

Référentiel BIODI-Bat



Indicateurs : **Cobénéfices** liées à la nature **Rafrâichissement**

version 1
Octobre 2025

Contact :

r4re@o-immobilierdurable.fr
big@o-immobilierdurable.fr



INTRODUCTION

En France, 93% de la population vit d'ores et déjà dans l'aire d'attraction d'une ville ([INSEE, 2020](#)). Cette dynamique d'urbanisation ne ralentit pas : entre 16 000 à 61 000 hectares de terres naturelles et semi-naturelles sont ainsi consommées et disparaissent chaque année en France ([Julien Fosse, 2019](#)). De fait, les réservoirs de biodiversité sont rares et éparés dans les villes ce qui limite les espaces favorables pour la flore et la faune tandis que les surfaces végétalisées et perméables sont converties en surfaces minérales imperméables. La perte de nature en ville affecte les fonctions écologiques des écosystèmes autrement dit les processus résultants des interactions entre le vivant et leur environnement qui sont indispensables au bon fonctionnement des écosystèmes. Ces mêmes fonctions écologiques sont tout autant indispensable pour nous, êtres humains, qui en tirons des bénéfices directs et indirects que l'on nomme services écosystémiques.

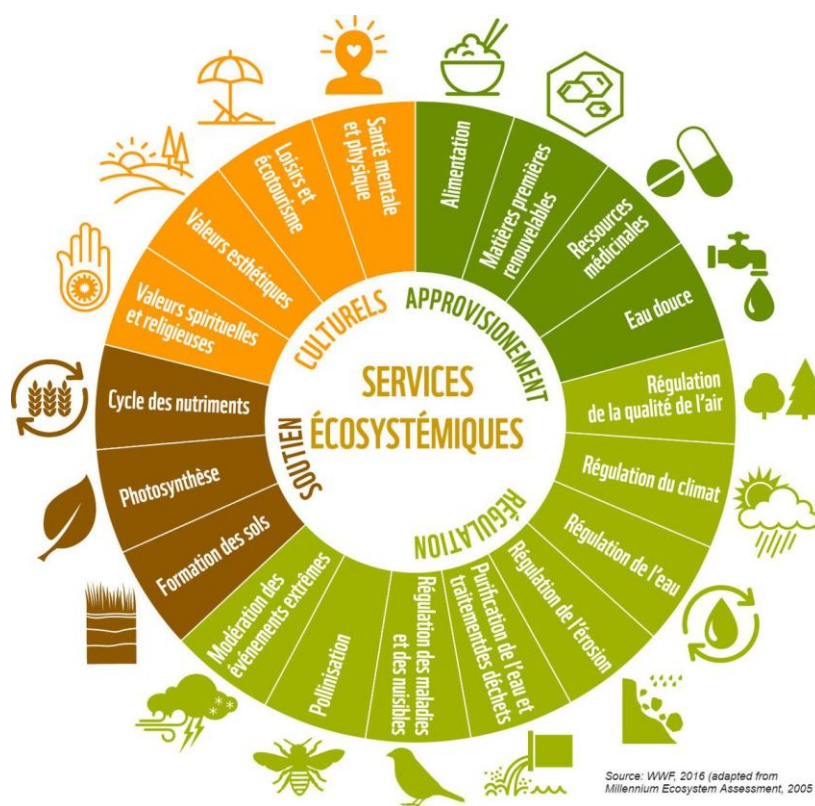


Figure 1 : Les différentes catégories de services écosystémiques, ([WWF, 2016](#))

Dans les villes, les processus écologiques sont fortement perturbés qu'il s'agisse du cycle de l'eau, de la régulation du climat, du cycle du carbone, ou encore les interactions entre les espèces. Les conséquences de la destruction de nature dans l'environnement urbain sont multiples et concrètes. Les surfaces minérales artificielles par exemple absorbent plus d'énergie solaire que les surfaces végétalisées, ce qui augmente localement la température ([Solecki et al., 2005](#)). Elles empêchent aussi les eaux pluviales de s'infiltrer, générant des inondations et une pollution des milieux naturels par ruissellement. De plus en plus d'études démontrent aujourd'hui un lien fort entre la nature et la santé humaine ([OMS, 2016](#)). La santé étant définie comme « un état de complet bien-être physique, mental et social [...] » ([Constitution de l'Organisation mondiale de la Santé, 1946](#)). La destruction et le manque d'expérience de nature est une cause de mal-être pour les usagers.

Les services écosystémiques sont menacés par l'absence ou la perte de biodiversité. La préservation de réservoirs de biodiversité en milieu urbain constitue alors une réponse face aux défis environnementaux et sociétaux. A ce sujet, l'UICN définit les Solutions Fondées sur la Nature (SFN) comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » ([UICN, 2016](#)). Toute solution fondée sur la nature permet à la fois de contribuer à la préservation de la biodiversité tout en répondant aux défis sociétaux du territoire.

L'immobilier est le principal secteur d'activité responsable de l'urbanisation et de la perte de nature en ville. Toutefois, il concentre une large partie des leviers d'actions pour inverser cette tendance. L'OID met à disposition des acteurs du secteur des outils pour comprendre les enjeux écologiques et rendre leurs parcs immobiliers plus favorables à la biodiversité. Plusieurs indicateurs sont d'ores et déjà proposés sur la plateforme [R4RE](#). En parallèle de cette évaluation strictement écologique des enjeux liés à la biodiversité, le programme de recherche du Biodiversity Impulsion Group (BIG) a abordé une approche plus transversale sur des sujets environnementaux et sociaux de manière à diversifier les arguments en faveur d'actions de renaturation en mettant en avant les avantages retirés par les usagers des bâtiments et ainsi toucher un plus large public. L'objectif est ainsi d'évaluer via des indicateurs la contribution potentielle des éléments de nature à l'endiguement des défis sociétaux du territoire selon leur niveau d'exposition. Trois co-bénéfices pour lesquels la nature peut apporter une solution à l'échelle de la parcelle et des espaces à proximité ont été retenus : le Rafraîchissement, la Gestion des eaux pluviales et la question de la Santé et du bien-être.

Le projet d'évaluer les co-bénéfices d'une parcelle a débuté par un partenariat avec le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) en dressant un état des lieux des moyens de mesurer et objectiver les co-bénéfices. Ce premier travail a été un socle afin de proposer des indicateurs évaluant les co-bénéfices. Nous parlons de « co-bénéfices » plutôt que de « services écosystémiques » afin d'inclure dans le terme utilisé les externalités positives pour la biodiversité et ainsi souligner leur importance dans notre démarche.

Comme exposé précédemment, les co-bénéfices reposent sur les fonctions écologiques des écosystèmes. Toutefois, la présence d'éléments de nature (arbres, masse d'eau, toiture végétalisée, etc.) n'est pas un paramètre suffisant afin d'évaluer la fonctionnalité des écosystèmes présents. Par exemple une végétation en stress hydrique aura tendance à limiter le rafraîchissement de l'air ambiant en piégeant les rayons infra-rouges solaires ([Gill et al., 2007](#)). Ce processus illustre l'importance de constituer des écosystèmes fonctionnels. La présence de végétation n'est pas toujours gage d'aménités effectives si son environnement n'est pas pris en compte. Cette évaluation nécessiterait le passage d'un écologue sur site. Les critères retenus pour constituer les indicateurs de co-bénéfices ne pouvant pas être assez précis pour assurer la fonctionnalité des écosystèmes, les indicateurs proposés par BIG sont donc une estimation des aménités liés à la nature. C'est la raison pour laquelle nous ne parlons pas de co-bénéfice lié à la biodiversité, qui englobe aussi les interactions des organismes vivants, mais plutôt de co-bénéfices liés à la nature puisque la collecte de données repose majoritairement sur les éléments de nature présents sur le site. Certaines questions vont tout de même chercher à décrire plus précisément l'environnement afin d'estimer la fonctionnalité potentielle du milieu (présence d'un système d'irrigation, pratiques de gestion, sols en pleine terre ou sur dalle, etc.).

Le présent référentiel décrit la méthodologie générale permettant d'évaluer les co-bénéfices. Dans un second temps est détaillé l'indicateur de Rafraichissement disponible sur la plateforme R4RE. Il décrit le modèle de construction de l'indicateur, la méthodologie

permettant de quantifier cartographiquement l'exposition du territoire au défi de rafraîchissement, ainsi que la justification et l'attribution des points de chaque critère contribuant au défi territorial.

BIODIVERSITY IMPULSION GROUP – GO BIG FOR NATURE!



Le Biodiversity Impulsion group (BIG) est un programme de recherche appliquée fédérant un groupe d'entreprises du secteur de l'immobilier et de la ville, ainsi que de nombreux partenaires académiques, institutionnels et techniques. Il vise le développement de référentiels de mesure de la biodiversité à l'échelle du bâtiment et du territoire ainsi que la mise à disposition d'outils et de guides facilitant la transition des professionnels vers un modèle respectueux du vivant. Pour cela, le programme repose sur une démarche d'intelligence collective et d'amélioration continue.

Le présent référentiel est le fruit d'un travail collaboratif entre les entreprises partenaires, les équipes de l'OID ainsi que de nombreux échanges avec des scientifiques, experts et chercheurs sur l'année 2023.

Pour en savoir plus sur l'initiative BIG : <https://biodiversity-impulsion-group.fr/>

LES ENTREPRISES PARTENAIRES



TABLE DES MATIERES

Introduction	2
Biodiversity Impulsion Group – Go BIG for Nature!.....	4
Les entreprises partenaires.....	4
Co-Bénéfices liés à la nature : principe et méthodologie générale.....	6
Comment utiliser les indicateurs ? Exemple de l'indicateur de rafraîchissement.....	7
Des indicateurs à la fois sociaux et environnementaux.....	8
Rafraîchissement : Méthodologie	9
Déterminer le défi du territoire.....	10
1.1 Prendre en compte la morphologie du territoire.....	11
1.2 Construction de l'indicateur de défi.....	13
Evaluation de la capacité de rafraîchissement du site.....	16
1. Bâti & structure	16
1.1 Toiture végétalisée.....	16
1.2 Façades végétalisées.....	21
1.3 Récapitulatif des points pour la catégorie Bâti et Structure.....	23
2. Espaces extérieurs	23
2.1 Espaces imperméables et semi-perméables	23
2.2 Espaces en pleine terre.....	24
2.3 Espaces sur dalle.....	25
2.4 Surface de la couverture arborée	26
2.5 Milieux humides	27
2.6 Récapitulatif des points pour la catégorie Espaces extérieurs	31
3. Pratiques et gestion	32
3.1 Flore.....	32
3.2 Eau	32
3.3 Récapitulatif des points pour la catégorie Pratique et gestion.....	33
Indice de fiabilité	33
1. Bâti et structure.....	33
2. Espaces extérieurs	33
3. Pratiques et gestion	33
4. Co-bénéfice « Rafraîchissement »	33
Discussion.....	34
Conclusion	35
Bibliographie	36
Remerciements	39
A propos.....	39

CO-BENEFICES LIES A LA NATURE : PRINCIPE ET METHODOLOGIE GENERALE

Les indicateurs de co-bénéfices reposent sur la démarche des Solutions Fondées sur la Nature (abréviation : SFN) telle que décrite par l'UICN ¹. Ainsi, ils évaluent la contribution d'un site par rapport à la présence d'éléments de nature à répondre aux défis sociétaux d'un territoire. Par conséquent, chaque co-bénéfice fait l'objet d'un indicateur unique qui met en regard le niveau de défi sociétal du territoire avec les critères relatifs aux caractéristiques intrinsèques d'une parcelle. Les trois co-bénéfices retenus sont les suivants :

- ≡ Rafraîchissement
- ≡ Gestion des eaux pluviales
- ≡ Santé et bien-être

Le défi territorial est un indicateur cartographique à l'échelle de la France métropolitaine. Chaque défi fait l'objet d'une méthodologie particulière qui traduira en indicateur les données territoriales, climatiques, etc. Le défi territorial se traduit par une note entre '0' et '1' qui est associée à un niveau de défi : prioritaire, élevé, modéré, faible, inexistant.

Les caractéristiques intrinsèques du site, quant à elles, sont renseignées par l'utilisateur dans un questionnaire pensé pour les acteurs de l'immobilier. Les critères d'évaluation questionnent les éléments de nature présents sur le site, ainsi que les modes de gestion des espaces extérieurs végétalisés. Une note est ainsi attribuée entre '0' et '100'. Les critères sont répartis en trois catégories avec des pondérations qui sont précisées dans le tableau 1 :

	Défi		Caractéristiques		
	Données	Seuils	Données	Répartition	
Rafrachissement	Exposition à la chaleur	[0] ;]0 - 0,35] ;]0,35 - 0,55] ;]0,55 - 0,75] ;]0,75 - 1]	Espaces végétalisés, strate arborée...	Bâti & structure Espaces extérieurs Pratiques et gestion	25% 65% 10%
Gestion des eaux pluviales	Exposition aux précipitations intenses, capacité d'infiltration, proximité de zones humides	[0] ;]0 - 0,30] ;]0,30 - 0,50] ;]0,50 - 0,70] ;]0,70 - 1]	Milieux humides, espaces végétalisés en pleine terre, strate arborée, gestion de l'eau...	Bâti & structure Espaces extérieurs Pratiques et gestion	27% 50% 23%
Santé & Bien-être	Surface végétalisée, densité de population	[0] ;]0 - 0,45] ;]0,45 - 0,60] ;]0,60 - 0,70] ;]0,70 - 1]	Accessibilité aux espaces végétalisés, couverture arborée	Bâti & structure Espaces extérieurs Pratiques et gestion	18% 47% 35%

Tableau 1 : Attribution des seuils de défi et de la répartition des points des caractéristiques d'un site selon chaque co-bénéfice, OID 2024.

¹ L'UICN définit les Solutions fondées sur la nature comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » ([UICN, 2016](#))

- ≡ **Bâti et structure** : ensemble des caractéristiques directement sur le bâtiment et qui traitent du gros œuvre (toitures, façades).
- ≡ **Espaces extérieurs** : ensemble des espaces en extérieur au niveau rez-de-chaussée présents sur la parcelle (surfaces imperméables, espaces en pleine terre, espaces sur dalle, couverture arborée, milieux humides).
- ≡ **Pratiques et gestion** : usage qui est fait du bâtiment et de ses espaces (flore, eau).

Finalement, chaque indicateur de co-bénéfice croise ces deux données :

- ≡ Le niveau de défi territorial classé de « inexistant » à « prioritaire » qui donne lieu à un coefficient multiplicateur
- ≡ La capacité d'un site selon ses caractéristiques à répondre au défi entre 0 à 100

La [Figure 2](#) ci-dessous schématise la méthodologie présentée ici.

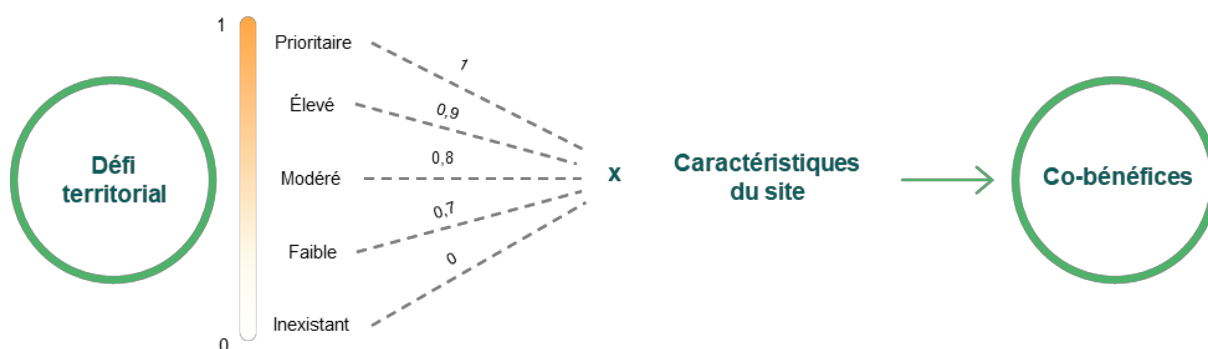


Figure 2 : Modèle d'évaluation des co-bénéfices, OID 2024.

Pour chaque co-bénéfice, les seuils pour les niveaux de défi territorial (inexistant à prioritaire) ainsi que les pondérations entre les trois catégories de caractéristiques d'un site. Selon le niveau de défi du territoire, un coefficient multiplicateur entre 0 et 1 est appliqué aux caractéristiques du site afin d'évaluer sa contribution au défi : co-bénéfice.

COMMENT UTILISER L'INDICATEUR DE RAFRAÎCHISSEMENT ?

En prenant en compte l'exposition du territoire aux fortes chaleurs ainsi que les éléments de nature présents sur le site permettant de relever ce défi, l'indicateur « Rafraîchissement » évalue la contribution du bâtiment et de la parcelle au rafraîchissement du territoire alentour.

Lorsque le défi est fort, cela signifie que le territoire est fortement exposé aux fortes chaleurs du fait de la carence en éléments de nature et de sa situation géographique qui influe sur le climat local. Si l'évaluation des caractéristiques du site est faible, cela signifie que le site est fortement anthropisé et que la place de la nature y est restreinte.

Afin d'identifier les sites sur lesquels la mise en œuvre d'actions pour le rafraîchissement du territoire est prioritaire, il est recommandé d'isoler les sites où le défi territorial est important (étiquette « prioritaire » dont le défi est compris entre 0,75 et 1), puis identifier ceux dont l'indicateur final de co-bénéfice est le plus faible, c'est-à-dire, où la contribution actuelle de la nature n'est pas à la hauteur du défi territorial.

Une fois les sites prioritaires identifiés, le passage d'un expert sur site permettra d'identifier sur le terrain un plan d'action adapté au contexte environnemental local. Il est recommandé pour tout aménagement de la parcelle de faire appel à un écologue afin de concilier aux enjeux sociétaux, les enjeux écologiques.

En attribuant un niveau de co-bénéfice à un site, ces indicateurs sont un argument supplémentaire afin de convaincre les parties prenantes de l'importance de la nature en ville.

DES INDICATEURS A LA FOIS SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX

Les co-bénéfices sont des indicateurs permettant de rappeler la dépendance de nos sociétés vis-à-vis de la nature. Sans écosystèmes fonctionnels, c'est-à-dire stables et résilients, il n'y aura pas de co-bénéfices sur le long terme. Autrement dit, la fonctionnalité des écosystèmes et la durabilité des co-bénéfices sont intrinsèquement liés.

La dimension sociale ne doit pas être l'unique prisme pour aborder les co-bénéfices. Les actions mises en œuvre doivent aussi bénéficier au vivant et ne doivent pas nuire à la biodiversité locale quand bien même elles répondraient à un défi sociétal. En ne considérant pas les enjeux environnementaux, le renforcement des aménités sociales peut nuire à la biodiversité locale, notamment en implantant une végétation qui ne soit pas adaptée au contexte environnemental local, en créant des pièges écologiques (arbres devant les fenêtres par exemple), etc. Dans ce cas, des alternatives doivent être pensées afin que l'enjeu écologique soit pris en compte. Les indicateurs de co-bénéfices ont donc été construits dans cette perspective. Une première compréhension de l'état écologique du site peut être basée sur l'indicateur de potentiel d'accueil de biodiversité disponibles sur la plateforme R4RE.

RAFRAICHISSEMENT : METHODOLOGIE

Un des défis sociétaux évalués dans BIODI-Bat concerne le rafraîchissement des espaces fortement anthropisés où la nature est peu développée. Cette problématique est d'autant plus préoccupante du fait du changement climatique ([Bowler et al., 2010](#); [Kong et al., 2016](#)) où l'évolution des températures va se retranscrire de manière très concrète dans les villes par une intensification de la chaleur.

Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont caractérisés par des températures nettement plus chaudes en zone urbaine qu'en zone rurale environnante. Les matériaux employés par les bâtiments et les revêtements de l'espace public ont des propriétés thermiques stockant la chaleur durant la journée et la restituant la nuit ([Ilots de Fraicheur Urbains, 2015](#)). Cette restitution nocturne est la principale cause de la différence de température entre les espaces urbains et ruraux la nuit. Les ICU sont aussi liés à d'autres paramètres comme la forme urbaine qui conditionne l'ombrage, l'orientation des rues, la circulation des vents et le piégeage radiatif des rayons solaires, ainsi que l'émission de chaleur anthropique liée aux réseaux de transports, aux équipements des bâtiments, etc. ([Ilots de Fraicheur Urbains, 2015](#)). Ils impactent la santé humaine et renforcent les effets sanitaires et socio-économiques des canicules ([Tan et al., 2010](#)), impactent la biodiversité ([Ilots de Fraicheur Urbains, 2015](#)), augmentent la consommation d'énergie (due aux équipements de climatisation notamment) ([Kong et al., 2016](#)) et favorisent les mouvements horizontaux des masses d'air froid vers les masses chaudes ce qui génère une couche d'inversion des températures responsable de l'accumulation et la stagnation des polluants en ville (voir [Figure 3](#)) ([Greuillet & Galsomiès, 2013](#)).

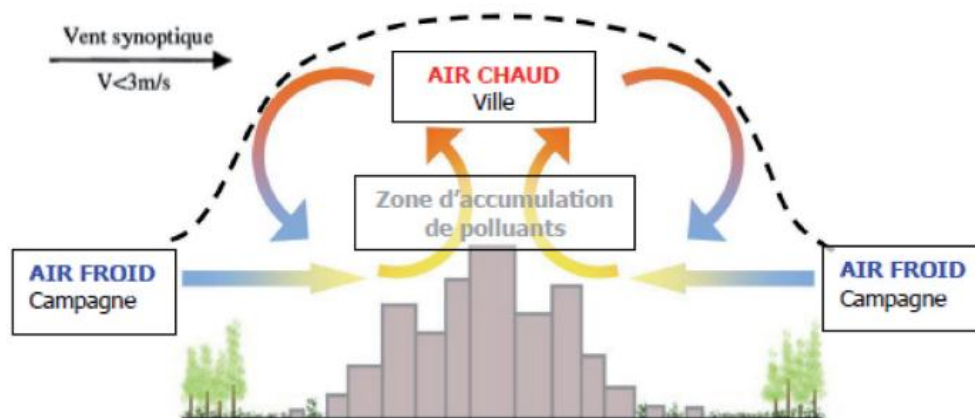


Figure 3 : Phénomène de convergence des vents entre la ville et la campagne (Greuillet & Galsomiès, 2013)

Plusieurs mesures permettent de réduire les îlots de chaleur urbains : réduire la pollution thermique (climatiseurs, réseaux de transport, serveurs informatiques, etc.), mettre à profit la fraîcheur du sous-sol, modifier les revêtements urbains ou encore créer des îlots de fraîcheur ([Apar, 2012](#)). Pour ce dernier point, les couverts naturels tels que les espaces végétalisés, milieux humides et sols perméables permettent de réguler le climat. Deux processus clés de la végétation permettent d'abaisser localement les températures : l'évapotranspiration et l'ombrage ([Oke, 1988](#)). L'évapotranspiration consiste à puiser l'eau des sols par les racines et

la restituer sous forme de vapeur dans l'atmosphère ce qui augmente localement le taux d'humidité ([Ilots de Fraicheur Urbains, 2015](#)). La perméabilité des sols permet de constituer une ressource en eau pour la végétation et ainsi rendre le processus d'évapotranspiration possible. De plus, la présence de milieux humides (en eau, naturels ou artificiels) à proximité de zones végétalisées génère des synergies qui augmentent les échanges thermiques et donc le rafraîchissement de l'espace ([Gunawardena et al., 2017](#)). Afin de rafraîchir les villes, redonner de la place à la nature permet de se rapprocher des cycles naturels et ainsi de rendre efficaces les fonctions écologiques des écosystèmes. Une attention particulière doit être portée à la maximisation de la fonctionnalité des écosystèmes.

Comme vu dans la partie décrivant la méthodologie générale des indicateurs de co-bénéfice, l'indicateur de rafraîchissement est constitué à la fois d'un indice cartographique évaluant le défi du territoire, et d'une analyse des éléments de nature propres au site qui évalue sa contribution à rafraîchir l'air ambiant. Le défi de rafraîchissement d'un territoire est évalué selon son exposition aux fortes chaleurs. En ville, les chaleurs sont dues à l'exposition climatique couplée à l'anthropisation de l'espace qui génère des ICU. Ce sont donc ces deux aspects qui sont pris en compte dans la méthodologie du défi territorial.

DETERMINER LE DEFI DU TERRITOIRE

Le défi de rafraîchissement du territoire est évalué selon son exposition aux fortes chaleurs. En ville les chaleurs sont dues à la fois à la situation géographique mais aussi à l'anthropisation des espaces. Un événement climatique peut être évalué à la fois selon son intensité ainsi que sa durée dans le temps. Au-delà de 35°C le confort thermique des bâtiments est dégradé. En prenant en compte le nombre de jours dans l'année où la température maximale journalière est supérieure à 35°C à un moment de la journée, nous pouvons ainsi évaluer la fréquence des périodes chaudes. En outre, une augmentation des vagues de chaleur estivales, couplée à une augmentation des nombres de jours supérieures à 35°C se traduiront par une augmentation des périodes caniculaires futures et donc de phases durables où le confort thermique est dégradé ([OID, 2022](#)). Les vagues de chaleur sont définies comme le nombre de jours où la température maximale journalière est supérieure de plus de 5°C à la normale pendant au moins 5 jours consécutifs ([Drias, s. d.](#)). Afin de limiter la température interne d'un bâtiment, il est possible d'avoir recours à des techniques de rafraîchissement passif qui ne consomment pas d'énergie. Deux stratégies de ventilation naturelle existent : la ventilation diurne et ventilation nocturne. L'avantage de la ventilation nocturne est qu'elle permet de rafraîchir un bâtiment même quand les températures diurnes sont relativement élevées. Elle permet de stocker la « fraîcheur » nocturne et de la restituer pendant la journée, afin de compenser les apports internes et solaires et, par conséquent, limiter les surchauffes et diminuer les besoins de refroidissement ([Caciolo, 2010](#)). Toutefois, si la température ne diminue pas pendant la nuit, cela implique des difficultés supplémentaires à rafraîchir les bâtiments. Il est alors pertinent de considérer pour l'évaluation du défi territorial, le nombre de nuits anormalement chaudes, c'est-à-dire le nombre de jours où la température journalière minimale (qui se situe pendant la nuit) est supérieure de plus de 5°C à la normale ([Drias, s. d.](#)). Ces facteurs climatiques influencent ainsi l'exposition des bâtiments aux fortes chaleurs et à la capacité de rafraîchissement des bâtiments. L'ensemble de ces données climatiques sont à disposition sur le portail [DRIAS](#). Il s'agit de projections climatiques régionalisées réalisées par les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM).

Outre les indicateurs climatiques, prendre en compte l'anthropisation des espaces permet de quantifier l'augmentation des températures dues aux matériaux utilisés dans l'espace urbain et la perte de nature. En effet, les degrés supplémentaires causés par l'îlot de chaleur urbain ont un effet amplificateur des canicules ([OID, 2022](#)). Le projet [MApUCE](#) du laboratoire CNRM a vocation à estimer les degrés supplémentaires liés au ICU sur 50 agglomérations² métropolitaines.

L'indicateur de défi « Rafraîchissement » repose sur le modèle « Chaleur » de Bat-ADAPT et prend en compte :

- ≡ [TX35] le nombre de jours avec une température supérieure à 35°C selon le scénario RCP8.5 sur la période 2020-2040, *Source : DRIAS*
- ≡ [TXHWD] le nombre de jours de vagues de chaleur selon le scénario RCP8.5 sur la période 2020-2040, *Source : DRIAS*
- ≡ [TNHT] le nombre de nuits anormalement chaudes selon le scénario RCP8.5 sur la période 2020-2040, *Source : DRIAS*
- ≡ [ICU] les degrés supplémentaires causés par l'îlot de chaleur urbain (ICU), *Source : MaPuce.*

Afin de lisser la variabilité climatique, un traitement statistique qui consiste à réaliser la médiane sur la période 2020-2040 a été appliqué. Cela permet d'estimer les indicateurs climatiques précédents à horizon 2030.

Le modèle chaleur de Bat-ADAPT agrège les données de la manière suivante :

$$Défi = \left[\left(\frac{TX35(localisation)}{TX35_{max}} + \frac{TXHWD(localisation)}{TXHWD_{max}} + \frac{TNHT(localisation)}{TNHT_{max}} \right) \times \frac{100}{3} \right] \times 2,2 \frac{ICU(localisation)}{ICU_{max}}$$

1.1 Prendre en compte la morphologie du territoire

Les données relatives aux ICU issues du projet [MApUCE](#) n'étant pas disponibles sur l'ensemble du territoire national, nous avons souhaité interpoler ces données sur toutes les villes métropolitaines. Nous avons donc réalisé une régression linéaire³ entre l'occupation des sols et les données MApUCE.

L'occupation des sols est évaluée selon l'indicateur de « favorabilité des milieux »⁴ développé dans le cadre de BIG. C'est un des indicateurs qui permet de qualifier l'état de la biodiversité selon le niveau d'hémérobie : « mesure intégrative des impacts des interventions humaines sur les écosystèmes » ([Fehrenbach et al., 2015](#); [Walz & Stein, 2014](#)). Les inventaires biophysiques d'occupation des sols utilisés pour l'indicateur de favorabilité des milieux sont [l'Urban Atlas 2018](#) (UA) et [Street Tree Layer 2018](#) (STL) pour les aires urbaines, et [Corine](#)

² Amiens, Angers, Arras, Avignon, Bayonne, Beauvais, Belfort, Besançon, Béthune, Bordeaux, Boulogne sur mer, Caen, Calais, Chalon sur Saône, Clermont-Ferrand, Colmar, Compiègne, Creil, Dijon, Douai-Lens, Dunkerque, Grenoble, La Rochelle, Le Havre, Lens-Liévin, Lille, Lorient, Limoges, Lyon, Marseille, Metz, Montbéliard, Montpellier, Mulhouse, Nancy, Nantes, Nice, Nîmes, Orléans, Paris, Pau, Reims, Rouen, Saint-Etienne, Saint-Nazaire, Thionville, Toulon, Toulouse, Tours, Valenciennes

³ Une régression linéaire est un modèle statistique qui cherche à établir une relation linéaire entre deux jeux de données.

⁴ Pour plus d'informations au sujet de l'indicateur de favorabilité des milieux, se référer au référentiel d'[Etat de la biodiversité](#).

[Land Cover 2018](#) (CLC) pour le reste de l'hexagone selon une maille de 2km par 2km. Les typologies d'occupation des sols de CLC et de l'UA ont été classées selon un gradient d'intégrité biophysique ([Fehrenbach et al., 2015](#)) qui est une méthode qui s'appuie sur les communautés végétales pour qualifier la « naturalité » d'un habitat ([Guetté et al., 2018](#)). Une classification partielle des typologies d'occupation des sols de CLC a été réalisée par ([Walz & Stein, 2014](#)). Cette classification a été complétée et enrichie avec les autres bases de données UA et STL selon l'impact anthropique en 7 classes allant de « excessivement fort » à « presque aucun ».

Niveau	Impact anthropique	Corine Land Cover / Urban Atlas / Street Tree Layer
1	Excessivement fort, Biocénose détruite	CLC : Tissu urbain continu, Zones industrielles ou commerciales, Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés, Zones portuaires, Aéroports UA : Tissu urbain continu (densité urbaine > 80 %) ; Unités industrielles, commerciales, publiques, militaires et privées ; Routes de transit rapide et terrains associés ; Autres routes et terrains associés ; Chemins de fer et terrains associés ; Zones portuaires ; Aéroports
2	Très fort	CLC : Tissu urbain discontinu, Extraction de matériaux, Décharges, Chantiers UA : Tissu urbain dense discontinu (50% - 80%) ; Tissu Urbain Discontinu de Moyenne Densité (30% - 50%) ; Extraction minière et dépotoirs ; Chantiers ; Terrain sans usage courant
3	Fort	CLC : Equipements sportifs et de loisirs, Vignobles, Vergers et petits fruits, Oliveraies, Terres arables hors périmètres d'irrigation, Irrigation, Rizières, Cultures annuelles et cultures permanentes, Systèmes cultureux et parcellaires complexes UA : Tissu urbain discontinu à faible densité (10% - 30%) ; Tissu urbain discontinu à très faible densité (< 10 %) ; Installations sportives et de loisirs ; Terres arables (cultures annuelles) ; Cultures permanentes (vignes, arbres fruitiers, oliveraies) ; Pâturages ; Ouvrages isolés ; Schémas de culture complexes et mixtes ; Vergers en marge des classes urbaines STL : Arbres d'alignement urbains
4	Modéré-fort	CLC : Espaces verts urbains, Prairies, Surfaces essentiellement agricoles interrompues par espaces naturels importants, Territoires agro-forestiers, Marais salants, Cours et voies d'eau, Plans d'eau, Espaces ouverts urbains (jardins, squares, cimetières) UA : Espaces verts urbains ; Milieux aquatiques
5	Modéré	CLC : Forêts de conifères, Forêts mélangées, Pelouses et pâturages naturels, Landes et broussailles, Végétation sclérophylle, Forêts et végétation arbustive en mutation, Végétation clairsemée, Zones incendiées UA : Associations végétales herbacées (prairies naturelles, landes...)

6	Faible	CLC : Forêts de feuillus, Plages, dunes et sables, Marais intérieurs, Tourbières, Marais maritimes, Zones intertidales, Lagunes littorales, Estuaires UA : Les forêts, les zones humides
7	Presque aucun	CLC : Roches nues, Glaciers et neiges éternelles UA : Milieux ouverts avec peu ou pas de végétation (plages, dunes, rochers, glaciers)

Tableau 2 : Classement des typologies d'occupation des sols selon leur degré d'hémérobie, OID 2023

1.2 Construction de l'indicateur de défi

Afin d'interpoler les degrés supplémentaires causés par les ICU sur l'ensemble du territoire métropolitain, il est nécessaire de déterminer la fonction qui lie les deux jeux de données (indicateur de favorabilité des milieux et données MAPUCE) via un test statistique de type régression linéaire. Nous trouvons la relation suivante :

$$ICU_{théorique} = -3,66 \times Favorabilité + 2,6$$

Le coefficient de détermination de 0,3 indique que le modèle explique en partie de la variabilité des données et la p-value de 10^{-80} permet de conclure un lien linéaire significatif entre les deux jeux de données.

Afin d'estimer les degrés de température supplémentaires liés à l'anthropisation du territoire, cette équation a été appliquée sur les espaces dont le niveau d'hémérobie est de 1 ou 2 selon la classification des inventaires d'occupation des sols. Cela correspond respectivement à des espaces où l'impact anthropique est excessivement fort (tissu urbain continu, zones industrielles, réseaux routier et ferroviaire, etc.), ainsi que des espaces où l'impact anthropique est très fort (tissu urbain discontinu, décharge, chantier, etc.) (voir Tableau 2 ci-dessus). En découle un indice d' $ICU_{théorique}$ permettant d'estimer la chaleur liée à l'anthropisation de l'espace.

L'ensemble des données climatiques et données liées aux ICU sont ensuite agrégées selon le modèle Chaleur de Bat-ADAPT (voir formule [ci-dessus](#)). Les données climatiques existent sur l'ensemble du territoire national, notamment dans les milieux naturels, semi-naturels et agricoles. Toutefois, bien qu'ils puissent être exposés à des fortes chaleurs comme la forêt des Landes par exemple, nous ne pouvons pas considérer qu'il existe un défi de rafraîchissement via des actions de végétalisation sur ces espaces puisque l'enjeu dans ces zones n'est pas davantage de créer de la végétation que de préserver et améliorer l'état de la biodiversité déjà existante. L'action de végétalisation n'aurait donc pas de bénéfice à ce niveau. Par ailleurs, le programme BIG est conçu pour les professionnels de l'immobilier qui exercent une influence sur les espaces urbains et ruraux. Les espaces naturels, semi-naturels et agricoles sont hors de leur périmètre d'action. L'indicateur de défi est donc conservé sur les surfaces artificialisées selon la base de données de Corine Land Cover et considéré comme inexistant (soit rapporté à zéro) sur le reste du territoire (voir listes ci-dessous).

Espaces artificialisés selon la nomenclature de Corine Land Cover (niveau de défi entre prioritaire et faible) :

- ≡ Zones urbanisées (continus et discontinus)
- ≡ Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication
- ≡ Mines, décharges et chantiers
- ≡ Espaces verts artificialisés, non agricoles (Espaces verts urbains, équipements sportifs de loisir)

Espaces non artificialisés selon la nomenclature de Corine Land Cover (niveau de défi inexistant) :

- ≡ Territoires agricoles
- ≡ Forêts et milieux semi-naturels
- ≡ Zones humides
- ≡ Surfaces en eau

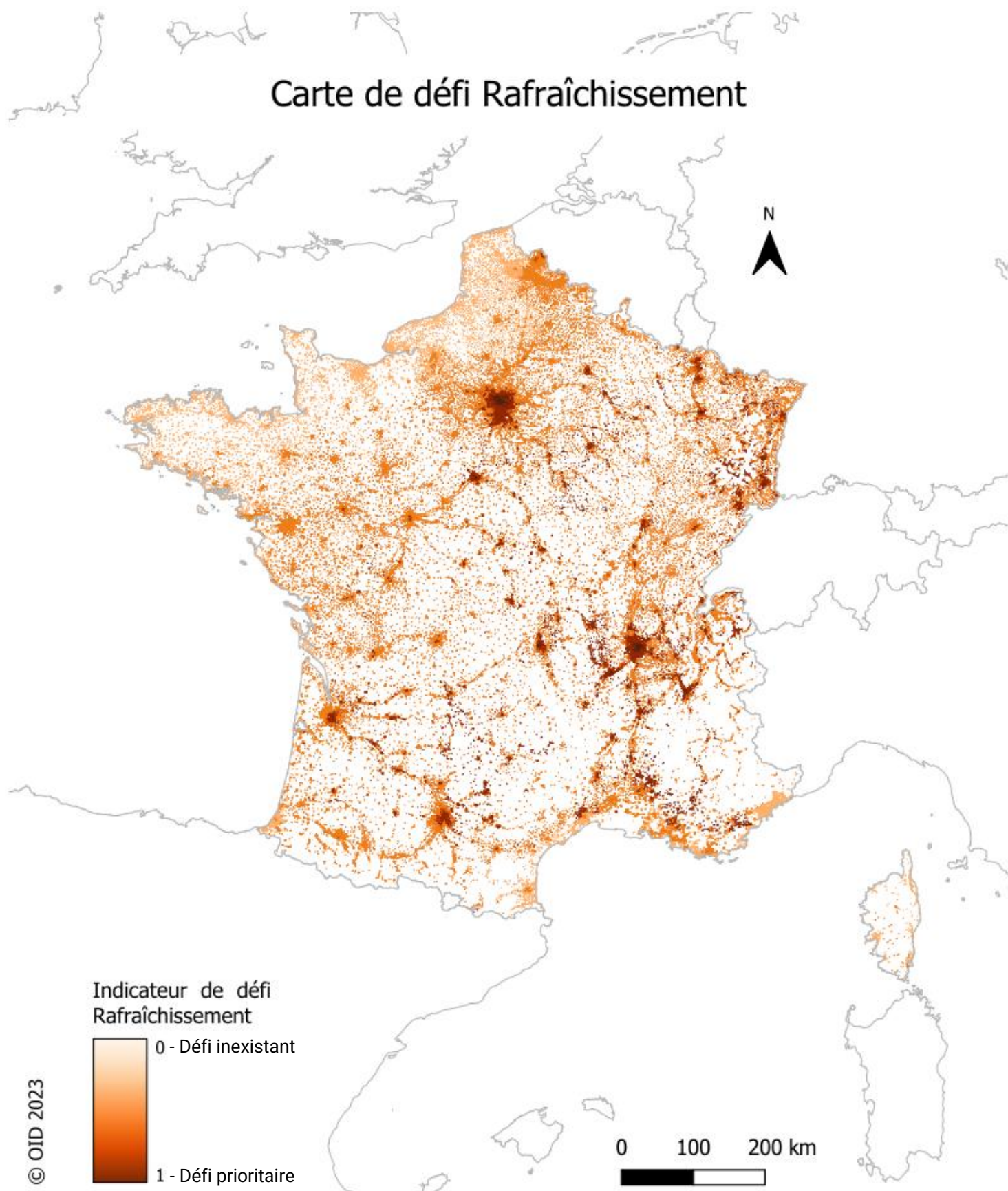


Figure 4 : Cartographie du défi de rafraîchissement

EVALUATION DE LA CAPACITE DE RAFRAICHISSEMENT DU SITE

La capacité théorique d'un bâtiment et sa parcelle à répondre au défi du territoire est évaluée selon les éléments de nature présents. La « contribution » de la nature que l'on cherche à évaluer via l'indicateur final de co-bénéfice correspond à la capacité théorique mise au regard du défi de rafraîchissement. Les critères permettant de qualifier la capacité intrinsèque d'un site sont renseignés via un questionnaire sur BIODI-Bat.

Deux questions préalables doivent être remplies pour permettre le calcul du co-bénéfice. Celles-ci permettent de donner une appréciation de la morphologie du site étudié, notamment en matière de ratio entre les espaces extérieurs et l'emprise du bâtiment.

- ≡ Surface totale de la parcelle en m²
- ≡ Emprise au sol du bâtiment en m² : l'emprise au sol correspond à une projection verticale du volume d'une construction, tous débords et surplombs inclus

1. Bâti & structure

Chaque bâtiment a des caractéristiques de construction qui lui sont propres. Selon ces critères, le bâtiment peut apporter plus ou moins de co-bénéfices. La catégorie « Bâti & structure » repose sur deux critères à savoir toitures végétalisées et façades végétalisées. Elles permettent de créer des micro-écosystèmes dans les milieux urbains très contraints qui peuvent apporter des bénéfices comme l'abaissement de la température atmosphérique à proximité, tamponner les eaux pluviales ou encore créer des espaces de nature bénéfiques pour la santé des usagers. Les points attribués à chaque critère varient pour chaque co-bénéfice selon ce qui maximise les services écosystémiques.

1.1 Toiture végétalisée

Les toitures végétalisées remplissent des services de rafraîchissement notamment via l'albedo de la végétation qui est supérieur à celui des matériaux des bâtiments. L'albedo est la mesure de la réflexion sur une échelle allant de 0 à 1. Plus la réflexion du rayonnement solaire incident est importante, plus l'énergie absorbée par le bâtiment est faible et n'est pas restituée sous forme de chaleur au bâti, notamment en fin de journée ([Lundholm et al., 2010](#); [Yu et al., 2020](#)).

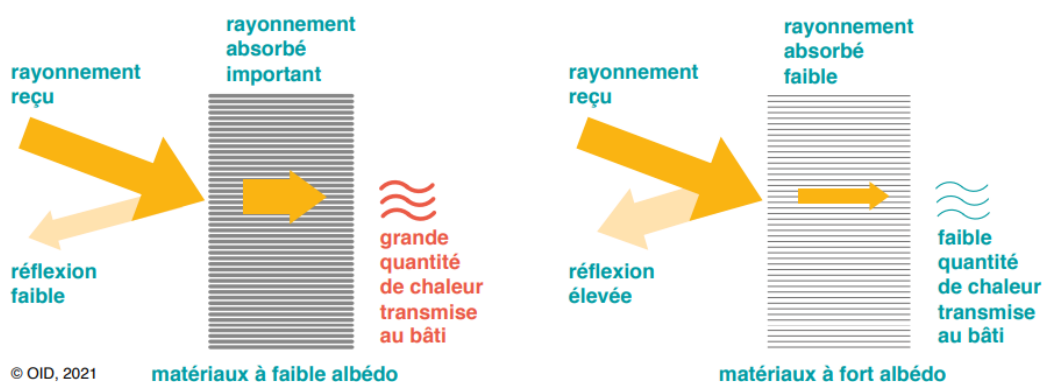


Figure 5 : Illustration des propriétés réfléchissantes des revêtements de murs et de toits à fort albédo, ([OID, 2024](#))

Quantifier les degrés gagnés reste compliqué puisque les paramètres à prendre en compte sont nombreux. On peut néanmoins souligner qu'entre 45% et 74% de l'énergie incidente (provenant du rayonnement solaire) est dissipée par évapotranspiration sur une toiture à végétation herbacée dont l'épaisseur de substrat est comprise entre 10 et 21 cm ([Alexandri & Jones, 2007](#); [Takebayashi & Moriyama, 2007](#)). Toutefois, les toitures à base de sédum tendent vers des albédos plutôt bas qui peuvent même être inférieur à l'albédo du toit initial ([Dusza, 2017](#)). Les sédums sont des espèces qui évapotranspirent peu et n'apportent pas d'ombre. Le pouvoir rafraîchissant de ces toitures est peu significatif.

Plusieurs critères entrent en compte pour évaluer la contribution d'une ou plusieurs toitures végétalisées au rafraîchissement local. L'indicateur varie selon : la surface végétalisée par rapport à l'emprise au sol du bâtiment, l'épaisseur du substrat, le nombre de strates végétales présentes et en particulier la surface de la strate arborée si existante, ainsi que la présence d'un point d'eau en toiture pour l'irrigation de la végétation.

Type de toiture

Les toitures végétalisées sont un moyen efficace d'apporter de la nature en ville où l'espace est contraint. Les premières questions de ce critère « Toiture végétalisée » cherchent à caractériser le type de toiture. Les questions suivantes permettent d'affiner les caractéristiques des toitures végétalisées afin d'évaluer leur contribution au rafraîchissement de l'air ambiant.

		0	2
Type de toiture	Couleur claire	X	
	Couleur foncée	X	
	Couleur claire et végétalisée		X
	Couleur foncée et végétalisée		X
	Autres	X	

Tableau 3 : Attribution de points selon le type de toiture

Nombre de strates végétales

La diversité de la composition floristique améliore la capacité des toitures à rendre de nombreux services écosystémiques. Le nombre de strates peut prédire la diversité spécifique. Aussi, renseigner le type de strates végétales permettrait de s'approcher du type de végétation et d'avoir une information sur la biomasse des plantes laquelle est corrélée à la température du substrat. Cela signifie que selon les différentes formes de végétation (succulentes, herbacées graminoides et non graminoides, arbustes) l'effet de rafraîchissement sera plus ou moins important ([J. Lundholm et al., 2010](#); [J. T. Lundholm, 2015](#)). Toutefois, un des prérequis pour l'utilisation de BIODI-Bat est de limiter le nombre de questions afin que l'indicateur soit le plus massifiable possible. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de mutualiser les questions permettant de qualifier la diversité de la composition floristique et la quantité de biomasse en une unique question : le nombre de strates végétales. C'est une donnée facilement accessible pour les non experts, permettant ainsi de remplir plus aisément le questionnaire.

En toiture, le poids de la méthode de végétalisation a un impact important sur la structure du bâtiment. L'enjeu est alors de favoriser la diversité de strates en minimisant le poids de la végétalisation. Ainsi lorsqu'une unique strate végétale est implantée, il s'agit généralement de la strate herbacée ou sédum, deux strates correspondent généralement à un mélange de sédum et strate herbacée ou un mélange de strate herbacée et arbustive, trois strates à une

combinaison de strate herbacée, arbustive et arborée. Voir les types de végétalisation ([Adivet, 2023](#)). Le tableau ci-dessous renseigne ainsi le nombre de point attribué selon le nombre de strates végétales

Nombre de points associés		1	2	3
Nombre de strates végétales en toiture	1	X		
	2		X	
	3			X

Tableau 4 : Attribution de points selon le nombre de strates végétales en toiture

Surface de la couverture arborée

La transpiration des végétaux se fait par les stomates, de petits orifices présents sur les feuilles à l'origine des échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant. L'évaporation est donc corrélée à la surface foliaire (surface du feuillage). En effet, le degré d'efficacité de rafraîchissement dépend notamment de la densité du feuillage des arbres ([ADEME et al., 2021](#)). Pour une surface de toiture égale, la surface foliaire d'un arbre est supérieure à celle de la strate arbustive, herbacée et sédum. Le type de végétation n'étant pas pris directement en compte par le questionnaire, il a été choisi d'ajouter un critère sur la surface au sol du feuillage de la strate arborée puisque ce critère a un poids non négligeable sur le rafraîchissement de l'air ambiant et permet ainsi de préciser et réajuster le calcul de l'indicateur.

Ce critère dépend de la surface de la toiture végétalisée selon la formule suivante :

$$\text{Points couverture arborée} = 4 \times \left(\frac{\text{Surface au sol du feuillage}}{\text{Surface totale de la toiture végétalisée}} \right)$$

Épaisseur du substrat

Trois types de systèmes de toiture végétalisée se distinguent : extensif, semi-intensif et intensif. Elles se caractérisent notamment par leur substrat c'est-à-dire le support qui recrée les conditions essentielles au développement du type végétal qui est planté (en termes de ressources nutritives). La classification des toitures se base sur l'épaisseur du substrat et sur le type de végétation installée.

Système	Extensif	Semi-intensif	Intensif
Nature du support de culture	Substrat léger	Substrat léger	Terre ou substrat léger
Épaisseur du substrat	6 à 12 cm	12 à 30 cm	> 30 cm
Type de végétation	Vivaces, succulentes, bulbeuses, rhizomateuses, mousses	Plantes arbustives à faible développement, vivaces, Poacées, gazon	Pas de restrictions
Entretien	Minimal	Minimal	Régulier

Tableau 5 : Règles françaises pour la conception des toitures végétalisées ([Adivet, 2018](#); [Dusza, 2017](#))

L'épaisseur des sols est un enjeu pour le rafraîchissement de l'atmosphère pour plusieurs raisons. La pénétration des flux de chaleur diminue quand la profondeur du substrat augmente, puis tend rapidement à atteindre un plateau ([Dusza, 2017](#)). Par ailleurs, l'évapotranspiration est un échange entre l'eau présente dans le sol et l'atmosphère par l'intermédiaire de la végétation. La teneur en humidité du sol est donc importante pour la transpiration ([Gunawardena et al., 2017](#)). Si le sol est sec, il n'y aura pas d'eau disponible pour

l'évapotranspiration. L'épaisseur du substrat permet ainsi d'assurer plus longtemps les fonctions d'évapotranspiration des plantes puisque la capacité de stockage de l'eau dans le sol est supérieure. Enfin, comme montré dans le tableau ci-dessus, selon l'épaisseur de substrat, des types de végétation différents peuvent occuper la toiture. Augmenter l'épaisseur du substrat mène à une augmentation de la production de biomasse des plantes ([Dusza, 2017](#)) dont le développement foliaire est plus important et donc une capacité d'évapotranspiration supérieure.

Afin de traduire cela dans l'indicateur de co-bénéfices de rafraîchissement, chaque type de surface est multiplié par un coefficient qui augmente en fonction de l'épaisseur du substrat. Les valeurs sont les suivantes :

Type de toiture	Coefficient
Toiture extensive	1
Toiture semi-intensive	3
Toiture intensive	5

Tableau 6 : Attribution de points selon le type de système de toiture végétalisée

Les points reposent sur les types de toiture et les surfaces qu'ils occupent sur le toit. Une somme pondérée est réalisée de la façon suivante :

$$\text{Points épaisseur} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\text{Surface du type de toiture végétalisée}_i}{\text{Surface totale de la toiture végétalisée}} \right) \times \text{Coefficient du type de toiture}_i$$

Présence d'un point d'eau en toiture

Comme expliqué ci-dessus, la teneur en humidité du sol est particulièrement importante pour le processus d'évapotranspiration. Les précipitations et l'irrigation augmentent le potentiel hydrique du sol pour la transpiration ([Gunawardena et al., 2017](#)). Des arbres mal irrigués (en situation de stress hydrique) auront même tendance à limiter le rafraîchissement de la ville en piégeant le rayonnement solaire infrarouge ([Gill et al., 2007](#)). [L'article 2 de l'arrêté du 19 décembre 2023 portant application de l'article L. 171-4 du code de la construction et de l'habitation et fixant les caractéristiques minimales que doivent respecter les systèmes de végétalisation installés en toiture](#), indique que tout point de la toiture doit pouvoir être desservi par au minimum un point d'alimentation en eau, présent en toiture.

Afin d'évaluer la contribution d'une toiture végétalisée au rafraîchissement du territoire, un critère évalue la présence d'un point d'eau en toiture.

		0	1
Présence de point d'eau en toiture	Non	X	
	Oui		X

Tableau 7 : Points attribués selon l'irrigation d'une toiture végétalisée

Surface des toitures

Plus la surface de la toiture végétalisée est importante par rapport à la surface totale de la toiture, plus la surface foliaire (toute strate confondue) sera importante ce qui permet de maximiser le rafraîchissement provenant de la végétation.

Pour des raisons de structure notamment, il est rarement possible de mettre en place des toitures ayant la même surface que la toiture totale. Les points attribués selon les caractéristiques de la toiture (nombre de strates, épaisseur du substrat, etc.) sont donc pondérés par un coefficient variant selon la surface de végétalisation relative à la surface totale de la toiture. Ces seuils surfaciques se basent sur les seuils réglementaires de végétalisation des toitures fixés par la Loi Climat et Résilience (2021) et la Loi d'accélération des énergies renouvelables (2023). Celles-ci imposent de couvrir de végétation ou de modules de production d'énergie photovoltaïque 30% de la surface de la toiture de certains bâtiments neufs ou faisant l'objet d'une rénovation lourde dès le 1^{er} juillet 2023, et 50% de la toiture à partir du 1^{er} juillet 2027. Ce faisant, c'est davantage l'effort de végétalisation par le propriétaire qui est valorisé que la surface des espaces.

Le tableau ci-dessous renseigne les coefficients attribués selon la surface de végétalisation au calcul final de la contribution de la toiture au rafraîchissement ambiant (voir calcul [ci-dessous](#)).

Surface des toitures	Coefficient surfacique
Surface totale des toitures végétalisées inférieure à 30% de l'emprise du bâtiment	0,5
Surface totale des toitures végétalisées entre 30% et 50% de l'emprise du bâtiment	0,7
Surface totale des toitures végétalisées supérieur à 50% de l'emprise du bâtiment	1

Tableau 8 : Coefficients attribués selon la surface relative de végétalisation d'une toiture

POINTS TOITURES VEGETALISEES

Le total des points attribués au critère « Toitures végétalisées » correspond à la somme des points associés au nombre de strates végétales en toiture, la surface de la couverture arborée, l'épaisseur de substrat ainsi que la présence d'un point d'eau. A la somme de ces points est appliqué un coefficient multiplicateur selon le rapport entre la toiture végétale et l'emprise au sol du bâtiment (voir partie 0 *Surface des toitures*).

$$\begin{aligned} \text{Points totaux} = & \text{Coefficient surfacique de la toiture} \times (\text{Point nombre de strates} \\ & + \text{Point couverture arborée} + \text{Point épaisseur du substrat} \\ & + \text{Point irrigation}) \end{aligned}$$

Points Toitures végétalisées	Minimum points	Maximum points
	0 Pas de toiture végétalisée	17 Toiture végétalisée intensive sur plus de 50% de la surface de toiture, avec trois strates végétales, une couverture arborée recouvrant l'ensemble de la toiture végétalisée et la présence d'au moins un point d'eau

Tableau 9 : Attribution de points maximale aux toitures végétalisées

1.2 Façades végétalisées

Système de façade végétalisée

Les façades végétalisées contribuent au développement de la biodiversité dans les espaces urbains ([Madre et al., 2015](#)) en hébergeant une faune et une flore riche et diversifiée et jouent un rôle de corridor écologique. Elles fournissent également de la nourriture et servent de refuge à de nombreuses espèces d'insectes, araignées, oiseaux et escargots ([Chiquet, 2014](#)). Outre les plus-values pour la biodiversité locale que les façades végétalisées représentent, cette forme de végétalisation rend plusieurs services écosystémiques : dépollution atmosphérique, réduction de l'effet d'îlot de chaleur, isolation phonique et thermique, intersection et tamponnement des eaux pluviales, etc. ([Vandersmissen, 2021](#)).

Les façades végétalisées contribuent à rafraîchir l'air ambiant en transformant environ 60% du rayonnement solaire absorbé en chaleur latente qui diminue la température de leur environnement proche ([Stec et al., 2005](#)). Les premières questions de ce critère « Façade végétalisée » cherchent à caractériser le type de façade. Les questions suivantes permettent d'affiner les caractéristiques des façades végétalisées afin d'évaluer leur contribution au rafraîchissement de l'air ambiant.

Les façades végétalisées sont classées en deux principales catégories : les « Green Façades » (GF) et les « Living Walls » (LW) ([Köhler, 2008](#)).

Les *green façades* (exemples 1 et 3 du schéma ci-dessous) sont composées de plantes grimpantes comme le lierre qui s'enracinent directement dans le sol et ne nécessitent pas d'irrigation supplémentaire. Les plantes s'accrochent directement à la façade, grâce à leurs racines adventives spécialisées pour l'ancrage, ou qui grimpent le long d'un support fixé à la façade (souvent des câbles en acier), en s'y enroulant ou en s'y accrochant grâce à leurs organes spécialisés. Ce type de support permet de protéger la façade d'une éventuelle détérioration par les végétaux.

Dans le cas des *living walls* (exemple 2 du schéma ci-dessous), les plantes sont enracinées dans un milieu de culture apposé à la façade. Les nutriments minéraux sont apportés aux plantes sous forme d'ions inorganiques dans l'eau d'irrigation. Différentes technologies existent au sein des LW et se distinguent principalement par la nature et le cloisonnement de leur substrat.

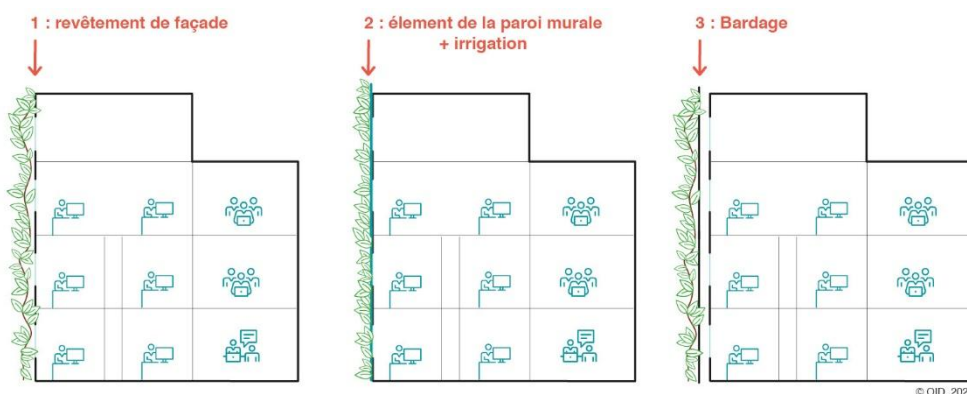


Figure 6 : Types de végétalisation de façade, OID 2021

Les GF, hébergent une faune et une flore diversifiée notamment lorsque la palette végétale est composée d'un pourcentage élevé d'espèces locales pour favoriser les interactions avec la faune du territoire. Les LW quant à elles sont des structures artificielles et souvent installées pour leurs caractéristiques esthétiques utilisant souvent des espèces horticoles ou exotiques. Pour ne prendre que quelques exemples, la végétation morte est fréquemment enlevée, l'eau d'irrigation peut contenir des fongicides, des pesticides, des acides, des engrais, etc. En conséquence, la biodiversité des insectes sur les LW est réduite aux espèces non sensibles à ces biocides et n'est pas toujours représentative de la biodiversité animale qui pourrait potentiellement y vivre ([Chiquet, 2014](#)).

Les études montrent clairement les bénéfices des GF par rapport aux LW pour la biodiversité, toutefois, en termes de capacité à rafraîchir, les LW sont plus efficaces. La moyenne d'abaissement de la température de la paroi extérieure par rapport à un mur de référence est plus important pour les LW que les GF ([Coma et al., 2017](#)). On peut estimer à 12,8 °C la différence de température à la surface d'une GF par rapport à un mur de référence, et jusqu'à 19,5 °C pour un LW.

Le choix du système optimal (LW ou GF) dépend du maître d'œuvre et des caractéristiques spécifiques du bâtiment (climat, orientation, usage, contraintes structurelles, budget, etc.). Les LW offrent une meilleure capacité de rafraîchissement, mais impliquent un coût d'investissement plus élevé, et les risques de fuites ou d'endommagements sont également importants à condition d'être traité comme un ouvrage technique à part entière, et non comme un simple élément décoratif. Par conséquent, il est essentiel d'évaluer chaque cas individuellement, en intégrant une approche de durabilité / cycle de vie : rapport « coût / bénéfice sur durée », incluant les économies d'énergie, les frais de maintenance, les coûts liés aux dégradations et la fin de vie du système. Dans le cadre des indicateurs de co-bénéfices, les deux systèmes sont valorisés également, car le but est d'avoir pour chaque projet le système le plus approprié et durable.

		0	8
Système de façade végétalisée	Non	X	
	Substrat apposé à la façade (LW)		X
	Plantes grimpantes (GF)		X

Tableau 10 : Points attribués selon le type de système de végétalisation de la façade

1.3 Récapitulatif des points pour la catégorie Bâti et Structure

La catégorie Bâti et Structure représente 25% de la note finale : 17% est attribué aux toitures et 8% aux façades.

	Critères	Minimum Points	Maximum Points
Toitures végétalisées	Présence d'une toiture Nombre de strates végétales Couverture arborée Type de toiture Présence d'un point d'eau Surface de la toiture	0	17
Façades végétalisées	Présence d'une façade végétalisée Système de végétalisation	0	8

Tableau 11 : Attribution de points maximale pour la catégorie Bâti et Structure

2. Espaces extérieurs

Par rapport aux espaces du bâti où les contraintes, notamment structurelles, sont fortes, les espaces extérieurs sont plus propices au développement des éléments de nature. La production de biomasse y est supérieure ce qui augmente l'évapotranspiration et la possibilité d'aménager des zones ombragées. C'est la raison pour laquelle cette catégorie a le plus de poids dans le calcul de la note globale du co-bénéfice de rafraîchissement lié à la nature (65 points sur les 100 au total).

Ce sont principalement des critères surfaciques qui sont pris en compte dans cette catégorie. Afin d'avoir une note bornée entre 0 et 65, les surfaces renseignées sont rapportées à la surface des espaces extérieurs. La surface des espaces extérieurs est calculée de la façon suivante :

$$\text{Surface espaces extérieurs} = \text{Surface totale de la parcelle} - \text{Emprise du bâti}$$

La note de rafraîchissement est donc relative à la proportion du bâti et des espaces extérieurs. Ce n'est pas une notation absolue qui est calculée. Cela signifie qu'à proportion bâti/espace extérieurs équivalente, deux parcelles de surface totale différente peuvent avoir la même note finale. Tout dépendra des éléments de nature présents sur la parcelle ainsi que de leur gestion (voir partie *Pratiques et gestion*).

2.1 Espaces imperméables et semi-perméables

Les surfaces complètement ou partiellement imperméabilisées impliquent une destruction complète des milieux naturels présents à l'origine, ainsi que l'interruption des cycles naturels en lien avec le sol ([ARB et al., 2022](#)). Les surfaces imperméables entravent l'infiltration de l'eau ainsi que leur fonction de support pour les végétaux. Ils n'ont donc aucune plus-value en termes de rafraîchissement et ne participent en rien au développement de la biodiversité. Au contraire, il arrive fréquemment que les matériaux utilisés stockent la chaleur notamment lorsque leur albedo est faible. Selon ([Armson et al., 2012](#)), dans un environnement exposé aux rayons du soleil, la température du sol enherbé est inférieure à celle de surfaces

minérales, néanmoins des mesures de température de confort ne permettent pas de mesurer un impact significatif de la pelouse. Durant la nuit toutefois, les zones herbacées ne réémettent pas de chaleur ce qui permet de réabaisser la température atmosphérique et limite l'effet d'îlot de chaleur urbain, à la différence des revêtements minéraux sombres.

Les surfaces minérales imperméables n'apportent pas de points. Les surfaces minérales semi-perméables et mixtes quant à elles contribuent à éviter la perturbation du cycle de l'eau local qui est indispensable pour le rafraîchissement basé sur le vivant. Cette solution est valorisée en attribuant un coefficient deux points.

Type d'espace	Coefficient
Surfaces minérales imperméables	0
Surfaces minérales semi-perméables et mixtes	2

Tableau 12 : Points attribués aux surfaces imperméables et semi-perméables

Les points attribués aux espaces imperméables et semi-perméables correspondent à la somme des surfaces minérales imperméables et des surfaces minérales semi-perméables et mixtes :

$$Points = \sum \left(\frac{Surface\ du\ type\ d'espace}{Surface\ totale\ des\ espaces\ extérieurs} \right) \times Coefficient\ type\ d'espace$$

2.2 Espaces en pleine terre

Les espaces en pleine terre sont considérés à travers leurs surfaces et le nombre de strates végétales.

La définition de pleine terre est complexe à appréhender. Une définition pourrait être établie en s'appuyant sur plusieurs critères, notamment : le revêtement en surface, la continuité verticale et la profondeur, la continuité horizontale des sols (ou trame brune), la qualité physico-chimique et biologique des sols, et la perméabilité ([ARB et al., 2022](#)). Ici, nous considérons la pleine terre comme une zone qui assure la continuité verticale jusqu'à la roche mère/nappe phréatique. La présence de réseaux n'est pas limitante.

La pleine terre, peut être considérée comme un optimum de capacité de sols urbains à remplir tout ou partie des fonctions écologiques exercées par un sol naturel, ce n'est pas le cas des espaces sur dalle dont la continuité verticale n'est pas assurée jusqu'à la roche mère. Les sols sont des systèmes complexes où une perturbation peut entraîner des répercussions sur d'autres paramètres. Le degré d'efficacité au rafraîchissement de la végétation varie selon la disponibilité en eau du sol, de la qualité biologique, chimique et physique des sols ([ADEME et al., 2021](#)), ainsi que l'épaisseur du sol. Les surfaces en pleine terre ayant subis moins de perturbation, les fonctions écologiques sont supérieures aux espaces sur dalle.

Le stockage de l'eau dans le sol responsable de l'évapotranspiration de la végétation dépend de plusieurs facteurs : épaisseur, texture, porosité ou encore teneur en matières organiques ([Geissen et al., 2013](#); [Somerville et al., 2020](#)). Or l'îlot de fraîcheur dépend du Réservoir Utile Potentiel (eau accessible par les plantes du sol) et du potentiel de prospection racinaire permettant à l'arbre de produire une plus grande surface de canopée ([Ow et al., 2019](#)). L'épaisseur des sols sur dalle est souvent inférieure à celle qu'aurait été le sol en pleine terre. L'indicateur de co-bénéfice différencie donc les surfaces en pleine terre des surfaces sur dalle.

Nombre de strates

La diversification de strates (type et hauteur de végétation) et de milieux au sein des espaces végétalisés permet de créer des nombreux habitats pouvant abriter une diversité d'espèces importante. Nous considérons trois strates végétales pour les espaces en pleine terre. La strate herbacée dominée par des fougères, des plantes à fleurs et des graminées. La strate arbustive comprend les haies champêtres, les arbustes et les jeunes arbres. La strate arborée composée d'arbres adultes module des paramètres environnementaux (ensoleillement, humidité des sols, etc.). Pour que la strate arborée soit effective, la densité d'arbres doit être supérieure à un individu pour 50m², ce qui est l'équivalent à un arbre pour deux places de parking. La diversification de strates complexifie les écosystèmes et permet d'avoir une richesse floristique et faunistique plus élevée. La diversité des strates est aussi un facteur pour le rafraîchissement. En raison d'une plus forte concentration de végétation, des espaces à la composition végétale plus complexe peuvent atteindre un effet de fraîcheur supérieur à des arbres isolés ([ADEME et al., 2021](#)). Il existe un effet synergique entre la strate arborée et les strates inférieures ([Amani-Beni et al., 2018](#)). L'effet de refroidissement est plus remarquable que lorsque le terrain est nu sous la strate arborée. Les arbres peuvent réduire la température de l'air de manière plus significative, augmenter l'humidité relative et améliorer le confort thermique.

Pour la même raison de simplification de l'outil que pour les toitures végétalisées, il a été choisi de ne pas ajouter de critère supplémentaire sur chaque type de végétation présent (herbacée, arbustive ou arborée). Seul le nombre de strate sera renseigné.

La littérature scientifique est faible sur l'apport de la strate arbustive au rafraîchissement des villes et se contente principalement de comparer la strate herbacée avec la strate arborée. Il en ressort que les zones enherbées contribuent de manière mesurée à rafraîchir la ville par rapport à la strate arborée. La couverture de la strate arborée sera donc traitée à part afin de favoriser ce critère important. Le critère Nombre de strates végétales sert seulement à identifier la diversité végétale.

Les surfaces des espaces en pleine terre sont prises en compte dans l'outil de la façon suivante :

$$Points = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\text{Surface Pleine terre avec } i \text{ strates}}{\text{Surface totale des espaces extérieurs}} \right) \times \text{Coefficient associé } i \text{ strates}$$

Type d'espace	Coefficient
Surface de pleine terre avec 1 unique strate végétale	18
Surface de pleine terre avec 2 strates végétales	20
Surface de pleine terre avec 3 strates végétales	22

Tableau 13 : Points attribué au nombre de strates en pleine terre

2.3 Espaces sur dalle

Les espaces sur dalle sont considérés à travers leurs surfaces et le nombre de strates végétales. Un espace sur dalle est défini comme un espace végétalisé dont la continuité

verticale n'est pas assurée jusqu'à la roche mère (présence de garage, parking souterrain, dalles de rez-de-chaussée). Les mêmes strates du critère Espaces de pleine terre sont considérées.

En rompant la continuité des sols, les caractéristiques pédologiques sont profondément modifiées : perte d'activité biologique (abondance de la faune du sol réduite), cycle de l'eau modifié, modification physique et chimique des sols, etc. Comme d'autres espèces vivant dans les sols, les communautés lombriciennes réagissent significativement au degré d'isolement et d'anthropisation de sols ([LPO, 2022](#)). Leur abondance est plus faible ce qui réduit les fonctions écologiques associées telles que la porosité de sols qui permet l'infiltration de l'eau. La faune du sol est indispensable pour avoir un sol riche en matière organique qui est indispensable au développement de la végétation.

Nombre de strates

Pour l'ensemble de ses raisons, à nombre de strate équivalent, les surfaces sur dalle ont un coefficient inférieur aux espaces de pleine terre. Le nombre de points est attribuée de la façon suivante :

$$Points = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{Surface\ Plaine\ terre\ avec\ i\ strates}{Surface\ totale\ des\ espaces\ extérieurs} \right) \times Coefficient\ associé$$

Les surfaces des espaces sur dalle sont prises en compte dans l'outil de la façon suivante :

Type de surface	Coefficient
Surface sur dalle avec 1 unique strate végétale	12
Surface sur dalle avec 2 strates végétales	14
Surface sur dalle avec 3 strates végétales	16

Tableau 14 : Points attribué au nombre de strates sur dalle

2.4 Surface de la couverture arborée

Les espaces végétalisés dominés par les arbres offrent le plus grand soulagement du stress thermique lorsqu'il est le plus nécessaire ([Gunawardena et al., 2017](#)). La strate arborée a un pouvoir de rafraîchissement bien supérieur à celui des plans d'eau et de la strate herbacée de par l'ombre projetée au sol ([Amani-Beni et al., 2018](#)) ainsi que la capacité d'évapotranspiration supérieure en raison de la densité foliaire importante. Plus la densité de feuillage est importante, plus l'effet de rafraîchissement est fort en journée ([ADEME et al., 2021](#)). La « surface de la couverture arborée » revient à renseigner la surface du feuillage qui est un indicateur plus simple à déterminer que l'identification des espèces sur site.

Il existe de nombreuses autres variables déterminant la capacité de rafraîchissement de la strate arborée. La capacité des arbres à rafraîchir peut varier d'un facteur 1 à 4 selon l'espèce et l'environnement (sol, albédo du feuillage, disponibilité en eau, etc.) ([ADEME et al., 2021](#)).

La sélection soigneuse des arbres est donc nécessaire afin de maximiser les bénéfices en termes de rafraîchissement. Toutefois, le choix de la palette végétale ne doit pas être motivé par ce seul facteur. Il sera toujours préférable de conserver les arbres existants et pour les arbres nouvellement plantés, de s'orienter vers des essences locales et adaptées au contexte environnemental afin de maximiser les interactions avec la biodiversité locale. Il est aussi recommandé de regrouper les arbres plutôt que de les isoler. Il a été démontré que les arbres en grappe pouvaient réduire la température de l'air de 0,96 à 1,59°C, tandis que la réduction de la température des arbres individuels variait de 0,77 à 0,88°C ([Amani-Beni et al., 2018](#)).

La surface de la couverture arborée est prise en compte dans l'outil de la façon suivante :

$$Points = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\text{Surface Pleine terre avec } i \text{ strates}}{\text{Surface totale des espaces extérieurs}} \right) \times \text{Coefficient associé}$$

Type de surface	Coefficient
Surface de couverture arborée	36

2.5 Milieux humides

Les milieux humides sont des milieux essentiels pour la faune et flore, surtout en zone urbaine où ces habitats sont peu présents ([Cerema, 2020](#)). La création de noues et de marres permettent de diversifier le paysage, créer des zones de nourrissage et de reproduction pour de nombreuses espèces et peuvent fournir différents services écosystémiques comme la rétention des eaux pluviales et la diminution de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

La capacité de rafraîchissement des masses d'eau est déterminée à la fois par ses propriétés inhérentes et par ses interactions avec les conditions climatiques environnantes. Le principal moteur de rafraîchissement est l'évaporation de la masse d'eau. Elle a lieu principalement pendant l'après-midi lorsque la température de l'eau est à son maximum et continue pendant la nuit avec une intensité décroissante ([Gunawardena et al., 2017](#)). Les propriétés thermiques de l'eau lui confèrent une forte inertie. Les plans d'eau agissent alors comme des tampons thermiques ([Oke, 1988](#)).

Les facteurs rafraîchissants sont multiples et leurs interactions complexes. On peut par exemple noter les conditions climatiques, la taille du plan d'eau, la température de l'eau et de l'air, la vitesse du vent, l'angle de rayonnement solaire, l'albédo de l'eau et de la zone environnante ([Amani-Beni et al., 2018](#)) la forme du plan d'eau ([Sun & Chen, 2012](#)) la composition de l'espace alentour (espaces ouverts ou fermés), l'ombrage du plan d'eau ([Gunawardena et al., 2017](#)), etc..

Certains paramètres permettent toutefois de donner facilement une image globale des milieux humides afin d'estimer leur capacité de rafraîchissement.

Pour les espaces en eau permanente, profondeur maximale des milieux humides

Une profondeur importante permet de conserver une masse d'eau plus fraîche et ainsi un différentiel de température supérieur entre l'eau et l'air. Ainsi l'évaporation augmente avec la profondeur ([Gunawardena et al., 2017](#)).

La profondeur des espaces en eau permanente est prise en compte de la façon suivante :

Profondeur	Points
Comprise entre 0 et 3m	2 x profondeur
Supérieure à 3m	6

Tableau 15 : Points attribués selon la profondeur des milieux humides en eau permanente

Berges végétalisées

Les berges végétalisées vont favoriser les échanges thermiques entre l'eau et l'atmosphère (ADEME et al., 2021). Toutefois, selon la disposition de l'espace, une végétation trop dense en bord de plan d'eau risque d'emprisonner l'air humide sous la canopée dans une zone abritée du vent. Cela a pour conséquence que l'évapotranspiration est réduite produisant des conditions thermiques inconfortables. Dans de tels cas, la morphologie urbaine doit être aménagée de manière à ce que les vents dominants puissent être dirigés à travers ces zones (Gunawardena et al., 2017).

La présence de berges végétalisées est prise en compte de la façon suivante :

		0	2
Présence de berges végétalisées	Non	X	
	Oui		X

Tableau 16 : Points attribués selon la présence de berges végétalisées

Surface des milieux humides étanches et non étanches

Deux types de milieux humides ont été considérés pour l'indicateur de potentiel d'accueil de la biodiversité qui est disponible aussi sur la plateforme R4RE :

- ≡ Les **milieux humides étanches** qui correspondent à des surfaces en eau naturelles ou semi-naturelles (mares, noues, bassin de rétention) caractérisées par un revêtement de fond ne permettant pas l'infiltration des eaux dans le sol (bâches, béton...).
- ≡ Les **milieux humides non étanches** qui correspondent à des surfaces eau naturelles ou semi-naturelles (mares, noues, bassin de rétention) permettant l'infiltration des eaux dans le sol.

Afin de conserver un questionnaire unique pour tous les indicateurs de BIODI-Bat, ces deux critères ont été conservés. Ils permettent de renseigner le total des surfaces en milieux humides. La notation de ces deux types d'espaces est égale. Quelle que soit la surface du milieu humide, la présence de tels espaces rapporte 7,8 points. La prise en compte de la surface est détaillée ci-après.

		0	7,8
Présence de milieux humides étanches ou non étanches	Non	X	
	Oui		X

Tableau 17 : Point attribués à la présence d'un milieu humide

Il faut savoir que les espaces végétalisés de composition complexe (strates diversifiées) et abritant une strate arborée ont une capacité de rafraîchissement supérieure à celle d'un lac qui peut enregistrer un refroidissement maximal de 2,9 C° contre 3,6 C° pour les parcelles végétalisées (Li & Yu, 2014). Les espaces végétalisés sont donc plus avantageux lorsqu'ils sont considérés de manière isolée, toutefois, la combinaison d'espaces végétalisés avec des espaces en eau entraîne des synergies en un « capital environnemental mutuellement

dépendant » ([Gunawardena et al., 2017](#)). Ainsi, bien que les milieux humides aient une capacité de rafraîchissement inférieure à celle des espaces végétalisés, une parcelle entièrement végétalisée contribuera moins au rafraichissement de l'environnement local que si une masse d'eau est présente.

Afin de rendre compte des effets synergiques qui existent entre les espaces végétalisés et les milieux humides, l'attribution des points des milieux humides n'est pas linéaire mais suit le modèle suivant :

- ≡ Lorsque le milieu humide est compris entre 0% et 20% des espaces extérieurs, la somme des points attribués par les caractéristiques du milieu suit la fonction suivante :

Points milieux humides

$$= \left(\sum \text{Caractéristiques intrinsèques} \right) - 300 \times \frac{(\text{Surface espaces extérieurs hors milieux humides} - 0,8 \cdot \text{Surface milieux extérieurs})^2}{\text{Surface espaces extérieurs}^2}$$

La somme des points des caractéristiques intrinsèques prend en compte : la profondeur des espaces en eaux permanents, la présence de berges végétalisées, la présence d'un milieu humide.

- ≡ Lorsque le milieu humide est compris entre 20% et 80% des espaces extérieur, la somme des points gagnés par les caractéristiques du milieu suit la fonction suivante :

$$\text{Points milieux humides} = \sum \text{Caractéristiques intrinsèques}$$

Ainsi, selon la surface qu'occupent les milieux humides par rapport aux espaces extérieurs, ils rapportent entre 0 et 16 points s'ils représentent moins de 20% de la surface des espaces extérieurs, puis rencontrent un seuil à 16 points s'ils représentent plus de 20% de la surface des espaces extérieurs.

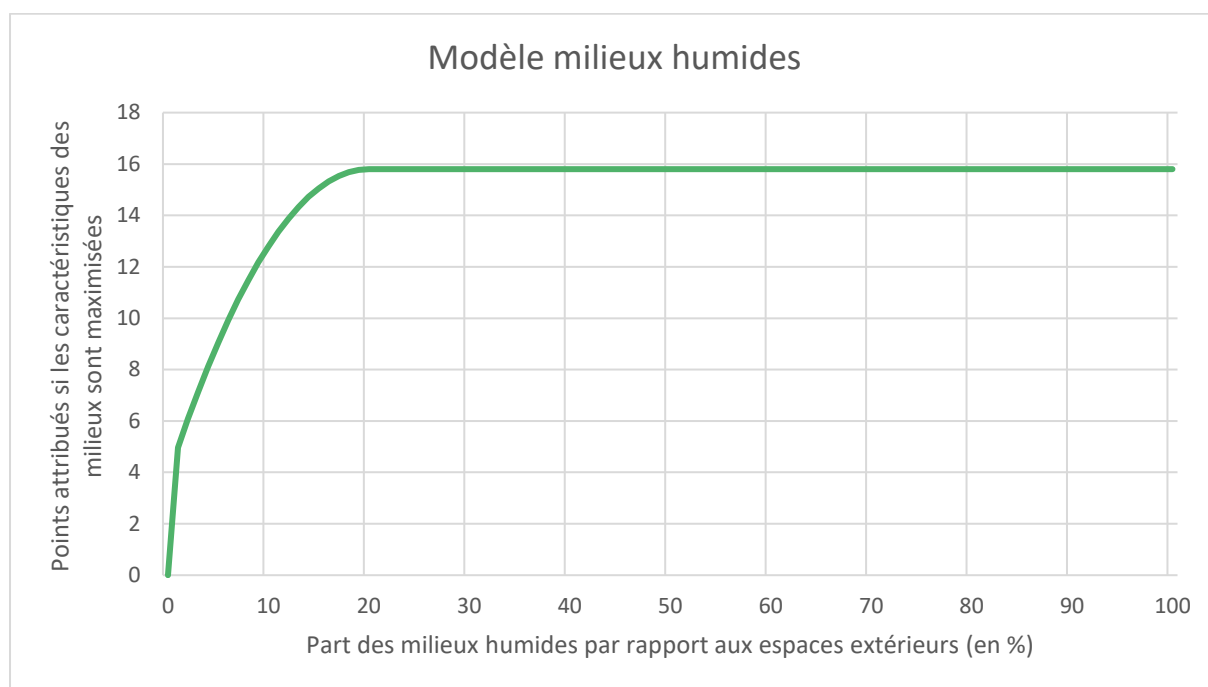


Figure 7 : Modèle permettant l'attribution de points des milieux humides selon leur surface par rapport à celle des espaces extérieurs

Ce modèle attribue le nombre de points aux espaces extérieurs selon l'effet de la surface de la masse d'eau. Un seuil est atteint lorsque la surface des masses d'eau dépasse 20% des espaces extérieur. Ce seuil a été choisi de manière arbitraire. Cela permet de prendre en compte deux effets :

- ≡ Les espaces végétalisés en pleine terre composés de plusieurs strates et abritant une couverture arborée non négligeable ont une capacité de rafraîchissement supérieure aux masses d'eau. Il faut donc que le maximum de points attribués aux masses d'eau soit inférieur à celui des espaces végétalisés complexes.
- ≡ Si le modèle était linéaire, il n'y aurait aucun effet synergique modélisé. Les parcelles entièrement végétalisées sans milieu humide seraient toujours valorisées. L'optimum ne se trouve pas lorsque 100% de la parcelle est végétalisée ou quand 100% de la parcelle est recouverte d'un espace en eau mais lorsque 80% de la parcelle est végétalisée et 20% recouverte d'un milieu humide. Cet optimum a été choisi de manière arbitraire.

Si l'on considère une parcelle dont les espaces extérieurs sont composés de surfaces végétalisées ayant le maximum de points (en pleine terre, composées de 3 strates végétales et d'une couverture arborée recouvrant la totalité des espaces végétalisés extérieurs) ainsi que de milieux humides ayant aussi le maximum de point (profondeur supérieure ou égale à 3m, dont les berges sont végétalisées), alors selon la proportion surfacique de l'un par rapport à l'autre, les points totaux attribués aux espaces extérieurs suivent la courbe suivante :

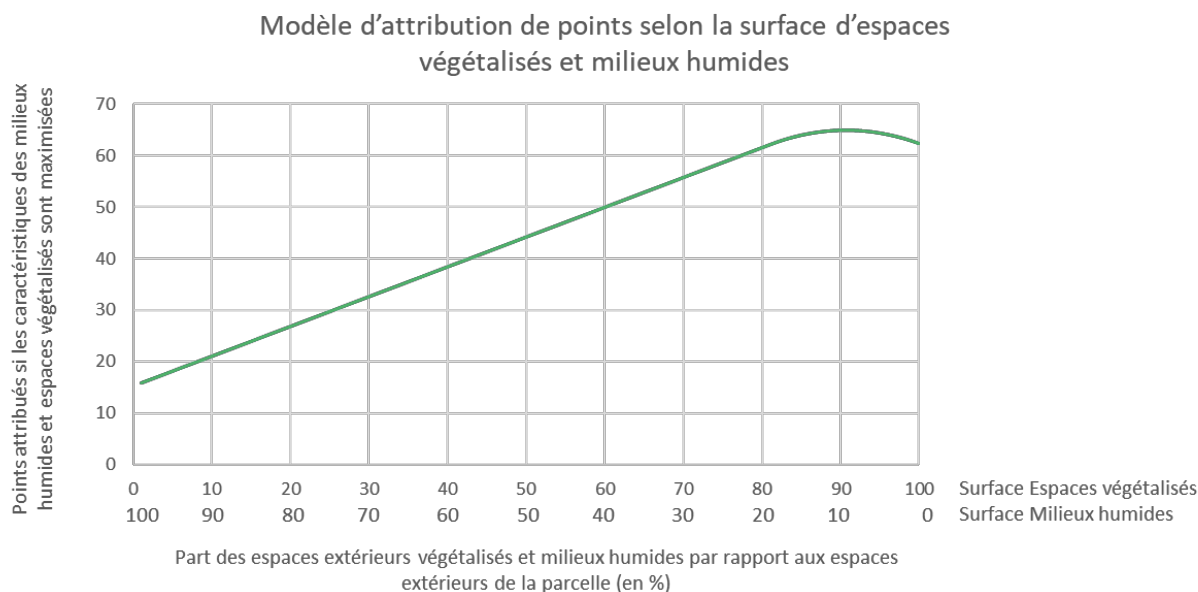


Figure 8 : Modèle d'attribution de points selon la surface d'espaces végétalisés et milieux humides

Les milieux humides sont des systèmes complexes. L'indicateur de co-bénéfice tente d'évaluer une contribution de rafraîchissement en prenant en compte une modélisation simple se basant sur seulement quelques critères facilement renseignables. Le résultat sortant a pour objectif de donner un ordre d'idée de la capacité de la parcelle à contribuer au rafraîchissement du territoire.

Nota bene : Même si les plans d'eau réduisent la température de l'air ambiant, l'augmentation de l'humidité de l'air due à l'évaporation peut dégrader le confort thermique. En outre, lorsque l'eau est plus chaude que la température de l'atmosphère (en automne ou la nuit), la masse d'eau a un effet négatif sur le confort thermique, limitant le refroidissement et le confort thermique dans l'environnement ([ADEME et al., 2021](#)).

2.6 Récapitulatif des points pour la catégorie Espaces extérieurs

La catégorie Espaces extérieur représente 65% de la note finale.

	Critères	Minimum Points	Maximum Points
Espaces imperméables et semi-perméables	Surface	0	2
Espaces en pleine terre	Surface Nombre de strates	0	22
Espaces sur dalle	Surface Nombre de strates	0	16
Couverture arborée	Surface	0	36
Milieux humides	Surface Profondeur Berges végétalisées	0	15,8

Tableau 18 : Attribution de points maximale pour la catégorie Espaces extérieurs

3. Pratiques et gestion

Chaque bâtiment a des choix de pratiques et de gestion qui lui sont propres. La gestion écologique est une gestion des espaces végétalisés respectueuse de la biodiversité. Il s'agit de favoriser la végétation spontanée, de proscrire l'apport d'intrants source de pollution (pesticides, intrants, etc.) et de gérer de façon différenciée chaque strate végétale selon leurs besoins en fonction des usages.

3.1 Flore

Elagage/Taille raisonné

La taille raisonnée, ou taille douce, est une technique d'entretien qui permet d'adapter la taille à la physiologie de l'individu et de sélectionner attentivement les éléments à traiter au sein de l'arbre. Cette technique permet de laisser un développement foliaire assez important qui augmente à la fois l'ombrage et le processus de transpiration de la végétation.

		0	6
Elagage/Taille raisonnée	Non	X	
	Oui		X

Tableau 19 : Points attribués selon les pratiques de taille de la flore

3.2 Eau

La capacité de la végétation à contribuer au rafraîchissement du territoire varie fortement selon l'eau disponible dans les sols. L'effet de rafraîchissement peut alors être divisé par 4 durant les vagues de chaleur (ADEME et al., 2021). Dans ce cas, l'utilisation d'un système d'irrigation est recommandée afin d'améliorer l'effet de rafraîchissement. Il faut toutefois réguler son utilisation selon la disponibilité en eau dans les nappes phréatiques. En période de sécheresse par exemple, il est préférable d'économiser l'eau pour des usages prioritaires afin de ne pas augmenter la pression sur la ressource. Deux systèmes d'irrigation de l'eau sont conseillés et valorisés dans l'indicateur de co-bénéfices : l'utilisation d'un système d'irrigation raisonné, type goutte à goutte qui permet de mieux réguler l'arrosage et d'économiser de l'eau ; un dispositif de récupération des eaux de pluie. Le confort thermique est d'autant plus important lorsque l'arrosage est réalisé en prévision d'une forte chaleur, c'est-à-dire 3 à 4 jours avant le début d'une canicule (ADEME et al., 2021).

		0	2
Système d'arrosage raisonné	Non	X	
	Oui		X
Dispositif de récupération des eaux de pluie	Non	X	
	Oui		X

Tableau 20 : Points attribués selon le système d'irrigation installé sur la parcelle

Les points attribués à la gestion de l'eau sur le site correspondent à la somme des mesures mises en œuvre :

$$\text{Points} = \sum \text{Coeff mesures mises en oeuvre}$$

3.3 Récapitulatif des points pour la catégorie Pratique et gestion

La catégorie Pratique et gestion représente 10% de la note finale.

	Critères	Minimum Points	Maximum Points
Flore	Elagage/taille raisonné	0	6
Eau	Système d'arrosage raisonné Dispositif de récupération des eaux de pluie	0	4

Tableau 21 : Attribution de points maximale pour la catégorie Pratiques et Gestion

INDICE DE FIABILITE

Lors de l'évaluation des co-bénéfices, un indice de fiabilité, noté I, est calculé selon le taux de complétion. Pour l'indicateur de rafraîchissement il y a donc quatre indices de fiabilité : l'un global à l'échelle de l'indicateur, et un propre à chaque catégorie. L'indice est donné sur une échelle de 1 à 5, arrondi à l'unité supérieure (borné à 5).

1. Bâti et structure

Le calcul de l'indice de fiabilité pour la catégorie Bâti et structure est basé sur le taux de remplissage des questions de la catégorie.

$$I_{Cat.1} = \frac{nb \text{ de questions répondues}}{nb \text{ de questions total}}$$

2. Espaces extérieurs

Le calcul de l'indice de fiabilité pour la catégorie Espaces extérieurs tient compte de la cohérence entre les surfaces renseignées pour les différents espaces et la surface totale de la parcelle, ainsi que du remplissage des questions supplémentaires sur les caractéristiques des milieux humides et la surface de la couverture arborée.

$$I_{Cat.2} = \left(\frac{\text{Somme des surfaces renseignées hors couverture arborée}}{\text{Surface des espaces extérieurs}} \times \frac{10}{13} \right) + \left(\frac{nb \text{ questions supplémentaires}}{nb \text{ de questions}} \times \frac{3}{13} \right)$$

3. Pratiques et gestion

Le calcul de l'indice de fiabilité pour la catégorie Pratiques et gestion est basé sur le taux de remplissage des questions de la catégorie.

$$I_{Cat.3} = \frac{nb \text{ de questions répondues}}{nb \text{ de questions total}}$$

4. Co-bénéfice « Rafraîchissement »

Le calcul de l'indice de fiabilité pour la note de co-bénéfice « Rafraîchissement » est basé sur les indices des trois catégories selon le poids qu'ils représentent dans la note finale. Si une catégorie n'est pas remplie ou ne possède pas de note, la note globale prend en compte uniquement les scores disponibles.

$$I_{global} = \frac{I_{Cat.1} \times 25 + I_{Cat.2} \times 65 + I_{Cat.3} \times 10}{100}$$

DISCUSSION

Ce travail a pour objectif de décrire la capacité des éléments de nature et des modes de gestion d'une parcelle et d'un bâtiment à répondre aux défis sociétaux tout en apportant des bénéfices à la biodiversité.

Les indicateurs de co-bénéfices jonglent entre deux aspirations : estimer les bénéfices rendus par les éléments de nature tout en assurant une faisabilité opérationnelle. Afin de répondre à ce besoin d'opérationnalité, le nombre de critères évalués a dû être réduit pour limiter l'effort de remplissage, et les formulations ainsi que la précision des données ont été adaptées à une prise en main par des non experts. Des questions relatives aux essences d'arbres, à la disposition des espaces extérieurs, le type de végétation présents en toiture ou dans les espaces extérieurs ont été écartées pour faciliter la collecte de données. Plusieurs éléments réduisent la précision potentielle : les passages sur site ne sont pas systématiques pour remplir le questionnaire et les utilisateurs ne sont pas forcément experts sur les sujets de biodiversité. Un passage sur site permettrait d'affiner l'analyse en prenant en compte le ressenti des usagers et en considérant des critères plus précis comme ceux listés ci-dessus.

D'autre part, il faut veiller à la qualité des données collectées, dans la mesure où quelques erreurs peuvent significativement affecter la note finale. Les surfaces extérieures sont souvent mesurées avec des logiciels tels que Géoportail ou Google Maps qui ne représentent pas toujours la réalité d'un site à l'instant présent. De même, les photographies aériennes ne représentent pas la réalité des strates végétales présentes sur le site au moment du remplissage du questionnaire et la saisonnalité peut avoir une influence non négligeable sur l'estimation des surfaces végétalisées. De plus, la surface foliaire de nombreuses essences varie selon la saison. Cela peut avoir un impact direct sur l'estimation des surfaces renseignées. Afin de réduire ces biais, un [tutoriel de remplissage](#) a été mis à disposition de l'utilisateur.

Comme tout indicateur, les co-bénéfices liés à la nature présents sur un site reposent sur un référentiel qui est une simplification de la réalité. Les co-bénéfices liés aux éléments de nature sont complexes à quantifier et à mesurer car ils dépendent de nombreux paramètres qui interagissent les uns avec les autres. Les indicateurs développés permettent d'estimer les co-bénéfices en comparant les mesures apportant le plus d'aménités environnementales les unes par rapport aux autres. Ce sont des indices qui sont livrés. Il n'y a pas de calcul d'un bénéfice absolu comme un gain de température dans le cas du co-bénéfice « Rafraîchissement ». Le choix des critères utilisés, l'affectation des coefficients et des seuils reposent sur la littérature scientifique et de la littérature grise sur le sujet, ainsi que d'échanges avec des chercheurs et experts (bureaux d'études). Il en ressort que les critères retenus sont relativement consensuels pour décrire le rafraîchissement : une toiture végétalisée par exemple, par le développement plus faible de la végétation en raison de enjeux liés à la structure du bâtiment, mais aussi la hauteur de la toiture et le peu d'ombre apportée, sera moins efficace pour lutter contre les chaleurs qu'une végétation arborée en pleine terre où le développement foliaire peut être maximisé. La principale incertitude de ce référentiel réside dans l'affectation des pondérations, qui décrivent dans quelle mesure ou à quel point un critère va permettre de répondre aux défis du territoire et jusqu'à quel périmètre spatial les bénéfices se font ressentir. Dans le contexte actuel où l'on cherche à réduire le déclin de la biodiversité, de plus en plus de travaux de recherche sont entrepris sur les services écosystémiques qui représentent un argument supplémentaire pour réduire l'impact anthropique. Ce référentiel sera mis à jour avec l'évolution des connaissances scientifiques sur l'ensemble de ces sujets.

CONCLUSION

Le développement d'indicateurs de co-bénéfices doit permettre aux entreprises de l'immobilier et aux acteurs de la ville d'intégrer de manière simple les bénéfices liés aux éléments de nature dans la conduite de leurs activités. Outre l'enjeu environnemental, les co-bénéfices par leur utilité sociale sont des arguments supplémentaires qui peuvent être actionnés afin de renforcer la nature en ville. Les indicateurs ont vocation à être utilisés comme outils d'aide à la décision pour appuyer une stratégie biodiversité à l'échelle d'un patrimoine selon les défis sociétaux ainsi que la capacité des sites à répondre à ces défis. La prise en compte des enjeux écologiques est primordiale afin de conduire une stratégie biodiversité efficiente. Porter une attention particulière à la cohérence écologique du projet permettra de rendre les écosystèmes fonctionnels et ainsi d'assurer la résilience des fonctions écologiques. Les co-bénéfices sont des indicateurs d'utilité sociale qui doivent aussi être vertueux pour les autres espèces. L'aménagement de parcelle ne doit pas être motivé par le prisme uniquement social ou le risque est alors de nuire à la biodiversité locale. L'indicateur de potentiel d'accueil de biodiversité disponible sur R4RE permet une première mesure simple et harmonisée à l'échelle d'un bâtiment existant ou d'un patrimoine de sa favorabilité pour la biodiversité. Un indicateur évaluant l'impact sur la biodiversité d'un nouveau projet en phase conception sera bientôt disponible sur la plateforme [Resilience for Real Estate \(R4RE\)](#) de l'[Observatoire de l'immobilier durable](#).

Les indicateurs mis à disposition sur R4RE n'ont pas vocation à remplacer une expertise sur le terrain. Ils peuvent être utilisés comme outil d'aide à la décision pour appuyer une stratégie biodiversité et prioriser l'action à l'échelle d'un patrimoine immobilier. Ils permettent aux différents acteurs de s'appuyer sur des méthodologies uniformisées afin de rendre leurs résultats comparables.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, Leroy, M., Marie, H., Lapray, K., Musy, M., Rodler, A., & Guernouti, S. (2021). *Rafraîchir les villes* (011441; Ils l'ont fait). ADEME. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4649-rafraichir-les-villes.html>

Adivet. (2023). *Le GreenRoofScore, le référentiel pour évaluer les performances des toitures végétalisées*. <https://www.adivet.net/ressources/publications-et-veille>

Alexandri, E., & Jones, P. (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42(8), 2835-2849. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.004>

Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G., & Xu, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days : A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.016>

Apur. (2012). *Les îlots de chaleur urbains à Paris—Cahier #1*. https://www.apur.org/sites/default/files/documents/publication/documents-associes/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf?token=HAr5ynNS

ARB, Deboeuf De Los Rios Serrano, G., Barra, M., & Grandin, G. (2022). *Renaturer les villes*. ARB. <https://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/renaturer-les-villes/>

Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Caciolo, M. (2010). *Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraîchissement des immeubles de bureaux* [Centre énergétique et procédés]. <https://pastel.hal.science/pastel-00583247>

Cerema. (2020, août 27). *Milieux humides : Préservation de la biodiversité en milieu urbanisé*. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/milieux-humides-preservation-biodiversite-milieu-urbanise>

Chiquet, C. (2014). *THE ANIMAL BIODIVERSITY OF GREEN WALLS IN THE URBAN ENVIRONMENT*. <https://eprints.staffs.ac.uk/2381/>

Coma, J., Pérez, G., De Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings : A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>

Constitution de l'Organisation mondiale de la Santé (1946). <https://apps.who.int/gb/bd/PDF/bd47/FR/constitution-fr.pdf?ua=1>

Cordeau, E., & Valette, E. (2010). *Les îlots de chaleur – Répertoires des fiches connaissances*. IAU-IDF. https://www.institutparisregion.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_774/Les_ilots_de_chaleur_urbains_REPERTOIRE.pdf

Drias. (s. d.). *Définition des indicateurs*. <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/181>

- Dusza, Y. (2017). *Toitures végétalisées et services écosystémiques : Favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale* [IEES - Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris]. <https://hal.science/tel-01587757/>
- Fehrenbach, H., Grahl, B., Giegrich, J., & Busch, M. (2015). Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(11), 1511-1527. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0955-y>
- Geissen, V., Wang, S., Oostindie, K., Huerta, E., Zwart, K. B., Smit, A., Ritsema, C. J., & Moore, D. (2013). Effects of topsoil removal as a nature management technique on soil functions. *CATENA*, 101, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.002>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). *Adapting Cities for Climate Change : The Role of the Green Infrastructure* (Alexandrine Press, Vol. 33). <https://www.ingentaconnect.com/content/alex/benv/2007/00000033/00000001/art00008>
- Greuillet, C., & Galsomies, L. (2013). *L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air*. https://www.appa.asso.fr/wp-content/uploads/2020/03/Greuillet_Galsomies_2013.pdf
- Guetté, A., Carruthers-Jones, J., Godet, L., & Robin, M. (2018). « Naturalité » : Concepts et méthodes appliqués à la conservation de la nature. *Cybergeogeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.29140>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Ilots de Fraicheur Urbains*. (2015). INSA Toulouse, Métropole de Toulouse, LMDC Toulouse, ENSA, LRA. https://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/projets/ifu/Projet_IFU_Rapport_Final.pdf
- INSEE. (2020). *En France, neuf personnes sur dix vivent dans l'aire d'attraction d'une ville*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806694>
- Julien Fosse. (2019). *Objectif « Zéro artificialisation nette » : Quels leviers pour protéger les sols ?* France Stratégie. <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-rapport-2019-artificialisation-juillet.pdf>
- Kong, F., Yan, W., Zheng, G., Yin, H., Cavan, G., Zhan, W., Zhang, N., & Cheng, L. (2016). Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.005>
- Li, C., & Yu, C. W. (2014). Mitigation of Urban Heat Development by Cool Island Effect of Green Space and Water Body. In A. Li, Y. Zhu, & Y. Li (Éds.), *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning* (Vol. 261, p. 551-561). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39584-0_62
- LPO. (2022). *Sols vivants : Alternatives à l'artificialisation des sols et réhabilitation des sols dégradés*. https://www.lpo.fr/media/read/20425/file/LIVRABLE%20SOLS%20VIVANTS_Web.pdf
- Madre, F., Clergeau, P., Machon, N., & Vergnes, A. (2015). Building biodiversity : Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation*, 3, 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.11.016>
- OID. (2022). *Inclibâti, un indice de risque climatique pour le bâtiment*. <https://www.taloen.fr/ressources/c824dc84-12e6-4b3f-9d2e-10f3d3977a8e>
- OID. (2024). *Guide des actions adaptatives au changement climatique*. <https://www.taloen.fr/ressources/35c325d0-41a0-423b-8d16-2bbc26cd3875>

- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 12(4), 471-508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- OMS. (2016). *Urban green spaces and health: A review of evidence*. https://www.researchgate.net/publication/309674084_Urban_green_spaces_and_health_-_a_review_of_evidence
- Ow, L. F., Ghosh, S., & Yusof, M. L. M. (2019). Growth of Samanea saman : Estimated cooling potential of this tree in an urban environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 41, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.03.021>
- Solecki, W. D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., & Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Environmental Hazards*, 6(1), 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.002>
- Somerville, P. D., Farrell, C., May, P. B., & Livesley, S. J. (2020). Biochar and compost equally improve urban soil physical and biological properties and tree growth, with no added benefit in combination. *Science of The Total Environment*, 706, 135736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135736>
- Stec, W. J., Van Paasen, A., & Maziarz, A. (2005). *Modelling the double skin façade with plants* (Vol. 35). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778804002531>
- Sun, R., & Chen, L. (2012). How can urban water bodies be designed for climate adaptation? *Landscape and Urban Planning*, 105(1-2), 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.018>
- Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8), 2971-2979. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.017>
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A. J., Li, F., & Chen, H. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 54(1), 75-84. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>
- UICN. (2016). *WCC-2016-Res-069-FR Définition des solutions fondées sur la nature*. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2016_RES_069_FR.pdf
- Vandersmissen, G. (2021). *Les façades végétalisées : Analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision*. <https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/13260/4/TFE%20Gauthier%20Vandersmissen.pdf>
- Walz, U., & Stein, C. (2014). Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany. *Journal for Nature Conservation*, 22(3), 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.01.007>
- WWF. (2016). *Rapport Planète Vivante 2016, Risque et résilience dans l'Anthropocène*. WWF. https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2017-07/161027_rapport_planete_vivante.pdf

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé par Philomène Pagès, chargée de projets sénior - OID, sous la responsabilité de Delphine Mourot, responsable de programme – OID, avec l'appui de Aminetou Ciré, chargée de projets sénior - OID.

L'équipe du projet remercie chaleureusement l'ensemble des personnes qui ont contribué à ce référentiel, scientifiques, professionnels de l'immobilier, experts, associations, en particulier :

- Anne-Claire Barberi – Perial AM
- Benjamin Bergerot – Université de Rennes, Laboratoire ECOBIO
- Amiirah Burahee - Greenaffair
- Alain Catherine - COVEA Immobilier
- Chloé Chary – GreenAffair
- Stéphanie Chevallier – Groupe RATP
- Quitterie Delion – LINKCITY
- Zénaïde Dervieux – MNHN
- Nelly Faget – MNHN
- Wendy Fajardo Capador – MNHN
- Imen Ghalem – MNHN
- Aurélien Judic – MNHN
- Ulysse Gaignard – Amundi immobilier
- Christine Grezes – LINKCITY
- Fabien Kufel – UICN
- Nathalie Machon – MNHN
- Caroline Martin – Groupe Essor
- Jérôme Narcisse – Wild Trees
- Lise Ropars – MNHN
- Marie Spanier – MNHN
- Stéphane Tatard - COVEA Immobilier
- Yannick Tchana – Perial AM

A PROPOS



L'Observatoire de l'Immobilier Durable – OID – est l'espace d'échange indépendant du secteur immobilier sur le développement durable et l'innovation. Penser l'immobilier responsable est la raison d'être de l'OID qui rassemble plus de cent membres et partenaires parmi lesquels les leaders de l'immobilier en France sur toute sa chaîne de valeur. L'OID est une association qui participe activement à la montée en puissance des thématiques ESG en France et à l'international.

<https://o-immobilierdurable.fr/>



Biodiversity Impulsion group (BIG) est un programme de recherche appliquée et d'action collective lancé par l'OID afin d'approfondir les thématiques de biodiversité via le développement d'outils d'aide à la décision et de pilotage pour les acteurs de l'immobilier et de la ville. BIG met à disposition des guides et des supports pédagogiques facilitant la transition de ces entreprises vers un modèle respectueux du vivant. Le programme est composé de vingt entreprises partenaires, issues du monde de l'immobilier et de la ville.

<https://biodiversity-impulsion-group.fr/>

NOUS CONTACTER

Observatoire de
l'Immobilier Durable
12 rue Vivienne
75002 Paris
Tél +33 (0)7 69 78 01 10

r4re@o-immobilierdurable.fr

**o-immobilierdurable.fr
www.taloen.fr**