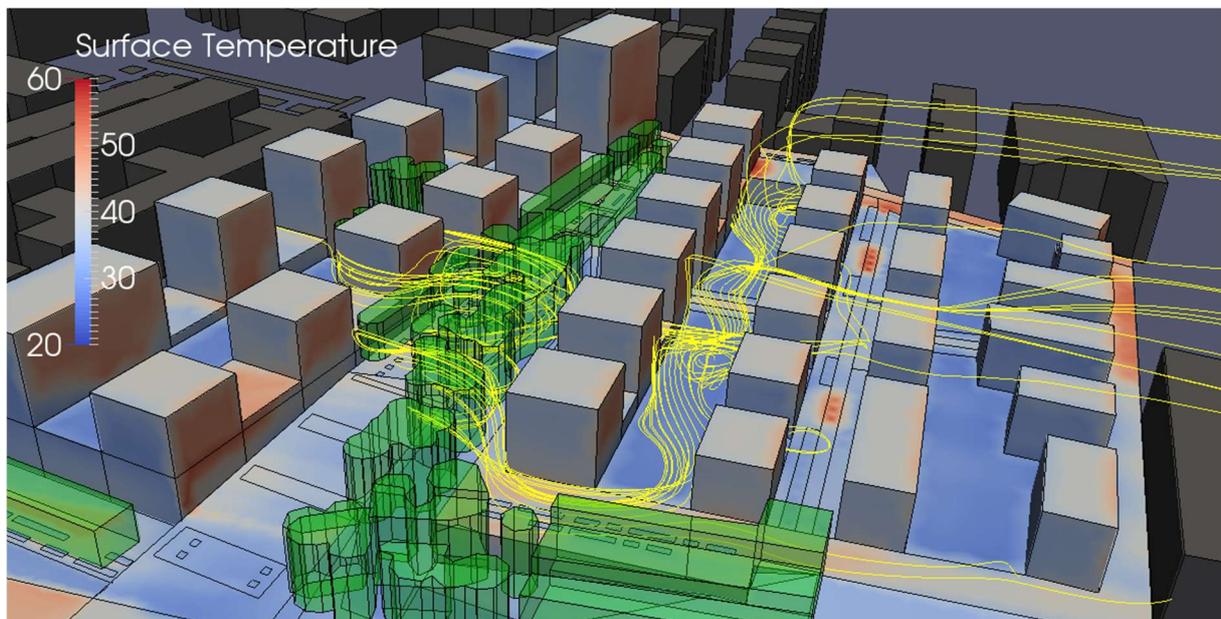


PROJET COOLVEG

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

SYNTHESE OPERATIONNELLE



Cerema, équipe de recherche TEAM

Emmanuel BERTHIER
Timothé ROBINEAU
David RAMIER
Jérémy SAGE

Cerema, équipe de recherche BPE

Auline RODLER
Marjorie MUSY

Société SOLENEOS

Benjamin MORILLE

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 à la bioclimatisation, avec l'objectif d'identifier des pistes pour favoriser le rafraîchissement associé. Une approche innovante a été mise en œuvre en faisant interagir des modèles numériques microclimatique et hydrologique. Le chaînage proposé entre les modèles MARIE et SOLENE-microclimat permet d'évaluer l'évapotranspiration des espaces végétalisés du VOP en séparant la strate arborée et les strates basses, et en considérant des conditions hydriques des sols optimales et aussi réelles avec stress hydrique. Le travail s'est concentré autour du mail Finot, espace public végétalisé emblématique du VOP, et sous conditions climatiques futures (horizon 2050).

Sur toutes les zones végétalisées étudiées, les résultats indiquent que l'évapotranspiration est conséquente, avec des valeurs potentielles supérieures à 1000 mm/an. Ce potentiel est réduit par la disponibilité en eau des sols, réduction qui est variable en fonction du type de végétation et de l'exposition de chaque zone mais aussi en fonction de l'importance du ruissellement amont connecté. Cette limitation de l'évapotranspiration par le stress hydrique est naturellement fortement accrue en période de canicule, avec des taux qui peuvent atteindre 65%. Assurer une évapotranspiration maximale, sans stress hydrique, permet de réduire de 5 à 10°C les températures à la surface des végétaux, et de plusieurs °C les températures de l'air du mail Finot. Une étude de sensibilité a permis d'identifier les déterminants de l'évapotranspiration sur le projet d'aménagement : adapter la végétation, plus infiltrer les eaux de ruissellement, et privilégier des sols de type limon permettent de favoriser le processus. Des recommandations opérationnelles à l'échelle du mail Finot et de chaque zone étudiée en sont déduites pour favoriser l'évapotranspiration et la bioclimatisation sur l'aménagement.

Référence pour ce rapport :

Berthier Emmanuel, Robineau Timothé, Morille Benjamin, Musy Marjorie, Ramier David, Rodler Auline, Sage Jérémie, 2021 : Optimisation de l'évapotranspiration et de la bioclimatisation sur le village olympique et paralympique, synthèse opérationnelle. Rapport du projet de recherche COOLVEG pour le compte de la SOLIDEO, 15p.

Autres livrables du projet :

- *Rapports scientifiques et techniques complets:*
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.
- *Synthèse scientifique et technique :*
Robineau Timothé, Morille Benjamin, Musy Marjorie, Ramier David, Rodler Auline, Sage Jérémie, Berthier Emmanuel, 2021 : Optimisation de l'évapotranspiration et de la bioclimatisation sur le village olympique et paralympique, synthèse scientifique et technique. Rapport du projet de recherche COOLVEG pour le compte de la SOLIDEO, 34p.
- *Les essentiels (en 2 pages):*
L'un à l'intention des acteurs opérationnels, l'autre plus scientifique et technique

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, qui sera ensuite transformé en habitats et locaux de bureaux, se doit aussi d'être un démonstrateur 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 urbaine. Lors des périodes de canicules, 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 ; c'est le principe de la bioclimatisation. Imaginer 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 : 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 ; et un modèle microclimatique qui permet à partir d'une maquette 3D détaillée du village de représenter l'état de l'atmosphère et des surfaces de l'aménagement. Le travail a débuté à l'échelle du village des Athlètes puis il a été rapidement recentré sur le mail Finot, espace public emblématique et à enjeu du VOP.

Ce document est une synthèse des résultats obtenus en des termes opérationnels, en insistant sur les préconisations pour l'aménagement. Des résultats plus complets, techniques et scientifiques peuvent être trouvés dans les autres livrables du projet cités en page 2.

I. Le projet du Village Olympique et Paralympique et la méthodologie d'étude

1. Le projet d'aménagement

Le VOP sera implanté entre les communes de Saint-Ouen et Saint-Denis (93) en bord de Seine au niveau de la cité du Cinéma. De nombreux espaces verts y sont prévus permettant d'offrir des zones de rafraîchissement et de confort pour les habitants. Parmi ces espaces publics, le Mail Finot constituera un lieu de promenade, de détente et de convivialité, avec une ouverture sur la Seine. Situé dans la partie sud du VOP, il constitue une descente de 300 m de long jusqu'à la Seine (dénivelé total de 12 m) avec 2 secteurs principaux : au nord, 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 au sud une partie végétalisée avec un sol composé de remblais humifères qui accueillera une importante végétation (Figure 1). Les espèces végétales présentes ont des propriétés différentes (couvert, résistance stomatique des feuilles, hauteur, ...) qui impactent la capacité maximale d'évapotranspiration de l'espace végétalisé. L'ensemble de la palette végétale présente sur le Mail Finot est pris en compte dans les simulations microclimatiques et hydrologiques, et différentes zones végétalisées ont été définies pour exploiter les résultats (Figure 1) :

- La zone 1 est un passage au sein de bâtiments au nord permettant de relier le Mail Finot et une rue parallèle.
- La zone 2 regroupe la végétation de la partie revêtue du Mail Finot.

- Les zones 3 et 4 correspondent à la partie sud végétalisée du Mail Finot. La zone 3 a un couvert végétal moins dense que celui de la zone 4.
- La zone 5 correspond à une partie du coteau boisé surplombant la Seine, avec de nombreux arbres.

Le plan d'aménagement du VOP présente également un plan de gestion des eaux pluviales prônant une politique d'utilisation maximale des eaux pluviales pour l'alimentation en eau des espaces végétalisés ; les ruissellements amont alimentant les zones végétalisées étudiées sont bien pris en compte dans les simulations.

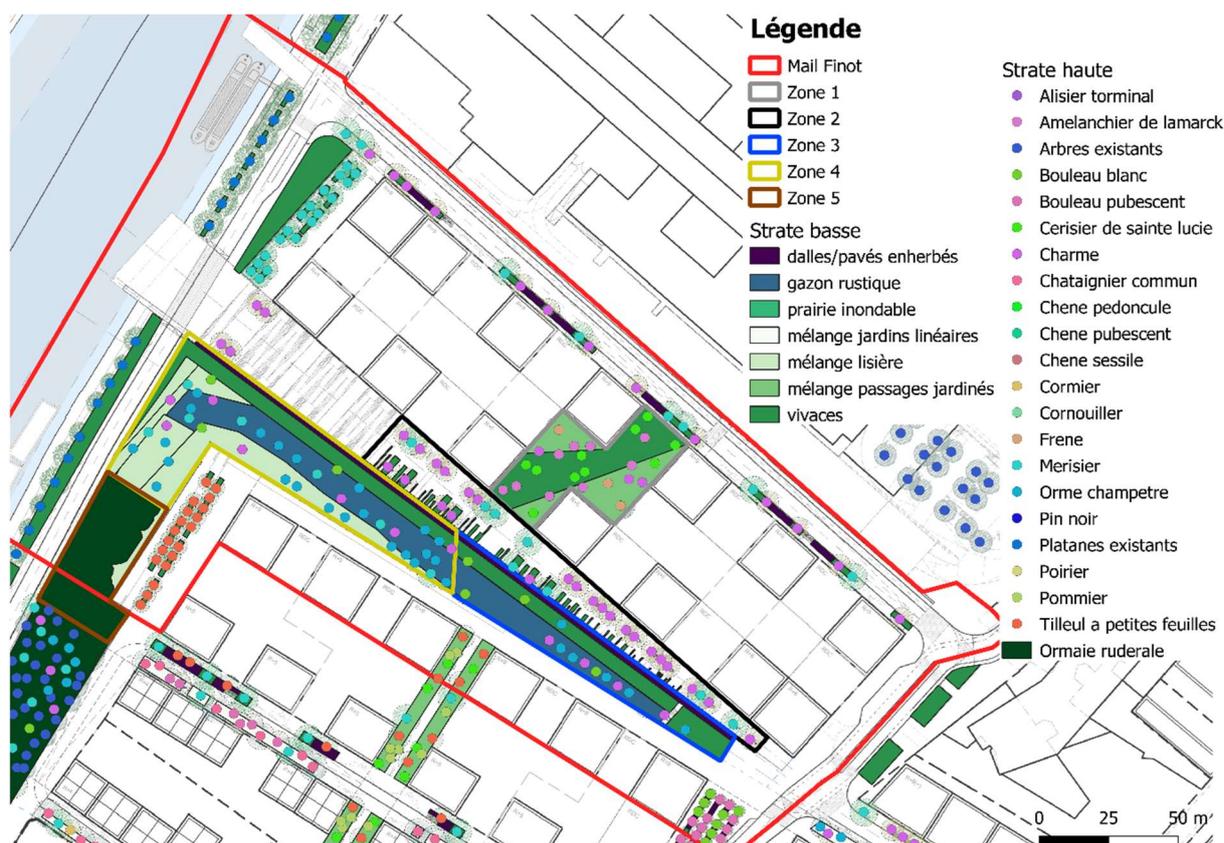


Figure 1 : Zones végétalisées et type de végétaux pris en compte sur le Mail Finot.

2. Méthodologie d'étude

Cette étude est basée sur une association innovante d'une modélisation microclimatique et d'une modélisation hydrologique pour estimer le potentiel de rafraîchissement de la végétation sur le Mail Finot à l'horizon 2050. Les deux modèles complémentaires font l'objet d'un chaînage en plusieurs étapes afin d'établir un diagnostic des flux d'évapotranspiration potentiels et réels puis du microclimat (Figure 2):

- Le modèle hydrologique MARIE (Modelling Actual Runoff Infiltration Evapotranspiration), spécifiquement développé pour l'étude, permet d'estimer le flux d'ET réel issue des strates hautes et basses de chaque zone végétalisée en fonction des conditions microclimatiques, des caractéristiques des végétaux, et de l'eau disponible dans les sols ;
- Le microclimat et le confort du mail Finot sont simulés à l'aide de SOLENE-microclimat. Sa représentation des phénomènes physiques (ensoleillement, vent, transferts de chaleur,...) permet d'évaluer l'influence de l'environnement bâti sur l'effet d'îlot de chaleur urbain, le confort thermique et les consommations énergétiques des bâtiments, et la bioclimatisation ;

- En tenant compte des profils de rayonnements solaires simulés par l’approche microclimatique et des données climatologiques de 2050 (prévisions Météo France), les flux d’évapotranspiration maximaux sont estimés. Les flux d’évapotranspiration réels, c.à.d. avec la prise en compte du stress hydrique, sont ensuite calculés en tenant compte des conditions hydriques des sols et des végétaux ;

- 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 flux d’évapotranspiration maximaux et réels issus du calcul hydrologique en conditions de forçage du calcul microclimatique de SOLENE-microclimat. En sortie de ce chaînage, des températures d’air et de surfaces sont obtenues et permettent, entre autres, de calculer des indicateurs de confort.

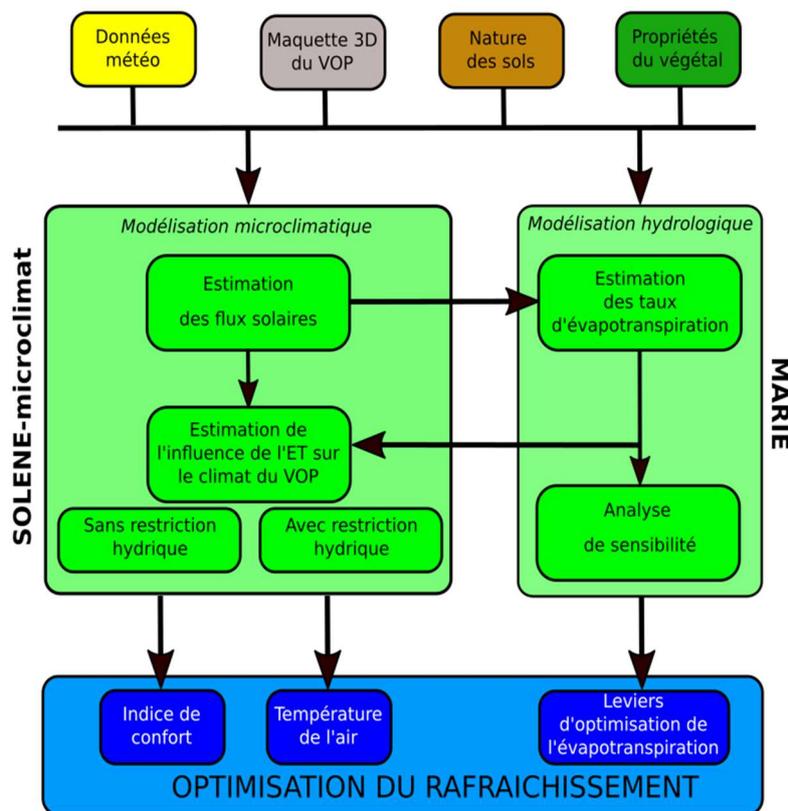


Figure 2: Méthodologie mise en œuvre pour l'étude

Un fichier de données météorologiques prévues à horizon 2050, transmis par la SOLIDEO et produit par Météo-France, est utilisée pour l'étude, caractéristique d'une année particulièrement chaude (3ème quartile des années les plus chaudes des 200 simulations). Les simulations hydrologiques sont effectuées sur toute cette année, alors que les calculs microclimatiques se concentre sur une période de forte chaleur (12 jours du 26 août au 6 septembre). Lors de cette période caniculaire, la température de l'air dépasse lors de plusieurs jours les 40°C, et l'humidité de l'air reste pendant plusieurs heures à des valeurs très faibles de 10% (Figure 3). 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 sur la période de simulation indique un vent provenant principalement du Nord-Est avec une vitesse moyenne de 2,7 m/s : cette direction du vent, qui s'écarte de la direction dominante de Sud-Ouest en Île-de-France, est une direction fréquente en périodes de canicules.

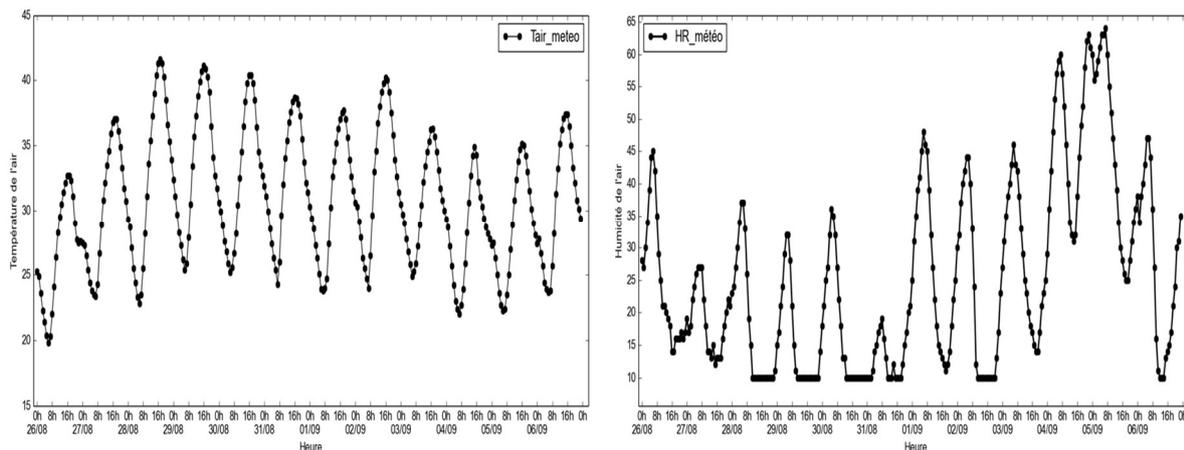


Figure 3 : Température et humidité de l'air pour la période des simulations microclimatiques.

3. Maquette du projet d'aménagement

La zone du VOP autour du mail Finot est modélisée en considérant la volumétrie des bâtiments, la topographie du terrain, la délimitation des zones de nature différentes, et la volumétrie du végétal (Figure 4). L'environnement du mail Finot a été modélisé et est pris en compte dans l'ensemble des calculs réalisés pour ses effets d'ombrage et d'obstacle à l'écoulement du vent. Le maillage réalisé est non structuré, avec un maillage triangulaire en surface et tétraédrique en volume : avec 150 000 mailles environ, chaque variable climatique est disponible tous les 2m² maximum.

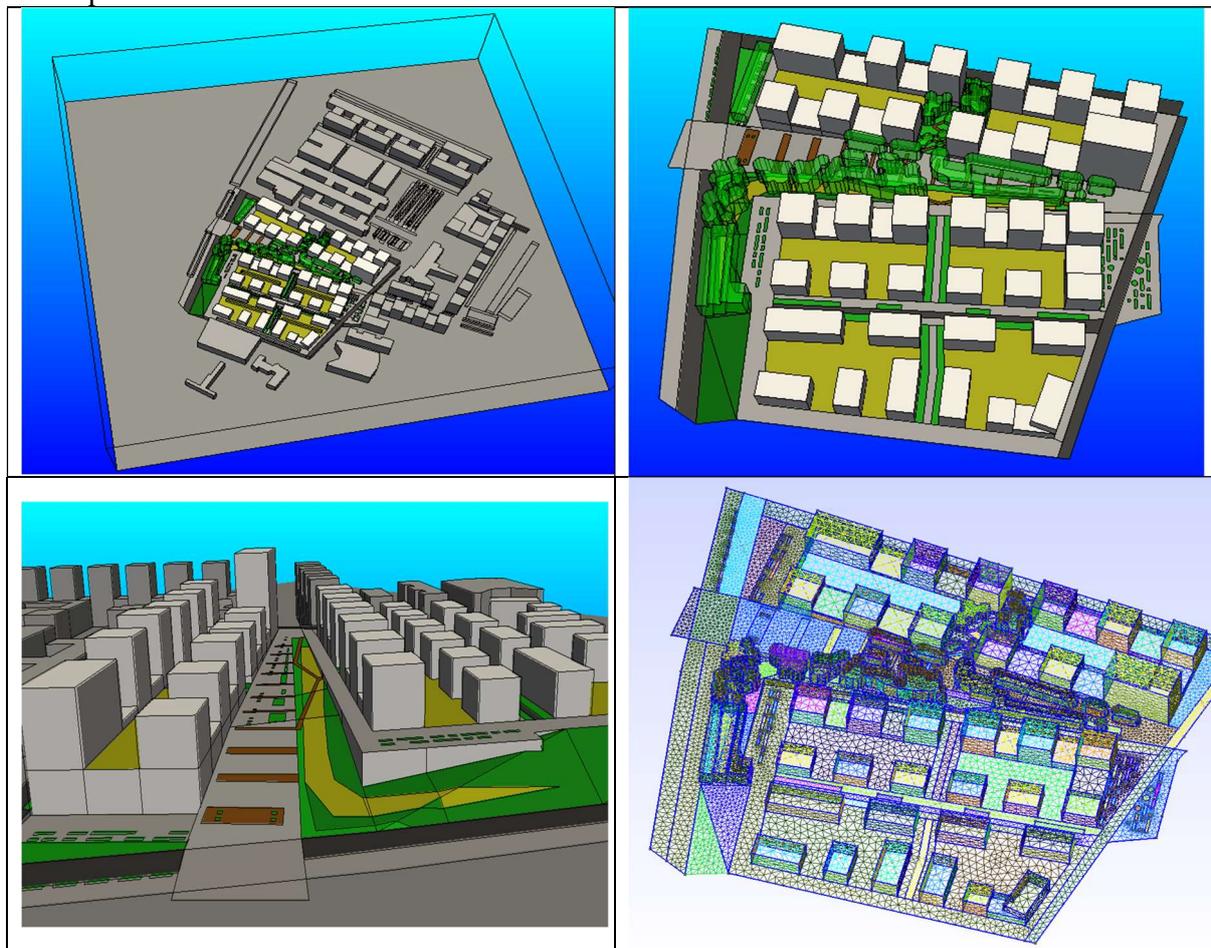


Figure 4 : Illustrations de la maquette 3D du mail Finot et de son maillage

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

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 en surface (Figure 5, prise en compte des inter-réflexions des bâtiments mais pas de l'ombrage des arbres) est qu'un certain nombre d'espaces ne voit le soleil à aucun moment de la journée (à la date du 2 septembre). C'est le cas pour une large partie de la zone 1, la partie haute de la zone 2, et les parties sud des zones 3 et 4, qui se trouvent continuellement à l'ombre des bâtiments. L'analyse du cumul d'ensoleillement (Figure 5) permet de prendre en compte l'intensité réelle du rayonnement reçu par les surfaces avec l'influence des arbres et des inter-réflexions du soleil sur les surfaces environnantes. Les deux tiers du mail Finot ne reçoivent que très peu de rayonnement à l'échelle d'une journée de début septembre, du fait de la présence d'arbres qui créent de l'ombrage sur ces espaces. A ces endroits, 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 des arbres, denses, qui recouvrent la quasi-totalité de la zone.

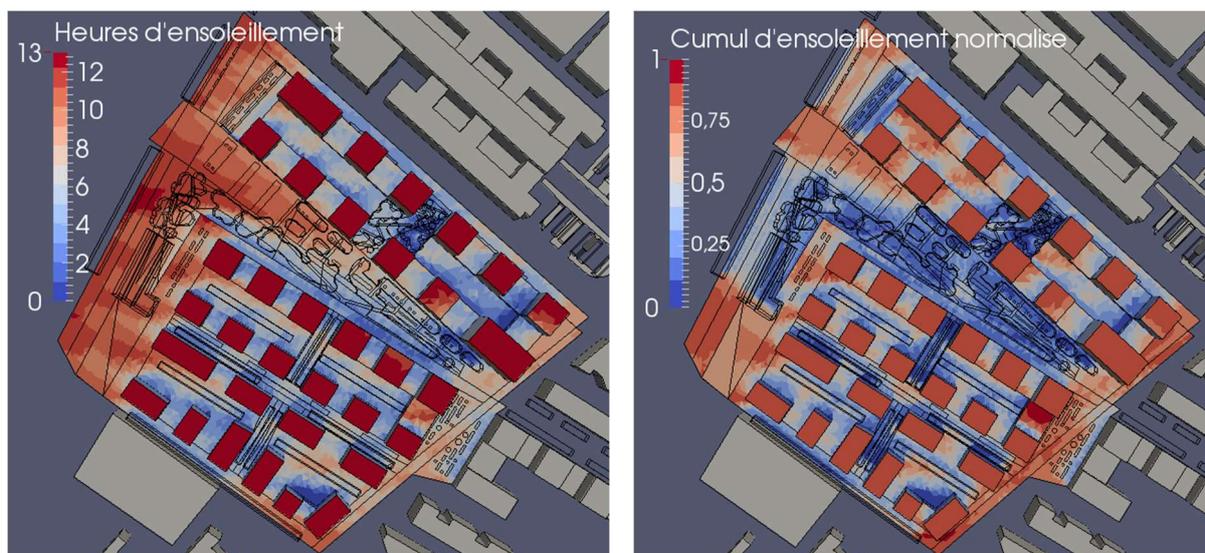


Figure 5: Nombre d'heures d'ensoleillement (à gauche) et cumul d'ensoleillement normalisé sur les surfaces du mail Finot (journée du 2 septembre).

Les arbres présents sur les zones à faibles expositions n'auront quasiment aucun impact via leur effet d'ombrage ; ceux en bas de la zone 4 et de la zone 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 : 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.

1.2. Vitesse du vent

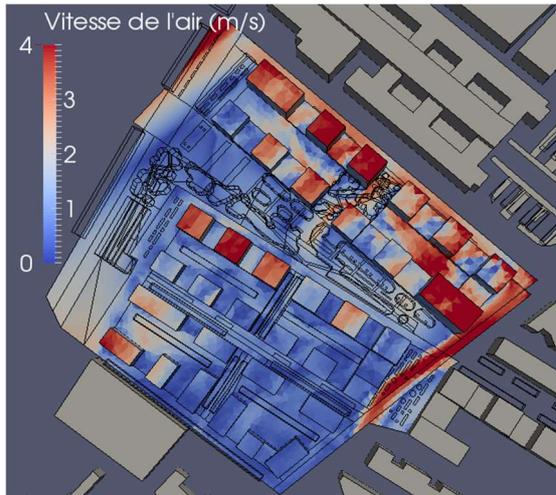


Figure 6 : Cartographie des vitesses du vent.

	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 I : 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 I). Le cœur des îlots au nord est plus exposé à un vent important que celui au sud qui profite de l'abri des bâtiments. Il est à noter que la rue Ampère à l'est du mail Finot est un lieu d'accélération importante du vent (Figure 6). L'analyse des lignes de vent permet de bien comprendre la circulation du vent, la provenance et la destination des masses d'air qui passent à un endroit donné (Figure 7).

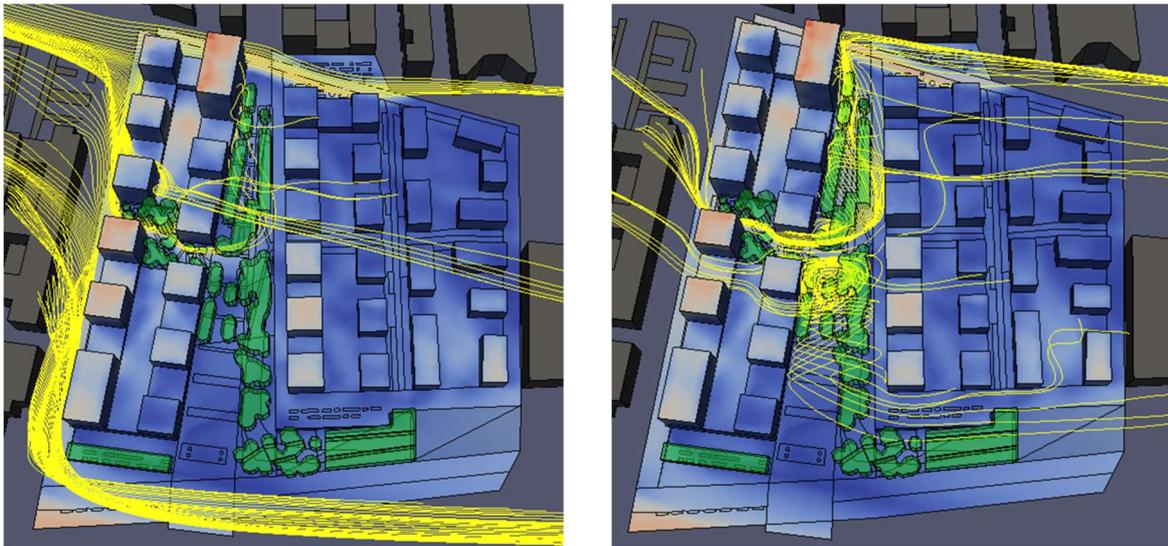


Figure 7 : Illustration de lignes de courant du vent en amont et au sein du mail Finot

1.3. Sky View Factor

Le facteur de vue du ciel représente la proportion de l'hémisphère local représentant la voûte céleste vue par un observateur. Il a un rôle prépondérant dans la capacité d'une surface à échanger de l'énergie par rayonnement thermique (en infrarouge) avec le ciel. Ces échanges sont l'un des phénomènes qui contribuent au refroidissement des surfaces urbaines, en particulier lorsque le ciel est dégagé.

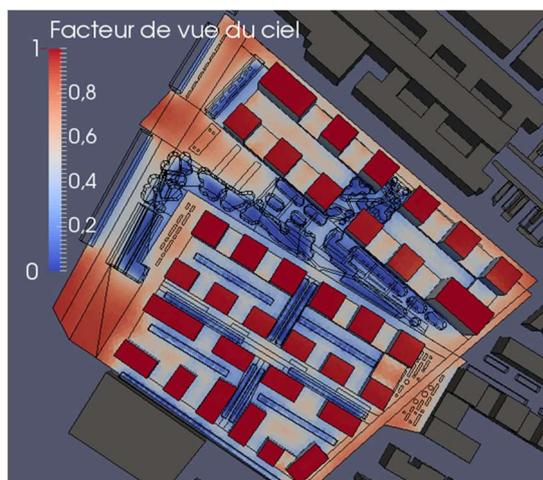


Figure 8 : Sky View Factor.

Pour toutes les zones végétalisées étudiées, ces valeurs sont très peu élevées (Figure 8). Les surfaces 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 du rafraîchissement naturel par rayonnement. Il est donc utile de limiter l'usage des arbres dès lors qu'ils sont implantés dans des zones déjà à l'ombre des bâtiments, et d'y développer des strates plus basses qui permettent de soutenir l'évapotranspiration.

2. Flux d'évapotranspiration

Un diagnostic des flux d'évapotranspiration (ET) a été réalisé en prenant en compte la diversité des propriétés de la végétation, les rayonnements solaires (différents par zones et par strates végétales), et les variations des conditions hydriques des sols. On rappelle que ces sols sont alimentés par la pluie et aussi par le ruissellement pluvial des surfaces connectées en amont (selon le schéma de gestion des eaux pluviales).

A l'échelle de l'année et lors de la période de canicule étudiée, les valeurs d'ET maximales (c.à.d. sans stress hydrique) sont significatives : elles dépassent les 1000mm sur un an et sont proches de 100mm pendant les 12 jours caniculaires, grâce à des conditions microclimatiques favorables et à l'importante végétation. Elles sont par ailleurs équivalentes sur les zones étudiées (tableau II), les légères différences étant liées aux ombrages et aux caractéristiques des végétaux.

Si le stress hydrique est pris en compte, les ET réelles annuelles sont naturellement réduites, dans une moindre mesure sur les zones 1, 2, 3 et 4 car leurs sols sont alimentés par des eaux de ruissellement amont, et plus significativement sur la zone 5 (réduction de 32%) car cette zone n'est pas alimentée par du ruissellement. Lors de la période de canicule, le stress hydrique est généralisé et entraîne des réductions supérieures à 30% d'ET pour toutes les zones, sauf la zone 1. L'ET de la zone 4 est réduite de 49% et celle de la zone 5 de 66% !

ET	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
	Année	Canicule								
Maximales (mm)	1067	94	1120	102	1169	91	1186	99	1086	104
Réelles (mm)	1019	81	980	70	1053	57	978	50	739	35
Rapport (-)	0,96	0,86	0,88	0,69	0,90	0,63	0,82	0,51	0,68	0,34

Tableau II : Cumuls d'évapotranspiration (ET) pendant l'année et lors de la période de canicule sur chaque zone étudiée

L'examen détaillé du stress hydrique par strates de végétation montre 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 elle d'une réserve en eau plus grande, via des racines plus profondes, mais elle peut être plus durablement affectée par les périodes de sécheresse : les apports en eau

de pluie ne permettent pas facilement de rétablir des conditions hydrologiques favorables en profondeur, l'eau infiltrée en surface étant préférentiellement captée par les racines superficielles. En résumé en période sèche, la strate basse subira un stress hydrique important, susceptible d'affecter sa physiologie (effet non pris en compte dans ces simulations hydrologiques), mais qui sera réduit avec le retour des précipitations. Alors que la strate haute sera sujette à un stress hydrique moins important mais qui pourra durer plus longtemps.

III. Rôle de la bioclimatisation sur le microclimat de l'aménagement

1. Sur les températures de surface

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 maximaux (sans stress hydriques) et l'autre en considérant les flux d'ET réels.

En situation de disponibilité en eau maximale, les zones 1, 2 et 5 sont les zones dont la température moyenne de la végétation est la plus élevée (33°C au maximum), les zones 3 et 4 celles dont la température moyenne de la végétation est la plus faible (de 2,5°C au maximum ; 1,5°C en moyenne ; Figure 9). Ces écarts sont expliqués par l'ombrage et surtout le type de végétation qui compose ces zones : 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 expliquent cette tendance. Cette hiérarchie n'est plus la même lorsqu'on considère la disponibilité en eau réelle (Figure 9): 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. Lors de la journée caniculaire du 2 septembre, les zones 3 et 4 sont celles qui présentent les plus importantes différences de température entre les scénarios avec ou sans stress hydrique: de 2 à 7°C pour le gazon et les plantes vivaces et 4 et 12°C pour le mélange de lisière. Lors de la journée, ces deux zones présentent une évapotranspiration de seulement 20 à 25 % de l'évapotranspiration maximale. L'augmentation moyenne de la température de surface journalière est comprise entre 2,9°C, pour la zone 1, et 6,0°C, pour les zones 3 et 4 ; alors que la température de l'air est en moyenne de 32.7°C. Le rafraîchissement potentiel des surfaces végétalisées grâce à l'évapotranspiration est donc limité par le stress hydrique, à une hauteur de 50 à 80% selon les zones.

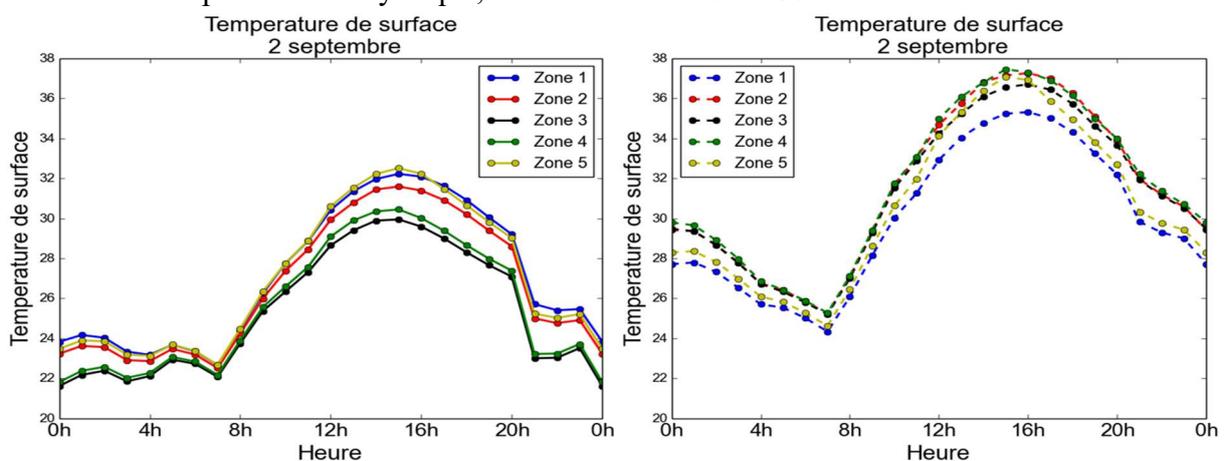


Figure 9 : Températures de la végétation de surface pour chaque zone sans stress hydrique (à gauche) et avec stress hydrique (à droite) lors de la journée du 2 septembre.

2. Sur les températures de l'air

Les températures de l'air sont la résultante des flux de chaleur convectifs (échangés entre les surfaces et l'air) et du vent au contact de la surface (advection des masses d'air). Les résultats indiqués dans ce paragraphe sont donc très dépendants des conditions de vent retenues dans la simulation (vitesse de 2,7 m/s provenant du nord-est). Les deux mêmes scénarios sont étudiés que pour l'impact sur les températures de surface : un sans stress hydrique et avec des évapotranspirations maximales, et l'autre avec les évapotranspirations réelles.

Le mail Finot a globalement une température moins élevée que la température de l'air en amont du VOP, avec des maximums entre 34 et 39°C lors de la journée du 2 septembre (alors que la température fixée aux alentours dépasse les 40°C). Le stress hydrique induit un moindre rafraîchissement qui reste globalement en deçà de 2°C en moyenne, ce qui est déjà un écart plutôt conséquent (Figure 10). Les différences de température d'air entre les deux scénarios simulés sont plus réduites que les différences de température de surface car les circulations d'air homogénéisent les températures.

Les écarts importants de température de l'air se concentrent majoritairement au niveau des zones où se produisent des recirculations d'air (zone 4 par exemple) qui est alors longuement en contact avec la surface plus fraîche de la végétation (compte tenu de certaines limites du modèle microclimatique, l'écart de température induit par le stress hydrique pour cette zone 4 n'est pas pris en compte dans la suite de 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, soit en moyenne une diminution de 40 % du rafraîchissement potentiel.

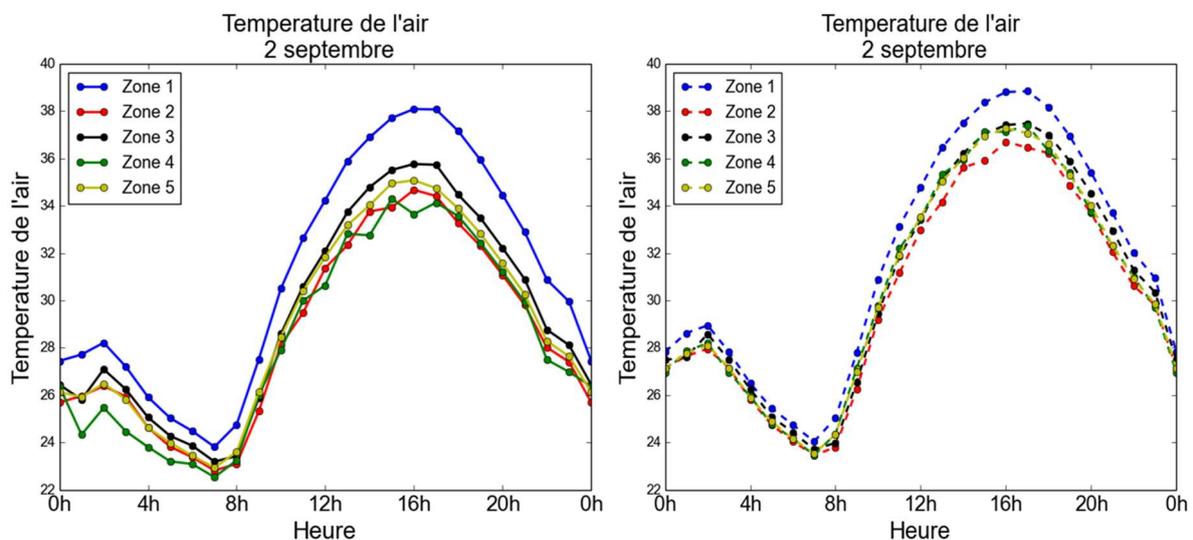


Figure 10 : Températures de l'air (moyenne au-dessus de chaque zone végétalisée) sans stress hydrique (à gauche) et avec stress hydrique (à droite).

Les profils de température le long d'un parcours sur le mail Finot (Figure 11) pour les deux scénarios ont des évolutions semblables pour toutes les heures de la journée : au début et à la fin du parcours, les températures suivent l'évolution de la température météorologique (38°C à 14h). Sur la partie basse du mail Finot (point A), un très léger rafraîchissement s'instaure dans le sillage des arbres et surfaces végétalisées (zone 4 au sud et prairie inondable au nord). 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. Toujours en remontant le mail Finot, le passage devant la zone 1 (zone en pente montante depuis

la rue au nord jusqu'au mail) entraîne une augmentation de la température à une valeur proche de la température météorologique. Sur la partie haute du mail, la température est globalement au niveau du rafraîchissement moyen de celui du mail Finot.

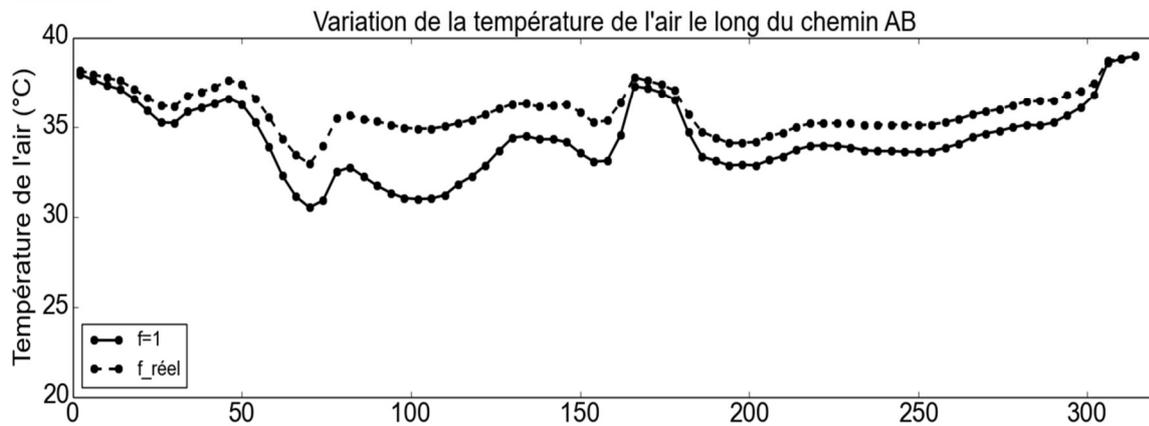


Figure 11 : Température de l'air sur un parcours piéton dans le mail Finot pour les scénarios sans et avec stress hydrique (ligne continue et pointillée respectivement, à 14h le 2 septembre).

3. Comment favoriser l'évapotranspiration ?

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

Une étude de sensibilité a été effectuée sur les paramètres du modèle hydrologique MARIE afin de connaître leur impact sur les flux d'évapotranspiration maximaux et réels. Certains de ces paramètres peuvent être interprétés en termes de choix de conception de l'aménagement du Mail Finot et ainsi être adaptés pour une optimisation de l'évapotranspiration. L'étude a été menée en distinguant des grandes familles de paramètres :

Végétation : Certaines propriétés de la végétation impactent significativement les flux d'ET. Un couvert végétal plus dense et une réduction de la résistance stomatique des feuilles augmentent significativement l'évapotranspiration maximale. Cette augmentation ne donne pas nécessairement lieu à une augmentation dans les mêmes proportions de l'ET réelles et peut même aggraver le stress hydrique : l'alimentation en eau de la végétation n'est alors plus suffisante pour ces valeurs d'ET maximales plus élevées. Une augmentation des profondeurs racinaires, en particulier des arbres, permet de réduire ce stress.

Sol : Les simulations ont été effectuées avec un sol de type limon correspondant aux observations sur le site du projet. Modifier le sol avec du sable limoneux et de l'argile sableuse ne permet pas de maintenir des conditions hydriques favorables dans les zones racinaires de la végétation (sable trop drainant et argile trop peu perméable), le limon présente un bon compromis entre infiltration et rétention d'eau.

Choix d'aménagements : Deux paramètres ont été testés pour améliorer l'accès à l'eau pour la végétation. : (1) les surfaces de ruissellement amont qui alimentent les zones 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 eaux pluviales s'accompagne d'une réduction considérable des flux d'ET réels due à une augmentation du stress hydrique (-22% à l'année et -56% lors de la période de canicule). L'imperméabilisation du sol en dessous de la zone racinaire de la végétation permet de maintenir une meilleure humidité et améliore les flux d'ET.

Sensibilité aux conditions climatiques : L'utilisation de conditions climatiques actuelles (années 2018-2019) génère une réduction de l'évapotranspiration maximale (-39% à l'échelle de l'année) mais réduit aussi le stress hydrique et donc une ET réelle légèrement moins affectée (-30%). Ces résultats indiquent que l'on peut s'attendre à des conditions d'évapotranspiration plus satisfaisantes (moins de limitation par stress hydrique) pour des années moins chaudes que la projection 2050 utilisée dans les simulations.

Certaines zones végétalisées étudiées se démarquent par des sensibilités plus importantes :

- La zone 5 est la plus marquée par une amélioration des conditions d'évapotranspiration. 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) qui est réduit par une trop faible alimentation en eau (aucune surface de ruissellement en amont) ;
- Les zones 2 et 4 présentent également des hausses marquées de l'ET réelle lorsque les conditions d'évapotranspirations sont d'avantage favorables, ce qui indique que ces zones subissent un stress hydrique relativement important pendant et après les périodes sèches ou de canicules.

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.

Conclusions opérationnelles

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 et ont été l'occasion de développer une approche particulièrement innovante mêlant les deux disciplines urbaines du microclimat et de l'hydrologie, disciplines incontournables des stratégies d'adaptation au changement climatique. Deux outils issus de la recherche académique dédiés à la simulation du microclimat urbain, SOLENE-microclimat, et des transferts hydrologiques, MARIE, ont ainsi fait l'objet d'un chaînage spécifique.

Une déclinaison opérationnelle de l'étude est l'optimisation du rafraîchissement du Village Olympique au travers de celle de l'évapotranspiration. La méthodologie est mise en œuvre spécifiquement sur le mail Finot et ses zones végétalisées, 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 un potentiel d'évapotranspiration important (supérieur à 1000mm/an) mais limité par le stress hydrique en particulier lors de la période de chaleur étudiée, quelle que soit leur situation géographique au sein du Village Olympique et leur composition en termes de type de végétaux. Les strates basses

de la végétation peinent à trouver de la ressource en eau au cours d'une période de sécheresse du fait de leurs profils racinaires superficiels ; les arbres ont accès à une réserve en eau plus importante en profondeur mais peuvent être durablement affectés par les périodes de sécheresse, les apports de pluie estivaux permettant rarement de rétablir des conditions hydrologiques favorables en profondeur ;

- La limitation de la disponibilité en eau des différentes zones induit des températures à la surface des végétaux plus élevées de 2°C à 6°C en moyenne selon les zones végétalisées et selon le stress hydrique auxquelles elles sont soumises, soit une réduction de 50 à 80% du rafraîchissement potentiel de surface ;

- Il en résulte un moindre rafraîchissement de l'air compris entre 0,6°C et 1,5°C au-dessus des différentes zones végétalisées. 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 maximaux pouvant néanmoins localement atteindre 3,8°C.

L'optimisation du rafraîchissement passe par le recours à des végétaux dont les caractéristiques sont favorables à l'évapotranspiration : densité des feuilles plus importante, résistance stomatique réduite, profil racinaire plus profond. Mais ce recours doit être couplé avec des stratégies de gestion permettant d'assurer une disponibilité en eau dans le sol suffisante pour que le végétal continue à évapotranspirer au cours des périodes de chaleur. La collecte et l'infiltration de ruissellement pluvial amont apparaît une bonne solution, cette stratégie permettant aussi de réduire les rejets d'eaux pluviales dans les réseaux ou la seine. L'imperméabilisation du sol à une profondeur en dessous des profils racinaires (quelques mètres) est apparue comme une stratégie possible mais cette solution a d'autres impacts environnementaux (produits manufacturés dans le sol, annulation des recharges de nappe, dénaturation du sol et impact sur sa biodiversité) qui font qu'elle n'est pas recommandée prioritairement. Le choix de sols aux propriétés favorables à l'infiltration et à la rétention en eau fait également parti des leviers d'actions, le type limon paraissant optimal sur le VOP.

Ces leviers pour favoriser la bioclimatisation et l'ET sont efficaces sur toutes les zones végétalisées du VOP. Les résultats obtenus avec les modèles illustrent aussi l'intérêt de considérer chaque zone végétalisée de manière spécifique tout en restant en interaction avec les zones alentours. En ce qui concerne notre étude, il est possible de retenir les recommandations suivantes par zone :

- + Zone 1: il est pertinent de trouver des solutions pour réduire la vitesse du vent, ce qui permettra de mieux rafraîchir l'air arrivant du nord-est (cette recommandation est surtout valable pour des conditions de vent provenant du NE) ;

- + Zones 1, 3, et parties supérieures des zones 2 et 4 : l'ombrage par les bâtiments environnants est important sur ces zones, et il est préférable d'y installer des végétaux bas qui ne vont pas freiner le rafraîchissement par rayonnement thermique. Sur ces zones ombragées, il n'est aussi pas décisif de travailler les matériaux de surface ;

- + Zones 3 et 4: la restriction hydrique du sol influence fortement les températures de surface en période de canicule, et assurer une bonne alimentation en eau de ces zones est donc particulièrement important ;

- + Zone 5 et partie inférieure de la zone 4: l'exposition au soleil est importante sur ces zones, et l'intérêt d'installer des arbres pour l'ombrage est donc accru ;

- + Zone 5: cette zone dans le projet d'aménagement actuel a un potentiel d'ET élevé (arbres et exposition au soleil) mais qui est fortement limitée par la restriction hydrique, d'où l'importance de l'alimenter en eau toute l'année.

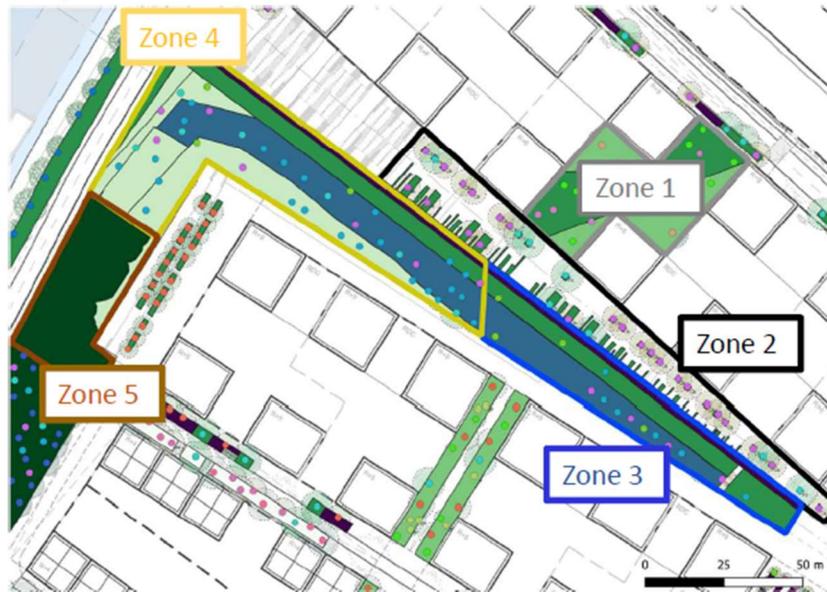
La figure 13 reprend de façon synthétique toutes les recommandations pour le projet d'aménagement.

Leviers sur tous les espaces végétalisés:

- + Recours à des végétaux favorables à l'ET: densité des feuilles importante, résistance stomatique réduite, racines profondes et Stratégies de gestion des eaux pour assurer une disponibilité en eau suffisante dans le sol : collecter et infiltrer les eaux de ruissellement amont est une solution pertinente (Attention: si l'espace n'est pas assez alimenté en eau, l'installation de végétaux favorables à l'ET à l'échelle annuelle entraîne une réduction de l'ET en période sèche de canicule)
- + Recours à des sols avec de bonnes capacités de rétention et d'infiltration: un limon est bon compromis
- + Un gazon reste généralement plus frais qu'un mélange de lisière ou des vivaces

Recommandations par zones:

- + Zone 1*: Pertinent de trouver des solutions pour réduire la vitesse du vent (→ optimisation de la bioclimatisation du mail)
- + Zones 1, 3, et parties supérieures des zones 2 et 4 : Ombrages importants par les bâtiments → préférer des végétaux de strates basses car intérêt de l'ombrage réduit et une strate haute va freiner le rafraîchissement par



- rayonnement thermique ; pas décisif de travailler sur les matériaux de surface
- + Zones 3 et 4: T° de surface fortement limitée par la restriction hydrique lors des périodes de canicule → importance de l'alimentation en eau
- + Zone 5 et partie inférieure de la zone 4: Exposition importante au soleil → importance des arbres pour l'ombrage
- + Zone 5: Potentiel d'ET élevé (arbres et exposition au soleil) fortement limité par la restriction hydrique → important de l'alimenter en eau toute l'année

* Recommandation valable pour un vent de direction NE

Figure 13: Synthèse des recommandations pour favoriser la bioclimatisation et l'évapotranspiration (ET) sur le mail Finot