

Les stratégies de végétalisation pour aider la ville à faire face à la canicule



Sophie Laurent/IAU/idf

La végétation remplit de multiples fonctions au sein de l'écosystème urbain. Elle participe largement à des dispositifs durables qui permettent aux villes de s'adapter au changement climatique et aux futures canicules. Focus sur les résultats de simulations de végétalisation urbaine.

De récentes études climatiques indiquent une augmentation très nette du nombre, de la durée et de l'intensité des canicules sur la région Île-de-France, à l'horizon 2100 : 11 jours de canicule par an en moyenne pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre (GES) le plus réaliste. Les villes sont soumises au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), caractérisé par des températures de l'air plus chaudes en leur centre qu'à leur périphérie, en particulier au cours de la nuit.

Principalement expliqué par l'artificialisation des sols (cf. « Lexique », p.6), ce phénomène est exacerbé sous certaines conditions météorologiques. Ce fut le cas lors de la canicule de 2003 : l'ICU a atteint en Île-de-France une intensité de 8°C durant la nuit, soit le double de son intensité habituelle en été (source : Météo France), aggravant ainsi les impacts sanitaires.

Le végétal, un atout face au changement climatique

C'est en ville que les enjeux d'atténuation et d'adaptation seront

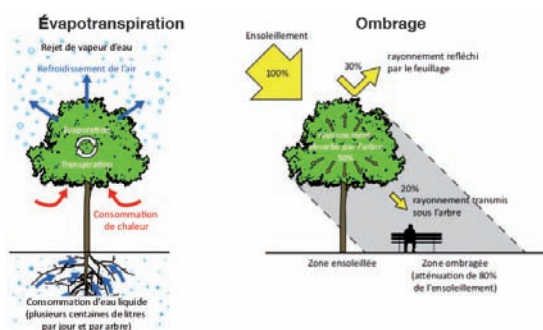
les plus forts⁽¹⁾. Dans ce territoire dense qui réclame des dispositions urgentes, une réflexion globale intégrant ces deux composantes doit être menée pour faire émerger des stratégies permettant de réduire la vulnérabilité des villes. Parmi les mesures envisageables, la végétalisation (cf. « Lexique », p.6) de l'espace urbain constitue un levier d'action potentiellement efficace.

On désigne par stratégies d'adaptation les mesures, individuelles ou collectives, visant à réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains contre les effets attendus des changements climatiques. Elles sont complémentaires des stratégies d'atténuation (cf. « Lexique », p.6), qui visent directement à émettre moins de GES et à protéger ou développer les systèmes qui constituent des puits de carbone (cf. « Lexique », p.6), comme, par exemple, les écosystèmes naturels.

La végétation agit sur le milieu urbain selon deux mécanismes (figure 1). Le premier, l'évapotranspiration, désigne la transpiration des plantes (qui intervient en journée au cours de la photosynthèse) et l'évaporation de l'eau interceptée par le sol et le feuillage. Cette transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau, consommatrice d'énergie, rafraîchit l'environnement immédiat des plantes.

(1) En Île-de-France, 96% de la population habite actuellement dans une commune de type urbain (source : Insee).

Figure 1 – Effets rafraîchissants de la végétation



Source : Apur

Le second intérêt de la végétation (principalement arborée) est qu'elle intercepte une partie du rayonnement solaire incident en créant des effets d'ombrage au sol et sur les bâtiments. En été, ces deux mécanismes contribuent à améliorer le microclimat urbain. La végétalisation des surfaces urbaines est souvent qualifiée de stratégie « sans regret ». En effet, outre l'objectif principal d'apporter une solution à un problème donné (ici, l'effet d'îlot de chaleur urbain), elle peut être valorisée pour les bénéfices conjoints qu'elle offre : le maintien de la biodiversité ou l'amélioration des ambiances, par exemple.

La modélisation pour une approche globale du système urbain

Les dispositifs végétaux sont variés : arbres d'alignement, massifs herbacés ou arbustifs dans les rues ou les ronds-points, enveloppes végétales pour les bâtiments, parcs, friches, noues végétalisées, agriculture ou forêt périurbaine, etc. Ils présentent des caractéristiques différentes et n'induisent donc pas les mêmes effets.

L'évaluation des différentes mesures de végétalisation de l'écosystème urbain, et de leurs interactions potentielles, passe par une approche globale du territoire, appelée approche écosystémique. Il s'agit de prendre en compte les effets synergiques et antagonistes d'une même mesure d'adaptation sur une ou plusieurs problématiques urbaines, comme de plusieurs mesures sur une problématique spécifique. La modélisation numérique est un outil particulièrement bien adapté pour l'évaluation des in-

teractions entre problématique urbaine et mesures d'adaptation, pour des villes et des climats variés.

Dans une démarche prospective, la modélisation agit comme un laboratoire virtuel. Avant implémentation, des stratégies proposées par des architectes, des urbanistes ou des aménageurs peuvent être testées, en quantifiant leurs performances respectives et combinées face à un problème donné (ici, la dégradation du microclimat urbain et ses effets secondaires), mais aussi les impacts néfastes qu'elles pourraient engendrer au sein de l'écosystème urbain.

Pour répondre à la question de l'adaptation au changement climatique à l'échelle de la ville, le Centre national de recherches météorologiques de Météo France dispose d'un modèle de climat urbain sophistiqué. Il permet notamment de simuler différentes stratégies végétales et de quantifier leurs impacts, tant microclimatiques qu'énergétiques ou hydrologiques, de l'échelle du quartier à celle de l'agglomération.

Ce type de simulation a été entrepris avec ce modèle pour l'agglomération francilienne, dans le cadre du projet Muscade⁽²⁾, et a fait l'objet d'une thèse dont les principaux enseignements sont exposés dans cette *Note rapide*.

Les scénarios de végétalisation

Bien que simplifiée pour des contraintes de modélisation, la zone d'étude (100 km par 100 km) est représentée de façon assez réaliste.

Le tissu urbain est catégorisé en cinq typologies de bâtiments : individuel, collectif, haussmannien, tour de bureaux, hangar ; et quatre types d'usage des bâtiments : résidentiel, bureau, industriel et agricole, commercial.

Il est alors possible de simuler les différentes caractéristiques de leurs équipements : climatisation, chauffage, protection solaire, ventilation, etc.

Notons que les systèmes de climatisation et de chauffage sont

associés ici à des températures de consigne respectives de 26 °C et 19 °C, conformément à la nouvelle réglementation thermique 2012 (RT 2012), supposant des pratiques habitantes raisonnées. Le choix des stratégies de végétalisation – déclinées en neuf scénarios (tableau 1) – s'est établi sur la base de résultats antérieurs, selon les principes suivants :

- l'augmentation de la densité de végétation est répartie sur l'ensemble de la ville, car c'est à la fois plus efficace et plus équitable ;
- cette augmentation de densité végétale est réalisée en pleine terre en végétalisant partiellement les surfaces au sol « disponibles » (c'est-à-dire qui ne sont ni bâties ni attribuées à la voirie) avec de la végétation basse ou mixte arborée ;
- l'installation de toitures végétalisées extensives, communément appelées TVE, qui présente l'intérêt d'augmenter la densité de végétation, là où la densité de bâti restreint la disponibilité des surfaces au sol,

est réalisée sur les bâtiments individuels et collectifs, et les hangars ;

- en été, la végétation de pleine terre est systématiquement arrosée (sans quoi elle ne serait pas efficace⁽³⁾) par asperseurs, entre 21 h et 5 h, à raison de 25 l par m² et par semaine. L'irrigation des TVE par goutte-à-goutte est optionnelle.

Des indicateurs pertinents pour évaluer les performances des scénarios

Les performances ont été évaluées dans un contexte caniculaire, en utilisant les conditions météorologiques de la canicule 2003, mais également sur celles de la période 1999-2008, pour tenir compte des effets saisonniers. Trois types d'indicateurs ont été sélectionnés :

- indicateurs thermiques : basés sur la température de l'air dans les rues et la température « ressentie », qui peut être associée à des niveaux de stress thermique (cf. « Lexique », p.6) du corps humain (Universal Thermal Climate Index⁽⁴⁾) (figure 6) ;

Tableau 1 – Les scénarios de végétalisation

REF état avant simulation	Couverture végétale (avec arrosage estival) de la ville actuelle servant de référence.
TVE toiture végétalisée extensive	Ajout de toitures végétalisées extensives (végétaux de petite taille nécessitant un support de culture fin, de l'ordre de 5 cm, et un entretien limité) sur les bâtiments individuels et collectifs, et les hangars, sans irrigation.
TVEirr toiture végétalisée extensive + irrigation	Toiture végétalisée avec irrigation estivale par goutte-à-goutte.
VB25 végétation basse 25 % VB50 végétation basse 50 % VB75 végétation basse 75 %	Végétalisation de 25 ou 50 ou 75 % des surfaces urbaines disponibles avec de la végétation basse (pelouse, petits arbustes), avec arrosage estival systématique par asperseurs.
VM25 végétation mixte 25 % VM50 végétation mixte 50 % VM75 végétation mixte 75 %	Végétalisation de 25 ou 50 ou 75 % des surfaces urbaines disponibles avec de la végétation mixte arborée (dont 40 % d'arbres feuillus), avec arrosage estival systématique par asperseurs.
Vmax végétation maximale	Végétalisation maximale (combinaison de VM75 et TVEirr) avec arrosage estival.

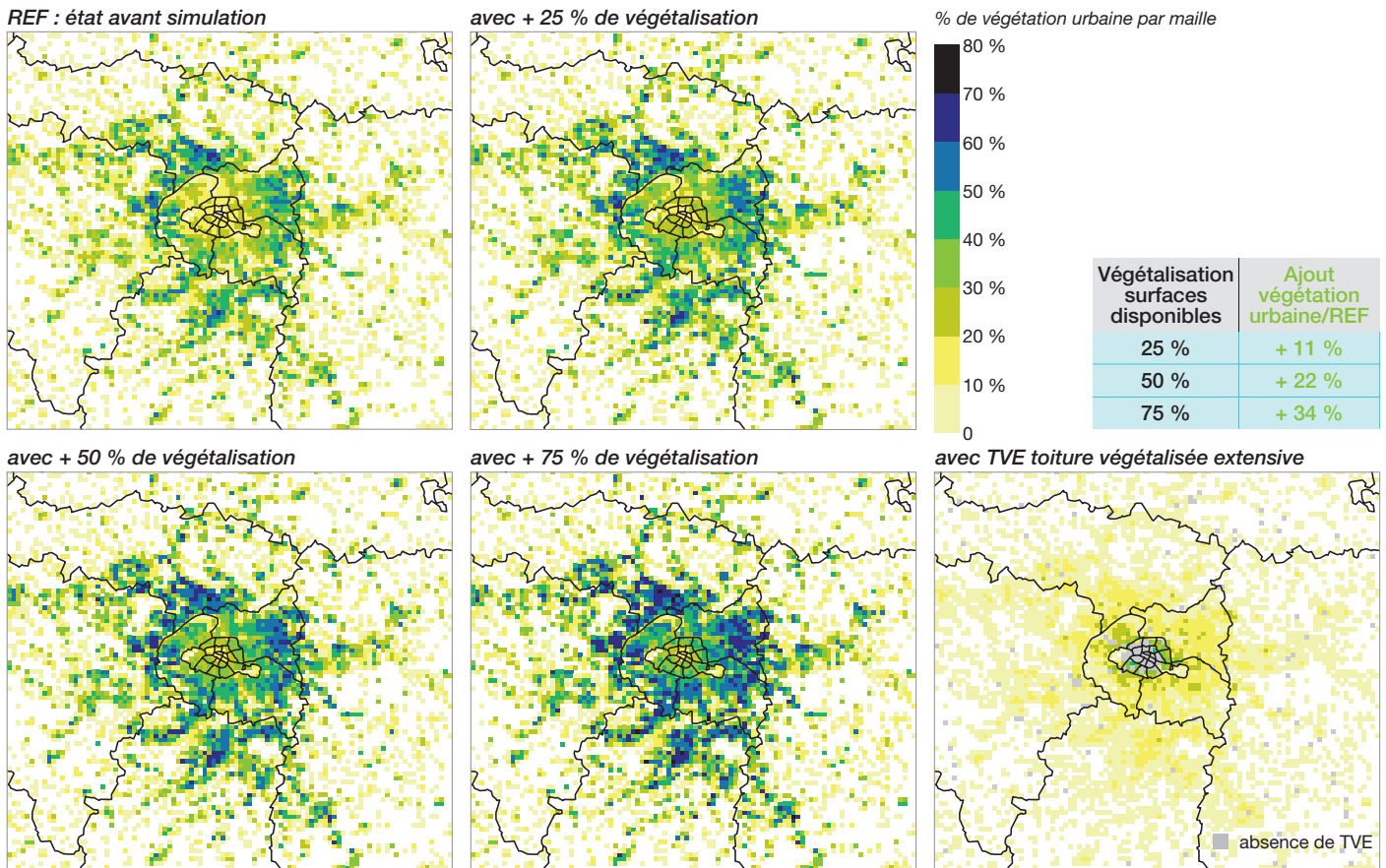
(2) Muscade: Modélisation urbaine et stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétiques. Projet de l'Agence nationale pour la recherche (ANR) 2009-2013.

(3) Projet de recherche Épicéa: étude pluridisciplinaire des impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne.

<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article271>

(4) www.utci.org

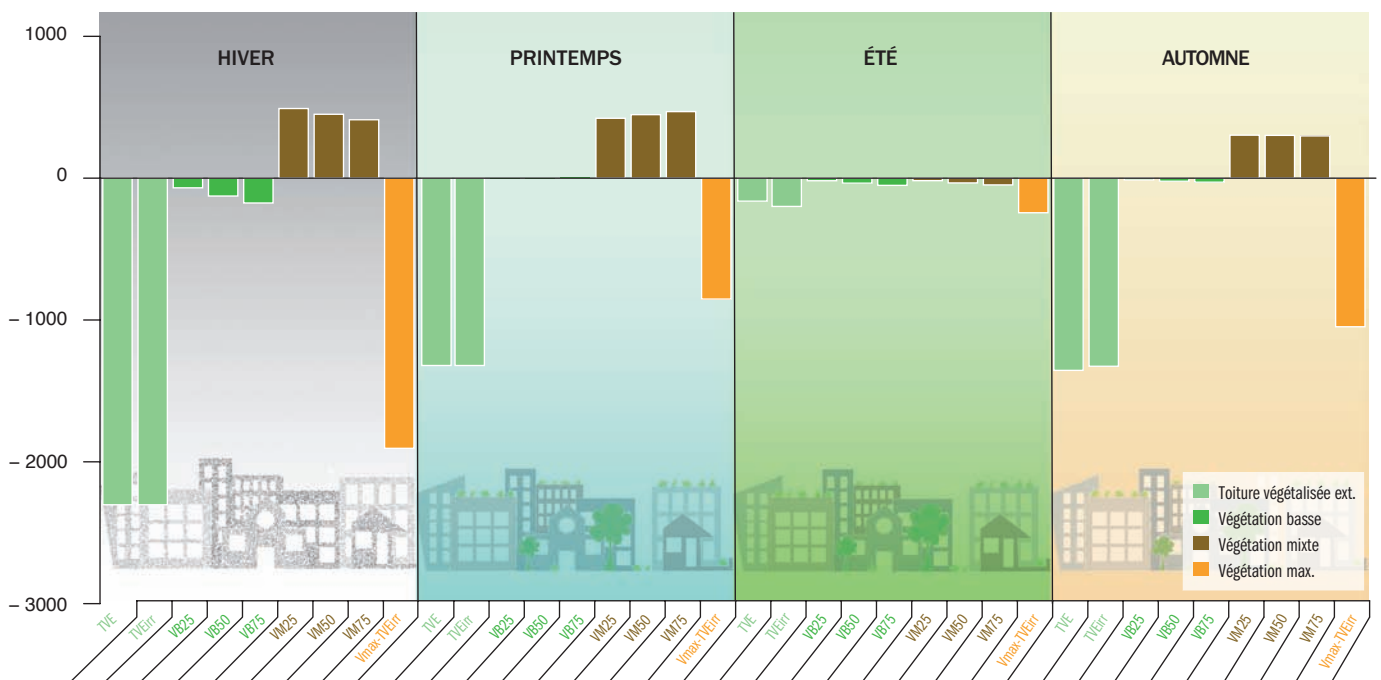
Figure 2 – Densités de végétation urbaine simulées au km²



Simulations à partir de la ville actuelle (REF) par la végétalisation de 25, 50 et 75 % des surfaces au sol disponibles, hors habitat et voirie

(trottoirs, parkings, places, ronds-points, etc.), ou par la végétalisation des toitures des bâtiments (TVE).

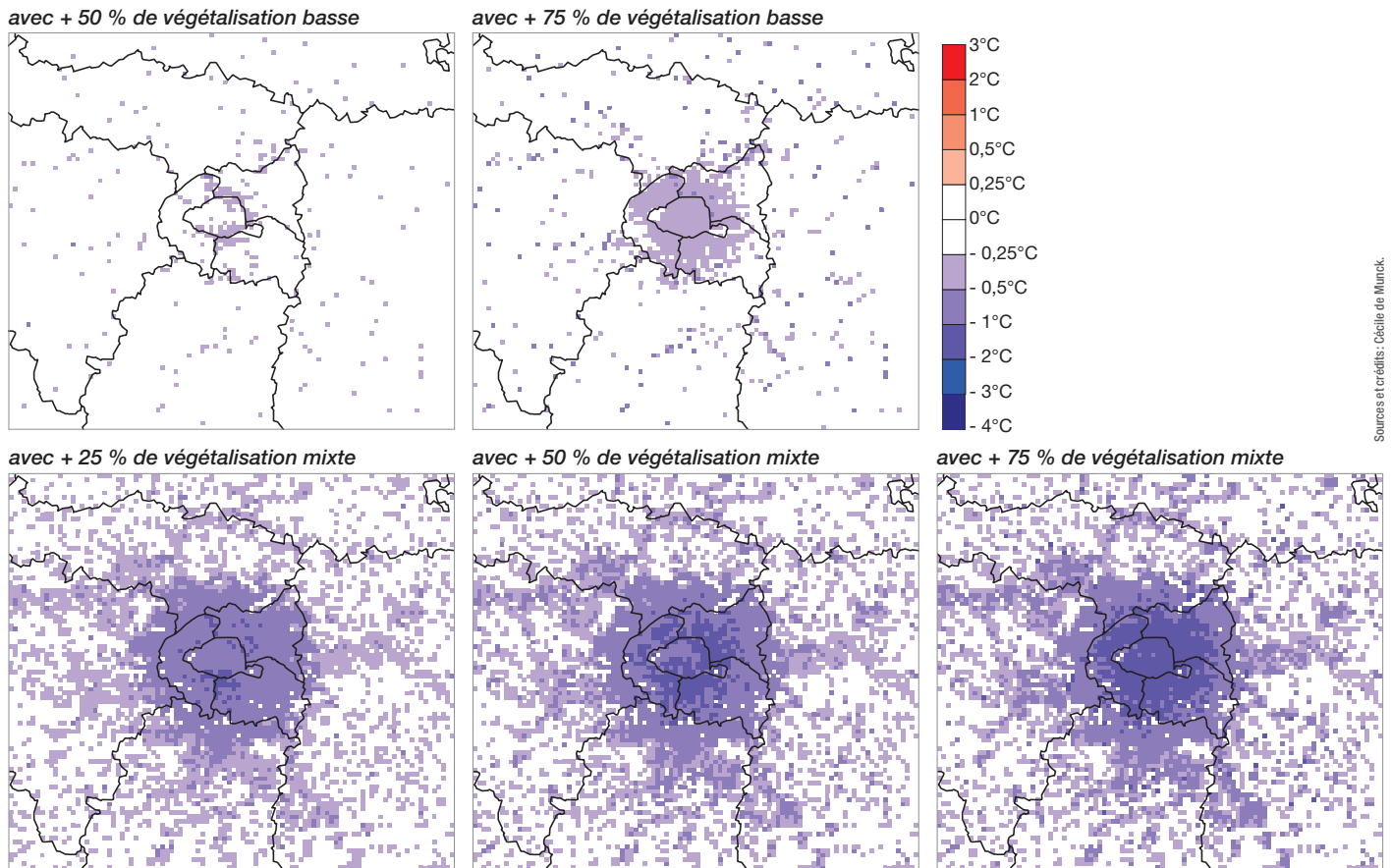
Figure 4 – Évolution simulée de la consommation d'énergie finale selon les saisons (GWh/gigawattheure)



Les différences de consommation d'énergie finale sont représentées pour chaque scénario de végétalisation par rapport à la situation de référence obtenue sur les moyennes de la décennie 1999-2008.

En été, en réponse à la demande de froid, l'évapotranspiration des végétaux irrigués et l'humidité du substrat rendent le scénario TVEirr plus performant énergiquement.

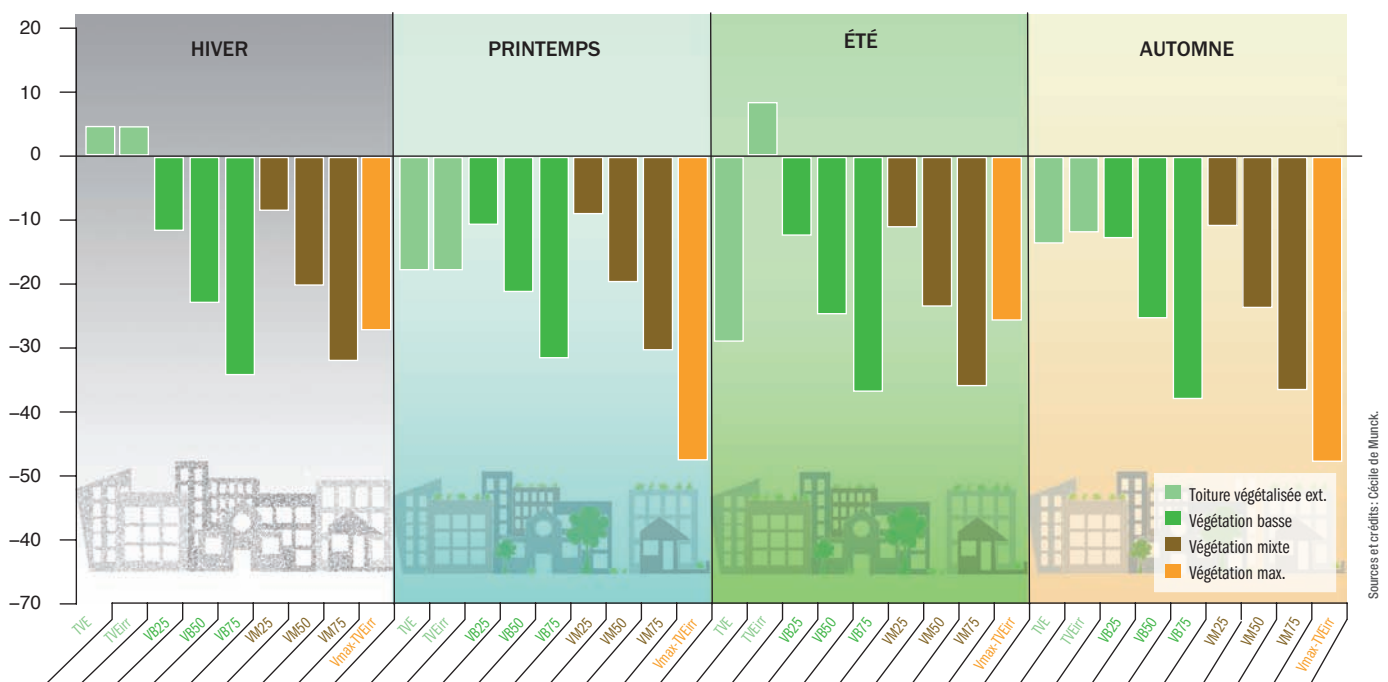
Figure 3 – Variations de température nocturne selon les scénarios de végétalisation



Variations de température minimale nocturne dans les rues, à 2 m du sol, obtenues par la végétalisation de 25, 50 et 75 % des surfaces

disponibles au sol, avec de la végétation basse ou de la végétation mixte arborée.

Figure 5 – Comparatif de l'impact des solutions de végétalisation sur le ruissellement (Mm³/million de m³)



Toutes les solutions de végétalisation en pleine terre sont efficaces contre le ruissellement (moins de surfaces artificialisées et imperméables, plus d'absorption directe de l'eau pluviale par le sol). En revanche, l'efficacité des TVE à gérer les eaux pluviales est variable

selon les saisons. La présence de précipitations naturelles qui s'ajoutent à l'arrosage estival systématique, et le fait que le modèle a tendance à trop drainer l'eau dans la TVE, induit un ruissellement supérieur des TVEirr par rapport aux TVE, en été et au début de l'automne.

- indicateurs énergétiques: basés sur la consommation énergétique des bâtiments pour le chauffage et la climatisation. Elle est ici exprimée en quantité d'énergie finale (Ef), c'est-à-dire réellement consommée;
- indicateurs hydrologiques: basés sur la consommation d'eau associée à l'arrosage de la végétation urbaine de pleine terre et en terrasse, ainsi que le ruissellement de surface.

Les enseignements des simulations dans un contexte caniculaire

Forme urbaine et végétalisation sont indissociables dans le contexte d'une période caniculaire. L'effet des scénarios arborés varie en fonction de la typologie urbaine en raison de deux principaux facteurs: la surface au sol disponible pour la végétalisation et les caractéristiques morphologiques du quartier.

Un confort climatique amélioré dans la rue

Comme l'illustrent les cartes d'anomalie de température nocturne, l'augmentation de densité de végétation induit bien un rafraîchissement des rues franciliennes. La végétation mixte arborée est nettement plus efficace que la végétation basse (figure 3).

En outre, le rafraîchissement est d'autant plus marqué que le taux de végétalisation est élevé, allant de 0,25°C à 2°C, selon le taux et la localisation de la végétation dans l'agglomération. Enfin, l'impact des toitures végétales n'apparaît que si elles sont arrosées. Il reste malgré tout très limité: de l'ordre de -0,25°C à -0,5°C.

Augmenter les surfaces végétalisées de pleine terre en ville limite aussi le stress thermique dans les rues. Ici également, cet effet augmente avec le taux de végétalisation et la proportion de végétation arborée (figure 7). Par exemple, augmenter le taux de végétalisation des surfaces urbaines de 25% à 75%, avec de la végétation basse, permet de diminuer d'une demi-heure

le temps moyen passé en stress thermique extrême au soleil, ou en stress thermique très élevé à l'ombre.

Mais les scénarios arborés sont les plus efficaces, en particulier dans les quartiers d'habitat collectif (figure 7): la végétalisation de 75% des surfaces au sol disponibles dans ce tissu urbain permet une réduction du temps passé à l'ombre en stress thermique très élevé supérieure à 1 h, contre seulement 40 min dans l'habitat individuel.

À noter également que les impacts des stratégies arborées sont sous-estimés dans cette étude car les effets d'ombrage des arbres ne sont pas actuellement pris en compte dans le modèle et le calcul des températures ressenties.

Une réduction de la demande en climatisation

Le rafraîchissement du microclimat extérieur induit par la végétalisation entraîne une diminution de la demande en climatisation, et de la consommation d'énergie associée. Elle varie, elle aussi, avec le type de dispositif végétal et le taux de couverture végétale (figure 8).

Sans adaptation spécifique (REF), la consommation d'énergie pour la climatisation, cumulée sur l'ensemble du domaine étudié, est de l'ordre de 759 GWh (gigawatt-heure). Les toitures végétales non arrosées agissent principalement comme un isolant, avec une économie d'énergie de l'ordre de 4%. Leur irrigation accroît leur pouvoir évapotranspirant, ce qui engendre une diminution plus conséquente de la consommation d'énergie finale (12%).

Indirectement, en régulant le microclimat extérieur, les stratégies de végétalisation de pleine terre font baisser la demande en climatisation des bâtiments: l'effet maximal est observé pour un taux de végétalisation de 75% des surfaces au sol disponibles avec de la végétation mixte arborée. Une économie d'énergie de 13% est ainsi réalisée, directement comparable

aux performances atteintes avec l'installation de toitures végétales irriguées.

Finalement, la réduction de 25% de consommation d'énergie engendrée par le scénario de végétalisation maximale (Vmax) permet de mettre en évidence l'effet synergique et donc l'intérêt de combiner deux stratégies de végétalisation qui mettent en jeu des mécanismes physiques différents: rafraîchissement de l'air dans les rues pour la végé-

Figure 6 – Échelle d'UTCI pour les niveaux de stress thermique

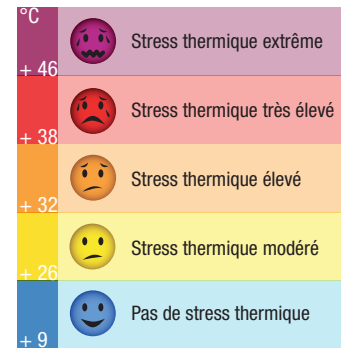
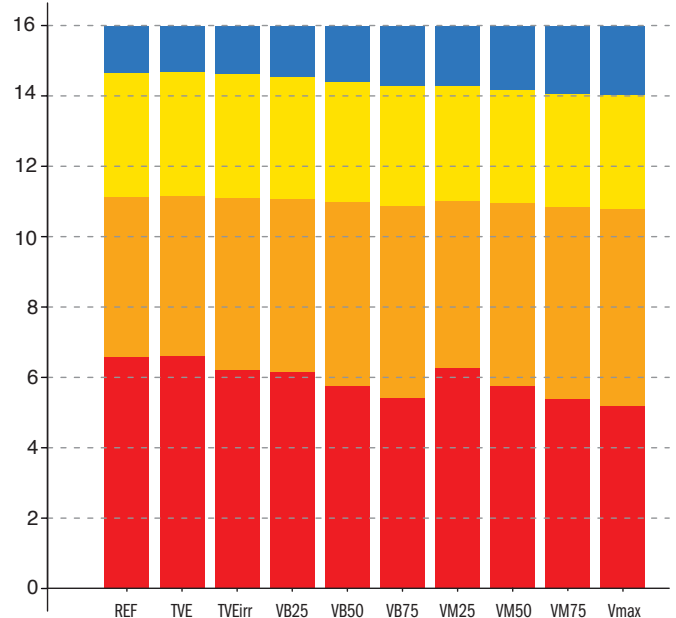
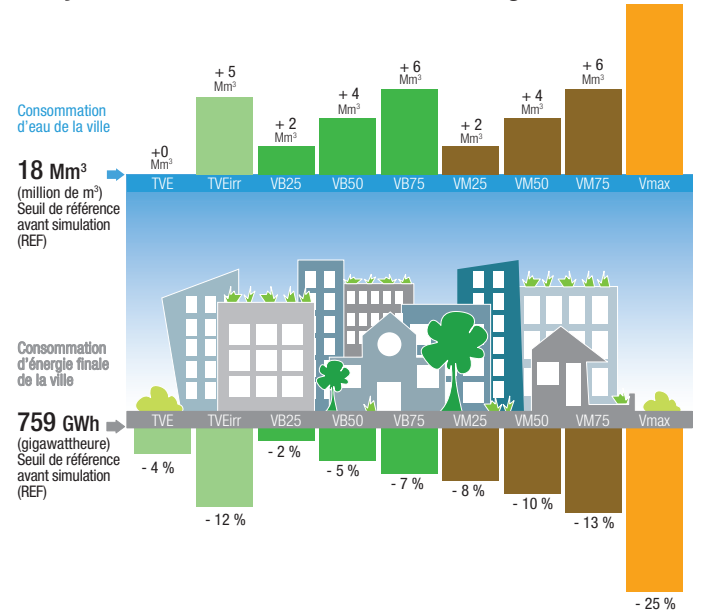


Figure 7 – Confort ou stress thermiques pendant une journée caniculaire selon l'échelle UTCI



Exemple du nombre d'heures de jour (entre 6h et 22h) passées en moyenne en confort ou stress thermique pendant la canicule, pour un individu à l'ombre, dans un tissu urbain de bâtiments collectifs, selon l'échelle d'UTCI.

Figure 8 – Consommations d'eau et d'énergie pendant les 6 jours de canicule selon les scénarios de végétalisation



talisation arborée de pleine terre et pouvoir isolant pour la végétation en toiture.

La disponibilité de la ressource en eau en question

Les performances énergétiques sont à mettre en perspective avec les consommations d'eau nécessaires à l'arrosage de la végétation. Cumulée sur les six jours de canicule et intégrée sur l'ensemble du domaine d'étude, la ressource en eau s'exprime ici en dizaines de millions de m³ (figure 8). Comparativement au débit de la Seine à l'étiage, c'est-à-dire en période de sécheresse (66 m³ par seconde), l'arrosage de toute la végétation urbaine du domaine d'étude avant végétalisation consommerait 53 % du volume de la Seine. Cette proportion atteint 71 % pour le scénario arboré le plus dense, contre 69 % pour les toitures végétales irriguées.

Les performances énergétiques des différentes stratégies végétales sont fortement dépendantes du protocole d'arrosage (volume, fréquence, horaires). Il est donc primordial d'engager une réflexion autour des pratiques d'arrosage, actuelles et futures, afin de simuler des conduites plus réalistes ou plus innovantes, dans le but d'optimiser la ressource en eau dédiée à l'arrosage de la végétation urbaine.

On retiendra un résultat important de cette étude : les arbres ont une gestion plus efficace de l'eau du sol que la végétation

herbacée. En effet, ils peuvent, du fait de leur système racinaire développé, mobiliser plus d'eau dans le sol et, ce faisant, rafraîchir davantage l'air environnant grâce à un feuillage beaucoup plus ample que les espèces herbacées. Par conséquent, à consommations d'eau égales, ils induisent une plus grande économie d'énergie pour la climatisation.

Consommations énergétique et hydrologique : les simulations selon les saisons

À l'échelle de l'agglomération parisienne et sur la décennie 1999-2008, qui a servi de base à l'analyse des impacts saisonniers des stratégies végétales, la consommation d'énergie finale annuelle est principalement liée au chauffage.

Des impacts variables sur la consommation d'énergie

Les toitures végétales conservent un pouvoir isolant sur les bâtiments tout au long de l'année (figure 4). Leur efficacité énergétique est significative, quelle que soit la saison, car elles régulent aussi bien la demande de climatisation que de chauffage.

Les effets des stratégies arborées sur la consommation énergétique sont plus complexes. La réduction de la demande en climatisation, entraînée par le rafraîchissement de l'air dans les rues, est confirmée en été. Néanmoins, en dehors de cette période, un léger effet de rafraîchissement persiste (du fait de l'évaporation

directe de l'eau interceptée par les arbres) et engendre finalement une surconsommation en chauffage. Cet effet devrait toutefois être moindre dans le futur, en raison de la diminution de la demande de chauffage (meilleure isolation du bâti, réchauffement climatique engendrant des hivers plus doux, notamment).

Des systèmes innovants de gestion de l'eau nécessaires à l'échelle locale

L'écosystème urbain fait face à deux problématiques aux temporalités différentes : la gestion des eaux pluviales tout au long de l'année et celle de la ressource en eau pour l'arrosage des espaces verts en été. Pour évaluer l'impact des différentes stratégies de végétalisation sur ces deux problématiques, le volume d'eau ruisselée sur les toitures et les surfaces artificielles au sol a été quantifié, et comparé au volume d'eau nécessaire à l'arrosage de l'ensemble de la végétation urbaine.

Le ruissellement annuel est notablement impacté par la végétalisation des surfaces urbaines. Indépendamment de la saison, la végétalisation de pleine terre réduit le ruissellement, principalement grâce à l'augmentation de la couverture de sol végétalisée, et perméable (figure 5). Cette réduction atteint 11 %, 22 % et 33 %, respectivement pour les taux de végétalisation de 25 %, 50 % et 75 % des surfaces au sol disponibles. L'efficacité des toitures végétales à gérer les eaux pluviales est variable selon les saisons. Au printemps et en automne, elles permettent de réduire les quantités d'eau ruisselées respectivement de 18 % et 10 %.

Enfin, il est intéressant de remarquer qu'au-delà d'un certain taux global de végétalisation de la ville (11 %), les volumes annuels d'eau ruisselée ne compensent plus ceux nécessaires à l'arrosage estival.

Pour en savoir plus

- DE MUNCK Cécile, *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*, thèse de doctorat, CNRM-Game, INPT, Toulouse, 2013 : <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002485>
- APUR, « Les îlots de chaleur urbains à Paris », *Cahier#1*, décembre 2012 : http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf
- BONHOMME Marion, MASSON Valéry, VIGUÉ Vincent, « Histoire et prospective avec le projet Muscade », dans *Les Cahiers*, n° 168, IAU idF, décembre 2013.
- COLOMBERT Morgane, BOUDES Philippe, « Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes », *Vertigo*, hors-série, vol. 12, mai 2012 : <http://vertigo.revues.org/11821>
- CORDEAU Erwan, VALETTE Emmanuelle, *Les îlots de chaleur urbains. L'adaptation de la ville aux chaleurs urbaines*, tome 1, Répertoire de fiches connaissance, tome 2, IAU idF, novembre 2010.
- LEGENNE Corinne, « Nature en ville ». Base pour *Les Carnets pratiques* (à paraître fin 2014) : <http://www.iau-idf.fr/detail/etude/la-nature-en-ville-1.html>



Directrice de la publication :
Valérie Mancret-Taylor

Auteurs : Cécile de Munck, Aude Lemonsu, CNRS/Météo France
avec Erwan Cordeau, Laurence Nologues
Sous la direction de Christian Thibault

Rédactrice en chef : Isabelle Barazza
Maquette : Vay Ollivier
Cartographie, infographie : Jean-Eudes Tilloy, Laurie Goblet
Sous la direction de Frédéric Theulé

Diffusion par abonnement
80 € par an (≈ 40 numéros) - 3 € le numéro
Service diffusion-vente
Tél. : 01 77 49 79 38
15, rue Falguière 75015 Paris

ISSN 1967 - 2144
ISSN ressource en ligne 2267-4071

www.iau-idf.fr

Cécile de Munck, Aude Lemonsu
CNRS/Météo France ■



Lexique

- **Artificialisation des sols :** réalisation d'infrastructure urbaine, équipement ou tout autre construction sur des espaces jusqu'alors naturels, agricoles ou forestiers.
- **Puits de carbone :** processus qui extrait les gaz à effet de serre de l'atmosphère, soit en les détruisant par des procédés chimiques, soit en les stockant sous une autre forme. Exemple : le dioxyde de carbone est stocké dans l'eau des océans, les végétaux ou les sous-sols.
- **Stress thermique :** augmentation de la température corporelle pouvant entraîner des risques graves pour la santé.
- **Végétalisation :** dans cet article, il s'agit d'un processus volontaire de replantation et de reconstruction du sol sur des terrains perturbés par l'homme, mais également de plantation sur toitures.