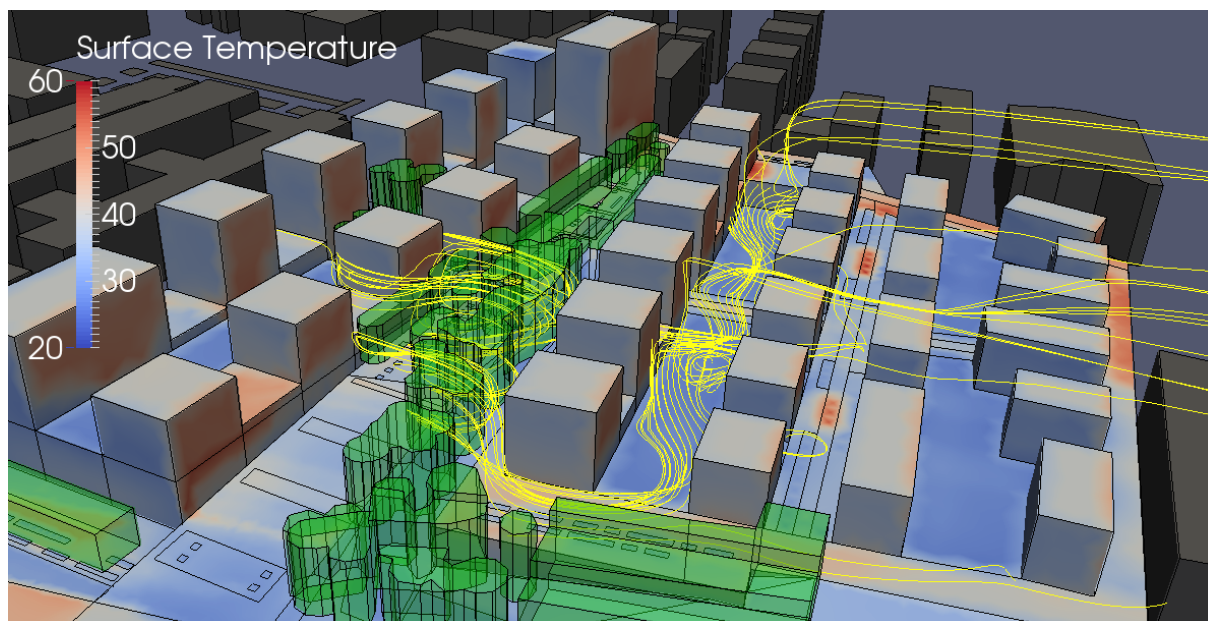


PROJET COOLVEG

OPTIMISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION ET DE LA BIOCLIMATISATION SUR LE VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE



Cerema, équipe de recherche TEAM

Timothé ROBINEAU
David RAMIER
Jérémy SAGE
Emmanuel BERTHIER

Cerema, équipe de recherche BPE

Auline RODLER
Marjorie MUSY
Société SOLENEOS
Benjamin MORILLE

Sommaire

RÉSUMÉ.....	5
INTRODUCTION.....	6
I. LES MODÈLES UTILISÉS ET LEUR APPLICATION SUR LE VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE.....	7
1. PRÉSENTATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE MARIE.....	7
2. PRÉSENTATION DU MODÈLE MICROCLIMATIQUE SOLENE-MICROCLIMAT.....	8
3. LE PROJET D'AMÉNAGEMENT DU VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE.....	10
4. MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE.....	11
5. MODÉLISATION DU VOP.....	14
II. DIAGNOSTIC DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET DU MICROCLIMAT SUR LE VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE.....	15
1. CONDITIONS GÉNÉRALES DU MICROCLIMAT.....	15
2. FLUX D'ÉVAPOTRANSPIRATION.....	17
4. TEMPÉRATURES DE SURFACE.....	21
5. TEMPÉRATURES DE L'AIR.....	23
6. INDICE DE CONFORT.....	25
III. DÉTERMINANTS ET OPTIMISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION SUR LE VILLAGE OLYMPIQUE ET PARALYMPIQUE.....	27
1. OPTIMISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION.....	27
2. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ.....	31
CONCLUSIONS.....	32

Référence pour citer ce rapport :

Robineau Timothé, Morille Benjamin, Musy Marjorie, Ramier David, Rodler Auline, Sage Jérémie, Berthier Emmanuel, 2020 : Optimisation de l'évapotranspiration et de la bioclimatisation sur le village olympique et paralympique, rapport du projet de recherche COOLVEG pour le compte de la SOLIDEO, 34p.

Listes des Figures

Figure 1 : Schéma conceptuel du modèle hydrologique d'évapotranspiration MARIE.....	7
Figure 2 : SOLENE-microclimat : outil de simulation numérique du climat urbain.....	8
Figure 3 : Distribution du vent dans la ZAC Montaudran simulée avec SOLENE-microclimat.	9
Figure 4 : Distribution des températures d'air dans la ZAC Montaudran simulée avec SOLENE-microclimat.....	9
Figure 5 : Représentation du « 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})).....	9
Figure 6 : Vue en plan de la zone du Mail Finot.....	10
Figure 7 : Zones végétalisées et type de végétaux pris en compte sur le Mail Finot.....	11
Figure 8: Méthodologie mise en œuvre pour l'étude.....	12
Figure 9 : Evolution de la température de l'air pour la période de simulation considérée.....	13
Figure 10 : Rose des vents pour la période considérée pour la simulation microclimatique.....	13
Figure 11 : Evolution de l'humidité relative de l'air pour la période de simulation considérée.	13
Figure 12 : Environnement du VOP.....	14
Figure 13 : Modélisation du mail Finot avec (à gauche) et sans (à droite) les arbres.....	14
Figure 14 :Maillage surfacique du mail.....	14
Figure 15 : Nombre d'heures d'ensoleillement pour le 2 septembre.....	15
Figure 16 : Cumul d'ensoleillement normalisé pour le 2 septembre.....	15
Figure 17 : Distribution des vitesses du vent.....	16
Figure 18 : Lignes de courant du vent en amont du mail Finot.....	17
Figure 19 : Lignes de courant du vent au sein du mail Finot.....	17
Figure 20 : Sky View Factor pour l'ensemble du quartier.....	17
Figure 21 : Variations temporelles des rapports ETR/ETP de la strate haute pour les 5 zones du Mail Finot (période de canicule surlignée en orange).....	18
Figure 22 Variations temporelles des rapports ETR/ETP de la strate basse pour les 5 zones du Mail Finot (période de canicule surlignée en orange).....	19
Figure 23 Variations temporelles des rapports ETR/ETP moyen (strate haute et strate basse) pour les 5 zones du Mail Finot (période estivale surlignée en orange).....	20
Figure 24, 25 et 26 : Cartographies des températures de surface à 14h et de la différence de températures de surface à 14h entre le scénario avec et sans stress hydrique.....	21
Figure 27 : Evolution temporelle des températures de surface (moyenne pour chaque zone) sans stress hydrique.....	22
Figure 28 : Evolution temporelle des températures de surface (moyenne pour chaque zone) avec stress hydrique.....	22
Figure 29, 30 et 31 : Cartographies des températures d'air à 14h et de la différence de températures de surfaces à 14h entre le scénario avec et sans stress hydrique.....	23

Figure 32 : Evolution temporelle des températures de l'air (moyenne pour chaque zone) pour le scénario sans stress hydrique.....	24
Figure 33 : Evolution temporelle des températures de l'air (moyenne pour chaque zone) pour le scénario avec disponibilité en eau limitée.....	24
Figures 34 et 35 : Parcours piéton étudié et profil de température d'air le long du parcours..	25
Figures 36, 37 et 38 : Cartographies de la température radiante pour la zone 1 pour les deux scénarios et différence de température radiante entre les deux scénarios.....	26
Figure 39 : Variation des rapports ETR/ETP des calculs de sensibilité à l'échelle du Mail Finot.....	29
Figure 40 : Variation des rapports ETR/ETP des calculs de sensibilité à l'échelle des zones du Mail Finot.....	30

Listes des Tableaux

Tableau 1 : Nombre d'heures d'ensoleillement et cumul de flux solaire moyens pour chaque zone.....	16
Tableau 2 : Valeurs moyennes des vitesses du vent dans les 5 zones étudiées.....	16
Tableau 3 : Comparaison des cumuls d'évapotranspiration de la strate haute et de la strate basse lors de la période de canicule (26/08/2050 – 09/06/2050, voir Figure 21 et Figure 22)..	20
Tableau 4 : Moyenne des températures de surface pour chacune des zones.....	22
Tableau 5 : Moyenne des températures d'air pour chacune des zones.....	24
Tableau 6: Moyenne des températures radiantes par zone et par scénario.....	26

Résumé

Les fortes ambitions environnementales de l'aménagement du Village Olympique et Paralympique (VOP) des Jeux de Paris 2024 ont amené la SOLIDEO à solliciter le CEREMA et SOLENEOS pour mener une étude sur l'évapotranspiration des espaces végétalisés et leur contribution au bioclimatisme avec l'objectif d'identifier des pistes permettant d'optimiser le rafraîchissement.

Une approche particulièrement innovante a été mise en œuvre en faisant interagir des approches numériques de simulations microclimatique et hydrologique. Le chaînage proposé entre les outils permet, à partir de simulations radiatives, d'évaluer l'évapotranspiration des différentes zones végétalisées du VOP autour du mail Finot en considérant séparément la strate végétale haute, arborée, de la strate végétale basse. La retranscription des transferts hydriques dans le sol, dans l'outil hydrologique MARIE, permet de connaître la disponibilité en eau pour les différentes zones végétalisées en considérant également la gestion des eaux pluviales et le ruissellement en surface. Le rapport « évapotranspiration réelle sur évapotranspiration potentielle » (ETR/ETP), obtenu constitue une des entrées principale permettant, dans l'outil microclimatique SOLENE-microclimat, de quantifier l'influence du stress hydrique sur l'évapotranspiration du végétal. La comparaison de différents scénarios avec et sans stress hydrique, dans un contexte intégrant des conditions météorologiques prospectives du changement climatique, donne accès à une quantification de l'impact de la restriction en eau sur la température de l'air et sur le confort thermique. L'analyse fine des processus physiques régissant le microclimat du mail Finot offre un éclairage sur le potentiel d'optimisation du rafraîchissement.

Enfin une étude de sensibilité sur les déterminants de l'évapotranspiration indique les principales actions à mettre en œuvre pour optimiser la disponibilité en eau pour le végétal et donc tenter de tirer profit de tout le potentiel de rafraîchissement.

Introduction

Le projet d'aménagement du Village des athlètes pour les jeux Olympiques et Paralympiques de 2024 à Paris (VOP) porte des ambitions environnementales fortes. Le village construit, qui sera ensuite transformé en habitats et locaux de bureaux, se doit d'être aussi un démonstrateur et une vitrine du savoir-faire français en termes de construction et d'aménagement.

Le confort dans les futurs espaces publics est un enjeu fort de l'aménagement du VOP, dans un contexte de réchauffement climatique et de densification dans le village et ses alentours. Lors des périodes de canicules, pendant les jeux olympiques mais aussi lors de la phase héritage, l'aménagement doit proposer des espaces extérieurs agréables à vivre. La végétalisation est un moyen, parmi d'autres, pour constituer un microclimat supportable dans certains espaces du futur VOP. Elle permet grâce à son ombrage et à son évapotranspiration d'abaisser localement les températures de l'air et les températures ressenties (ADEME, 2020) ; c'est le principe de la bioclimatisation. Imaginer et optimiser des espaces où la bioclimatisation est efficace est donc un enjeu important pour l'aménagement du VOP.

La SOLIDEO en charge de l'aménagement du VOP a demandé au Cerema et à la startup SOLENEOS de travailler sur cet enjeu, avec comme objectif de bien caractériser le microclimat du futur VOP et d'identifier des leviers permettant d'optimiser la bioclimatisation. L'équipe du Cerema et de SOLENEOS a proposé une méthodologie innovante basée sur l'usage croisé de deux modèles numériques. Le premier est un modèle hydrologique permettant d'estimer rigoureusement l'évapotranspiration issues de zones végétalisées du village olympique, en tenant compte du microclimat, du type de végétation, et de l'eau disponible dans le sol. Le second est un modèle microclimatique complet qui permet à partir d'une maquette 3D fine du village de représenter l'état de l'atmosphère et des surfaces de l'aménagement ; ces informations permettent alors de caractériser le confort pour les habitants des espaces extérieurs. Le travail a débuté à l'échelle du village olympique mais c'est rapidement recentré sur le mail Finot, espace public emblématique et à enjeu du VOP.

Ce document est une synthèse des résultats obtenus, présentés dans deux rapports plus complets (Morille, 2020 ; Robineau et al., 2020). Dans une première partie, les modèles utilisés, le projet d'aménagement, ainsi que la méthodologie de l'étude sont présentés. Une seconde partie expose le diagnostic de l'évapotranspiration et du microclimat sur le projet du VOP. Enfin la troisième partie détaille les déterminants principaux de l'évapotranspiration sur le VOP et propose des pistes pour optimiser la bioclimatisation sur le village.

I. Les modèles utilisés et leur application sur le village olympique et paralympique

Dans cette première partie du rapport, les deux outils de simulation sont successivement détaillés avant de présenter le terrain sur lequel ils sont mis en œuvre : le Village Olympique et Paralympique (VOP) et en particulier le mail Finot. La méthodologie innovante mise en œuvre dans l'étude est alors exposée.

1. Présentation du modèle hydrologique MARIE

Le modèle de bilan hydrologique et d'évapotranspiration développé pour cette étude est basé sur une partie du code URBS (Rodriguez *et al.*, 2008). La partie du code URBS chargée de traiter les flux d'eau des surfaces végétalisées est adaptée aux surfaces végétalisées du VOP. Ce nouveau code, baptisé MARIE (Modelling Actual Runoff Infiltration Evapotranspiration), permet de calculer les flux d'évapotranspiration de surfaces végétalisées composées de strates végétales multiples (Figure 1).

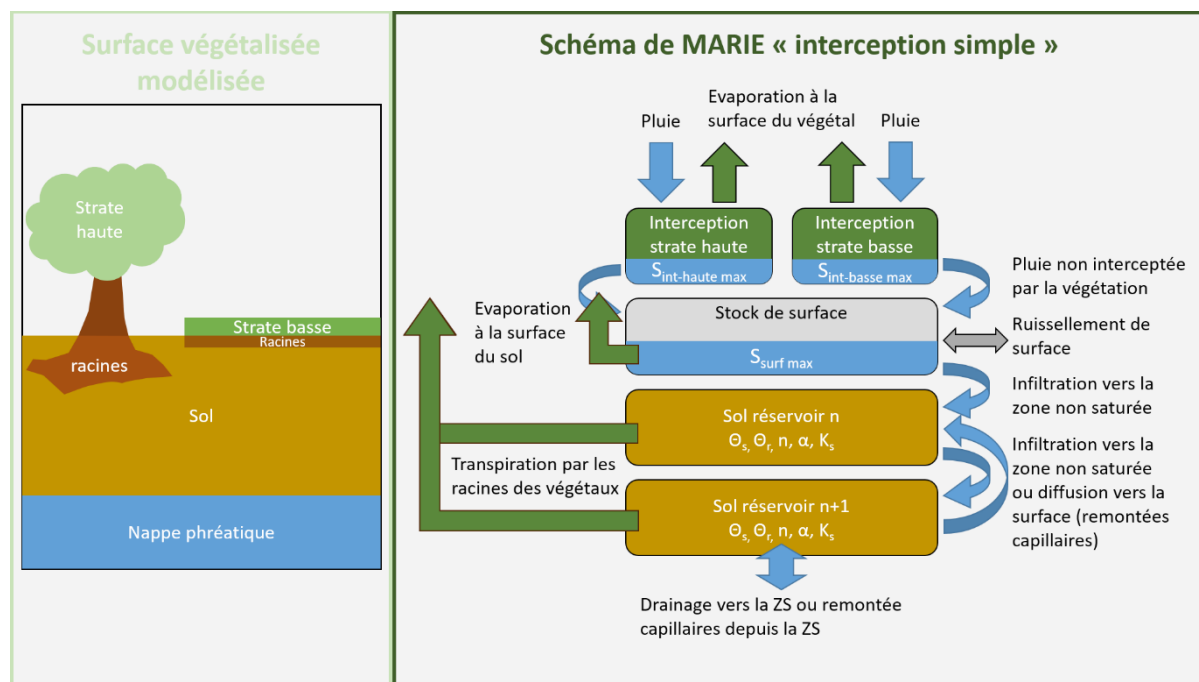


Figure 1 : Schéma conceptuel du modèle hydrologique d'évapotranspiration MARIE

Ces flux d'évapotranspiration sont calculés en tenant compte de différents processus hydrologiques et microclimatiques intervenant dans le continuum Atmosphère-Végétation-Sol :

- La demande évapotranspiratoire atmosphérique est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith qui tient compte des conditions climatiques (rayonnement solaire, température et humidité de l'air, vitesse du vent) mais également des propriétés de la végétation (indice foliaire LAI, résistance stomatique des feuilles et hauteur). Cette demande est utilisée comme capacité maximale d'évapotranspiration (évapotranspiration potentielle, ETP) des surfaces végétalisées dans le modèle MARIE.
- L'interception des précipitations par le couvert végétal est prise en compte. Chaque strate végétale possède un réservoir d'interception. L'eau contenue dans ce réservoir s'évapore en fonction du stock d'eau du réservoir et de l'ETP de la strate végétale. Ce réservoir se vidange dans le réservoir sous-jacent lorsque la capacité maximale du stock d'interception est atteinte (S_{int} voir Figure 1).

- Le réservoir de surface reçoit l'eau provenant de la vidange des réservoirs d'interception et les eaux de pluie qui ruissellent sur les surfaces peu perméables connectées hydrologiquement aux surfaces végétalisées modélisées. Ce réservoir de surface se vidange par évaporation (en fonction du stock d'eau et de l'ETP) et par infiltration de l'eau dans le sol. L'infiltration vers la zone non saturée (ZNS) du sol dépend de la teneur en eau et de la conductivité hydraulique du sol.
- La ZNS du sol est discrétisée en réservoirs d'épaisseurs variables. Chaque réservoir peut être défini par des propriétés hydrodynamiques différentes. Ces paramètres (θ_r , θ_s , α , n et K_s) sont utilisés pour définir les caractéristiques du sol dans la loi hydrodynamique qui permet de calculer les transferts d'eau en milieu insaturé. Ces transferts d'eau peuvent avoir lieu par gravité et capillarité. La transpiration du végétal est également prise en compte lorsque des racines sont présentes dans les réservoirs du sol. Ce flux de transpiration est calculé selon la loi de Feddes (Feddes et al., 2001) à partir d'une densité racinaire, de la teneur en eau du réservoir et de l'ETP. Ce flux de transpiration est ainsi directement lié aux conditions hydriques du sol. Les écoulements dans la zone saturée ne sont pas modélisés dans ce modèle. Le niveau de la zone saturée (ZS : nappe) est considéré constant en raison de la proximité de la zone d'étude avec la Seine. Seules les interactions avec la ZS sont prises en compte (recharge ou remontées capillaires de la ZS vers la ZNS).

Le modèle MARIE permet ainsi de calculer les flux d'évapotranspiration à chaque pas de temps (5 minutes) en tenant compte : (1) d'un couvert végétalisé composé de plusieurs strates et (2) des conditions hydriques du sol.

2. Présentation du modèle microclimatique SOLENE-microclimat

SOLENE-*microclimat* est un outil de simulation numérique qui permet de modéliser finement le climat urbain à l'échelle d'un quartier. La représentation des phénomènes physiques régissant le climat urbain (ensoleillement, vent, transferts de chaleur,...) permet de pouvoir évaluer l'influence de l'environnement bâti sur l'effet d'îlot de chaleur urbain, le confort thermique et les consommations énergétiques des bâtiments. La quantification de l'efficacité des solutions de rafraîchissement urbain (végétation, surface d'eau, forme urbaine, choix des matériaux, ...), la comparaison de diverses solutions d'aménagement, ainsi que la considération de scénarios prospectifs considérant le changement climatique sont quelques unes des applications phares de l'outil.

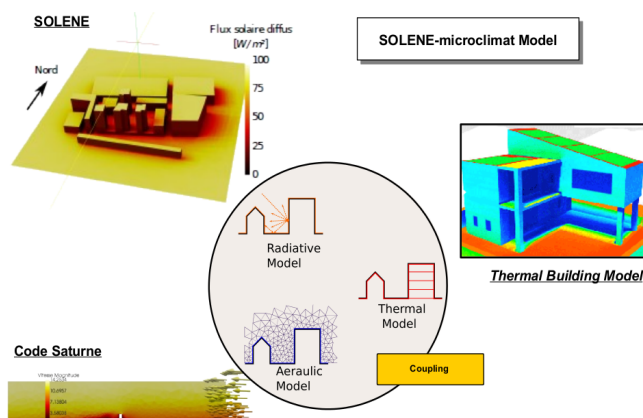


Figure 2 : SOLENE-microclimat : outil de simulation numérique du climat urbain

SOLENE-microclimat réalise le couplage (Figure 2) entre un outil de calcul d'ensoleillement (SOLENE), des modèles de paroi, un modèle de thermique du bâtiment, et un outil de mécanique des fluides numériques (CFD) Code_Saturne. Utilisé à l'échelle du quartier, il permet de calculer avec une résolution très fine (de l'ordre du m^2) des distributions de l'ensemble des paramètres climatiques : ensoleillement, température de surface, température d'air, humidité, etc.

Les calculs d'ensoleillement (Miguet, 2000) prennent en compte précisément le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Considérant les albédos des surfaces, les calculs d'ensoleillement prennent également en compte interreflexions solaires entre les diverses surfaces urbaines. Les modèles de transferts thermiques (Bouyer, 2009) permettent de reproduire les phénomènes de stockage et de restitution de la chaleur au sein des surfaces urbaines, ainsi que l'évolution de la température au sein des bâtiments. Enfin, la résolution des équations de mécanique de fluides via Code_Saturne permet de connaître les écoulements du vent dans la scène urbaine (Figure 3) et donc de pouvoir évaluer les échanges de chaleur entre les surfaces urbaines et l'air, ainsi que la dispersion de la chaleur et de l'humidité de l'air. Cela permet en particulier d'évaluer comment et où se diffuse la fraîcheur générée par les solutions de rafraîchissement urbain (Figure 4).

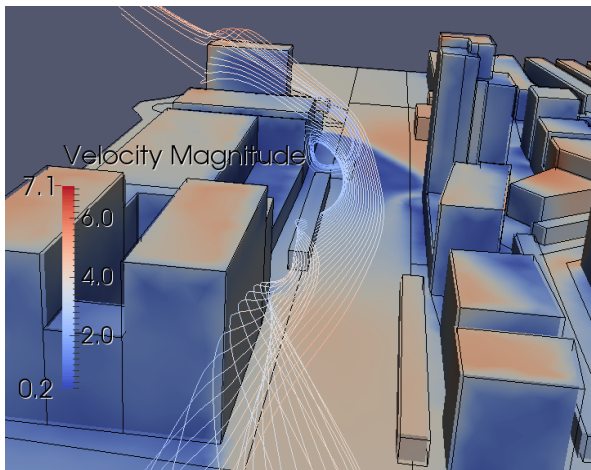


Figure 3 : Distribution du vent dans la ZAC Montaudran simulée avec SOLENE-microclimat.

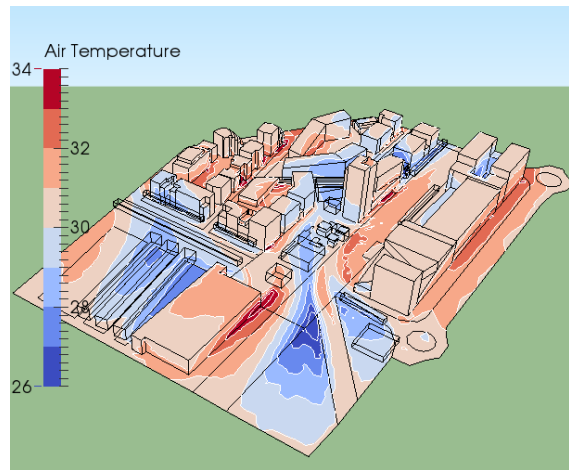


Figure 4 : Distribution des températures d'air dans la ZAC Montaudran simulée avec SOLENE-microclimat.

SOLENE-microclimat possède des modèles de végétation représentant les arbres (Robitu, 2005), les toitures et façades végétalisées (Malys, 2012) ainsi que les surfaces enherbées (Bouyer, 2009). Ces modèles permettent d'estimer la capacité de différentes végétations à rafraîchir l'espace urbain, à en améliorer le confort thermique ou à réduire les consommations énergétiques et permettent aussi d'évaluer la consommation en eau du végétal (Projet EVA).

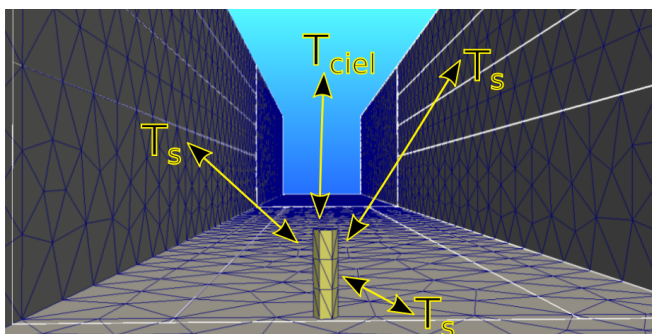


Figure 5 : Représentation du « bonhomme confort » pour le calcul de la TRM à partir d'un point de la scène urbaine (fonction des températures de surface vues par le bonhomme (T_s) et du ciel (T_{ciel}))

Plusieurs modèles d'évaluation du confort thermique existent. Ils exigent le calcul de la température radiante moyenne (MRT, Mean Radiant Temperature, Figure 5) de la scène, en définissant le « bonhomme confort », concept utilisé ici :

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

où MRT est la température moyenne radiante, 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.

3. Le projet d'aménagement du village olympique et paralympique

Le village Olympique et Paralympique (VOP) sera implanté entre les communes de Saint-Ouen et Saint-Denis (93) en bord de Seine au niveau de la cité du Cinéma. Un des principaux enjeux du projet d'aménagement est la lutte contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. La bioclimatisation de l'environnement urbain est donc mise en avant afin de rafraîchir l'air grâce à l'ombrage et au flux d'évapotranspiration (ET) de la végétation.

Ainsi, de nombreux espaces verts sont prévus au sein du VOP pour créer des zones de rafraîchissement et de confort pour les usagers. Parmi ces espaces verts, le Mail Finot constituera un espace d'ouverture sur la Seine. Il est pensé en lieu de promenade, de détente et de convivialité. Les simulations du microclimat, du confort urbain et des flux d'ET des surfaces végétalisées se concentrent ainsi sur cette zone d'intérêt.

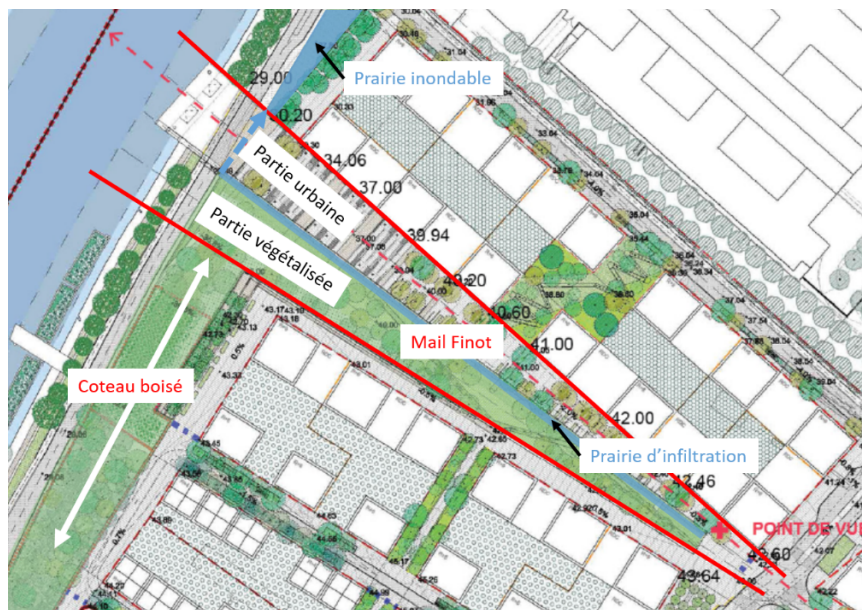


Figure 6 : Vue en plan de la zone du Mail Finot.

Le Mail Finot, situé dans la partie sud du VOP, constitue une descente de 300 m de long jusqu'à la Seine pour un dénivelé total de 12 m (Figure 6). Cette zone est divisée en deux parties : (1) une partie urbaine dont le sol sera principalement composé de dalles en bétons avec quelques plateformes en bois, d'arbres et de jardinières de plantes vivaces, et (2) une partie végétalisée avec un sol composé de remblais humifères qui accueillera une végétation de type Ormaie Rudérale.

De nombreuses espèces végétales seront présentes dans la zone du Mail Finot (Figure 7). Ces espèces végétales ont des propriétés différentes (couvert végétal, résistance stomatique des feuilles, hauteur) qui impactent la capacité maximale d'évapotranspiration (ETP) de la surface végétalisée. Ainsi, l'ensemble de la palette végétale présente sur la Mail Finot est prise en compte dans les simulations microclimatiques et hydrologiques. Les différents espaces végétalisés du Mail Finot ont été utilisés pour définir des zones de travail (Figure 7) :

- La zone 1 est un passage au sein de bâtiments permettant de relier le Mail Finot et une rue parallèle au Mail Finot.
- La zone 2 regroupe la végétation de la partie urbaine du Mail Finot.
- Les zones 3 et 4 correspondent à la partie végétalisée du Mail Finot. La zone 3 à un couvert végétal moins dense que celui de la zone 4.
- La zone 5 correspond à une partie du coteau boisée surplombant la Seine.

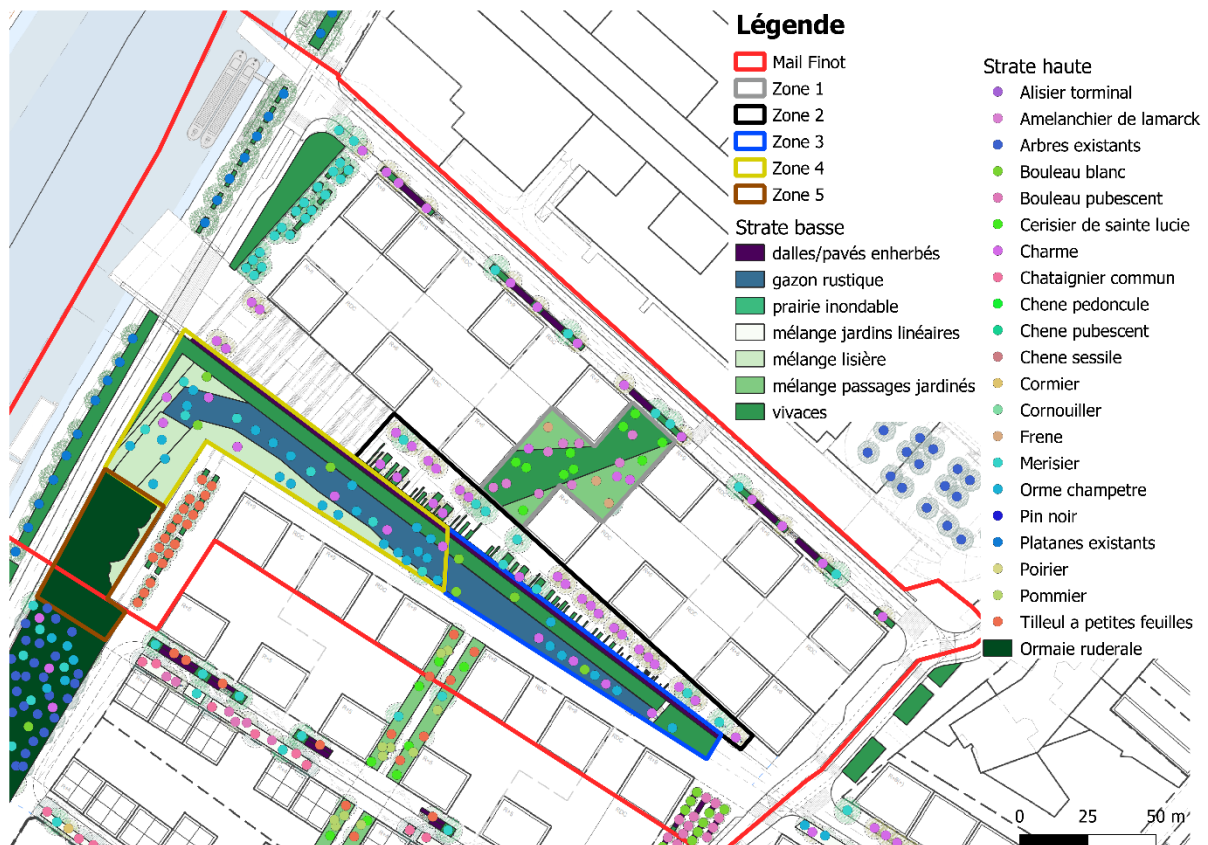


Figure 7 : Zones végétalisées et type de végétaux pris en compte sur le Mail Finot.

Le plan d'aménagement du VOP présente également un plan de gestion des eaux pluviales (EP). Ce schéma de gestion des EP est en accord avec une politique d'utilisation maximale des EP pour l'alimentation en eau des surfaces végétalisées. Ce plan de gestion présente également des directions d'écoulements des eaux de ruissellement. Ces directions sont utilisées afin de déterminer les surfaces d'alimentation des surfaces végétalisées modélisées avec MARIE.

4. Méthodologie d'étude

Cette étude présente une association innovante d'une approche de modélisation microclimatique et d'une approche de modélisation hydrologique (Figure 8) pour estimer le potentiel de rafraîchissement de la végétation sur le Mail Finot à l'horizon 2050. Ces deux approches complémentaires font l'objet d'un chaînage en plusieurs étapes afin d'établir un diagnostic des flux d'évapotranspiration potentiels et réels (ET) puis du microclimat :

- Les profils de rayonnements solaires du Mail Finot sont modélisés avec l'approche microclimatique. Ces profils de rayonnements solaires tiennent compte de l'ombrage des arbres et des bâtiments, et sont considérés distinctement pour les deux strates végétales étudiées (strate haute et strate basse).
- Les flux d'évapotranspiration (ET) sont modélisés avec MARIE en tenant compte des profils de rayonnements solaires simulés par l'approche microclimatique et des données climatiques de 2050 (prévisions Météo France) comme données d'entrées du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les flux d'évapotranspiration réelle (ETR) sont ensuite calculés à partir de ces flux d'ETP en tenant compte des conditions hydriques des sols.
- 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. Le principe du

chaînage consiste à faire passer à chaque pas de temps de simulation les données issues du calcul hydrologique en conditions de forçage du calcul microclimatique. Ces données sont le taux d'évapotranspiration (ETR) et l'évapotranspiration potentielle climatique (ETP). En sortie de ce chaînage, des températures d'air et de surfaces sont obtenues et permettent, entre autres, de calculer les indicateurs de confort.

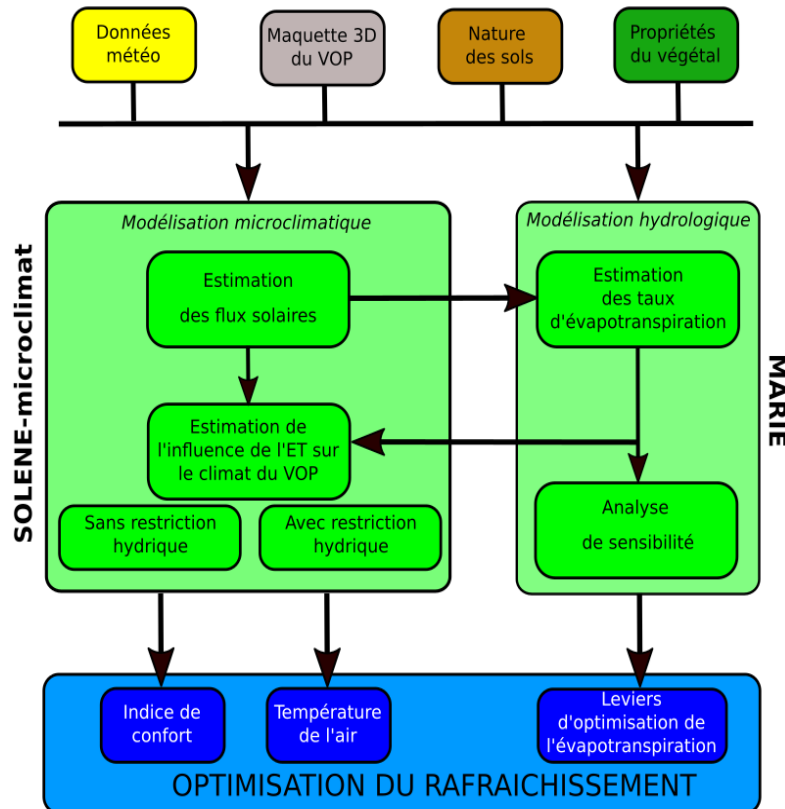


Figure 8: Méthodologie mise en œuvre pour l'étude

Des calculs de sensibilité sont effectués en parallèle de ce chaînage afin : (1) de présenter les déterminants des flux d'ET (analyse de sensibilité des paramètres du modèle hydrologique MARIE) et (2) de présenter l'impact de l'évapotranspiration sur les températures ambiantes du Mail Finot (simulations microclimatiques).

Un fichier de données météo intégrant une perspective du changement climatique (selon le scénario RCP 8.5 du GIEC) a été transmis par la SOLIDEO. Il s'agit de données issues de 200 simulations climatologiques effectuées par Météo France indiquant des probabilités d'évolution des variables météorologiques à l'horizon 2050. Une année particulièrement chaude, correspondant au 3ème quartile des années les plus chaudes des 200 simulations, a été retenue pour mener l'étude. L'analyse de ce fichier a permis d'identifier la période caniculaire du 26 août au 6 septembre.

La Figure 9 et la Figure 11 présentent respectivement les évolutions temporelles de la température de l'air et de l'humidité relative de l'air au cours de la période de simulation. La journée du 2 septembre est la dernière journée parmi les plus chaudes de la période ; elle est retenue comme journée type pour réaliser l'analyse du microclimat.

La rose des vents (Figure 10) sur la période de simulation indique un vent provenant principalement du Nord-Est avec une vitesse moyenne de 2,7 m/s. Il faut noter que cette

- *Conditions climatologiques* : Les conditions climatologiques actuelles sont testées, avec les années 2018 et 2019, et avec la paramétrisation du modèle MARIE correspondant à l'aménagement du Mail Finot à l'horizon 2050.

5. Modélisation du VOP

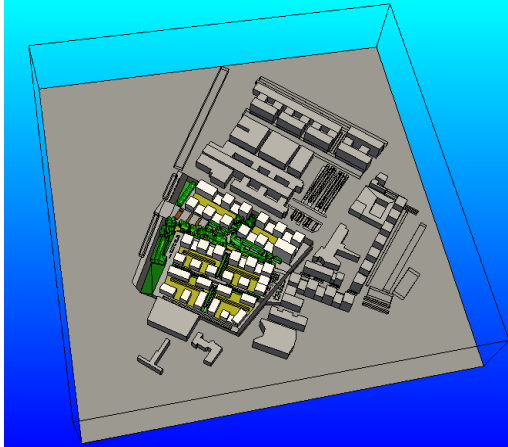


Figure 12 : Environnement du VOP.

La zone du VOP autour du mail Finot a été modélisée en considérant la volumétrie des bâtiments, la topographie du terrain, la délimitation des zones de nature différentes, et la représentation du végétal (implantation, volumétrie, caractéristiques notamment celles impactant les phénomènes d'évapotranspiration). L'environnement du mail Finot a été modélisé (Figure 13) et sera pris en compte dans l'ensemble des calculs réalisés au cours de la simulation. L'environnement au-delà est également pris en compte pour son effet d'ombrage et son effet d'obstacle à l'écoulement du vent (Figure 12).



Figure 13 : Modélisation du mail Finot avec (à gauche) et sans (à droite) les arbres.

Le maillage réalisé (Figure 14) est un maillage non structuré qui comporte un maillage surfacique triangulaire de l'enveloppe urbaine. Les mailles les plus fines sont de 2m de côté. La discrétisation est satisfaisante : chaque variable climatique est disponible tous les 2m² maximum au niveau du mail Finot. Ce maillage surfacique sert de base au maillage volumique tétraédrique.

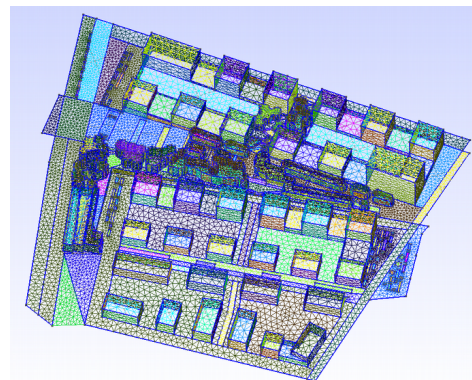


Figure 14 : Maillage surfacique du mail

II. Diagnostic de l'évapotranspiration et du microclimat sur le village olympique et paralympique

Dans cette seconde partie, les conditions climatiques générales sur le VOP sont en premier lieu présentées. Cela permet de poser les bases de la compréhension des phénomènes physiques qui interagissent (rayonnement solaire, écoulement du vent, ...). L'évaluation des flux d'évapotranspiration présentée ensuite constitue une donnée d'entrée à la modélisation microclimatique couplée. Le potentiel de rafraîchissement est alors évalué au travers de l'analyse des températures de surface avant d'investiguer les températures d'air et le confort thermique en conditions hydriques optimales et dans des conditions de stress hydrique.

1. Conditions générales du microclimat

1.1. Ensoleillement

L'ensoleillement est le premier moteur de la surchauffe urbaine et de la production de situation d'inconfort. Le constat principal de l'observation du nombre d'heures d'ensoleillement (Figure 15) est qu'un certain nombre d'espaces ne voit le soleil à aucun moment de la journée. C'est le cas pour une large partie de la zone 1. Par ailleurs le reste de la zone 1 ne voit le soleil qu'un très faible nombre d'heures. La zone 2 présente les mêmes caractéristiques pour la zone haute du mail Finot. Enfin, il en est de même pour la partie la plus au sud des zones 3 et 4, qui se trouve continuellement à l'ombre du front bâti longeant le mail Finot. Cela est renforcé par le dénivelé du mail. L'analyse du cumul d'ensoleillement (Figure 16) permet de prendre en compte l'intensité réelle du rayonnement reçu par une surface, ainsi que l'influence des arbres et des inter-réflexions du soleil sur les surfaces.

On constate notamment que les deux tiers du mail Finot ne reçoivent que très peu de rayonnement à l'échelle de la journée. Ceci résulte de la présence d'arbres qui vont créer de l'ombrage sur ces espaces. De fait, il ne sera pas décisif d'y mettre en œuvre des matériaux qui limitent l'effet d'îlot de chaleur. L'ensemble des surfaces au sol des zones 3 et 4 (pour sa partie la plus haute) est peu exposé. Une partie est la conséquence de l'ombrage des bâtiments, l'autre celle des arbres. Enfin la zone 5 reçoit un cumul de flux solaire relativement faible alors qu'elle présente un nombre d'heure d'ensoleillement élevé. Ceci est l'effet de la strate haute, dense, qui recouvre la quasi-totalité de la zone.

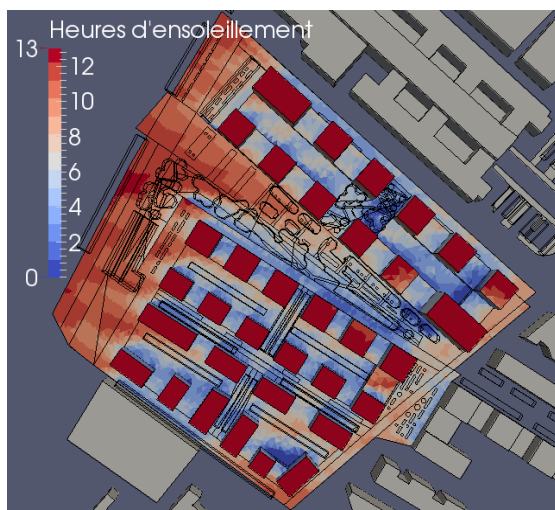


Figure 15 : Nombre d'heures d'ensoleillement pour le 2 septembre

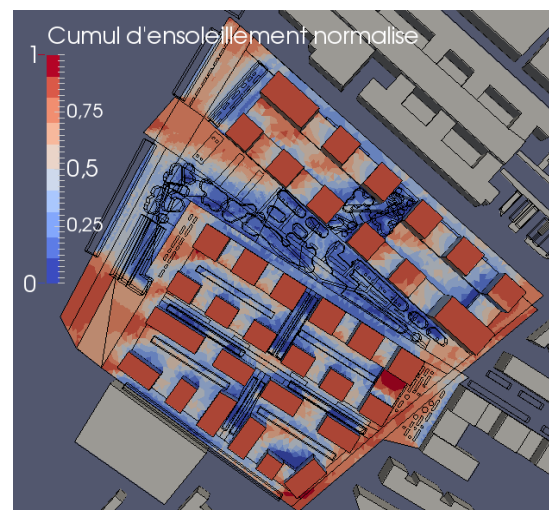


Figure 16 : Cumul d'ensoleillement normalisé pour le 2 septembre

Le Tableau 1 résume l'ensemble de ces indicateurs pour lesquels une moyenne a été calculée pour chaque zone. La zone 1 et 3 ont une faible exposition, elles sont déjà fortement ombragées par les bâtiments. Les arbres qui y sont présents n'auront quasiment aucun impact via leur effet d'ombrage. Ils auront d'ailleurs également une faible capacité à évapotranspirer. Les arbres des zones 4 et 5 ont en revanche une réelle efficacité en termes de production d'ombrage. La zone 2 est assez dispersée et l'analyse ne se fait pas de manière uniforme. Comme évoqué précédemment, la partie la plus haute du mail Finot est faiblement ensoleillée, les arbres auront une efficacité faible. C'est moins le cas pour la partie centrale du mail.

	Nombre d'heures d'ensoleillement moyen (% des 13h d'ensoleillement maximales)	Moyenne du cumul des flux solaires
Zone 1	3,3 (25%)	16 %
Zone 2	6,7 (52%)	20 %
Zone 3	3,7 (28%)	23 %
Zone 4	7,5 (58%)	19 %
Zone 5	9,2 (71%)	27 %

Tableau 1 : Nombre d'heures d'ensoleillement et cumul de flux solaire moyens pour chaque zone.

1.3. Vitesse du vent

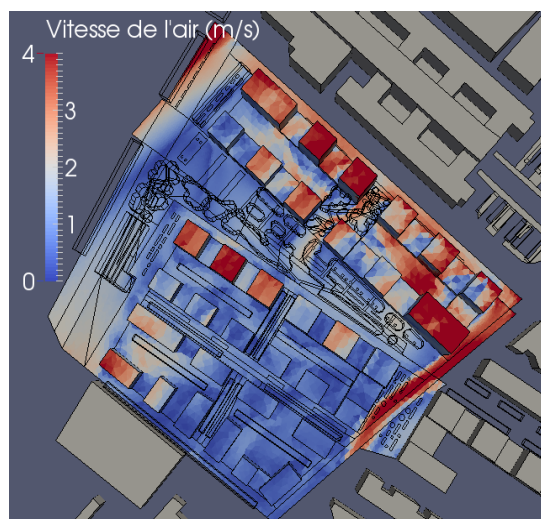


Figure 17 : Distribution des vitesses du vent.

	Vitesse de l'air moyenne (m/s)
Zone 1	1,82
Zone 2	1,09
Zone 3	1,39
Zone 4	0,82
Zone 5	1,37

Tableau 2 : Valeurs moyennes des vitesses du vent dans les 5 zones étudiées.

Les vitesses du vent au niveau du mail Finot et de chacune des 5 zones étudiées sont relativement faibles (Tableau 2). Le cœur de l'îlot le plus au nord est le plus exposé à un vent important, ceux les plus au sud sont soumis à des vents faibles profitant de l'abri des bâtiments. Il est à noter que la rue Ampère en haut du mail Finot est un lieu d'accélération importante du vent (Figure 17). L'analyse des lignes de vent permet de comprendre la circulation du vent, la provenance et la destination des masses d'air qui passent à un endroit donné. Un exemple de restitution graphique est donné sur les Figures 18 et 19. L'analyse complète est à retrouver dans le rapport dédié à l'analyse microclimatique (Morille, 2020).

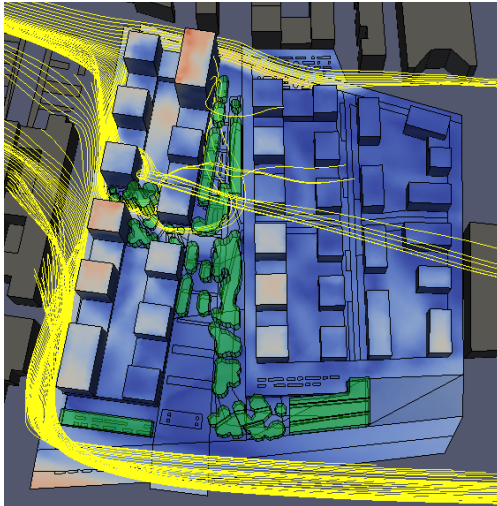


Figure 18 : Lignes de courant du vent en amont du mail Finot

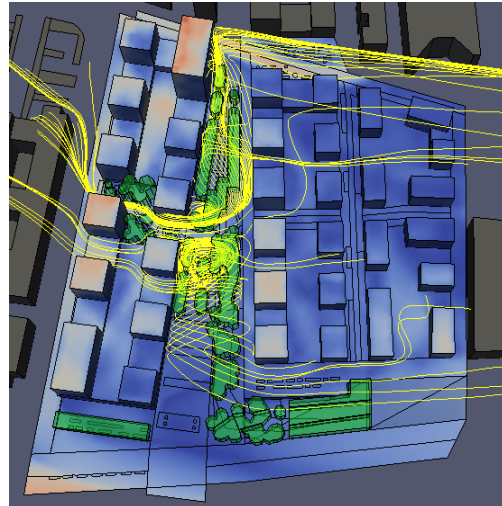


Figure 19 : Lignes de courant du vent au sein du mail Finot

1.2. Sky View Factor

Les facteurs de vue du ciel représentent la proportion de l'hémisphère local représentant la voûte céleste vue par un observateur. Ils ont un rôle prépondérant dans la capacité d'une surface à échanger de l'énergie par rayonnement infrarouge avec le ciel. Ces échanges radiatifs sont en effet l'un des phénomènes qui contribuent au refroidissement des surfaces urbaines, en particulier lorsque le ciel est dégagé.

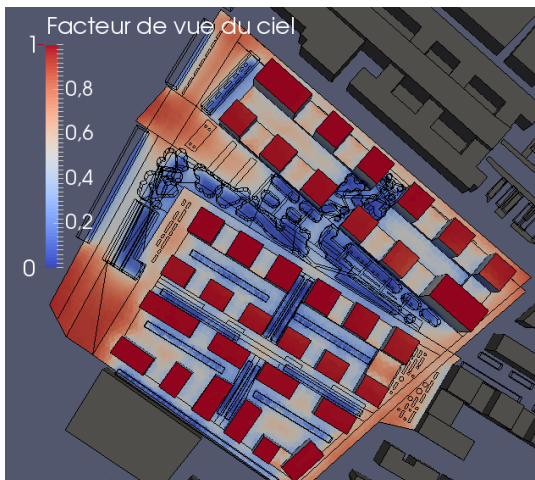


Figure 20 : Sky View Factor pour l'ensemble du quartier.

Pour toutes les zones végétalisées, ces valeurs sont très peu élevées (Figure 20). Les surfaces de sol au pied des bâtiments présentent des valeurs faibles de facteurs de vue du ciel, tout comme les surfaces sous les arbres. Ces dernières sont justement celles sur lesquelles il faut concentrer son attention afin de permettre de tirer profit de ce rafraîchissement naturel par rayonnement thermique. Il est donc important de limiter l'usage des arbres dès lors qu'ils sont implantés dans des zones où leur influence est limitée, notamment donc dans les zones qui sont déjà à l'ombre des bâtiments, comme cela a été décrit sur l'analyse du rayonnement solaire.

2. Flux d'évapotranspiration

Un diagnostic des flux d'évapotranspiration est proposé en prenant en compte la diversité des propriétés de la végétation présente sur le Mail Finot, les profils de rayonnements solaires (différents par zones et par strates végétales), et les variations des conditions hydriques des sols. Ces sols sont alimentés par l'eau de pluie non interceptée par la végétation et par le ruissellement des eaux pluviales sur les surfaces en amont peu perméables alimentant les surfaces végétalisées. Les résultats sont présentés en suivant le rapport ETR/ETP des 5 zones étudiées : l'évapotranspiration potentielle ETP représente la demande climatique estimée à

partir des conditions climatologiques et des propriétés de la végétation, l'ETR représente la l'évapotranspiration réelle. Le rapport ETR/ETP correspond ainsi à un coefficient de limitation de l'évapotranspiration en raison d'un manque d'eau dans le sol pour la végétation. Les rapports ETR/ETP sont présentés pour les deux strates végétales des 5 zones du Mail Finot, un rapport moyen (strate haute et strate basse) est aussi proposé par zone.

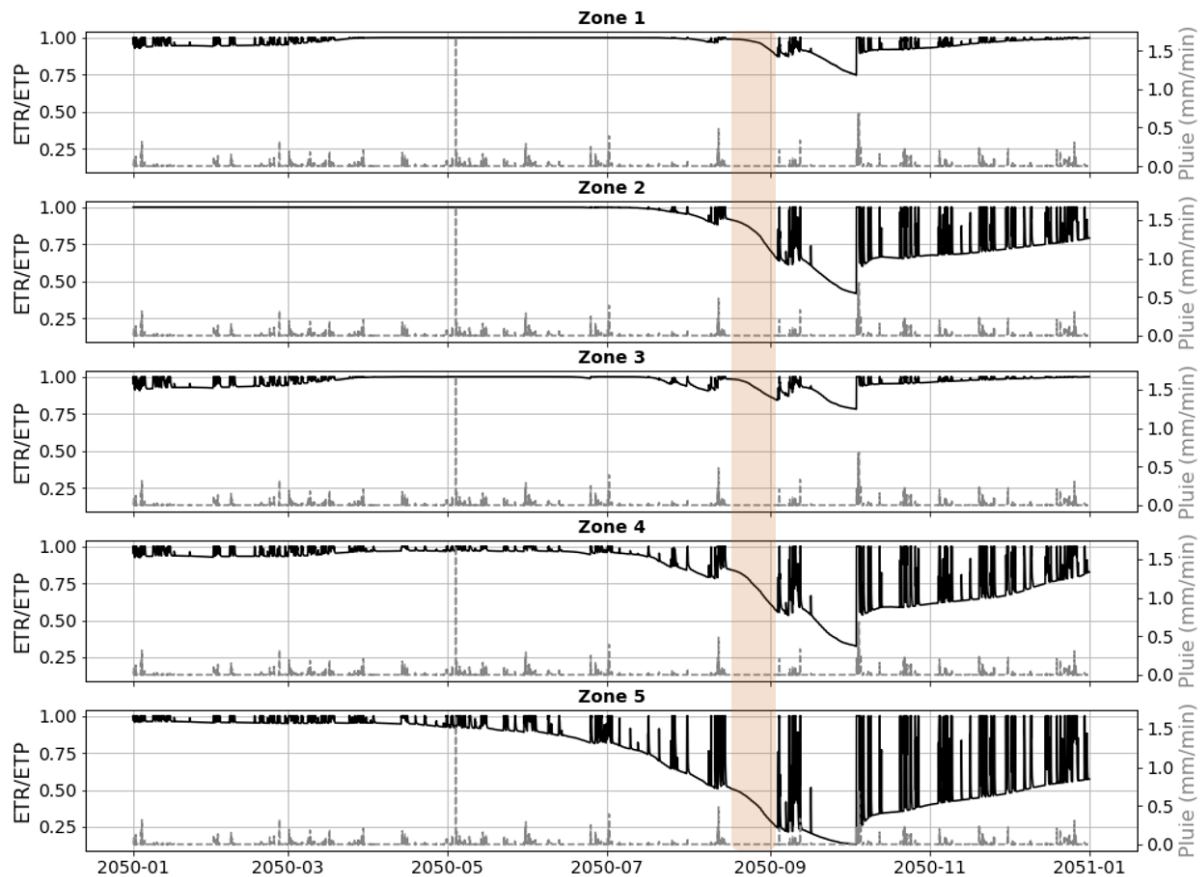


Figure 21 : Variations temporelles des rapports ETR/ETP de la strate haute pour les 5 zones du Mail Finot (période de canicule surlignée en orange).

On observe sur la Figure 21 une variabilité spatiale du manque d'eau pour la strate haute. La zone 5 montre un rapport ETR/ETP particulièrement faible à partir du mois de juillet, et jusqu'à la fin de l'année. La strate haute des zones 2 et 4 est également marquée par ce manque d'eau. Les strates hautes de la zone 1 et 3 sont les moins touchées. La strate haute des zones 2, 4 et 5 présente une limitation significative de l'ET après la période de canicule (surlignée en orange) malgré des précipitations plus fréquentes en fin d'année : l'évapotranspiration de la strate haute a épuisé le stock d'eau de la zone racinaire et la recharge en eau n'est pas suffisante. La variabilité spatiale du manque d'eau pour l'ET de la strate basse est moins marquée que celle de la strate haute : les strates basses des 5 zones présentent des variations du rapport ETR/ETP similaires (Figure 22). Les valeurs les plus faibles du rapport ETR/ETP sont atteintes par les strates basses des zones 2, 3 et 4, avec des dynamiques différentes de celles de la strate haute. La strate basse est mieux alimentée en eau au cours de l'année (rapport ETR/ETP proche de 1). Néanmoins, lors de la période de canicule, la limitation de l'ET de la strate basse est plus importante que la limitation de l'ET de la strate haute.

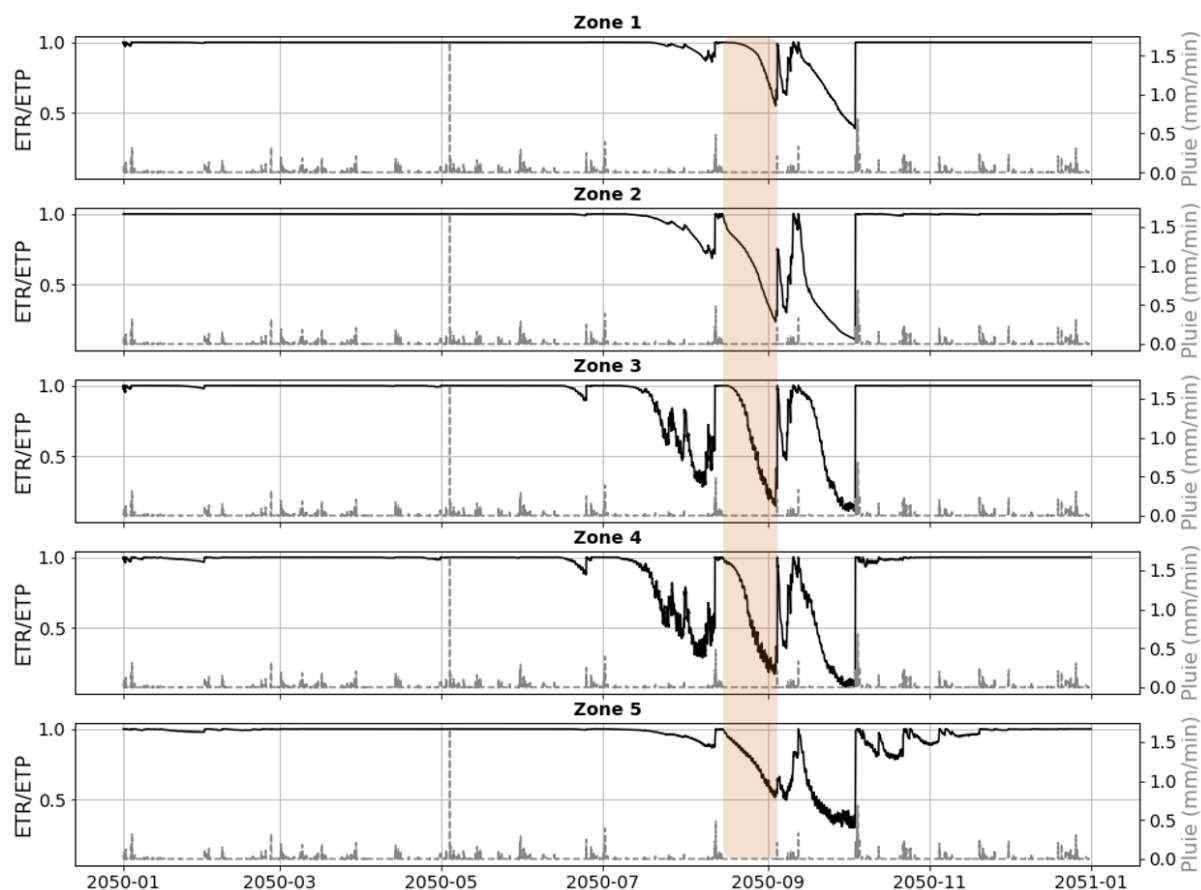


Figure 22 Variations temporelles des rapports ETR/ETP de la strate basse pour les 5 zones du Mail Finot (période de canicule surlignée en orange)

Cette différence du stress hydrique s'explique par les profils racinaires des deux végétations :

- La strate basse possède des racines superficielles (entre 20 à 70 cm dans le modèle MARIE) qui captent en priorité l'eau de pluie non interceptée par le couvert végétal et l'eau de pluie ruisselée sur les surfaces aont. La faible profondeur des racines de la strate basse signifie également que le stock d'eau disponible est limité, ce qui explique l'arrivée rapide d'un stress hydrique important lors des périodes sans pluie.

- A l'inverse, la strate haute possède un système racinaire profond (2 m dans le modèle MARIE). La réserve en eau disponible pour la strate haute est donc plus importante que celle de la strate basse. L'arrivée du stress hydrique de la strate haute est ainsi plus lente et le stress hydrique moins important (la réserve en eau étant plus longue à épuiser) que dans le cas de la strate basse. Les rapports ETR/ETP moyen de la période sèche (voir Error: Reference source not found) indiquent en ce sens une limitation de l'ET par manque d'eau plus importante pour la strate basse que pour la strate haute.

Le Tableau 3 montre un fonctionnement particulier pour la zone 5 : la strate haute subit un stress hydrique plus important (rapport ETR/ETP plus faible) lors de la période de canicule que la strate basse. Le profil racinaire de la strate basse de la zone 5 est le plus profond (70 cm de profondeur) des 5 zones (entre 20 et 50 cm). La strate basse de la zone 5 a donc accès à une réserve en eau plus grande pour satisfaire son importante demande évapotranspiratoire et prélève ainsi d'avantage l'eau du sol disponible pour la strate haute.

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

Tableau 3 : Comparaison des cumuls d'évapotranspiration de la strate haute et de la strate basse lors de la période de canicule (26/08/2050 – 09/06/2050, voir Figure 21 et Figure 22).

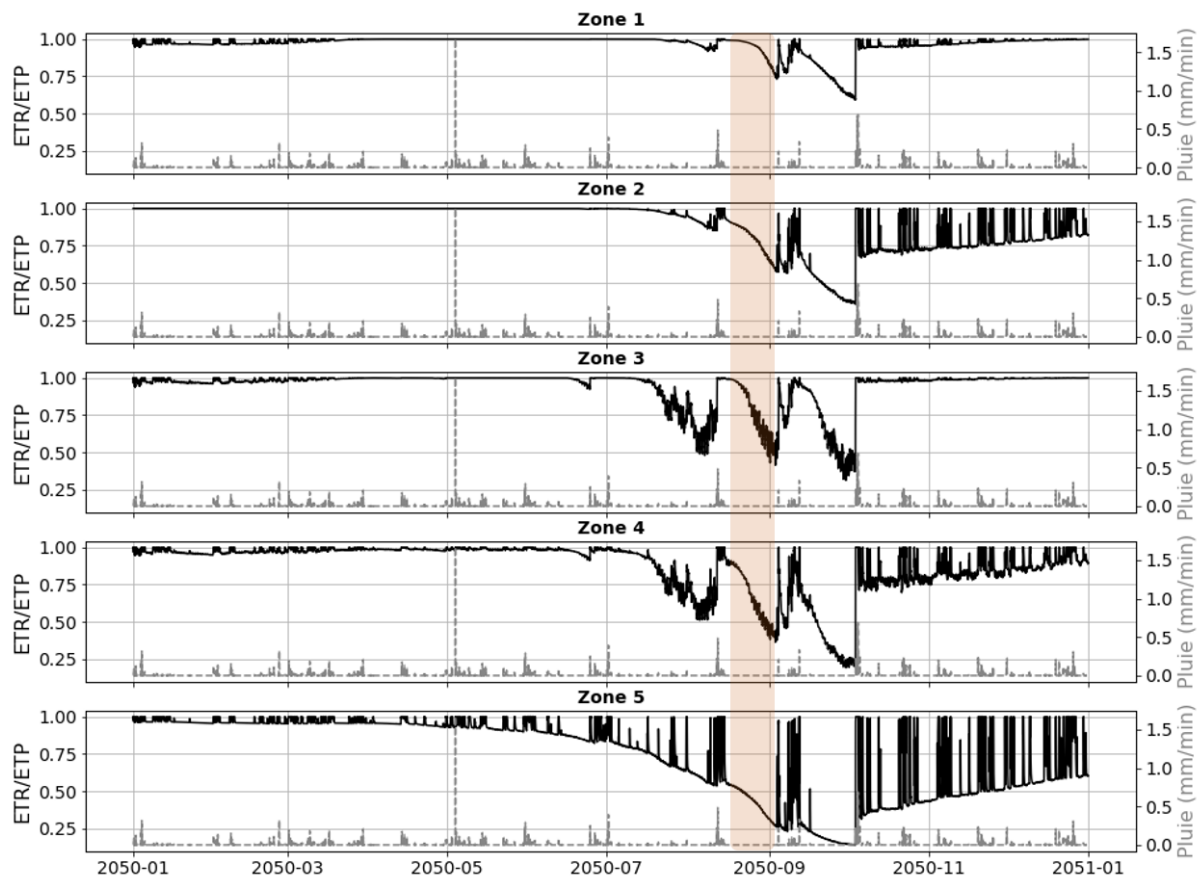


Figure 23 Variations temporelles des rapports ETR/ETP moyen (strate haute et strate basse) pour les 5 zones du Mail Finot (période estivale surlignée en orange).

Ce diagnostic des flux d'évapotranspiration du Mail Finot à l'horizon 2050 montre que toutes les zones présentent une limitation du flux d'ET lors de la période de canicule sélectionnée en raison d'un manque d'eau (Figure 23). Le stress hydrique des zones 2, 4 et 5 est particulièrement important puisqu'il se répercute sur les flux d'ET bien après la fin de la période sèche (Figure 23). Cette première analyse indique également que :

- les flux d'ET de la strate basse sont particulièrement affectés par les périodes chaudes et sèches, le profil racinaire superficiel ne permettant pas de subvenir aux besoins en eau de la plante lorsqu'il ne pleut pas ;
- la strate haute dispose d'une réserve en eau plus grande mais la végétation de cette strate peut être durablement affectée par les périodes de sécheresse puisque les apports en eau ne permettent pas de rétablir des conditions hydrologiques favorables à l'ET.

4. Températures de surface

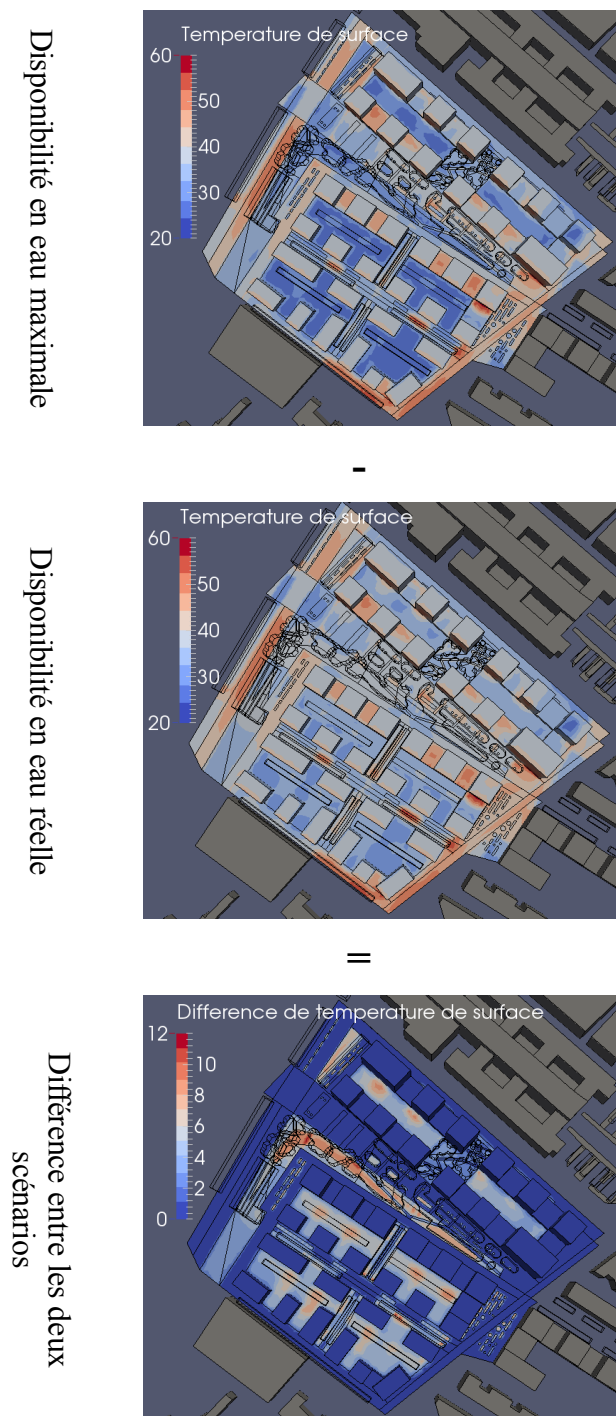


Figure 24, 25 et 26 : Cartographies des températures de surface à 14h et de la différence de températures de surface à 14h entre le scénario avec et sans stress hydrique. (seules les cartographies à 14h sont ici présentées, les autres sont disponibles dans Morille, 2020).

Afin de rentrer plus en détails dans l'analyse des différentes zones étudiées, l'évolution temporelle de la température de surface moyenne de chaque zone est présentée pour le scénario sans (Figure 27) et avec stress hydrique (Figure 28).

Les températures de surfaces sont directement impactées par la nature de la surface et par son exposition aux divers échanges de chaleur : radiatifs (rayonnement solaire, infrarouge), convectifs (dépendant de la vitesse du vent, de la température de l'air) et conductifs (stockage et déstockage). Deux scénarios sont étudiés : l'un avec les flux d'ET précédemment calculés (scénario dit réel ou de référence), l'autre en supposant un supposant les flux d'ET maximums.

Les différences de températures de surfaces entre les deux scénarios sont directement liées aux taux d'évapotranspiration f . C'est la raison pour laquelle les zones 3 et 4 sont celles qui présentent les plus importantes différences de température : de 2 à 7°C pour le gazon et les plantes vivaces et 4 et 12°C pour le mélange de lisière. Ces deux zones présentent une évapotranspiration de seulement 20 à 25 % de l'évapotranspiration maximale. Au contraire, la zone 1 et la zone 5 sont influencées de manière modérée (jusqu'à 4 °C maximum).

Pour les cœurs d'îlot, certaines zones voient leur différence de température localement augmenter du fait du rayonnement solaire qu'elles reçoivent à certains moments de la journée. Dans ces conditions, l'évapotranspiration est plus élevée. Le manque d'eau disponible dans le sol réduit donc de manière plus importante l'évapotranspiration, ce qui mène à une augmentation (une moindre réduction en fait) de la température dans le scénario avec la disponibilité en eau réelle.

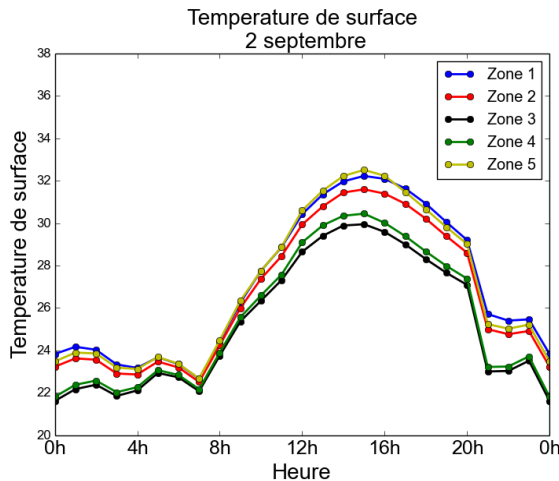


Figure 27 : Evolution temporelle des températures de surface (moyenne pour chaque zone) sans stress hydrique.

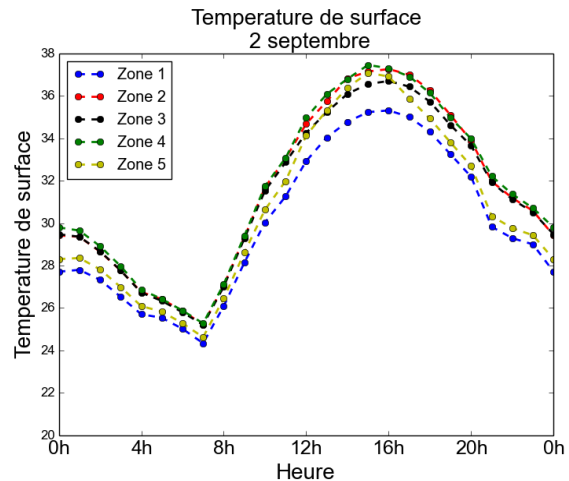


Figure 28 : Evolution temporelle des températures de surface (moyenne pour chaque zone) avec stress hydrique.

En situation de disponibilité en eau maximale, les zones 1, 2 et 5 sont les zones dont la température moyenne est la plus élevée, les zones 3 et 4 celles dont la température moyenne est la plus faible (de 2,5°C au maximum ; 1,5°C en moyenne). L'ensemble des zones étant exposées globalement de la même manière au rayonnement solaire, cela est principalement expliqué par le type de végétation qui compose ces zones. En effet, le gazon restant plus frais que le mélange de lisière et que les vivaces, les grandes proportions de gazon dans les zones 3 et 4 (plus encore dans la zone 3) expliquent cette tendance.

Cette hiérarchie dans les niveaux de température n'est plus la même lorsqu'on considère la disponibilité en eau réelle : toutes les zones voient leur température de surface augmenter mais de manière différente selon le niveau de la restriction en eau. Ainsi la zone 1, sujette à un moindre stress hydrique et initialement la plus chaude, devient la plus fraîche tandis que les zones 3 et 4 initialement plus fraîches deviennent aussi chaudes que les zones 2 et 5.

	$T_{\text{surface}} (f_{\text{réel}})$	$T_{\text{surface}} (f=1)$	$\Delta T_{\text{surface}}$
Zone 1	30.0	27.1	+2.9
Zone 2	31.6	26.7	+4.9
Zone 3	31.4	25.4	+6.0
Zone 4	31.7	25.7	+6.0
Zone 5	30.7	27.1	+3.6

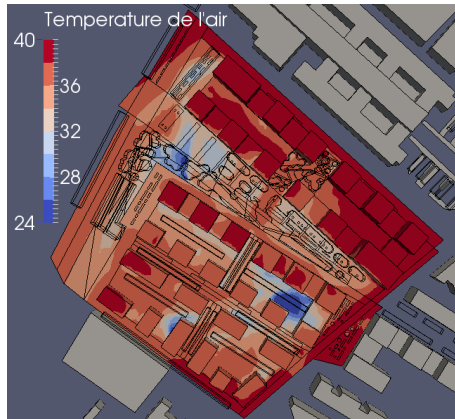
Tableau 4 : Moyenne des températures de surface pour chacune des zones.

Au final, l'augmentation moyenne de température de surface est comprise entre 2,9°C et 6,0°C, alors que la température de l'air météo est en moyenne de 32.7°C pour la journée du 2 septembre. Le rafraîchissement est donc réduit de 50 à 80 % de son potentiel selon les zones.

5. Températures de l'air

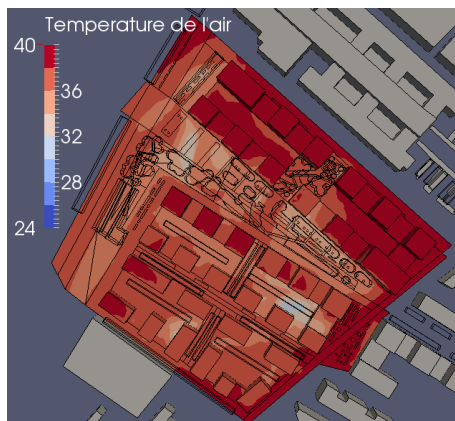
Les températures de l'air sont la résultante des flux convectifs (échangés entre les surfaces et l'air) et de l'advection des masses d'air qui dépend de la vitesse de vent au contact de la surface et du chemin que suivent les masses d'air. L'analyse de la distribution des températures d'air requiert donc l'analyse sur les écoulements des masses d'air (Morille, 2020).

Disponibilité en eau maximale



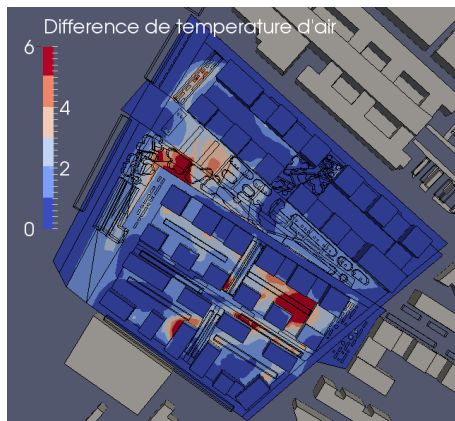
-

Disponibilité en eau réelle



=

Différence entre les deux scénarios



Le mail Finot a globalement toujours une température moins élevée que la température de l'air en amont du VOP. Du fait de la forte circulation du vent, la zone 1 est relativement peu rafraîchie, les masses d'air ayant été peu en contact avec les surfaces plus fraîches. A la sortie de cette zone 1, au niveau du mail Finot, l'air est donc plus chaud que sur le reste du mail Finot où il a circulé au contact des surfaces végétales plus fraîches.

Une température excessivement trop faible apparaît au niveau des différentes zones de recirculations de vent (cf. Figure 19 et paragraphe 1.3). Il s'agit là d'une limite du modèle : les masses d'air, qui stagnent au niveau des mêmes espaces sans se disperser, restent longtemps en contact avec les surfaces plus froides, de manière excessive même. Néanmoins ce rafraîchissement excessif est nettement moins sensible pour la simulation avec la prise en compte de la disponibilité en eau réelle. En effet, les températures de surfaces sont moins froides puisque l'évapotranspiration est réduite.

L'écart entre les températures de surface et la température de l'air est donc également moins important et donc le refroidissement de l'air est moindre. Au final, les écarts de température entre les deux scénarios simulés se concentrent majoritairement au niveau des zones où se produisent ces recirculations d'air. Pour autant, le stress hydrique induit tout de même une augmentation (un moindre rafraîchissement) de la température dans les autres espaces. Ce réchauffement se maintient globalement en deçà de 2°C en moyenne, ce qui est déjà un écart plutôt conséquent.

Figure 29, 30 et 31 : Cartographies des températures d'air à 14h et de la différence de températures de surfaces à 14h entre le scénario avec et sans stress hydrique. (seules les cartographies à 14h sont ici présentées, les autres sont disponibles dans Morille, 2020).

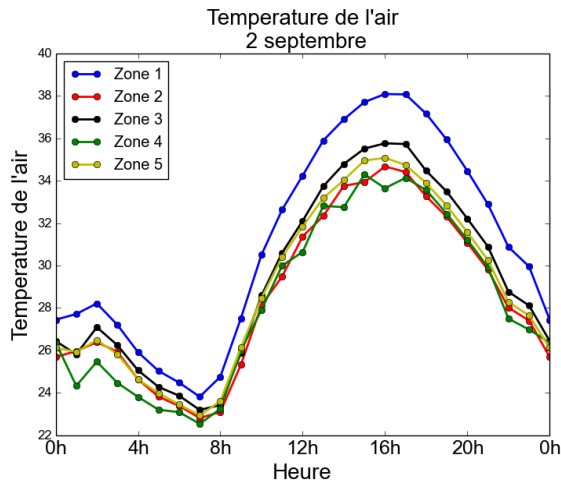


Figure 32 : Evolution temporelle des températures de l'air (moyenne pour chaque zone) pour le scénario sans stress hydrique.

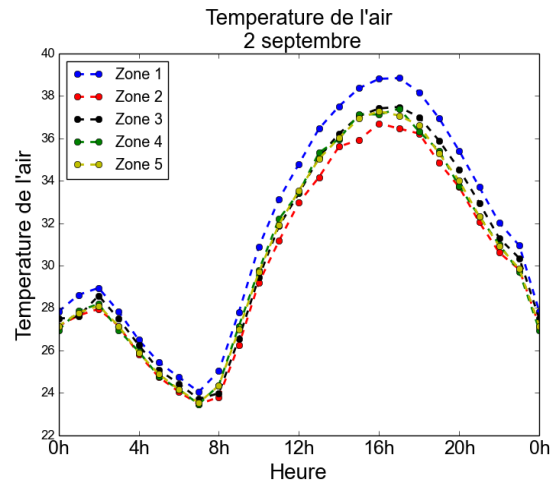


Figure 33 : Evolution temporelle des températures de l'air (moyenne pour chaque zone) pour le scénario avec disponibilité en eau limitée.

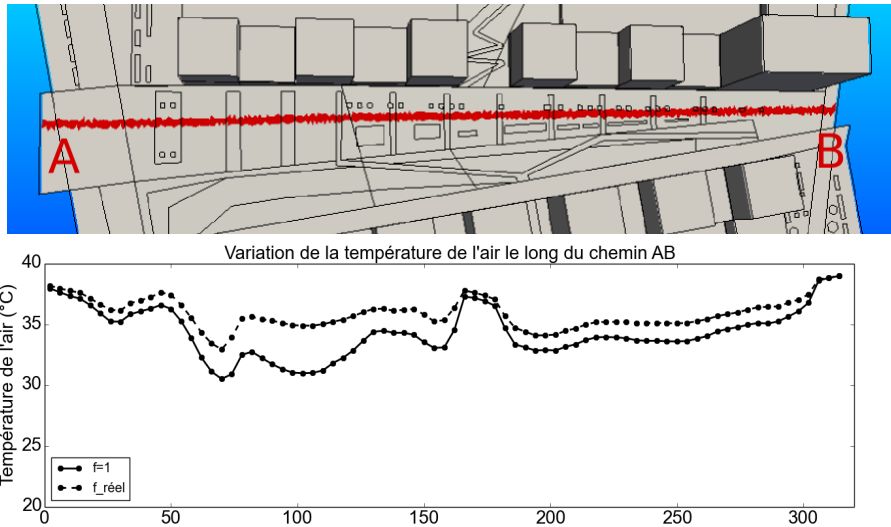
Comme déjà évoqué précédemment, on constate sur la Figure 32 que la zone 1 est la plus chaude, ou plus précisément la moins refroidie par l'effet de la végétation. La zone 5, qui présentait pourtant quasiment les mêmes températures de surface que la zone 1, est nettement plus fraîche : en premier lieu du fait de l'accumulation de fraîcheur par les masses d'air au fur et à mesure de leur contact avec les autres zones végétalisées, et en second lieu car la zone 5 est densément boisée ; la contribution des arbres au rafraîchissement est donc plus important. La zone 2 est plus fraîche que la zone 3, à nouveau du fait de l'écoulement des masses d'air qui fait que globalement la zone 2 est parcourue par l'air après qu'il ait été en contact avec la zone 3 ou 4. La température moyenne de la zone 4 ne peut pas être commentée de manière fiable vu que c'est en son sein qu'une importante recirculation s'opère (avec les conséquences liées aux limites du modèle). La prise en compte de la limitation de la disponibilité en eau (Figure 33) tend à augmenter le niveau des températures et donc à réduire les écarts de température entre la zone 1 et les autres zones.

	$T_{\text{air}} (f_{\text{réel}})$	$T_{\text{air}} (f=1)$	$\Delta T_{\text{surface}}$
Zone 1	31.8	31.2	+0.6
Zone 2	30.3	28.8	+1.5
Zone 3	30.9	29.6	+1.3
Zone 4	30.7	28.2	+2.5
Zone 5	30.6	29.1	+1.5

Tableau 5 : Moyenne des températures d'air pour chacune des zones.

(Compte tenu des recirculations qui opèrent sur la zone 4 et des limites du modèle exposé précédemment, l'écart de température induit par la restriction hydrique pour cette zone n'est pas pris en compte dans l'analyse)

L'augmentation moyenne (à l'échelle de la journée) de température d'air induite par la restriction hydrique est comprise entre 0.6°C et 1.5°C selon les zones. La température de l'air météo est en moyenne de 32.7°C pour la journée du 2 septembre. Cela correspond donc à une diminution de 40 % du rafraîchissement en moyenne.



Figures 34 et 35 : Parcours piéton étudié et profil de température d'air le long du parcours.

Les profils de température sur le mail Finot (Figure 67 à 72) ont une forme qui est semblable pour toutes les heures de la journée avec des causes qui sont celles évoquées précédemment. Au début et à la fin du parcours, les températures suivent l'évolution de la température météo (38°C à 14h). Sur la partie basse du mail Finot, un très léger rafraîchissement s'instaure dans le sillage des arbres et surfaces végétalisées (prairie inondable). Deux zones de forts rafraîchissements sont observées (à 70 m et 140 m environ) : il s'agit des zones de recirculations au sein desquelles le rafraîchissement simulé est excessif. Puis, toujours en remontant le mail Finot, le passage devant la zone 1 induit une zone où la température augmente à une valeur proche de la température météo. Sur le reste du mail, sur sa partie haute, la température est globalement au niveau au rafraîchissement moyen de celui du mail Finot.

La comparaison du profil pour les deux scénarios indique que le moindre rafraîchissement du fait du manque de disponibilité en eau atteint les 1,5°C du moindre rafraîchissement moyen qu'on a pu décrire précédemment. La différence reste nulle ou quasi nulle à la sortie de la zone 1 et aux extrémités du profil, là où les plus fortes vitesses du vent favorisent l'arrivée des masses d'air plus chaudes de l'air incident sur cette partie du VOP et surtout réduit le temps au contact des surfaces plus fraîches.

6. Indice de confort

L'étude de confort a été réalisée sur les 5 zones du mail Finot avec le calcul de la température radiante qui dépend de la température de surface de la maille étudiée et des températures de surfaces perçues par celle-ci. Un calcul thermo-radiatif avec prise en compte du champ de vitesse de vent a été réalisé. Dans un second temps, 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. Nous avons ainsi cartographié la température radiante 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 ($f=0$) :

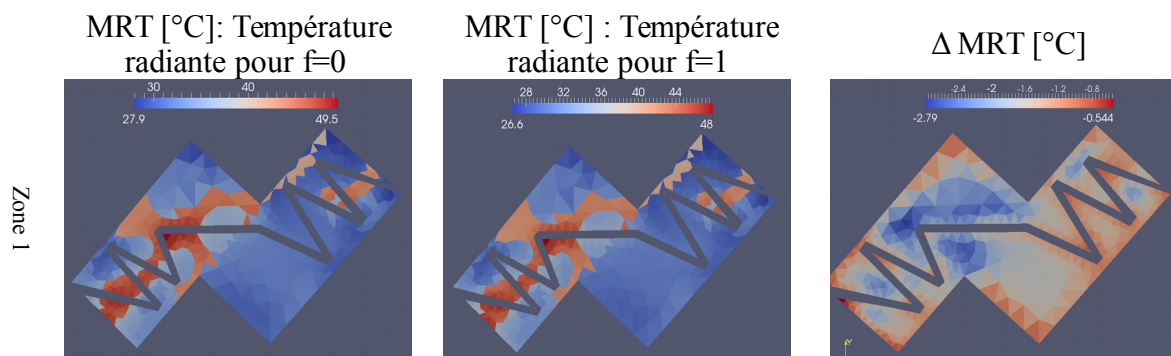
- Quelle que soit la zone considérée, les températures radiantes calculées pour une évapotranspiration maximale T_{mr1} sont plus faibles que la température radiante pour une évapotranspiration nulle T_{mr0} sur la plupart des mailles : les écarts $T_{mr1} - T_{mr0}$ sont

présentés en Tableau 6. Cette diminution de la température radiante est expliquée par la diminution des températures des surfaces végétales liée à l'évapotranspiration.

- Les différences de moyennes des températures radiantés des deux scénarios varient entre 0,8 et 1,8°C (Tableau 6). Les écarts maximums peuvent néanmoins localement atteindre 3,8°C (Figures 36). 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. Il semble donc plus utile d'avoir des zones présentant des surfaces végétalisées importantes. 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.

	MRT [°C] : Moyenne des températures radiantés pour f=0	MRT [°C] : Moyenne des températures radiantés pour f=1	Δ MRT [°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

Tableau 6: Moyenne des températures radiantés par zone et par scénario.



Figures 36, 37 et 38 : Cartographies de la température radiante pour la zone 1 pour les deux scénarios et différence de température radiante entre les deux scénarios.

A noter que ces impacts des scénarios d'évapotranspiration sur la température ambiante sont différents de ceux obtenus sur la température de l'air, en particulier en termes de répartition par zones d'études. Cela s'explique par la non-prise en compte des écoulements aérauliques dans les estimations de la température ambiante.

III. Déterminants et optimisation de l'évapotranspiration sur le village olympique et paralympique

L'estimation de la ressource disponible en eau a permis de quantifier l'influence de la restriction hydrique sur l'évapotranspiration des différentes zones végétalisées ainsi que la répercussion sur le rafraîchissement et le confort que peut amener le végétal. Cette partie investigate à présent la manière dont pourrait être optimisée l'évapotranspiration afin de bénéficier au maximum du potentiel de rafraîchissement des espaces végétalisés.

1. Optimisation de l'évapotranspiration

Une étude de sensibilité a été effectuée sur les paramètres du modèles hydrologiques MARIE afin de connaître leur impact sur les flux d'évapotranspiration (ET). Certains de ces paramètres peuvent être interprétés en termes de choix de conception de l'aménagement du Mail Finot et ainsi être modifiés dans le but d'aboutir à une optimisation de l'évapotranspiration. L'impact de la modification de ces paramètres a été évalué en analysant l'écart du rapport ETR/ETP des calculs de sensibilité avec le rapport ETR/ETP du calcul de référence (calcul présenté dans le paragraphe II.2 prenant en compte les aménagements du Mail Finot et le climat 2050). Une hausse du rapport ETR/ETP indique une amélioration de l'ET et des conditions hydriques du sol (réduction de la limitation de l'ET par manque d'eau dans la zone racinaire). Cet écart est quantifié en pourcentage pour les 20 calculs de sensibilité (Figure 39). Les principaux résultats de cette étude de sensibilité sont présentés, à l'échelle du Mail Finot, au travers des figures Figure 39 et Figure 40.

Végétation : Certaines propriétés de la végétation impactent significativement les rapports ETR/ETP. Un couvert végétal plus dense (LAI + et LAI saison, Figure 39), une réduction de la résistance stomatique des feuilles et des racines de la strate haute moins profondes engendrent une baisse significative du rapport ETR/ETP (jusqu'à -25% à l'année et -71% lors de la période de canicule). A l'inverse, un couvert végétal moins dense, une hausse de la résistance stomatique des feuilles et des racines des arbres plus profondes entraînent une hausse significative des rapports ETR/ETP (jusqu'à +13% à l'année et +50% lors de la période sèche).

> **Une augmentation de la valeur de l'ETP (couvert végétal plus dense et baisse de la résistance stomatique) ne donne pas nécessairement lieu à une augmentation dans les mêmes proportions de l'ETR mais aggrave le stress hydrique : l'alimentation en eau de la végétation n'est pas suffisante pour ces valeurs d'ETP plus élevées. De plus, une augmentation de l'ETP à l'année provoque un prélèvement de l'eau du sol plus important, la végétation est d'avantage en manque d'eau, en particulier lors de la période de canicule.**

Sol : Les propriétés hydrodynamiques du sable limoneux et de l'argile sableuse ne permettent pas de maintenir des conditions hydriques favorables dans la zone racinaire de la végétation (sable trop drainant et argile trop peu perméable). De plus, une conductivité hydraulique du limon plus faible (loi Van Genuchten) réduit l'alimentation en eau de la zone racinaire.

> **Les flux d'ET issus des simulations avec le sol sablo limoneux (sol drainant) et le sol argilo-sableux (sol peu perméable) indiquent que le sol défini dans le calcul de référence (sol limoneux) présente un bon compromis entre alimentation et rétention d'eau.**

Aménagements du Mail Finot : Ces propositions d'aménagements du Mail Finot visent à améliorer l'accès à l'eau pour la végétation. Deux paramètres sont modifiés : (1) les surfaces

de ruissellement amont qui alimentent les surfaces végétalisées et (2) l'imperméabilisation du sol à une certaine profondeur pour maintenir l'eau dans la zone racinaire. La suppression des surfaces de ruissellement des EP s'accompagne d'une réduction considérable des flux d'ET expliquée par une augmentation du stress hydrique (baisse significative du rapport ETR/ETP, -22% à l'année et -56% lors de la période sèche).

> **L'augmentation des surfaces de ruissellement amont permet d'apporter suffisamment d'eau à la zone racinaire de la végétation pour augmenter les flux d'ET, en particulier lors de la période de canicule. L'imperméabilisation du sol en dessous de la zone racinaire de la végétation permet de maintenir une humidité suffisante pour améliorer les flux d'ET.**

Conditions climatologiques : L'utilisation des conditions climatologiques de 2018-2019 dans le calcul des flux d'ET avec MARIE génère une nette amélioration des rapports ETR/ETP. Ces résultats indiquent que l'on peut s'attendre à des conditions d'évapotranspiration satisfaisantes (pas de limitation de l'ET par manque d'eau) pour des années moins exceptionnelles que la projection 2050 utilisée dans le calcul de référence. Le calcul avec un rayonnement solaire non ombragé (Ray MF sans ombrage, Figure 39) montre une réduction du rapport ETR/ETP causée par une valeur d'ETP légèrement plus élevée que celle du calcul de référence.

Les flux d'ET du Mail Finot présentent une sensibilité spatiale aux paramètres du modèle hydrologique. Certaines zones du Mail Finot pourraient bénéficier d'aménagements pour optimiser l'évapotranspiration. La Figure 40 présente des sensibilités des flux d'ET par zones aux paramètres du modèle MARIE similaires aux sensibilités précédemment présentées (Figure 39). Toutefois, on peut voir que certaines zones se démarquent par des sensibilités plus importantes :

- La zone 5 est la plus marquée par une amélioration des conditions d'évapotranspiration (baisse de l'ETP ou meilleur accès à l'eau pour la végétation). En effet, cette zone possède un fort potentiel d'évapotranspiration en raison de son important couvert végétal et de son exposition au soleil (zone du coteau boisé). Néanmoins, ce potentiel d'évapotranspiration est réduit par une trop faible alimentation en eau (aucune surface de ruissellement n'alimente cette surface végétalisée).
- Les zones 2 et 4 présentent également une hausse du rapport ETR/ETP lorsque les conditions d'évapotranspirations sont davantage favorables ce qui indique que ces zones subissent un stress hydrique relativement important pendant et après les périodes sèches ou de canicules.

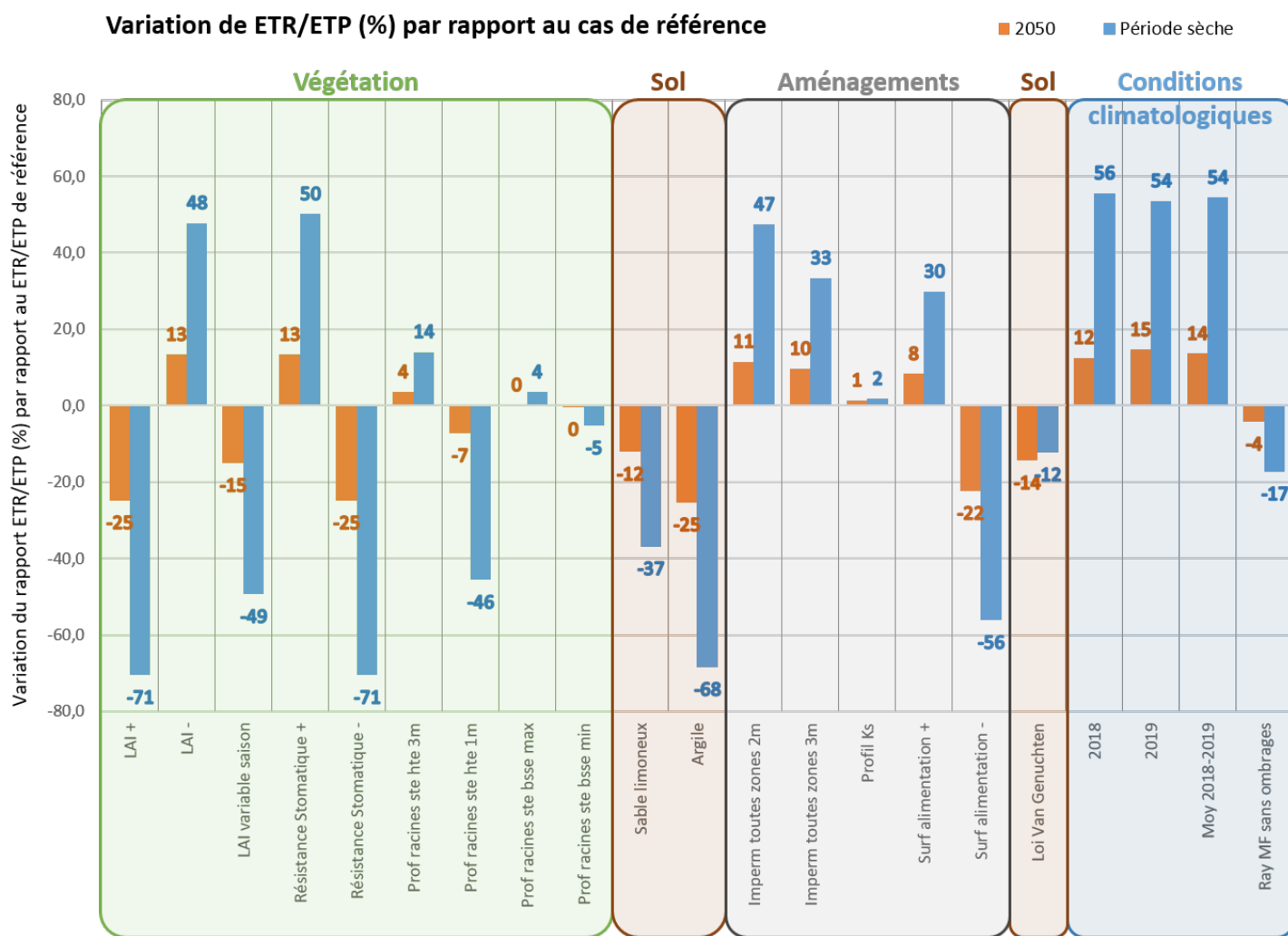


Figure 39 : Variation des rapports ETR/ETP des calculs de sensibilité à l'échelle du Mail Finot. (% de variation par rapport au ratio ETR/ETP du calcul de référence).

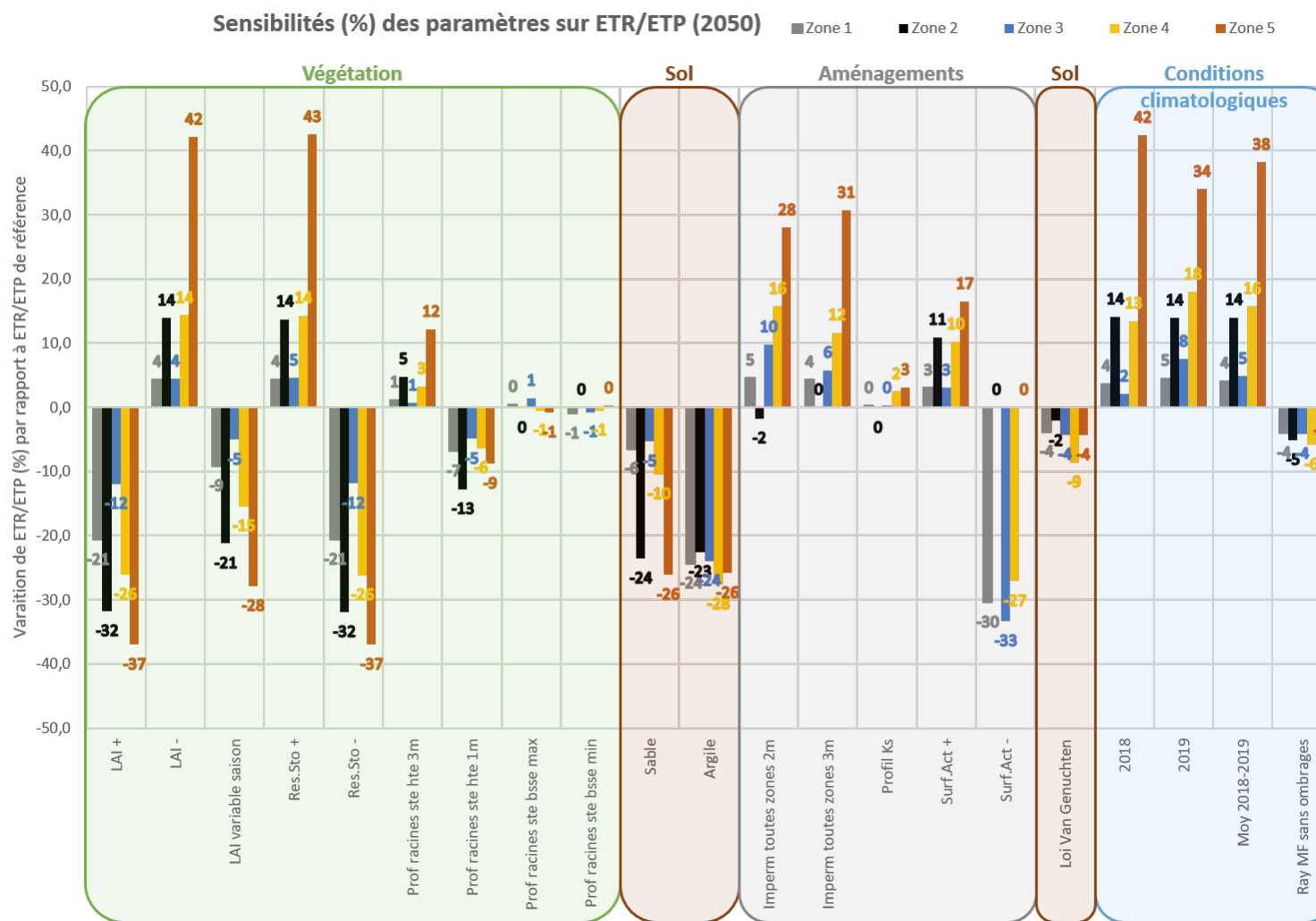


Figure 40 : Variation des rapports ETR/ETP des calculs de sensibilité à l'échelle des zones du Mail Finot. (% de variation par rapport au ratio ETR/ETP du calcul de référence).

2. Synthèse de l'étude de sensibilité

Cette étude de sensibilité des paramètres du modèle MARIE met en exergue les déterminants du flux d'ET qui permettraient d'optimiser le rafraîchissement du Mail Finot à l'horizon 2050. Ces principaux déterminants sont :

- l'indice foliaire LAI de la végétation, caractérisant la densité du couvert végétal ;
- la résistance stomatique des feuilles, correspondant à la capacité du végétal à évapotranspirer à travers ses stomates ;
- la profondeur des racines ;
- la disponibilité en eau dans le sol au niveau de la zone racinaire de la végétation. Cette disponibilité en eau peut être sensiblement améliorée par l'utilisation d'un type de sol dont les propriétés hydrodynamiques sont favorables à la rétention en eau et par une meilleure alimentation en eau des surfaces végétalisées grâce au ruissellement des eaux pluviales.

Les calculs de sensibilité ont aussi montré qu'une augmentation du potentiel d'évapotranspiration de la végétation est inefficace si le stock d'eau accessible par la végétation n'est pas suffisant pour satisfaire cette augmentation d'ETP. Ainsi, les déterminants les plus efficaces en termes d'optimisation des flux d'ET seraient ceux qui favorisent l'accès en eau aux racines de la végétation :

- augmentation de la profondeur des racines ;
- meilleure alimentation en eau des surfaces végétalisées par ruissellement des eaux pluviales (ou redirection des eaux collectées sur les toitures et/ou les voiries) ;
- maintien de l'eau du sol dans la zone racinaire des végétaux (couche de sol ou membrane artificielle peu perméable à la base la zone racinaire).

Par ailleurs, ces simulations hydrologiques des flux d'évapotranspiration ont également montré des conditions de stress hydrique différentes pour la strate haute et la strate basse. Lors des périodes sèches ou de canicule, la végétation de la strate basse est fortement sujette au stress hydrique en raison de son système racinaire superficiel. La végétation de la strate haute possède un système racinaire plus profond lui permettant d'avoir accès à un stock d'eau plus conséquent. Néanmoins, le système racinaire de la strate basse peut concurrencer l'alimentation en eau du système racinaire de la strate haute. En ce sens, des décisions peuvent être prises lors de ces périodes de stress pour optimiser les flux d'ET des surfaces végétalisées. En effet, la strate basse subira un stress hydrique important, à moins d'être irriguée. Ce stress est susceptible d'affecter le bien-être du végétal (qui n'est pas pris en compte dans ces simulations hydrologiques) et ainsi de compromettre l'ET à la suite de ces périodes. La strate haute sera moins sujette à ce stress hydrique, il serait peut-être préférable d'opérer des choix conduisant à privilégier son alimentation plutôt que celle de la strate basse.

Conclusions

L'étude présentée dans ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet d'aménagement du futur Village Olympique et Paralympique des Jeux 2024. Les fortes ambitions environnementales du projet s'illustrent au travers de la volonté de la SOLIDEO de traiter la problématique d'îlot de chaleur urbain, problématique émergente dans les projets d'aménagement. Les travaux menés dans le cadre de l'étude dépassent toutefois le fait de traiter une problématique émergente : la collaboration entre les experts de la modélisation du microclimat urbain et de la simulation des transferts hydrologiques que constituent les équipes de chercheurs du CEREMA et de SOLENEOS a permis de développer une approche particulièrement innovante mêlant ces deux disciplines incontournables des stratégies d'adaptation au changement climatique.

L'objet de l'étude est l'optimisation du rafraîchissement du Village Olympique au travers de celle de l'évapotranspiration. Pour cela, deux outils issus de la recherche académique dédiés à la simulation du microclimat urbain, SOLENE-microclimat, et des transferts hydrologiques, MARIE, font l'objet d'un chaînage spécifique. Les flux radiatifs issus de SOLENE-microclimat ont permis l'évaluation de la disponibilité en eau des zones végétalisées au terme d'un bilan hydrologique complet réalisé avec MARIE. Ainsi la restriction hydrique est réinjectée dans SOLENE-microclimat afin de quantifier le rafraîchissement de l'espace urbain qui en résulte. La quantification parallèle du microclimat qui s'instaure au sein du village olympique en situation de disponibilité en eau maximale permet d'évaluer le potentiel d'optimisation du rafraîchissement. L'étude de sensibilité sur les déterminants de l'évapotranspiration menée avec MARIE donne les pistes principales pour viser cette optimisation.

Cette méthodologie est mise en œuvre spécifiquement sur le mail Finot et les zones végétalisées qui l'entourent avec des conditions météorologiques prospectives du changement climatique à l'horizon 2050. Les résultats obtenus indiquent que :

- L'ensemble des 5 zones végétalisées considérées présente une limitation du flux d'évapotranspiration lors de la période de canicule sélectionnée (26/08/2050 – 06/09/2050) quelle que soit leur situation géographique au sein du Village Olympique et leur composition en termes de type de végétaux. Les strates basses du végétal peinent à trouver de la ressource en eau au cours d'une période de sécheresse du fait de leurs profils racinaires superficiels. Les strates hautes ont accès, en profondeur, à une réserve en eau plus importante mais peuvent être durablement affectées par les périodes de sécheresse puisque les apports en eau ne permettent pas nécessairement de rétablir des conditions hydrologiques favorables.
- La faible disponibilité en eau des différentes zones induit des températures de surface plus élevées pour le végétal de 2°C à 6°C en moyenne selon les zones végétalisées et selon le stress hydrique auxquelles elles sont soumises. Il en résulte un moindre rafraîchissement compris entre 0,6°C et 1,5°C pour les différentes zones végétalisées selon les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises. Pour ce qui concerne le confort thermique, directement lié aux températures de surface des zones végétalisées, les différences de moyennes des températures radiantes induites par le manque d'eau varient entre 0,8 et 1,8°C en moyenne, les écarts maximums pouvant néanmoins localement atteindre 3.8°C.
- Au niveau du mail Finot, la perte de rafraîchissement liée à la restriction hydrique atteint en certains points ces 1,5°C. Néanmoins, ces résultats sont complètement dépendants des conditions aérauliques qui concourent à dissiper les effets de l'évapotranspiration dès lors que la vitesse du vent augmente.
- L'optimisation du rafraîchissement passe d'une part par le recours à des végétaux dont les caractéristiques sont favorables à l'évapotranspiration. Néanmoins, cela doit être couplé avec des stratégies de gestion des eaux en surface permettant d'assurer une disponibilité

en eau du sol suffisante pour que le végétal continue à rafraîchir au cours d'une période de sécheresse. Le choix de sols aux propriétés favorables à la rétention en eau fait également partie des leviers d'actions principaux.

Cette application au Village Olympique et Paralympique des outils pointus issus du monde académique avec une méthodologie innovante illustre au final parfaitement la nécessité de considérer chaque zone végétalisée de manière spécifique. Ceci est indispensable pour adopter les choix d'aménagement permettant d'optimiser le rafraîchissement urbain. Bien que les outils peuvent toujours faire l'objet d'amélioration – la méthodologie du chaînage en fait partie – le recours à des approches de modélisation numérique restituant finement les phénomènes physiques démontre une nouvelle fois sa capacité à produire les connaissances indispensables à des choix de conception urbaine éclairés.

Références

ADEME, 2020 : Adaptation au changement climatique et projet urbain, ADEME - PARENTHÈSES, juin 2020 - 144 p. - Réf. 010831

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.

Malys, L. 2012. Evaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 238 p.

F. Miguet, 2000. Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain . Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes.

Morille Benjamin, 2020 : Simulation microclimatique du village olympique et paralympique des jeux de Paris 2024, rapport du projet de recherche COOLVEG pour le compte de la Solideo, startup SOLENEO, 33p.

Robineau Timothé, Musy Marjorie, Ramier David, Rodler Auline, Sage Jérémie, Berthier Emmanuel, 2020 : Etude des flux d'évapotranspiration et du confort extérieur du Village Olympique et Paralympique à l'horizon 2050, rapport du projet de recherche COOLVEG pour le compte de la SOLIDEO, Cerema, 130p.

Robitu, M. 2005. Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

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.