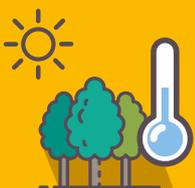




Octobre 2024

L'îlot de chaleur urbain

Formes urbaines et ventilation





Un enjeu de résilience face au changement climatique



Quartier Hauts-du-Chazal à Besançon (2021)

Dans un contexte de changement climatique et d'élévation des températures entre autres, le développement de la résilience des territoires doit s'appuyer sur la recherche d'une meilleure adaptation des constructions et des espaces publics par leurs aménagements.

La surchauffe urbaine est liée aux différents modes d'occupation des sols : place et types de végétation, typologies de revêtements et de matériaux de construction, choix de coloris... sont autant de facteurs qui jouent un rôle dans le réchauffement urbain, en fonction de leurs caractéristiques thermiques.

Il est important d'étudier l'influence de ces différents paramètres sur les températures de l'espace public afin d'orienter l'aménagement des espaces vers une meilleure adaptation : cette troisième publication s'intéresse en particulier aux rôles des formes urbaines.

La morphologie des bâtiments et leur disposition au sein d'un espace contribuent ou, au contraire, limitent la surchauffe urbaine. Les perspectives climatiques appellent à repenser les modes d'urbanisation et notamment à privilégier des formes urbaines favorisant la ventilation des villes.

Directeur de la publication : Michel Rouget - Directrice des études : Isabelle Maquin -
Rédaction : Noémie Dufernez, Gaëlle Duménil, Benjamin Gracieux - Conception graphique et
mise en page : Dorianne Noriega - Pictogrammes : Freepik - Impression : AUDAB.

Sommaire

- 4** La surchauffe urbaine, causes et effets
- 6** Quelles sont les réponses possibles ?
- 7** Circulation des vents et surchauffe urbaine
- 8** Ventilation et formes urbaines
- 9** La modélisation 3D comme outil d'aménagement du territoire
- 13** Recommandations pour une bonne ventilation des espaces urbains

Cette publication est le deuxième numéro d'une série de trois, issue de l'Observatoire des îlots de chaleur urbains de l'AUDAB, étudiant les solutions possibles pour limiter et réduire la surchauffe urbaine.

Retrouvez les deux autres publications, la première *La nature en ville* parue en mars 2023 et *Matériaux et couleurs* diffusée en octobre 2024, dans une [actualité dédiée sur le site web de l'agence](#).



La surchauffe urbaine, causes et effets

Les modes d'urbanisation remis en cause

Les secteurs urbanisés se caractérisent par des températures plus élevées, de jour comme de nuit, par rapport aux périphéries davantage agricoles ou naturelles. Ce phénomène est particulièrement marqué en période estivale où la fraîcheur nocturne est fortement limitée. La surchauffe urbaine qui en résulte est une problématique complexe qui a des répercussions sur les bâtiments, les espaces publics et donc sur les habitants des villes.



MULTIPLICATION PAR 3 DES VAGUES DE CHALEUR D'ICI 2050 À BESANÇON

Cette problématique est d'autant plus prégnante dans le contexte du changement climatique : toutes les projections climatiques, y compris les plus optimistes, prévoient une augmentation des températures moyennes mais aussi de la fréquence et de l'intensité des épisodes de canicule d'ici 2050.

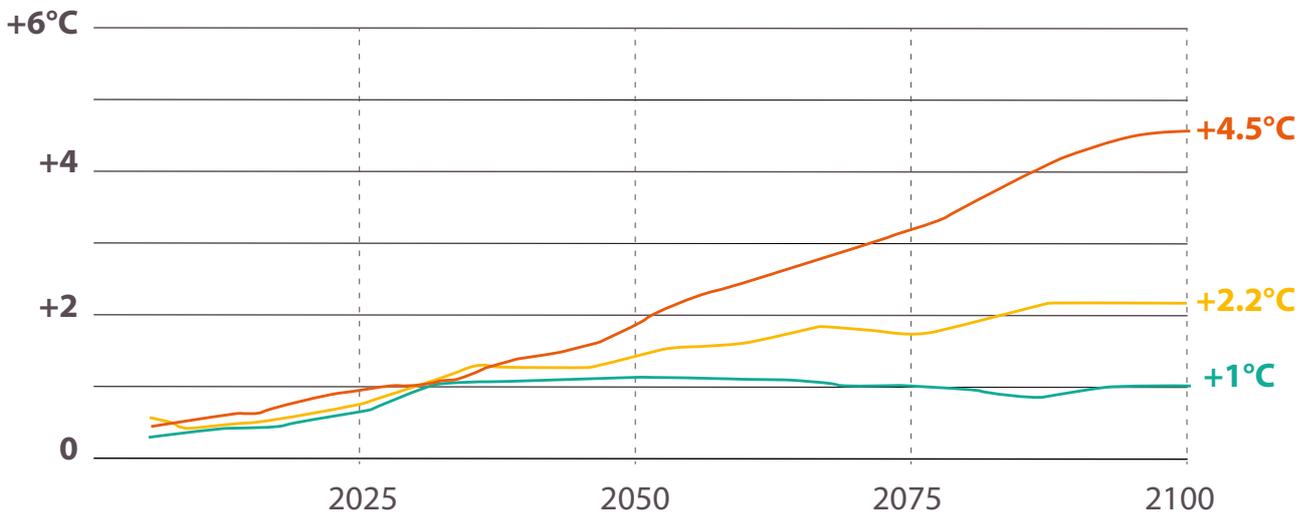
La surchauffe urbaine dépend principalement de cinq grandes causes qui sont liées à l'aménagement du territoire et au cadre bâti :

- le manque de rafraîchissement urbain par évaporation (du fait de la faible place de la nature en ville¹) ;
- la forte inertie thermique des espaces publics ou du cadre bâti (en raison des choix de matériaux et coloris qui tendent à concentrer la chaleur) ;
- les formes urbaines qui favorisent l'accumulation de chaleur ou ne facilitent pas la ventilation (principe de rues canyons) ;
- la généralisation d'équipements techniques qui génèrent des dégagements de chaleur anthropique.

À l'échelle des espaces extérieurs, les solutions de rafraîchissement urbain interviennent sur les différents paramètres influant le ressenti thermique des habitants (rayonnement du soleil et des surfaces, humidité, vents en plus des températures d'air) où l'accès à l'ombre est un facteur prépondérant du confort avec la présence de l'eau et du végétal.

1cf. la publication de mars 2023 de l'observatoire des îlots de chaleur urbains sur la "nature en ville"

Évolution de l'écart de température moyenne annuelle au cours du XXI^e siècle (par rapport à la référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5

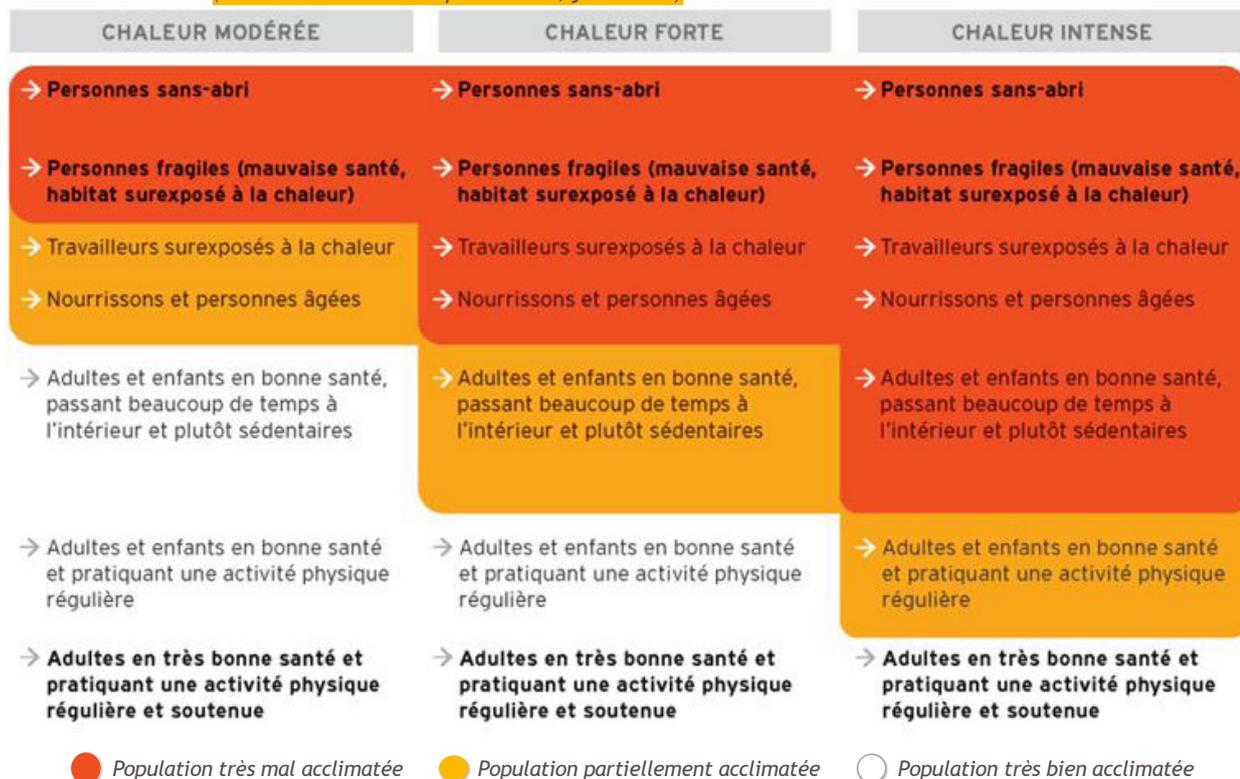


Les scénarios RCP simulent l'évolution du climat en fonction des actions plus ou moins volontaristes des États pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et leur influence sur le climat.

- RCP 8.5 : absence de politique de régulation des émissions de GES
- RCP 4.5 : scénario intermédiaire de croissance puis stabilisation des émissions de GES
- RCP 2.6 : politique volontariste de réduction des émissions de GES

Des impacts sanitaires, sociaux et environnementaux

✓ Augmentation de la population à risque en fonction de l'intensité de la chaleur
 ✓ (source : Santé Publique France, juin 2023)



En période de forte chaleur, la pratique quotidienne des espaces publics extérieurs et l'usage des bâtiments deviennent inconfortables pour les usagers. Le manque de rafraîchissement nocturne en ville devient un réel enjeu de santé : la chaleur peut en effet créer un stress thermique chez les populations sensibles que sont les personnes âgées, nourrissons, jeunes enfants, personnes malades, etc.

Du fait de la fragilité de leur condition physique ou de leurs conditions de vie (habitat inadapté, isolement), ces personnes sensibles sont particulièrement exposées à des risques d'insolation, de déshydratation, d'hyperthermie ou de coup de chaleur.

Selon les données de Santé Publique France, la canicule de 2003 fut de loin la plus meurtrière avec plus de 15000 morts en excès enregistrés lors des journées caniculaires d'août.



2 816

c'est le **nombre de décès en excès** liés à la **canicule** en 2022 en France

(source : Santé Publique France)

En 2019, où l'intensité était comparable mais beaucoup plus courte, la canicule a provoqué près de 1500 décès en excès mais également 1624 morts en 2018 et 1 903 en 2020.

L'augmentation de la mortalité concerne davantage les personnes les plus âgées qui présentent des pathologies chroniques.

Les impacts des fortes chaleurs sur les espaces urbains sont considérables du fait de leurs caractéristiques thermiques : l'échauffement urbain a des impacts sanitaires sur la population mais aussi sur la végétation présente.

La ventilation des espaces urbains est donc primordiale pour faciliter l'évacuation et le renouvellement de l'air échauffé, ainsi que l'évacuation des pollutions atmosphériques éventuelles.



Quelles sont les réponses possibles ?

La complexité des facteurs de la surchauffe urbaine appelle à la définition et la mise en œuvre de différentes solutions techniques mais aussi naturelles.

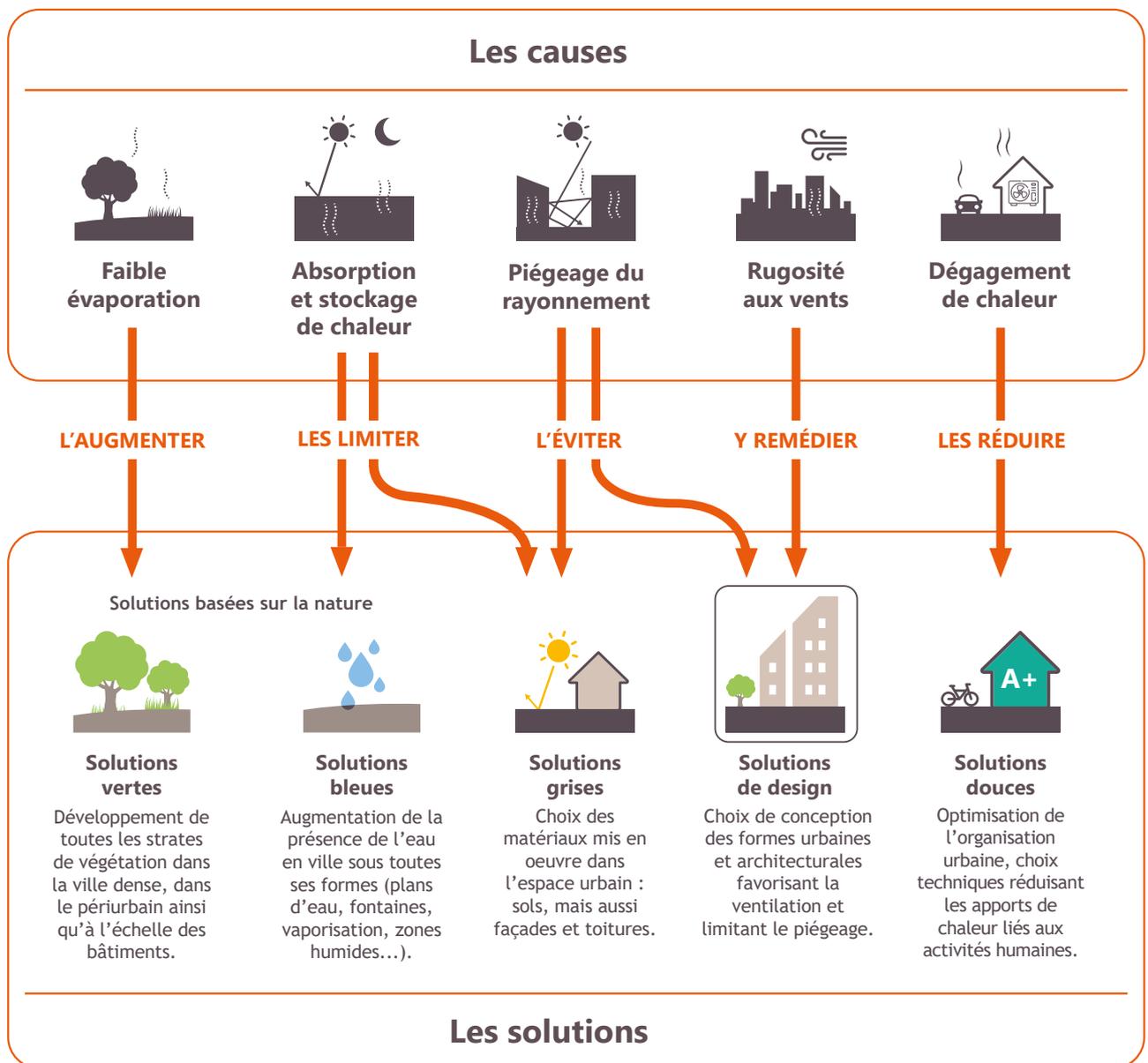
La surchauffe urbaine est causée par différents paramètres inhérents au milieu urbain que sont la forme urbaine (paramètres morphologiques), les caractéristiques des revêtements, la part du végétal (paramètres surfaciques) ou encore la concentration d'activités humaines (paramètres anthropiques).

Ces facteurs invitent à adopter différentes stratégies qui visent à améliorer, éviter ou limiter ces différentes sources de surchauffe.

Les solutions qui en découlent peuvent être techniques (formes urbaines, choix de coloris/matériaux, etc.) mais aussi et surtout s'appuyer sur la nature et ses services écosystémiques.

Une réflexion sur la morphologie urbaine, en lien avec les formes tridimensionnelles, à savoir la taille des bâtiments, leur orientation et l'espace entre eux, peut être menée pour aider à éviter ou limiter la surchauffe urbaine.

▼ Les solutions possibles au regard des facteurs de la surchauffe urbaine. ▼



Réalisation : AUDAB, 2023. | Sources : d'après les travaux de l'AURM et de l'ADEME, 2020.



Circulation des vents et surchauffe urbaine

La forme urbaine est l'un des premiers facteurs de la surchauffe urbaine selon qu'elle favorise ou, au contraire, contraint la circulation des vents au sein du tissu urbanisé.

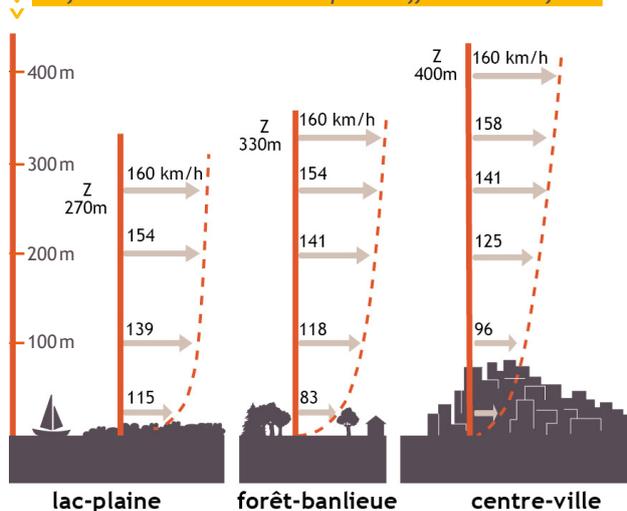
Le vent résulte du déplacement de masses d'air dans l'atmosphère en raison des différences de température et de pression atmosphérique. Ce déplacement se fait des zones de haute pression vers les zones de basse pression, avec une tendance générale du déplacement de l'air chaud vers l'air froid.

Le déplacement horizontal des vents peut être limité par la rugosité des milieux traversés (obstacles naturels ou urbains), qui modifie l'écoulement de l'air et la dissipation de la chaleur : c'est le cas lors de la traversée des villes qui tendent à freiner les masses d'air, empêchant leur rafraîchissement. Les masses d'air se déplacent verticalement (l'air chaud s'élève et l'air froid descend) et celles de surface migrent des zones les plus froides vers les zones les plus chaudes.

Ce phénomène se produit également dans les villes, où le vent est généré par le mouvement de masses d'air chaud et froid. Ces différences de température sont amplifiées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain, qui entraîne la formation de brises thermiques.

Les brises thermiques apparaissent dans des conditions météorologiques caractérisées par une absence de vent et un ciel dégagé. Ce phénomène est

Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces

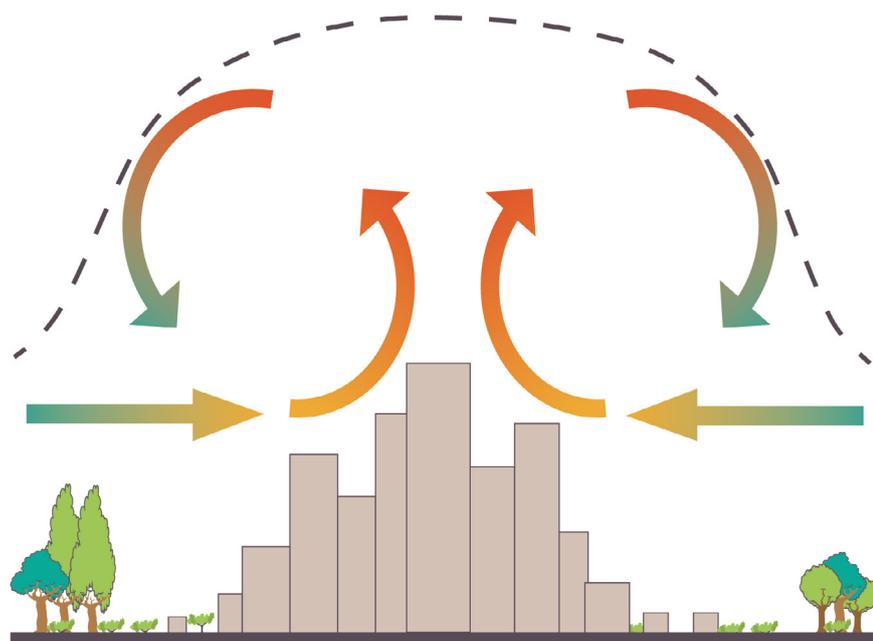


Réalisation : AUDAB, 2024.

Sources : d'après les travaux de Chatelet et al., 1998.

particulièrement marqué en été, en fin de journée, lorsque les différences de température entre le sol et l'air, ainsi qu'entre les zones périphériques forestières et agricoles, sont les plus prononcées.

Ce phénomène de brise thermique contribue également à la formation de dômes de chaleur au-dessus des espaces urbanisés, renforçant l'effet d'îlot de chaleur urbain.



Phénomène de brise thermique dans le contexte de l'îlot de chaleur urbain

Schéma du phénomène de brise thermique de la campagne vers la ville

Ces brises de campagne engendrent un effet de dôme au-dessus de la ville particulièrement néfaste lors des pics de pollution.

Réalisation : AUDAB, 2024. | Sources : d'après le schéma de l'IAU IdF, nov. 2010.



Ventilation et formes urbaines

La forme urbaine, premier facteur de la surchauffe urbaine

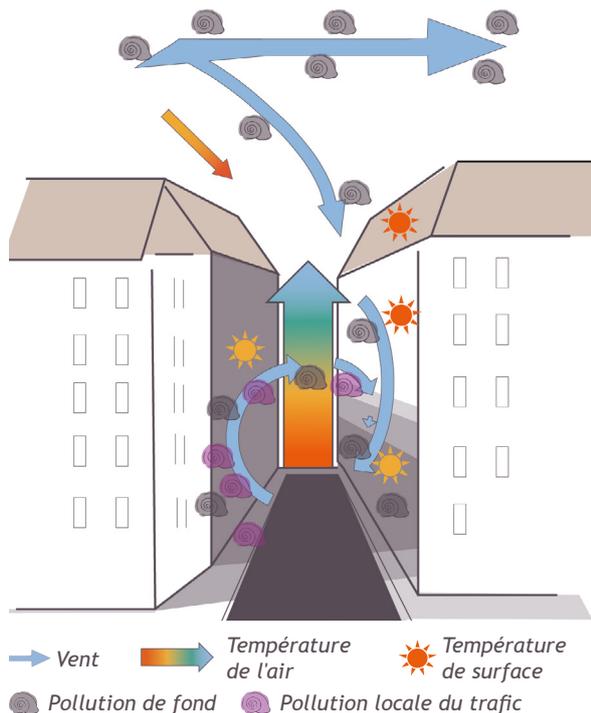
Les différentes formes urbaines qui composent la ville sont l'un des premiers facteurs de la surchauffe urbaine en raison de deux paramètres principaux :

- d'une part la quantité de surfaces exposées au rayonnement solaire de façon directe ou indirecte et leurs comportements thermiques selon les matériaux employés ;
- d'autre part la tendance des différentes formes bâties à favoriser ou au contraire à freiner la circulation des vents au sein d'un tissu urbanisé.

D'autres paramètres vont également jouer sur les températures et les échanges thermiques : l'orientation des rues et leur degré d'ouverture, la hauteur des bâtiments, etc.

Ces paramètres vont notamment contribuer à dévier plus ou moins les vents : dans le cas de « rues canyons¹ », les circulations d'air se font mal et tendent à stagner en bas (de même que la chaleur et les polluants atmosphériques).

Schéma d'une rue canyon



Le vent dominant s'engouffre dans la rue et est dévié par les obstacles que constituent les bâtiments. Les masses d'air ont alors un mouvement en spirale, renforcé par la convection due à la chaleur : l'air chaud des rues monte et est bloqué par l'air froid qui circule au-dessus de la ville, ce qui tend à piéger la chaleur et les polluants atmosphériques (liés aux émissions des véhicules notamment) au niveau du sol.

Réalisation : AUDAB, 2024. | Sources : d'après le schéma de l'IAU IdF, nov. 2010.

Les espaces exposés aux situations les plus chaudes (sud et ouest) vont connaître des phénomènes d'échauffement plus importants.

La configuration étroite des rues (centres anciens par exemple) réduit l'exposition au soleil pendant la journée, mais limite également la capacité de rafraîchissement durant la nuit.

Les zones plus récentes (tissus pavillonnaires par exemple) suivent une logique inverse en raison de leur faible densité bâtie, surtout si la végétation y est bien présente (les zones d'activités en sont un contre-exemple à cet égard).

1 - Une « rue canyon » désigne une rue dont les bâtiments, des deux côtés de la rue et sur plus de 100 mètres, se succèdent de manière ininterrompue ou sont très proches les uns des autres. Le rapport moyen entre la hauteur du bâti et la largeur de ce type de rue est supérieur à 0,5.

Un exemple de rue canyon - Rue Claude Pouillet à Besançon, 2019.





La modélisation 3D comme outil d'aménagement du territoire

La modélisation des formes urbaines et de leurs impacts sur la circulation des vents peut venir appuyer en amont la définition des différentes politiques d'aménagement du territoire et des espaces publics ainsi que la conception des projets d'aménagement.



Atmo Bourgogne-Franche-Comté s'appuie sur la modélisation à fine échelle depuis plusieurs années

pour créer des cartes annuelles de la qualité de l'air ainsi que des cartes prévisionnelles quotidiennes à l'échelle des grandes agglomérations de la région Bourgogne-Franche-Comté.

Depuis 2020, Atmo Bourgogne-Franche-Comté dispose d'un nouvel outil de modélisation en 3D qui permet d'intégrer de manière précise l'effet des tissus urbains (bâtiments, végétation) sur la circulation des vents.

Grâce à cette modélisation en trois dimensions, il est possible d'évaluer l'impact des aménagements

urbains (qu'ils soient existants ou projetés) sur la qualité de l'air avec une résolution très fine, jusqu'à 1 mètre.

L'outil a pour fonction première d'analyser les panaches de fumée en cas d'incendie accidentel mais il intègre également des données sur la modélisation des vents, ce qui en fait un outil idéal pour étudier la ventilation urbaine.

Il aide à comprendre comment la forme urbaine, influencée par la disposition des bâtiments et le rapport entre leur hauteur et la distance entre eux, favorise ou, au contraire, freine la circulation des vents au sein du tissu urbain.



Différentes formes urbaines - secteur Trépillot-Tilleroyes à Besançon, 2004.

Le choix du site d'étude

Le site retenu pour ce travail de modélisation des vents correspond à la partie nord de la zone d'activités économiques Trépillot-Tilleroyes à Besançon. Elle s'inscrit dans le quartier des Tilleroyes et est circonscrite au nord par la route de Gray (RD 70) et le campus de la Bouloie, à l'ouest par la rocade (RN 57) et au sud par la voie ferrée Dijon-Besançon et la gare de triage de Saint-Ferjeux.

Ce site comprend plusieurs bâtiments d'activités de différentes superficies et hauteurs mais similaires dans leur conception architecturale sous forme de "blocs". Leur implantation et l'organisation générale du secteur est dictée par les différents réseaux routiers et ferrés.

Le choix de ce site s'explique notamment par son rôle important en tant qu'îlot de chaleur urbain en raison de son caractère fortement imperméabilisé. Il présente en outre des caractéristiques architecturales simples, facilitant également la modélisation 3D.

- ✓ Bâtiments modélisés à Besançon
- ✓ secteur de Trépillot-Tilleroyes au boulevard Kennedy



Source : ATMO BFC, 2023.



Zone d'activités économiques Trépillot-Tilleroyes à Besançon, 2019.

Les conditions météorologiques locales

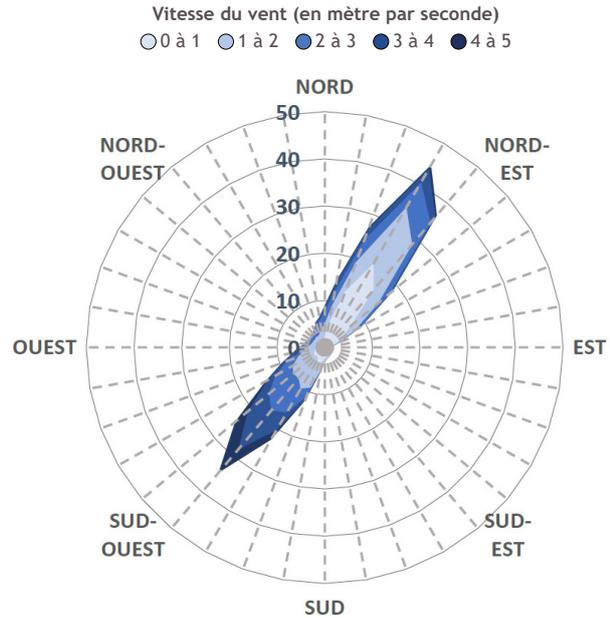
Une rose des vents dominants de Besançon a été réalisée grâce aux données météorologiques de la station Météo France de Besançon sur deux ans.

Besançon se caractérise par deux types de vents dominants :

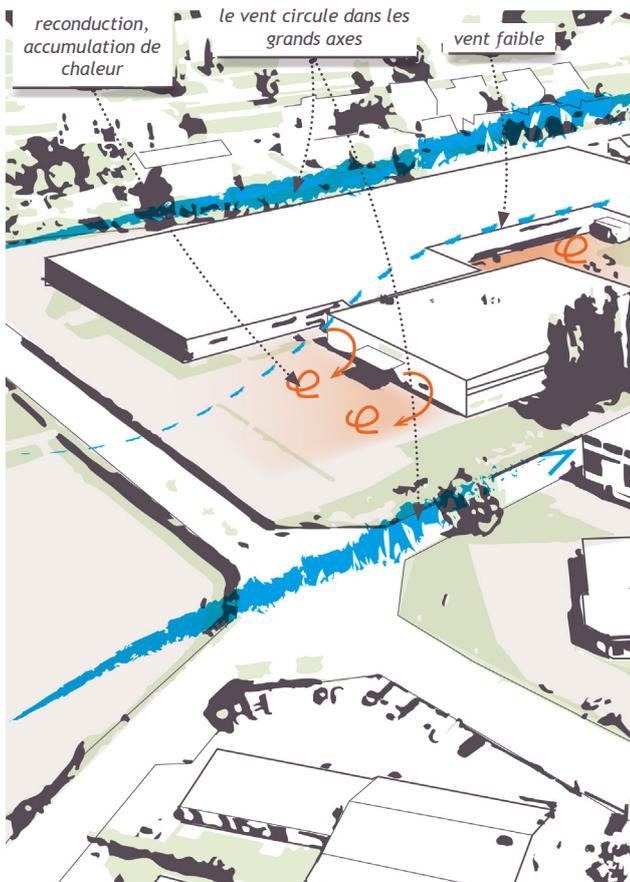
- le vent le plus fréquent (140 jours par an) est un vent Nord-Est avec des vitesses moyennes plutôt faibles (environ 5,4 km/h) ;
- le deuxième vent dominant (120 jours par an) est un vent Sud-Ouest avec des vitesses moyennes plus élevées (5,8 km/h).

>>>

La rose des vents de Besançon



Les enseignements de la modélisation 3D



Source : AUDAB, 2024.

<<<

Représentation des circulations de vents dans la ZAE Trépillot-Tilleroyes

La modélisation des vents met en évidence les zones bien ventilées et à l'inverse, les zones où il y a de potentielles surchauffes dues à la stagnation de l'air.

Un vent fort favorise une bonne circulation de l'air, facilitant ainsi l'évacuation de la chaleur et réduisant les risques de surchauffe. À l'inverse, un vent faible entraîne une stagnation de l'air, ce qui accentue l'accumulation de chaleur.

Les faibles vitesses de vent sont principalement observées autour des bâtiments, qui agissent comme des obstacles, ralentissant le vent.

Dans les résultats de la modélisation, ces vitesses des vents sont représentées par un gradient de couleurs : les faibles vitesses tendent vers le rouge (potentiellement favorable à l'augmentation des températures), tandis que les vitesses élevées sont représentées en bleu (favorable à la baisse des températures).

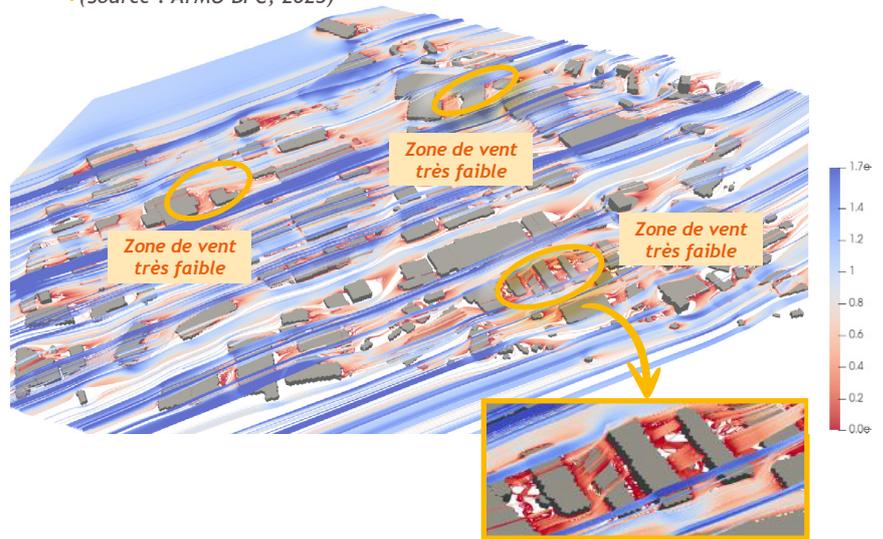
La morphologie et la disposition des bâtiments influencent directement la circulation des vents au sein des espaces urbains.

Les résultats de la modélisation

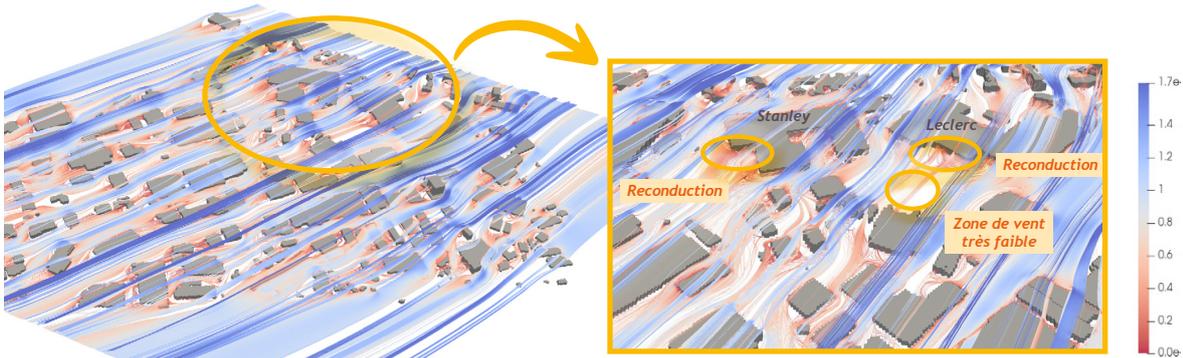
La modélisation ci-contre offre une vue d'ensemble des lignes de courants pour un vent de direction Sud-Ouest.

Le vent est parallèle aux grands axes de la zone industrielle en raison de l'alignement des bâtiments. Cette disposition favorise le renouvellement de l'air le long de ces axes (jusqu'à 1,7 m/s), mais pas dans les zones situées entre les bâtiments, où le vent perpendiculaire aux bâtiments a une vitesse quasi-nulle.

▼ Modélisation 3D des vitesses du vent Sud-Ouest en m/s
 ▼ (Source : ATMO BFC, 2023)



▼ Modélisation 3D des vitesses du vent Nord / Nord-Est en m/s
 ▼ (Source : ATMO BFC, 2023)



Des phénomènes de traînée et de redirection des vents sont observables dans certains secteurs. Cela entraîne une absence de ventilation entre les bâtiments, ce qui provoque une élévation des températures dans ces zones.

La modélisation ci-dessus montre une vue d'ensemble des lignes de courants pour une direction Nord / Nord-Est.

Ici aussi, le vent est parallèle aux grands axes de la zone industrielle en raison de l'alignement des bâtiments, ce qui favorise le renouvellement de l'air dans ces axes (jusqu'à 1,7 m/s), mais pas dans les zones situées entre les bâtiments, où le vent est perpendiculaire (vitesse quasi-nulle du vent).

Les grands bâtiments, comme Stanley ou Leclerc (voir modélisation ci-dessus), influencent fortement l'écoulement des trajectoires des vents.

Les bâtiments qui freinent le plus la vitesse des vents sont ceux avec une large façade perpendiculaire au vent et ceux en forme de "C", comme le bâtiment Stanley.

Ce type de structure génère deux effets :

- le vent est ralenti par le bâtiment, puis le contourne, créant des reconductions (vortex). Ces reconductions ralentissent encore davantage le vent, générant des zones non ventilées à l'arrière des bâtiments ;
- le vent évite les bâtiments en créant des couloirs de circulation.

Dans ces couloirs, le vent s'élève et s'accélère (effet Venturi), ce qui entraîne une absence totale de ventilation au niveau du sol.



Recommandations pour une bonne ventilation des espaces urbains

La forme des bâtiments

Premièrement, la forme des bâtiments influence l'écoulement du vent. Plusieurs facteurs sont à considérer, notamment les dimensions des bâtiments et la forme de leur toiture.

La figure ci-dessous illustre l'impact des dimensions des bâtiments sur l'écoulement du vent. Lorsque la direction du vent est parallèle à la longueur d'un bâtiment étroit et haut (**type a**), les lignes de courant sont peu perturbées.

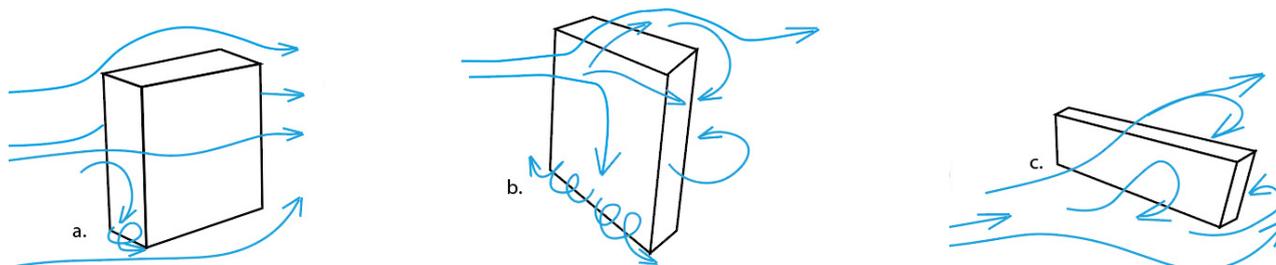
En revanche, un bâtiment haut et face au vent (**type b**) génère de nombreuses perturbations et des reconductions (vortex).

Enfin, pour un bâtiment bas et perpendiculaire à la direction du vent (**type c**), les perturbations sont nombreuses, mais restent près du sol.

Ainsi, pour favoriser une bonne ventilation dans les zones bâties, il est recommandé de privilégier les bâtiments de **type a**, qui sont étroits. Les bâtiments hauts et larges de **type b** sont à éviter, car ils agissent comme des barrières qui dévient considérablement les vents.

▼ Les trois types d'écoulement du vent autour d'un bâtiment

▼ Réalisation : AUDAB, 2024. | Sources : d'après les travaux INSA de Toulouse, 2015.



Un exemple de bâtiment haut, face au vent, rue de Bourgogne à Besançon (Source : AUDAB, 2017)

La forme de la toiture

La conception de la toiture joue également un rôle important dans l'écoulement du vent. Une toiture avec une pente de 8 degrés¹ permet de réduire les turbulences et d'atteindre une vitesse maximale d'écoulement du vent le long du bâtiment.

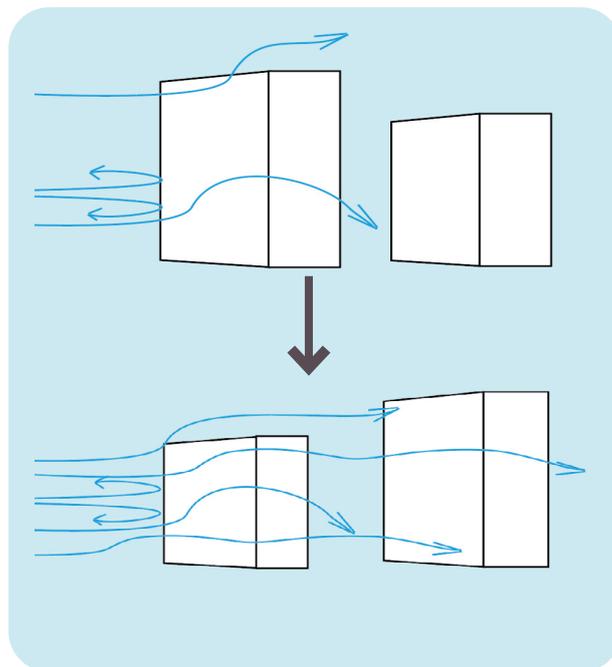
La disposition des bâtiments

La disposition des bâtiments entre eux conditionne également l'écoulement des vents. Les bâtiments situés dans le sillage d'une structure élevée subissent davantage de turbulences et une réduction de la vitesse du vent. De plus, il faut éviter les bâtiments alignés et compacts, car ils créent des zones non ventilées entre les constructions.

Le rapport H/L optimal

Selon le guide ISadOrA², le rapport H/L (hauteur des bâtiments/distance entre les bâtiments) optimal pour une bonne ventilation des espaces urbains est de 0,6. Pour obtenir la meilleure configuration possible, il est donc conseillé de définir la hauteur et l'espacement des bâtiments en se rapprochant de cette valeur.

✓ Amélioration de la disposition des bâtiments
✓ Réalisation : AUDAB, 2024.



Deux bâtiments de hauteurs différentes - Rue de Champagne à Besançon (Source : AUDAB, 2017)

(1) Balduzzi et al. (2012). Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation on the rooftop of a building. Applied Energy, Volume 9, p 173

(2) Roué-Le Gall, A., Thomas, M.-F., Deloly, C., Romagon, J., & Nassiet, C. (2020). Le guide ISadOrA, une démarche d'accompagnement à l'Intégration de la Santé dans les Opérations d'Aménagement urbain. EHESP et a-urba (dir.).

Les 4 points essentiels à retenir

Pour améliorer la prise au vent, il est essentiel de trouver la meilleure combinaison entre la forme des bâtiments et leur disposition.

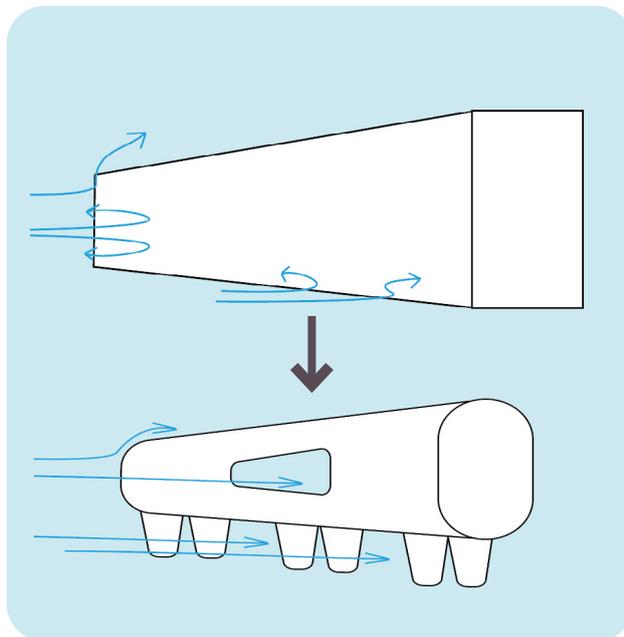
Il est également conseillé de s'assurer que la disposition et la forme des bâtiments permettent aux vents estivaux de s'infiltrer au maximum dans le quartier.

Pour favoriser une meilleure circulation du vent, il est aussi possible de concevoir des bâtiments perméables, par exemple en construisant sur pilotis, en arrondissant les bâtiments ou en intégrant des ouvertures dans les murs exposés aux vents.

Enfin, les études sur les îlots de chaleur préconisent un urbanisme relativement ouvert, où les bâtiments sont intégrés au milieu d'espaces verts tout en respectant un rapport H/L (hauteur/distance entre les bâtiments) de 0,6.

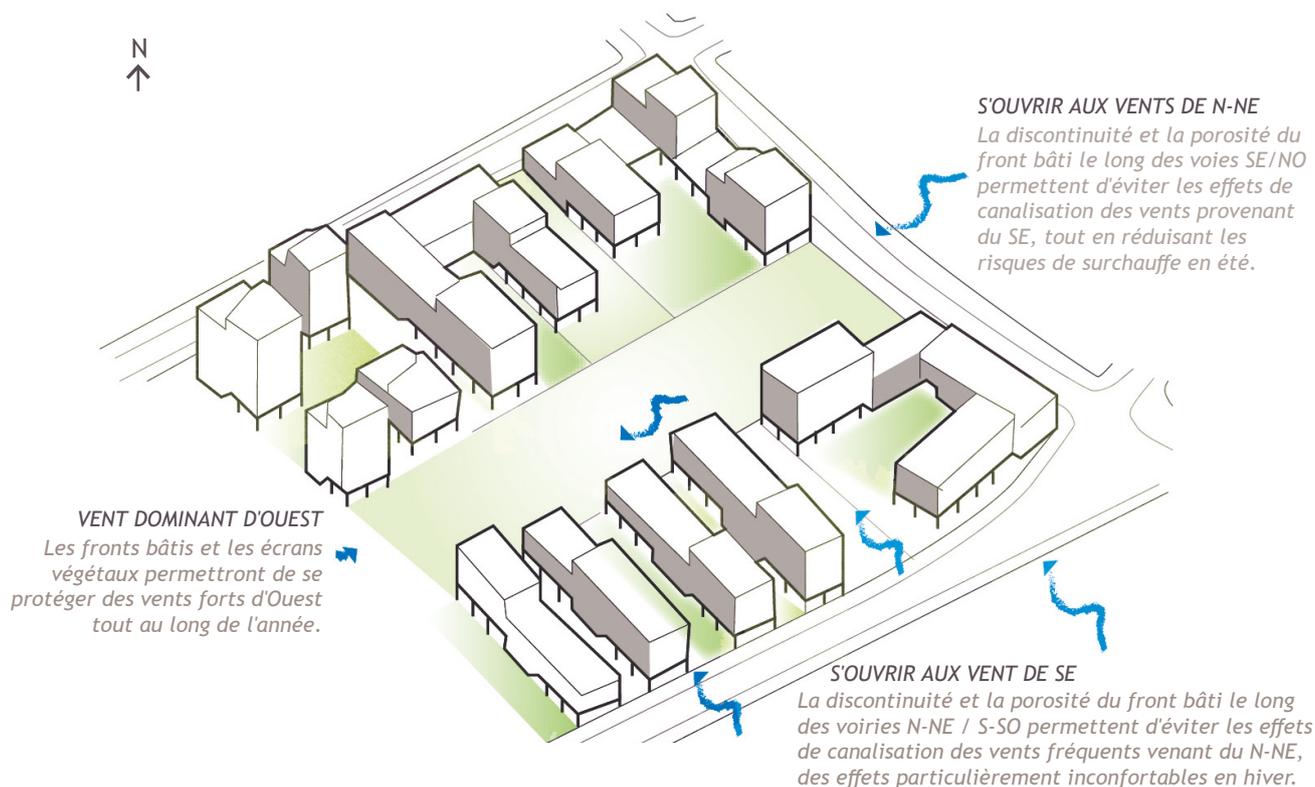
Le projet Garonne Eiffel à Bordeaux (voir ci-dessous) a pris en compte ces enjeux bioclimatiques en intégrant de la végétation et en veillant à ce que les îlots de bâtiments soient perméables aux vents dominants.

- ✓ Amélioration de la perméabilité au vent d'un bâtiment
- ✓ Réalisation : AUDAB, 2024.



- ✓ Conception bio-climatique du projet Garonne-Eiffel

✓ Réalisation : AUDAB, 2024. | Sources : d'après le schéma de principe EPA Euratlantique / TVK Architectes-Urbanistes





AGENCE D'URBANISME
BESANÇON CENTRE FRANCHE-COMTÉ

AUDAB

Agence d'urbanisme Besançon
centre franche-comté

03 81 21 33 00

contact@audab.org

www.audab.org

Avec la participation de



Ville de
Besançon

