cette hausse est plus importante en période sèche lorsque la végétation est en manque d'eau (+30 %).

Ces résultats donnent un premier aperçu de l'impact des paramètres des modèles (ETP et hydrologique) sur les flux d'évapotranspiration réelle simulés à l'échelle du Mail Finot. Certains paramètres se démarquent par une influence importante sur ces flux d'ETR : les propriétés de la végétation (LAI et résistance stomatique), le type de sol, les paramètres contrôlant la disponibilité de l'eau pour la végétation (surface de ruissellement, imperméabilisation de la ZNS) et les conditions climatologiques.

4.2.2 À l'échelle des zones de calcul

L'analyse de l'impact des paramètres sur les flux d'évapotranspiration est présentée à l'échelle des 5 zones du Mail Finot. Cette analyse locale est d'abord présentée sur les flux d'ETP et d'ETR. Une seconde partie présente l'impact de ces paramètres sur l'état hydrique des sols des 5 zones.

4.2.2.1 Impact des paramètres sur les flux d'évapotranspiration

La Figure 47 présente, pour les 5 zones du Mail Finot, les variations des cumuls de l'ETP des 20 simulations de sensibilité par rapport aux cumuls de l'ETP de référence pour l'année 2050. Une comparaison identique est proposée en Annexe à l'échelle de la période sèche de 2050. Les résultats sur cette période sèche sont similaires à ceux présentés ci-après mais avec des amplitudes différentes. On note une influence différente de ces paramètres sur les flux d'ETP des 5 zones (pour la période 2050, Figure 47) :

- Les flux d'ETP de la zone 3 sont les moins sensibles, et les flux d'ETP de la zone 5 les plus sensibles, aux modifications des propriétés de la végétation (LAI et résistance stomatique).
- Les conditions climatiques affectent les flux d'ETP des 5 zones dans des proportions similaires.

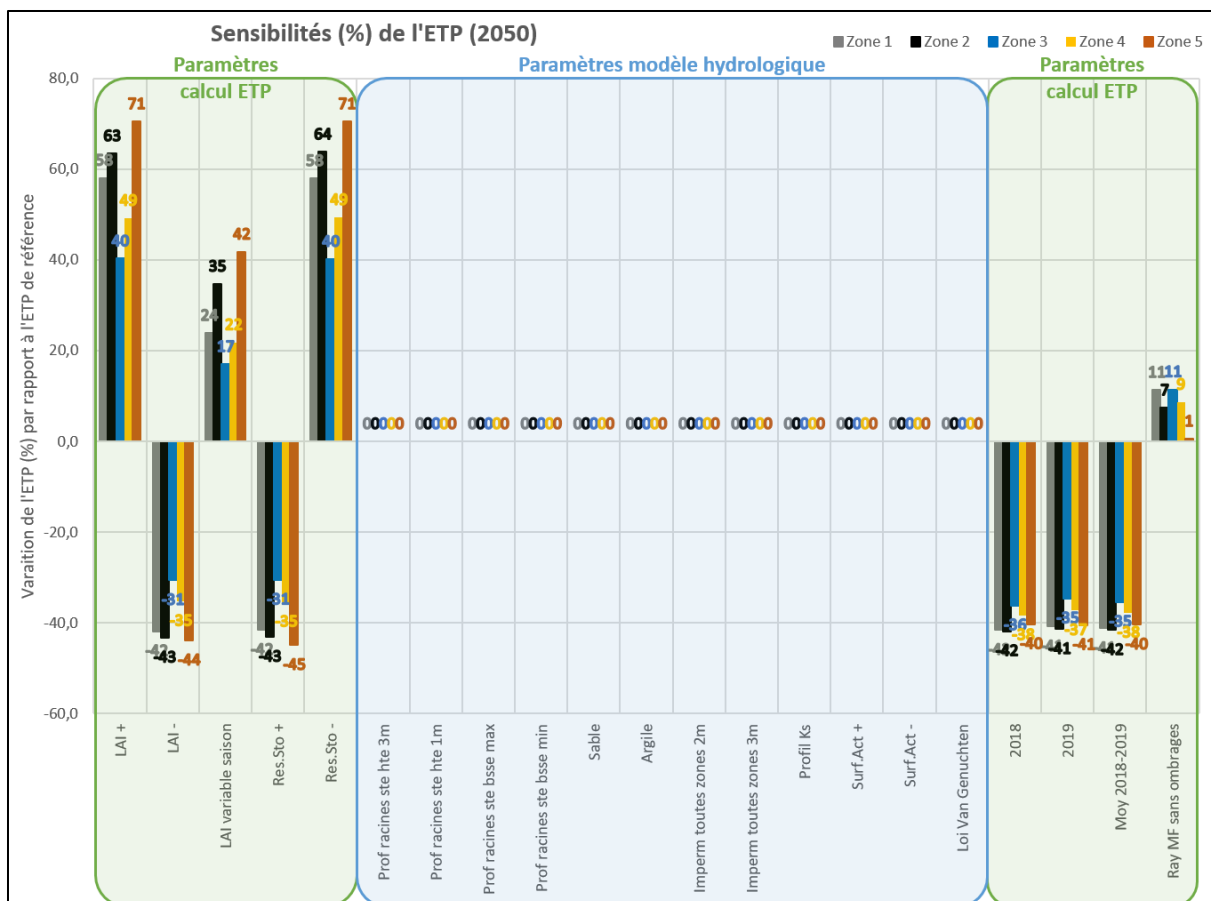


Figure 47 Variation des cumuls de l'ETP des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETP du calcul de référence) à l'échelle des zones (période 2050)

- Les flux d'ETP de la zone 5 sont moins affectés par une modification du rayonnement solaire que les flux d'ETP des autres zones.

L'impact des paramètres sur les flux d'évapotranspiration réelle (ETR) de l'année 2050 est présenté dans la Figure 48 :

- **Impact des paramètres du calcul de l'ETP** : l'impact des paramètres sur les flux d'ETR sont similaires à l'impact des paramètres sur les flux d'ETP mais avec des amplitudes plus faibles. Cependant, l'influence des paramètres sur les flux d'ETR est plus variable spatialement que l'influence des paramètres observée sur les flux d'ETP : les flux d'ETR de la zone 1 sont les plus sensibles, et les flux d'ETR de la zone 5 les moins sensibles, aux modifications des paramètres du calcul de l'ETP. Cette différence de sensibilité est directement liée à la disponibilité en eau des deux zones : la zone racinaire de la zone 5 est en manque d'eau presque toute l'année (Figure 42 et Figure 43) tandis que la zone racinaire de la zone 1 est seulement en manque d'eau lors de la période sèche (Figure 42 et Figure 43). La végétation de la zone 1 (et la zone 3) est donc capable de satisfaire la demande en évapotranspiration potentielle plus élevée de ces calculs.

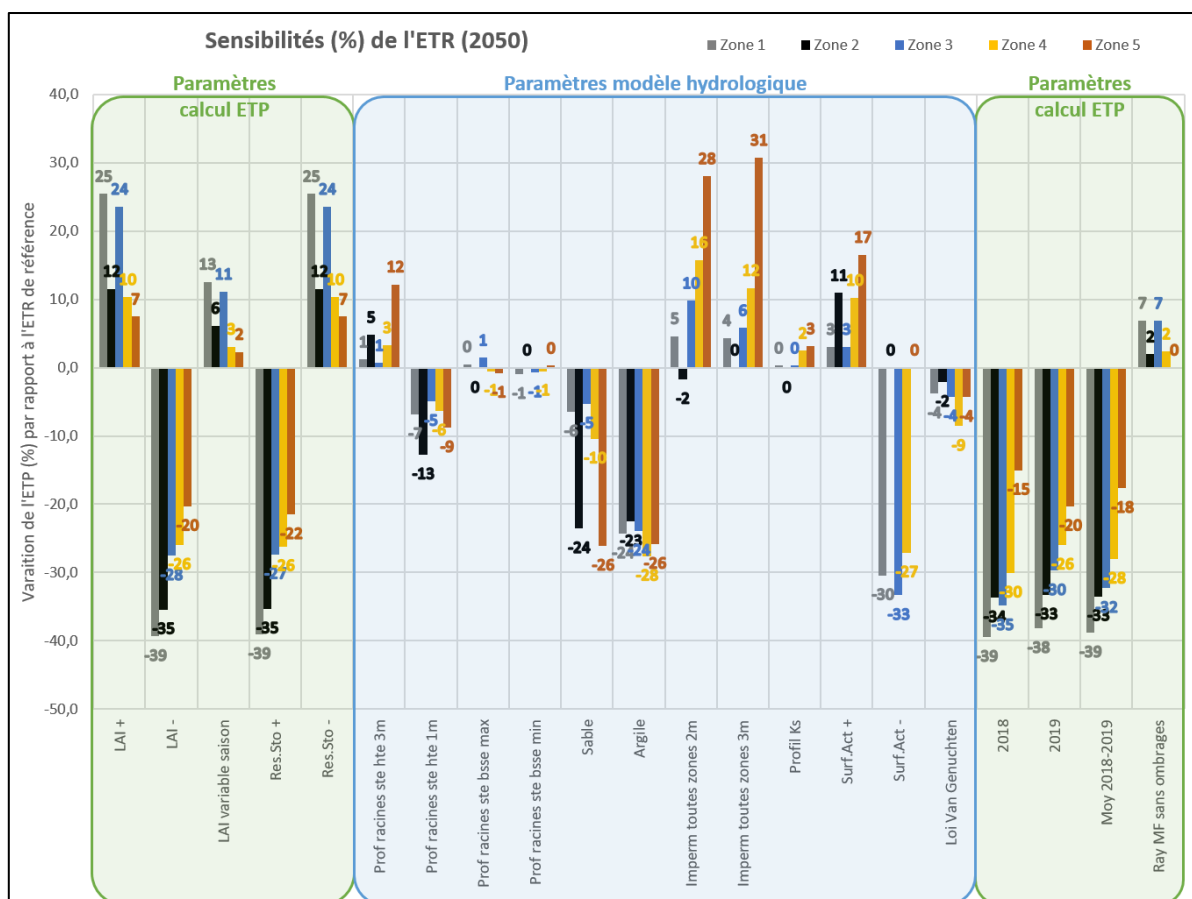


Figure 48 Variation des cumuls de l'ETR des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETR du calcul de référence) à l'échelle des zones (période 2050)

- **Impact des paramètres du modèle hydrologique** : Les flux d'ETR présentent un schéma de sensibilité, face aux paramètres du modèle hydrologique, identique à celui présenté à l'échelle du Mail Finot (Figure 46). Néanmoins, les flux d'ETR de certaines zones sont plus sensibles aux modifications de ces paramètres.
 - **Profondeur des racines** : les modifications de la profondeur des racines de la strate basse ont peu d'impact sur les flux d'ETR simulés. Les modifications de la profondeur des racines de la strate haute ont un impact plus marqué sur les flux d'ETR des zones 2 et 5. La ZNS de la zone 2 est imperméabilisée à 3 m de profondeur (fosses et jardinières) et la zone 5 est caractérisée par de fortes valeurs de l'ETP de la strate haute (Tableau 28 et
 - Tableau 29). Ces conditions rendent les flux d'ETR plus sensibles à des modifications de la profondeur des racines de la strate haute.
 - **Propriétés hydrodynamiques** :
 - **Type de sol** : Le sol argileux provoque une réduction sensible, et homogène pour les 5 zones, de l'ETR simulée par rapport à l'ETR de référence. L'impact du sol sableux sur les flux d'ETR est spatialement variable : les zones 2 et 5 sont les plus marquées en raison de l'absence de surface d'alimentation par ruissellement des eaux pluviales. Le manque d'eau dans les zones

racinaires des sols de ces deux zones est donc accentué par la faible capacité de rétention en eau du sable.

- **Le profil de conductivité hydraulique** créé pour cette étude ne génère pas de modifications significatives des flux d'ETR pour les différentes zones du Mail Finot.
 - L'utilisation de la **loi Van Genuchten** provoque une légère baisse des flux d'ETR des 5 zones par rapport au flux d'ETR du calcul de référence (voir paragraphe 4.2.1.2).
- **Aménagements de gestion des EP :**
- **L'imperméabilisation de la ZNS** à 2 ou 3 mène à une hausse des flux d'ETR simulé par rapport aux flux d'ETR du calcul de référence. Cette hausse est davantage marquée pour une imperméabilisation à 2 m de profondeur (voir paragraphe 4.2.1.2). Les flux d'ETR de la zone 5 sont fortement impactés par l'imperméabilisation de la ZNS. En effet, cette zone est dépourvue de surfaces d'alimentation par ruissellement des eaux pluviales et est caractérisée par une forte demande évapotranspiratoire (ETP). La zone 5 possède le rapport ETR/ETP le plus faible, et le manque en eau le plus important, des 5 zones (voir paragraphe 0). L'imperméabilisation de la ZNS permet ainsi de maintenir un stock d'eau suffisant pour améliorer le rapport ETR/ETP de la zone 5 (ETR/ETP = 0,9 ; ETR/ETP du calcul de référence = 0,7).
 - **Les modifications des surfaces de ruissellement des eaux pluviales** impactent significativement les flux d'ETR simulés par rapport aux flux d'ETR du calcul de référence. La suppression de ces surfaces réduit fortement les flux d'ETR des zones 1, 3 et 4. Les flux d'ETR des zones 2 et 5 ne sont pas impactés puisque ces zones ne possèdent pas de surfaces de ruissellement des EP dans le calcul de référence. On peut ainsi remarquer que l'ajout de zones d'alimentation par ruissellement des EP, pour les zones 2 et 5, entraîne une nette hausse des flux d'ETR simulés par rapport aux flux d'ETR du calcul de référence.

La Figure 49 présente l'impact des paramètres sur les flux d'ETR simulé par rapport aux flux d'ETR du calcul de référence pour la période sèche de 2050 (26/08/2050 – 06/09/2050) :

- **Paramètres du calcul de l'ETP :** La tendance des sensibilités des flux d'ETR est différente de celle observée sur la période 2050 (Figure 48). En effet, les paramètres qui favorisaient une hausse des flux d'ETR pour la période 2050, entraînent sur la période sèche une baisse des flux d'ETR par rapport aux flux d'ETR du calcul de référence. Et inversement, les paramètres qui provoquaient une baisse significative des flux d'ETR pour la période 2050, créent une hausse de l'ETR des zones 4 et 5 sur la période sèche. Les flux d'ETR de la zone 5 sont les plus marqués par cette observation. Une hausse significative de l'ETR sur la période annuelle provoque un prélèvement plus important du stock d'eau de la zone racinaire (voir paragraphe 4.2.1.2). La zone racinaire de la végétation est donc en manque d'eau en période chaude.

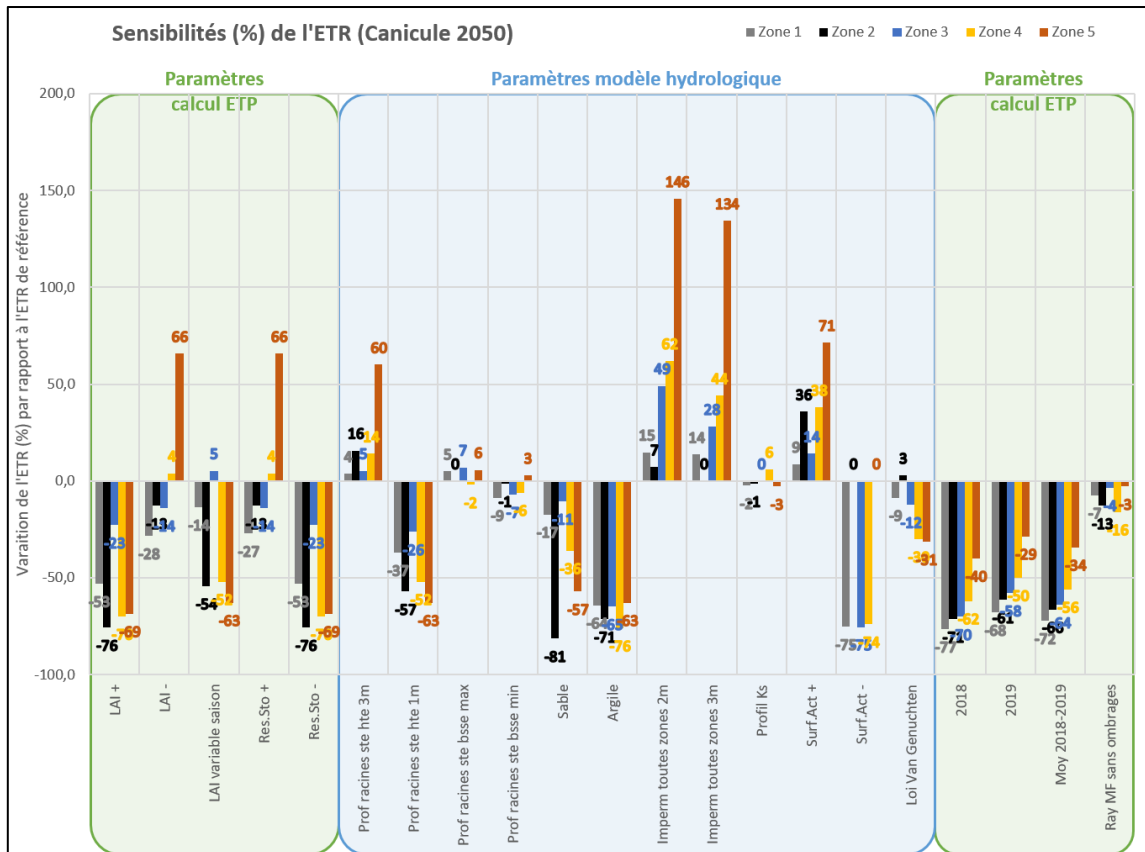


Figure 49 Variation des cumuls de l'ETR des calculs de sensibilité (% de variation par rapport à la valeur de l'ETR du calcul de référence) à l'échelle des zones (période sèche 2050)

A l'inverse, lorsque l'ETR est plus faible à l'année (par rapport à l'ETR de référence), le stock d'eau de la zone racinaire est plus important lors de la période sèche. Les flux d'ETR sont ainsi plus importants lors de cette période sèche. La zone 5 apparaît comme la plus marquée par ce phénomène en raison de son déficit important en eau au cours de l'année 2050 (Figure 42 et Figure 43).

- **Paramètres du calcul hydrologique** : On retrouve des résultats similaires à ceux de l'année 2050 mais avec des amplitudes plus élevées pour la période sèche.

4.2.2.2 Impact des paramètres sur l'état hydrique des sols

Les impacts des paramètres du calcul de l'ETP et des paramètres du modèle hydrologique sur les flux d'ETP et d'ETR ont été présentés à l'échelle du Mail Finot et des 5 zones étudiées. L'influence de ces paramètres sur les conditions hydriques des sols est présentée dans ce paragraphe pour les 5 zones du Mail Finot. L'objectif est de proposer un aperçu de l'impact de ces paramètres sur le stress hydrique de la végétation des 5 zones. La teneur en eau moyenne de la zone racinaire est utilisée comme variable de suivi de ce stress hydrique.

Deux valeurs de cette teneur en eau sont calculées (voir paragraphes 3.4.3 et 4.1.4) et donnent un aperçu de la teneur en eau moyenne des zones racinaires de la strate haute et de la strate basse.

Deux valeurs seuils sont utilisées pour définir une durée de stress hydrique des zones racinaires des deux strates : la teneur en eau de « réduction de l'ETR » (seconde limitation de l'ETR de la végétation par manque d'eau) et la teneur en eau du point de flétrissement de la végétation (voir paragraphe 3.4.3). Ces résultats sont présentés sous la forme de graphiques circulaires. Pour chaque zone, les temps passés en dessous de la teneur en eau de « réduction de l'ETR » sont présentés pour ces deux teneurs en eau (Figure 50 et Figure 51).

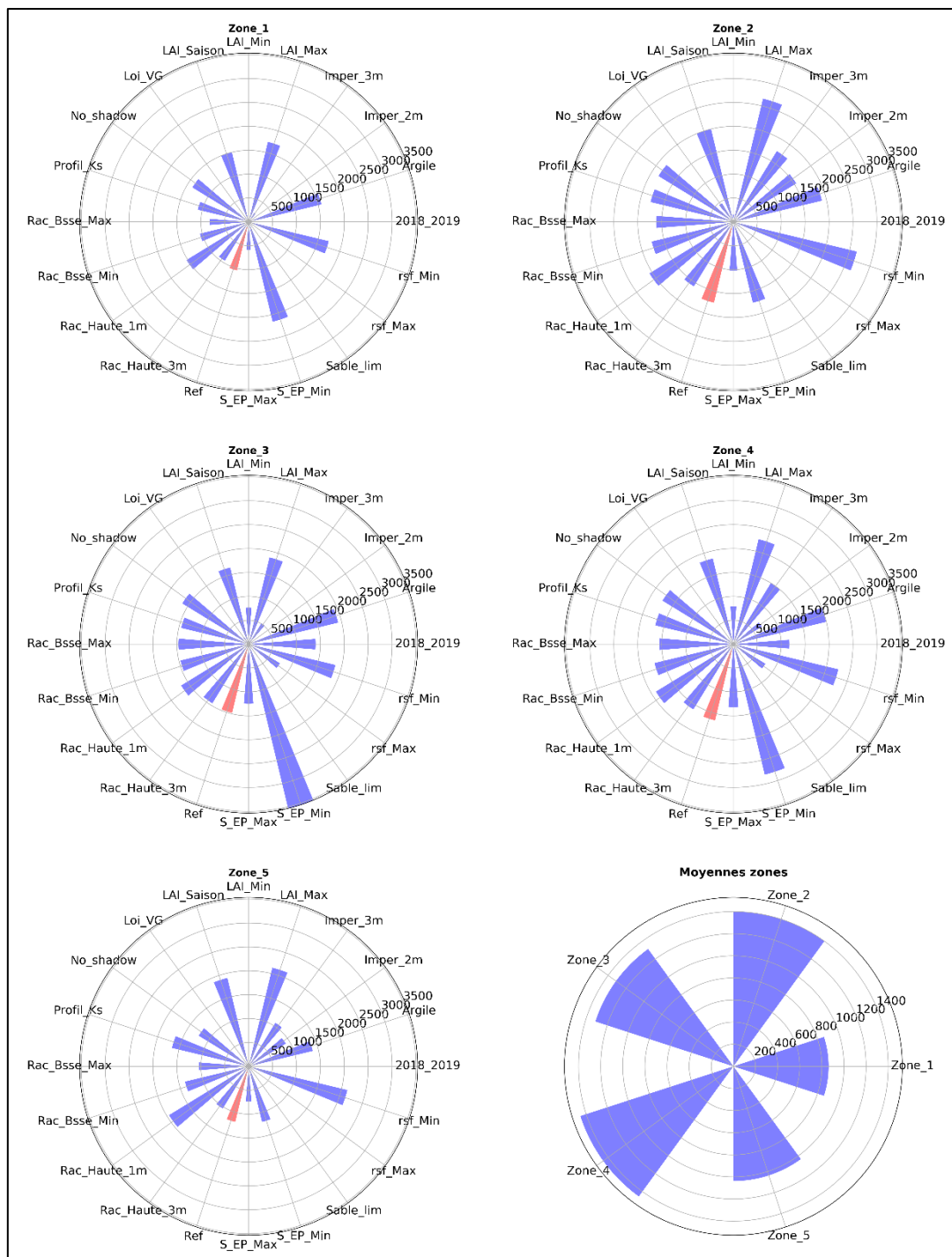


Figure 50 Résultats de l'étude de sensibilité (teneur en eau moyenne des 40 premiers cm de la zone racinaire), temps passés en dessous de la teneur en eau de « réduction de l'ETR » (valeur du calcul de référence en rouge)

La teneur en eau du point de flétrissement est peu atteinte lors de ces calculs de sensibilités. Une brève description est proposée dans ce paragraphe mais les graphiques sont présentés en Annexe.

Les durées passées en dessous de la teneur en eau de « réduction de l'ETR » dans les 40 premiers centimètres de la zone racinaire montrent une organisation spatiale du stress hydrique (Figure 50) :

- Les zones 2, 3 et 4 présentent les durées moyennes de stress hydrique de la strate basse les plus élevées (environ 1400 heures). Les paramètres qui ont le plus d'impact sur ce stress hydrique sont : l'augmentation du LAI, la réduction de la résistance stomatique, le sol argileux et la suppression des surfaces d'alimentation par ruissellement des EP.
Les strates basses de la zone 3 et 4 ont les valeurs les plus élevées de l'ETP et de l'ETR des 5 zones (Tableau 28). Il est donc logique que ces strates basses soient les plus marquées par le stress hydrique. La strate basse de la zone 2 n'est pas alimentée par le ruissellement des EP. Ce manque d'apport en eau est responsable du stress hydrique subit par la strate basse de la zone 2.
- Les strates basses de la zone 1 et 5 sont les moins touchées par ce stress hydrique (de 600 à 800 heures). La strate basse de la zone 5 est fortement ombragée et la strate basse de la zone 1 est mieux alimentée en eau de pluie, le stress hydrique est donc moins important que celui des zones 2, 3 et 4. En plus des paramètres sensibles mentionnés ci-dessus, la réduction de la zone racinaire de la strate haute à 1 m impacte significativement la durée de stress hydrique (la strate haute prélève davantage d'eau dans le premier mètre du sol = moins d'eau disponible pour la strate basse).

Les durées de stress hydrique de la zone racinaire de la strate haute (moyenne de la teneur en eau sur toute l'épaisseur de la zone racinaire de la strate haute, Figure 51) montrent une organisation spatiale similaire à celle présentée lors de l'analyse des flux d'évapotranspiration de la strate haute du calcul de référence (voir paragraphe 4.1.1) :

- Les zones 1 et 3 sont les moins marquées par un stress hydrique. Le paramètre le plus influant sur la durée du stress hydrique est la suppression des surfaces d'alimentation par ruissellement des EP (5000 et 7000 heures pour la zone 1 et la zone 3) : le stress hydrique de la strate haute des zones 1 et 3 est contrôlé par l'alimentation en eau de pluie ruisselées.
- Les zones 2 et 4 ont des durées de stress hydriques intermédiaires (entre 1500 et 2500 heures). Le stress hydrique de la zone 4 est aussi fortement impacté par la présence des surfaces d'alimentation. La zone 2 ne possède pas ces surfaces d'alimentation, le stress hydrique de cette zone est donc sensible à la réduction de la résistance stomatique, à l'augmentation de la valeur du LAI, au sol argileux et à l'augmentation du rayonnement solaire.
- La zone 5 est la zone du Mail Finot qui subit le stress hydrique le plus longtemps. Ce stress hydrique est fortement sensible aux modifications des valeurs du LAI et de la résistance stomatique. Pour rappel, la strate haute de la zone 5 est la plus exposée au soleil des 5 zones. Les paramètres de la végétation ont un impact notable sur les valeurs d'ETP et d'ETR mais cet impact est d'autant plus important pour cette zone fortement exposée aux rayonnements solaires. De plus, cette zone ne possède pas de surfaces d'alimentation par ruissellement des EP.

Le stress hydrique de la strate haute de cette zone (comme celui de la strate haute de la zone 2) est donc sensible à la plupart des autres paramètres de l'étude de sensibilité en raison d'un manque d'apport en eau.

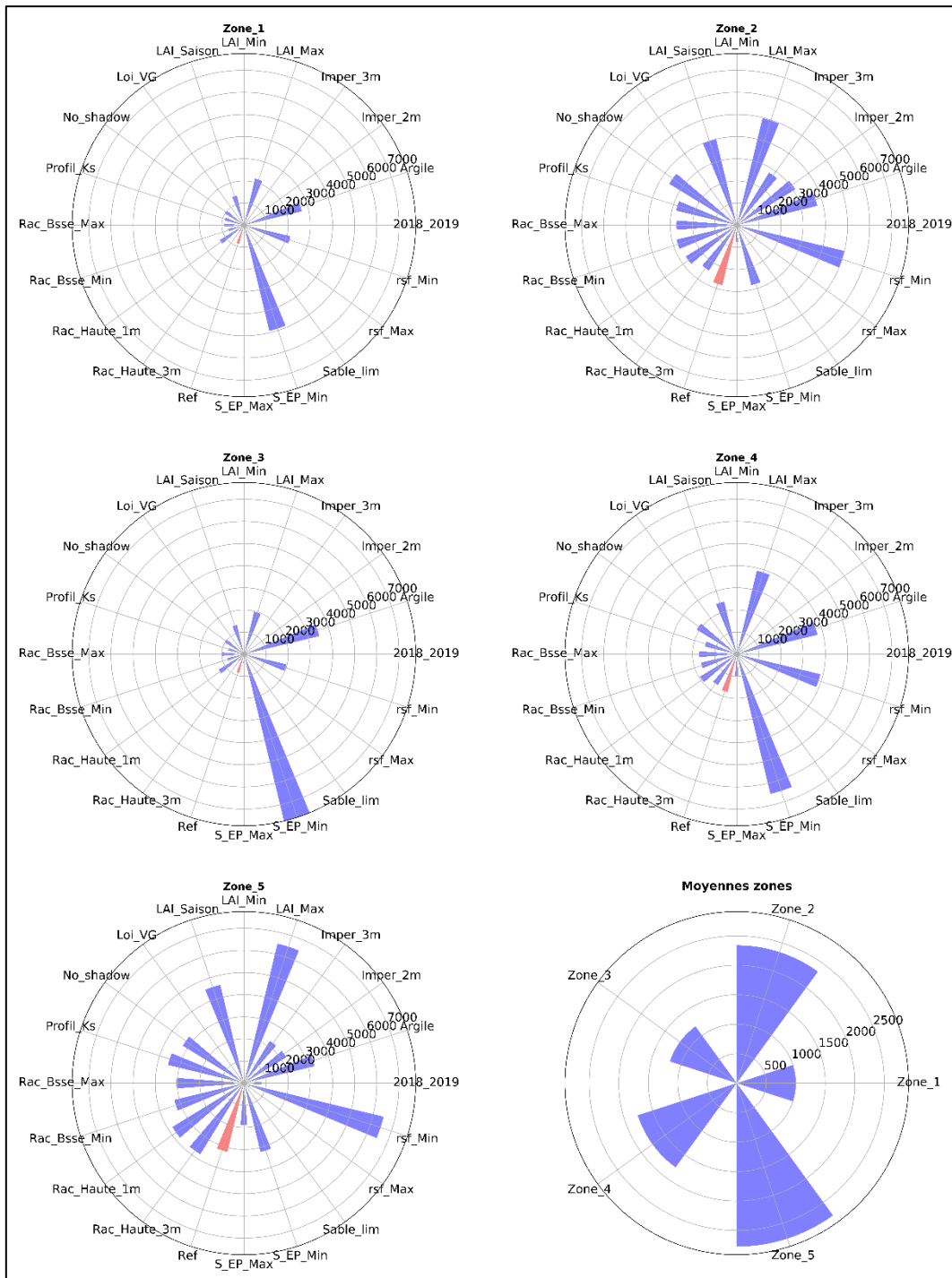


Figure 51 Résultats de l'étude de sensibilité (teneur en eau moyenne de la zone racinaire), temps passés en dessous de la teneur en eau de « réduction de l'ETR » (valeur du calcul de référence en rouge)

La teneur en eau du point de flétrissement est seulement approchée dans la zone racinaire de la strate basse de la zone 2 (pendant environ 80 heures) et dans la zone racinaire de la strate haute des zones 2 et 5 (pendant 15 et 30 heures). Ces deux zones sont les plus touchées par le stress hydrique de la végétation.

4.2.3 Bilan

L'étude de sensibilité présentée dans ce chapitre a permis d'analyser l'impact des paramètres du calcul de l'ETP et du modèle hydrologique sur les flux d'évapotranspiration et les conditions hydriques des sols du Mail Finot.

La Figure 52 présente une synthèse des variations du rapport ETR/ETP des 20 calculs de sensibilité par rapport au rapport ETR/ETP du calcul de référence pour les 5 zones du Mail Finot. La sensibilité du rapport ETR/ETP intègre d'une part la sensibilité des flux d'ETP aux paramètres de la végétation et aux conditions climatiques, et d'autre part la sensibilité des flux d'ETR aux paramètres hydrodynamiques et à la disponibilité en eau pour la végétation.

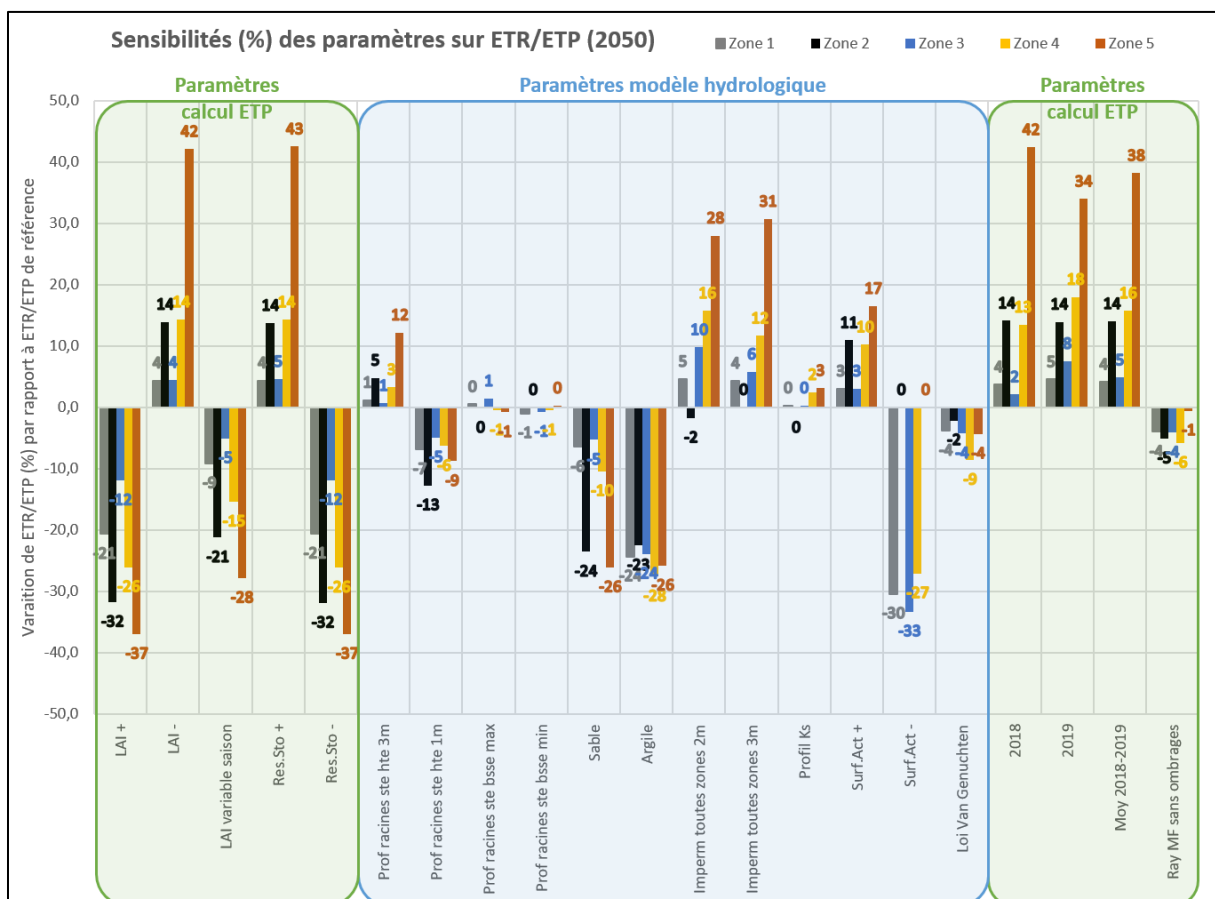


Figure 52 Variation des rapports ETR/ETP des calculs de sensibilité (% de variation par rapport au rapport ETR/ETP du calcul de référence)

Cette analyse conjointe des sensibilités des flux d'ETP et des flux d'ETR permet de conclure cette analyse de sensibilité (Figure 52) :

- Les sensibilités des flux d'évapotranspiration de la période sèche (Figure 49) prédominent sur les sensibilités des flux d'évapotranspiration à l'échelle annuelle (Figure 48).
- Les paramètres du calcul de l'ETP impactent le plus les flux d'évapotranspiration. Parmi ces paramètres, les propriétés de la végétation apparaissent comme les paramètres permettant de contrôler le plus efficacement les flux d'évapotranspiration.
- Des aménagements de gestion des EP (imperméabilisation ou semi-imperméabilisation de la zone racinaire, meilleure alimentation en eau des surfaces végétalisées) peuvent être mis en place afin d'apporter des variations significatives des flux d'évapotranspiration.
- Les flux d'évapotranspiration simulés sont sensibles à la définition des propriétés hydrodynamiques des sols (nature et texture des sols) et à l'estimation de la profondeur des racines de la végétation.
- Les flux d'évapotranspiration présentent une sensibilité spatialement variable : certaines zones (5, 2 et 4) sont particulièrement sensibles aux conditions hydriques du sol et aux paramètres de la végétation.

4.3 Discussions sur les simulations hydrologiques

Le modèle de l'ETP et le modèle hydrologique ont permis de simuler des flux d'évapotranspiration réelle tenant compte de nombreux paramètres :

- Le rayonnement solaire affecté par l'environnement (arbres et bâtiments)
- Les prédictions climatologiques de 2050
- La disposition de la végétation, les propriétés des différentes espèces végétales, les profils racinaires
- Les écoulements surfaciques des eaux pluviales
- Les propriétés hydrodynamiques des sols
- La profondeur de la nappe

Certains de ces paramètres font intervenir des hypothèses faute d'informations suffisantes. L'étude de sensibilité a montré que les flux d'évapotranspiration simulés sont sensibles à certains de ces paramètres :

- Les prédictions climatologiques de 2050 fournies par Météo sont issues du 3ème quartile des simulations les plus chaudes parmi les 200 simulations de 2050. Ces simulations présentent un écart de +3°C de la température moyenne avec le climat actuel (données de 2018-2019). L'écart moyen (pour une année) d'humidité relative est d'environ -20 % par rapport aux conditions climatiques actuelles. Les flux d'évapotranspiration générés à partir de ces deux conditions climatologiques sont sensiblement différents. Des modifications des conditions climatologiques, par rapport aux données 2050 présentées dans cette étude, impactent les flux d'évapotranspiration simulés.

- Les propriétés de la végétation (LAI et résistance stomatique) sont propres à chaque espèce végétale. Ces propriétés sont peu référencées dans la littérature pour la palette végétale de la zone étudiée (Mail Finot). Des valeurs issues d'espèces de la même famille ont été utilisées pour une partie de la végétation. Les incertitudes sur les valeurs de ces paramètres peuvent ainsi avoir un impact sensible sur les flux d'évapotranspiration simulés (voir paragraphe 4.2). Par ailleurs, l'utilisation de valeurs moyennes de ces propriétés à l'échelle d'ensemble « strate haute + strate basse » (voir paragraphe 3.4.2.1.2) permet d'atténuer, dans une moindre mesure, l'impact de l'incertitude de ces paramètres sur les flux d'évapotranspiration.
- Le ruissellement des eaux pluviales impacte fortement les flux d'évapotranspiration simulés. Les surfaces d'alimentation des différents espaces végétalisés étudiés ont été déterminées à partir du schéma de gestion des eaux pluviales (cf. VO_AVP_PG_12 - Plan d'assainissement Projet). Les superficies de ces aires d'alimentation par ruissellement des eaux pluviales sont donc mesurées directement sur le logiciel Qgis. Ces surfaces peuvent être modifiées jusqu'à l'aménagement final du VOP. Ces modifications peuvent impacter significativement les flux d'évapotranspiration simulés.
- Les propriétés hydrodynamiques des sols affectées au modèle sont déterminées à partir de la nature du sol qui est connue localement par le biais de sondage au sein du VOP. Certains de ces sondages renseignent sur la conductivité hydraulique des sols. Ces informations ont permis de définir une nature du sol (limon) correspondant aux mesures de conductivité hydraulique et aux reconnaissances lithologiques effectuées. On suppose que les propriétés hydrodynamiques des sols du VOP ne sont pas homogènes. Cependant, pour ne pas compliquer l'interprétation des résultats et multiplier inutilement les calculs, les propriétés hydrodynamiques du sol limoneux ont été affectées au modèle hydrologique pour toutes les zones du Mail Finot et sur toute l'épaisseur de la ZNS. L'étude de sensibilité a montré que les flux d'évapotranspiration sont sensiblement impactés par une modification de ces propriétés hydrodynamiques. Toutefois, les modifications opérées dans cette étude de sensibilité ont également été affectées à l'ensemble des zones et de l'épaisseur de la ZNS. Aucun calcul n'a été effectué avec une répartition hétérogène de la nature du sol dans la zone non saturée.

L'ensemble de ces hypothèses ont permis de paramétrer le modèle d'ETP et le modèle hydrologique (ETR). Certaines des hypothèses faites sur les paramètres ou la conceptualisation du modèle hydrologique pourraient faire l'objet d'investigations plus profondes afin d'améliorer le modèle. Parmi celles-ci, les plus importantes pour la simulation des flux d'ET seraient : les propriétés de la végétation et les propriétés du sol.

Par ailleurs, le modèle hydrologique actuel permet de simuler les flux d'évapotranspiration de surfaces végétalisées en tenant compte d'une strate haute et d'une strate basse dégagée. Des améliorations pourraient être expérimentées sur la prise en compte de la strate basse sous la strate haute. Toutefois, un tel modèle fait intervenir des problématiques complexes liées au fonctionnement hydrologique de la strate basse sous la strate haute (profil racinaire, évaporation sur la surface de la strate basse, conditions microclimatiques locales sous les arbres, ...).

Le calcul de référence présenté dans cette étude correspond à la paramétrisation des deux modèles se rapprochant le plus de la situation du Mail Finot en 2050 (en se basant sur les informations disponibles). Ces prédictions de flux d'évapotranspiration montrent des valeurs d'ETP environ 39 % (30 % pour l'ETR, à l'échelle d'une année) plus élevés que celles calculées pour le climat actuel (2018-2019). Cette différence remarquable de l'ETP est la conséquence directe de l'écart important de température et d'humidité relative entre ces deux périodes. L'augmentation significative des flux d'ETR en 2050 (par rapport à 2018-2019) indique que les précipitations, issues des prédictions météorologiques de Météo France, permettent de soutenir les fortes valeurs d'ETP de 2050. Cependant, les cumuls des précipitations de ces deux périodes présentent des valeurs similaires : l'augmentation de l'ETR en 2050 n'est pas dû à un apport d'eau de pluie plus important mais plutôt à une utilisation plus importante de l'eau déjà présente dans le sol.

Les prédictions climatologiques de Météo France utilisées dans le calcul de référence ont volontairement été sélectionnées pour leurs conditions climatologiques extrêmes. Ces simulations ont montrées que certaines zones du Mail Finot pouvaient présenter un besoin en eau important. Ce manque en eau limite significativement les flux d'évapotranspiration et génère un stress hydrique important lors de la période sèche (26/08/2050 – 06/09/2050). Pour ces zones du Mail Finot (2, 4 et 5), un lien direct est établi entre l'absence de surfaces d'alimentation par ruissellement des EP et le stress hydrique. L'analyse des résultats de la simulation de référence a également montré une différence de dynamique entre le fonctionnement de la strate haute et le fonctionnement de la strate basse :

- **Strate basse** : la végétation de la strate basse dispose d'un système racinaire superficiel qui capte rapidement l'eau de pluie. Le stock d'eau de la zone racinaire de la strate basse varie rapidement mais possède une alimentation fréquente en eau de pluie.
- **Strate haute** : les racines de la strate haute sont plus profondes. Le stock d'eau disponible pour cette végétation est donc plus important que celui de la strate basse. Néanmoins, la recharge de ce stock d'eau par la pluie est moins fréquente. En effet, le système racinaire superficiel de la strate basse intercepte une partie de cette recharge.

L'étude de sensibilité montre en ce sens une amélioration des flux d'évapotranspiration (et une réduction des durées de stress hydrique) lorsqu'une meilleure alimentation en eau est effectuée sur ces zones. Par ailleurs, cette analyse de sensibilité des flux d'évapotranspiration (ET) face aux paramètres du modèle d'ETP et d'ETR (modèle hydrologique) présente également des indices pour l'optimisation des flux d'ET :

- Le bilan de cette analyse montre que les paramètres du modèle de l'ETP ont le plus d'influence sur les flux d'ET. Les paramétrisations qui réduisent la valeur d'ETP sont celles qui produisent une augmentation du rapport ETR/ETP à l'échelle de l'année (la valeur d'ETR est plus proche de la valeur de l'ETP) : la valeur de l'ETP apparaît plus adaptée au stock d'eau disponible pour la végétation. Dans le cas de la paramétrisation du modèle d'ETR, les paramètres qui favorisent la disponibilité en eau pour la végétation sont ceux qui génèrent une amélioration des flux d'ET à l'échelle de l'année.

- L'optimisation des flux d'ET revient à maintenir un rapport $ETR/ETP = 1$. Ce rapport représente la balance entre la demande évapotranspiratoire maximale (qui dépend des conditions climatologiques et des propriétés de la végétation) et la disponibilité en eau du sol pour la végétation. Il ne paraît pas efficace d'augmenter l'ETP si le stock d'eau disponible pour la végétation n'est pas suffisant pour satisfaire cette demande évapotranspiratoire maximale.

Dans le cas du Mail Finot aux horizons de 2050 (simulation de référence), l'augmentation de la disponibilité en eau pour la végétation apparaît comme la meilleure solution d'optimisation des flux d'ET. En effet, le calcul de référence montre une limitation de l'ET en raison d'un manque d'eau dans la plupart des zones étudiées (avec des stress hydriques important dans certaines zones). Des premières solutions visant à améliorer l'alimentation en eau (augmentation des surfaces de ruissellement des EP) et la rétention d'eau dans la zone racinaire (imperméabilisation de la zone non saturée) ont été proposées dans l'étude de sensibilité. Ces solutions sont présentées sous la forme d'hypothèses de simulation et peuvent être interprétées différemment :

- L'imperméabilisation de la ZNS limite fortement l'infiltration des EP jusqu'à la nappe sous-jacente et ne favorise pas le bon développement des sols. Toutefois, des solutions intermédiaires peuvent être envisagées (membrane artificielle ou couche lithologique semi perméable) avec comme objectif le maintien d'une teneur en eau suffisante dans la zone racinaire pour ne pas limiter les flux d'ET.
- L'augmentation des surfaces de ruissellement des eaux pluviales peut être considérée comme telle ou comme une meilleure redirection des EP vers les surfaces végétalisées concernées (drains de surface et/ou enterrés, rejets des toitures végétalisées et non végétalisées, rejets des espaces de stockage intermédiaires des EP).

L'ensemble des flux d'ET des zones du Mail Finot bénéficieraient d'une optimisation de la disponibilité en eau pour la végétation. Néanmoins, les zones 2, 4 et 5 doivent faire l'objet d'une attention particulière.

4.4 Prise en compte de flux optimisés d'ET dans l'outil microclimatique : étude de confort des zones du Mail Finot

4.4.1 Principe de chainage entre le modèle hydrologique et microclimatique

Les données caractérisant le climat, la nature des sols et les propriétés du végétal sont nécessaires en données d'entrées pour les deux approches de modélisations (Figure 53). Le principe du chainage consiste à faire passer à chaque pas de temps de simulation les données issues du calcul hydrologique en conditions aux limites du calcul microclimatique. Ces données sont le taux d'évapotranspiration et l'évapotranspiration potentielle climatique. Dans le cadre de ce travail nous avons aussi profité du calcul radiatif urbain précis obtenu avec l'outil Solene pour avoir des chroniques radiatives adaptées au mail Finot. Elles ont été utilisées comme donnée d'entrée du modèle hydrologique. En sortie de ce chainage nous obtenons des températures d'air et de surfaces permettant de calculer les indicateurs de confort.

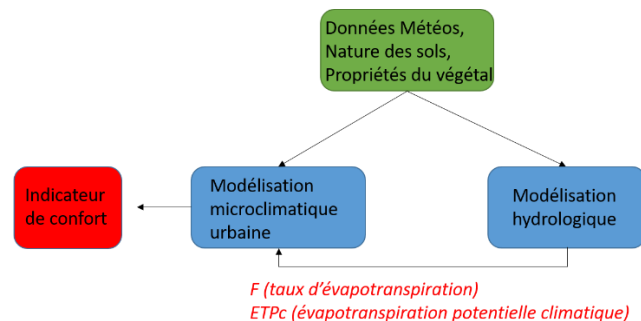


Figure 53: Chainage entre les deux modélisations

L'étude de confort a été réalisée sur les 5 zones du mail Finot, déjà présentées précédemment. Ces zones présentes des surfaces de gazons, de vivaces et de lisières ainsi que différents arbres. Les propriétés des végétaux et arbres sont présentées en Tableau 15 et nécessaires au paramétrage des simulations climatiques. Les propriétés du sol proviennent de la section 3.2.3 et les données climatiques sont celles des prévisions pour 2050 présentées en section 3.4.

4.4.2 Résultats de l'étude de confort

Le calcul de la température radiante présentée dans la section 2.4 dépend de la température de surface de la maille étudiée et des températures de surfaces perçues par celle-ci et donc indirectement du rayonnement incident solaire (avec prise en compte des multi réflexions et donc de l'effet de l'albedo des matériaux environnants). Afin de calculer cet indicateur de confort, un calcul thermo radiatif a été réalisé sur l'ensemble de ces zones.

Pour éviter des temps de calculs prohibitifs, la simulation aéraulique n'a pas été réalisée pour l'ensemble des pas de temps et n'a pas été directement couplée au calcul thermo-radiatif. Cependant, des cartographies des vitesses de vent sur toutes les zones ont été calculées par Soleneos (présentées dans le second rapport) pour un ensemble de pas de temps. La cartographie de vitesses de vent d'un pas de temps donné, représentatif des conditions de canicules et d'un développement d'îlot de chaleur urbain, a été appliquée en entrée du calcul des deux coefficients d'échanges convectifs :

- $h_{a\infty}$ intervient dans le flux convectif $\varphi_{conv,a-\infty}$ transmis à l'extérieur par advection de l'air au sein du feuillage. Pour estimer la valeur du coefficient d'échange, on définit un taux de renouvellement d'air au sein de la canopée (R , en [s-1]), qu'on exprimera également en fonction de l'intensité du vent (page 110 ; Malys, 2012) ;

- h_{fa} intervient dans le flux transmis par convection entre les feuilles et l'air. Il s'exprime en fonction de la résistance aérodynamique et stomatique r_e qui dépend de la vitesse du vent ;
- h_c intervient dans le calcul du flux sensible entre toutes les surfaces et l'air ambiant.

Cette même cartographie de vitesse de vent a été couplée à tous les pas de temps.

Après avoir réalisé ce couplage, nous nous sommes intéressés au moment le plus critique en termes d'inconfort de la période étudiée : le 2 septembre, à 14H, moment pendant lequel les températures d'air semblent être les plus élevées (Figure 54).

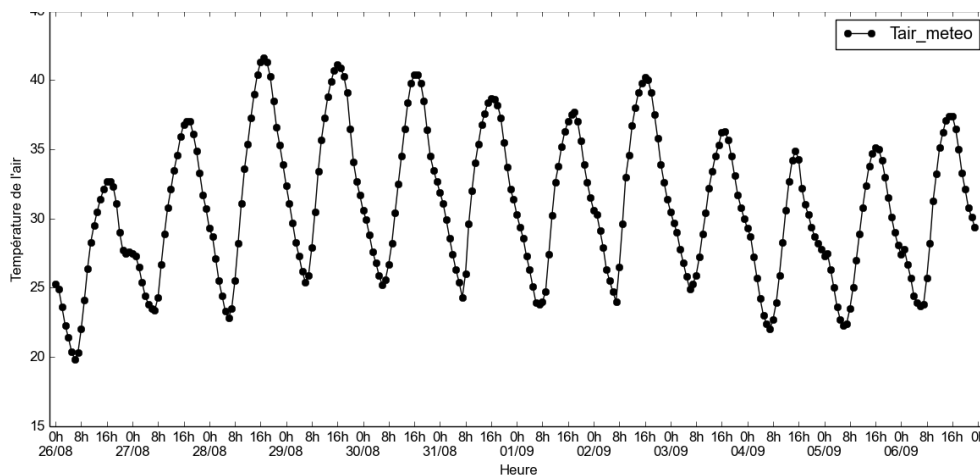


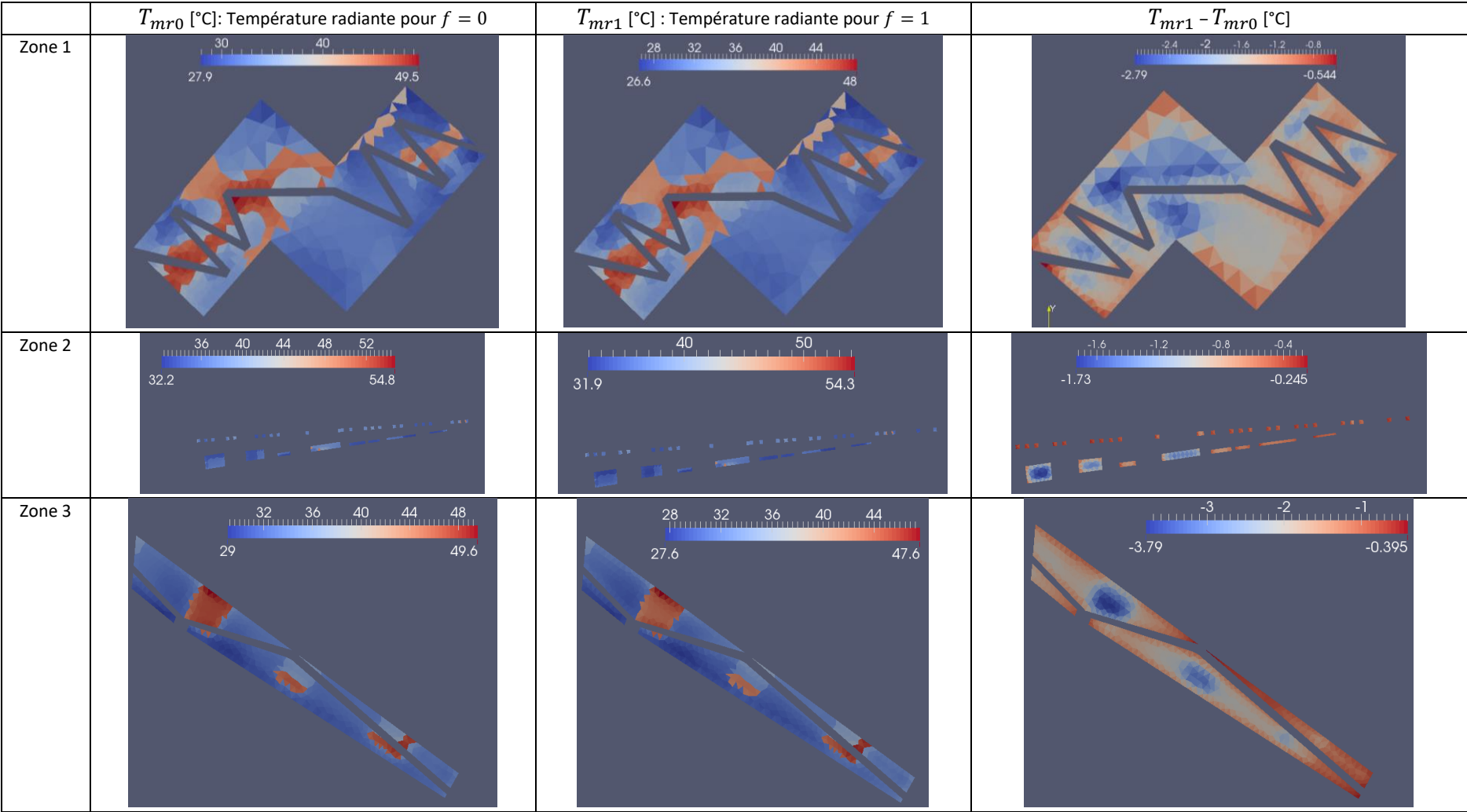
Figure 54: Température extérieure [°C]

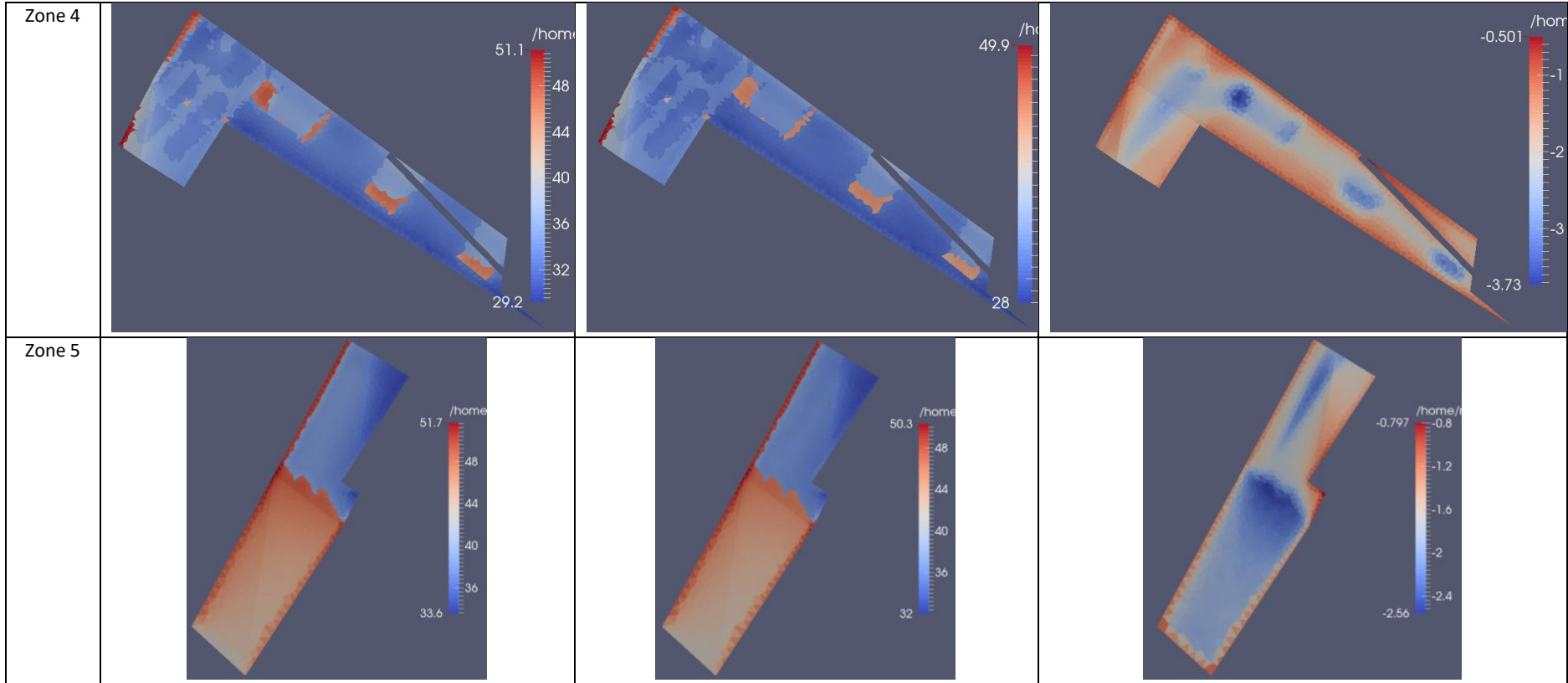
Nous avons ainsi cartographié l'indicateur de confort à cet instant sur toutes les zones étudiées, pour deux configurations : avec un taux d'évapotranspiration maximal ($f=1$) et avec un taux d'évapotranspiration nul ($f=0$, Tableau 30). Nous constatons :

- que quel que soit la zone considérée, les températures radiantes calculées pour une évapotranspiration maximale T_{mr1} sont plus faibles que la température radiante pour une évapotranspiration nulle T_{mr0} sur la plupart des mailles : les écarts $T_{mr1} - T_{mr0}$ sont souvent négatifs et les écarts positifs restent assez marginaux et faibles (Tableau 30) ;
- les écarts entre la moyenne des températures radiantes pour chaque zone et scénario sont pour la plupart des mailles négatifs et varient entre 0,8 et 1,8°C (). Le scénario avec évapotranspiration maximale permet donc de diminuer la température radiante et d'améliorer le confort pendant cette période de forte chaleur. C'est pour la zone 2, moins végétalisée, que nous observons une diminution de la température radiante moindre, de 0,8°C uniquement ;
- cette diminution de la température radiante est expliquée par la diminution des températures des surfaces végétales (Figure 55, Figure 56).

Nous observons des amplitudes de températures radiantes très importantes. Les températures radiantes élevées sont la plupart du temps expliquées par l'absence d'ombre et aussi la réverbération du rayonnement depuis les façades des bâtiments. Par ex, pour la zone 1, quel que soit le scénario, les températures radiantes sont plus faibles pour les mailles situées sous les arbres donc à l'ombre ou bien à l'ombre générée par les bâtiments (Figure 57). Les écarts de température moyenne radiante entre les deux scénarios sont plus importants pour les zones ensoleillées. L'ensoleillement intervient directement dans le calcul de l'ETPC et par conséquent dans le flux latent prélevé aux nœuds de végétation. Pour la simulation avec un taux d'évapotranspiration nul, le flux latent sera nul et donc l'écart avec le flux latent calculé avec un taux d'évapotranspiration maximal sera élevé. Ceci est aussi observé pour les autres zones.

Tableau 30 : Cartographies de la température radiante par zone et pour les deux scénarios





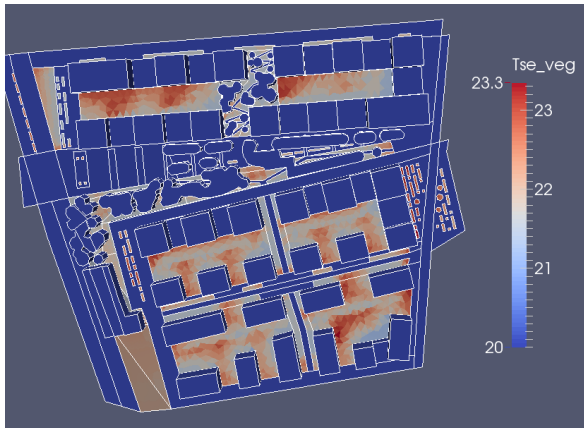


Figure 55 : Températures [°C] des strates basses pour $f = 0$

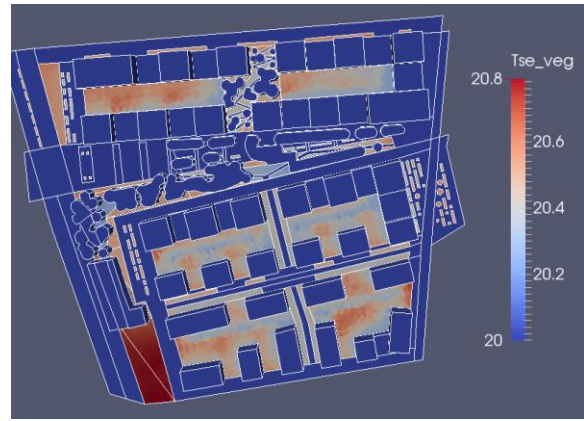


Figure 56 : Températures [°C] des strates basses pour $f = 1$

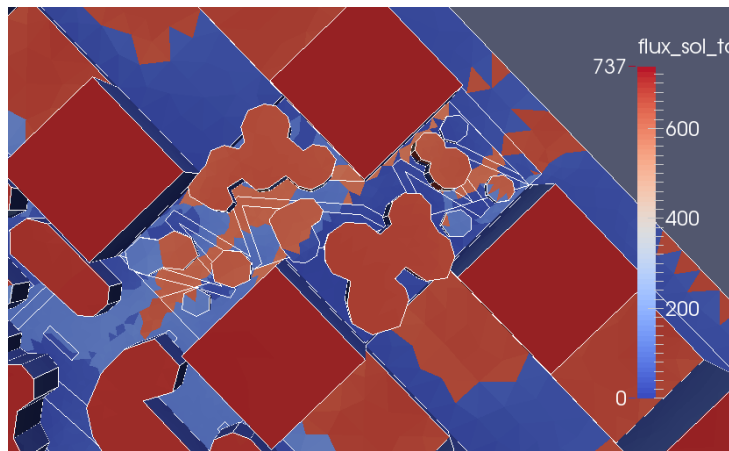


Figure 57 : Flux solaire total reçu pour la zone

Tableau 31 : Moyenne des températures radiantes par zone et par scénario

	$\overline{T_{mr0}}$ [°C] : Moyenne des températures radiantes pour $f = 0$	$\overline{T_{mr1}}$ [°C] : Moyenne des températures radiantes pour $f = 1$	$\overline{T_{mr1}} - \overline{T_{mr0}}$ [°C]
Zone 1	35.4	33.8	-1.6
Zone 2	36.3	35.5	-0.8
Zone 3	34.5	32.7	-1.8
Zone 4	34.5	32.6	-1.7
Zone 5	41.5	39.7	-1.7

5 Conclusions

Ce travail s'inscrit dans le projet d'aménagement du futur Village Olympique et Paralympique de 2024. La politique environnementale de ce grand projet présente une volonté de lutte contre l'effet d'îlot de chaleur urbain responsable d'une augmentation de la température ambiante. La bioclimatisation est une pratique courante permettant de rafraîchir le milieu urbain grâce à l'ombrage de la végétation et au flux d'évapotranspiration (flux d'eau émis vers l'atmosphère par les feuilles de la végétation). L'alimentation en eau des surfaces végétalisées est une composante importante de la bioclimatisation. La politique environnementale du projet VOP présente une recommandation en accord avec ce besoin : les eaux pluviales doivent être utilisées au maximum pour alimenter les surfaces végétalisées du VOP.

Dans ce contexte, une étude est menée sur les flux d'évapotranspiration et le confort urbain du futur VOP à l'horizon 2050. Deux approches sont menées conjointement dans ce travail :

- **L'approche hydrologique**, qui permet une représentation réelle du flux d'évapotranspiration par la prise en compte des propriétés des végétaux, des paramètres hydrodynamiques et conditions hydriques des sols.
- **L'approche microclimatique**, qui permet de modéliser le climat urbain avec une représentation détaillée de l'environnement (bâtiments, végétation) et des paramètres microclimatiques (rayonnements, vent, ...). Ces simulations permettent également de définir des indices de confort urbain.

L'objectif du chaînage de ces deux outils est donc double : (1) proposer une estimation des flux d'évapotranspiration des surfaces végétalisées du VOP et (2) tester l'impact des flux d'évapotranspiration sur les indices de confort.

Afin de répondre à cet objectif, un modèle hydrologique est développé pour représenter l'évapotranspiration réelle des différentes strates végétales. Une simulation de référence est proposée dans un premier temps afin de présenter les flux d'évapotranspiration du VOP à l'horizon 2050.

Ces simulations hydrologiques présentent une capacité d'évapotranspiration plus élevée en 2050 (par rapport au climat actuel). Ces résultats s'appuient sur des prédictions météorologiques en 2050 particulièrement chaude et favorable à l'évapotranspiration. Néanmoins, ces simulations indiquent également un besoin en eau important de la végétation pour soutenir cette forte capacité d'évapotranspiration (en particulier pour la strate végétale basse). Le modèle hydrologique ne permet pas de tenir compte de l'état physiologique de la végétation. Ainsi, dans le modèle, les végétaux continuent d'évapotranspirer même sous des conditions de stress hydrique important. Cependant, ces simulations hydrologiques montrent que les précipitations de 2050 (dont le cumul est proche des précipitations actuelles) ne sont pas suffisantes pour maintenir des conditions hydriques favorables à la végétation.

Des simulations hydrologiques supplémentaires, menées dans le cadre de l'étude de sensibilité, ont montrées que des aménagements permettraient d'améliorer les flux d'évapotranspiration ainsi que

les conditions hydriques du sol. Ces aménagements auraient pour objectif d'améliorer la disponibilité en eau pour la végétation de la strate haute et de la strate basse :

- Redirection des eaux pluviales (EP) vers les surfaces végétalisées (agrandissement des surfaces de ruissellements de EP, alimentation par les rejets des eaux de toitures végétalisées ou non, ...);
- Maintien de l'eau du sol dans la zone racinaire (membrane artificielle semi-perméable, couche de sol peu perméable, ...).

Les simulations microclimatiques réalisées sur les 5 zones du mail Finot ont permis de cartographier l'indice de confort pour une journée soumise à des fortes chaleurs. Nous avons ainsi cartographié l'indicateur de confort (température radiante) à 14h sur toutes les zones étudiées, pour deux configurations : avec un taux d'évapotranspiration maximal et avec un taux d'évapotranspiration nul. Les conclusions les plus saillantes extraites de ces résultats sont :

- que le scénario avec évapotranspiration maximale permet donc de diminuer la température radiante et d'améliorer le confort pendant cette période de forte chaleur : pour un taux d'évapotranspiration maximal nous obtenons des réductions de 1,8°C de l'indicateur de confort.
- qu'il est plus utile d'avoir des zones présentant des surfaces végétalisées importantes. Par exemple, la zone 2 (zone la plus faiblement végétalisée) présente une réduction de la température radiante de 0,8°C uniquement. De plus, dans cette zone, les surfaces végétalisées sont petites en surfaces et entourées par des pavés en béton, stockant de la chaleur et peu favorable au maintien du confort piéton.

Références

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration : Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy, 300 pp.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J.B., Smith, M., Pereira, L.S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., Elliot, R., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural water management* 81, 1-22.
- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.
- G. Bastet, Ary Bruand, P. Quéting, Isabelle Cousin. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols*, Association Française pour l'Etude des Sols, 1998, 5, pp.1-24.
- Béchet B. (coord.), Le Bissonais Y. (coord.), Ruas A. (coord.), Aguilera A., André M., Andrieu H., Ay J.-S., Baumont C., Barbe E., Beudet-Vidal L., Belton-Chevallier L., Berthier E., Billet Ph., Bonin O., Cavailhès J., Chancibault K., Cohen M., Coisnon T., Colas R., Cornu S., Cortet J., Dablanç L., Darly S., Delolme C., Fack G., Fromin N., Gadal S., Gauvreau B., Géniaux G., Gilli F., Guelton S., Guérois M., Hedde M., Houet T., Humbertclaude S. (expert technique), Jolivet L., Keller C., Le Berre I., Madec P. (expert technique), Mallet C., Marty P., Mering C., Musy M., Oueslati W., Paty S., Polèse M., Pumain D., Puissant A., Riou S., Rodriguez F., Ruban V., Salanié J., Schwartz C., Sotura A., Thébert M., Thévenin T., Thisse J., Vergnès A., Weber C., Wery C., Desrousseaux M, 2017, Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action. INRA (France), 609 pages.
- Berthier, E., Dupont, S., Mestayer, P.G., Andrieu, H., 2006. Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *Journal of Hydrology* 328, 635-646.
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 325 pp.
- Brooks R.H., Corey A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper n°3*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27 p.
- Cammalleri, C., Agnese, C., Ciralo, G., Minacapilli, M., Provenzano, G., Rallo, G., 2010. Actual evapotranspiration assessment by means of a coupled energy/hydrologic balance model: Validation over an olive grove by means of scintillometry and measurements of soil water contents. *Journal of Hydrology* 392, 70-82.
- Chebbi, W., Boulet, G., Le Dantec, V., Lili Chabaane, Z., Fanise, P., Mougénot, B., Ayari, H., 2018. Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive orchard during three contrasting years in a semi-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 256-257, 159-178.
- Costello, L.R., Jones, K.S., 2014. WUCOLS IV. Water Use Classification of Landscape Species. University of California, Cooperative Extension.
- Deardorff, J.W., 1977. A parametrization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models. *Journal of applied meteorology* 16, 1182-1185.
- DHI, 2017. MOUSE Rainfall Dependent Inflow and Infiltration: Reference Manual. Danish Hydrological Institute, Hørsholm, Denmark.

Dourado-Neto, D., Van Lier, Qd.J., Metselaar, K., Reichardt, K., Nielsen, D.R., 2010. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thronthwaite and Mather method. *Scientia Agricola* 67, 87–95.

Dupont, S., Mestayer, P.G., Guilloteau, E., Berthier, E., Andrieu, H., 2006. Parameterization of the Urban Water Budget with the Submesoscale Soil Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 624–648.

Gerke, H.H., Van Genuchten, M.T., 1993a. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.* 29, 305–319.

Gerke, H.H., Van Genuchten, M.T., 1993b. Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models. *Water Resour. Res.* 29, 1225–1238.

Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., Steyn, D.G., 1986. Urban water balance, 1. A model for daily totals. *Water Resources Research* 22, 1397–1403.

Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., 1991. An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Research* 27, 1739–1755.

Hargreaves, G. H., 1981. Responding to tropical climates. *The 1980-81 Food and Climate Review, The Food and Climate Forum, Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, Colo.*, 29–32.

Hargreaves, G. H., Samani, Z. A., 1982. Estimating potential evapotranspiration *J. Irrig. Drain. Div.*, 108, 225–230.

Jahanfar, A., Drake, J., Sleep, B., Gharabaghi, B., 2018. A modified FAO evapotranspiration model for refined water budget analysis for Green Roof systems, *Ecological Engineering* 119, 45–53.

Jankowfsky, S., Branger, F., Braud, I., Rodriguez, F., Debionne, S., Viallet, P., 2014. Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: Development of the object oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models, *Journal of Hydrology* 517, 1056–1071.

Järvi, L., Grimmond, C. S. B., Christen, A., 2011. The Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): Evaluation in Los Angeles and Vancouver. *Journal of Hydrology* 411, 219–237.

Katul, G.G., Cuenca, H.R., Grebet, P., Wright, J.L., Pruitt, O.W., 1992. Analysis of evaporative flux data for various climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, July 1992, 606–619.

Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P.S., Arnbjerg-Nielsen, K., Jense, M.B., 2014. Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology* 519, 3237–3248.

Marchionni, V., Guyot, A., Tapper, N., Walker, J.P., Daly, E., 2019. Water balance and tree water use dynamics in remnant urban reserves. *Journal of Hydrology* 575, 343–353.

Morena, F., 2004. Modelisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé – Représentation des processus de production et développement du modèle URBS. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. 256 pp.

Noilhan, J., Planton, S., 1988. A simple parametrization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review* 117, 536–549.

Noilhan, J., Mahfouf, J.F., 1995. The ISBA land surface parametrisation scheme. *Global and Planetary Change* 13, 145–159.

Ollivier, C., Mazzilli, N., Olioso, A., Chalikakis, K., D. Carrière, S., Danquigny, C., Emblanch, C., 2020. Karst recharge-discharge semi distributed model to assess spatial variability of flows. *Science of the Total Environment* 703, 134368.

- Philippe, E., Habets, F., Ledoux, E., Goblet, P., Viennot, P., Mary, B., 2011. Improvement of the solute transfert in a conceptual unsaturated zone scheme : a case study of the Seine river basin. *Hydrological Processes* 25, 752-765.
- Price, M., Low, R.G., McCann, C., 2000. Mechanisms of water storage and flow in the unsaturated zone of the Chalk aquifer. *Journal of Hydrology* 233, 54-71.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weath. Rev.*, 100: 81-92.
- Rafi, Z., Merlin, O., Le Dantec, V., Khabba, S., Mordelet, P., Er-Raki, S., Amazirh, A., Olivera-Guerra, L., Hssaine, B.A., Simonneaux, V., Ezzahar, J., Ferrer, J., 2019. Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Intercomparing eddy covariance-, sap flow-, lysimeter- and FAO-based methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 265, 310-326.
- Ramier, D., Berthier, E., Bernard, G., 2018. FAVEUR – A simple model for design extensive green roofs. 11th International Conference on Urban Drainage Modelling 2018. 4 pp.
- Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, p. 318-333.
- Robineau, T., Tognelli, A., Goblet, P., Renard, F., Schaper, L., 2018. A double medium approach to simulate groundwater level variations in a fissured karst aquifer. *Journal of Hydrology* 565, 861-875.
- Rodriguez, F., Andrieu, A., Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology* 351, 268-287.
- Rossmann, L. A., Huber, W. C., 2016. Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (Revised). National Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, US.
- Sanchez, J.M., Lopez-Urrea, R., Valentin, F., Caselles, V., Galve, J.M., 2019. Lysimeter assessment of the Simplified Two-Source Energy Balance model and eddy covariance system to estimate vineyard evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 274, 172-183.
- Skala, V., Dohnal, M., Votrubova, J., Vogel, T., Dusek, J., Sacha, J., Jelinkova, V., 2020. Hydrological and thermal regime of a thin green roof system evaluated by physically-based model. *Urban Forestry & Urban Greening* 48, 126582.
- Snyder, R.L., Pedras, C., Montazar, A., Henry, J.M., Ackley, D., 2015. Advances in ET-based landscape irrigation management. *Agricultural and Forest Meteorology* 147, 187-197.
- Thiéry D., 2015. Code de calcul MARTHE – Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Rev* 38, 55-94.
- Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. *Ann. Agron.* 12:13-49.
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 44, p. 892-898.
- Widmoser, P., Wohlfahrt, G., 2018. Attributing the energy imbalance by concurrent lysimeter and eddy covariance evapotranspiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 263, 287-291.
- Willuweit, L., O'Sullivan, J. J., 2013. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the Dynamic Urban Water Simulation Model. *Water Research* 47, 7206-7220.