

MARCHÉ DE SERVICE EN DEUX LOTS :

- LOT N°1 : ÉTUDES CARTOGRAPHIQUES DE LA CANOPÉE D'ARBRES, DE SITES
POTENTIELS DE PLANTATION D'ARBRES ET DES ÎLOTS DE CHALEURS URBAINS ET ÉTUDE
DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DE RÉGULATION RENDUS PAR LES ARBRES URBAINS

- LOT N° 2 : COMMUNICATION RELATIVE AUX RÉSULTATS ET PLANS D'ACTION ET

STRATÉGIE D'IMPLICATION CITOYENNE

PROCÉDURE NÉGOCIÉE SANS PUBLICATION PRÉALABLE

CAHIER SPÉCIAL DES CHARGES GEP/2020-560/E.

Lot 1 - Tranche 4

Rapport de réalisation de la tâche 2.5.4 : Prédictions

V1.0– 12 septembre 2024

TABLE DES MATIERES

1. Préambule	3
2. Méthodologie.....	3
2.1. Mise à jour de la couche d'arbres.....	3
2.2. Simulations de l'impact climatique des nouveaux arbres	5
3. Résultats.....	6
3.1. Evolution climatique générale.....	6
3.2. Impact des arbres.....	7
4. Discussion.....	15
5. Conclusion.....	15
Références.....	16

1. PRÉAMBULE

Le Plan Canopée de la Ville de Liège a pour objectif principal d'améliorer le confort thermique des Liégeois au travers de la plantation d'arbres. L'objectif des autorités liégeoises est de développer environ 206 ha de couvert arboré supplémentaire en plantant 24 000 arbres d'ici 2032. Ces plantations permettraient ainsi d'augmenter l'indice de canopée de la Ville de +3% d'ici 2050.

La Tranche 4 du Plan Canopée a pour objectif d'évaluer l'impact de ces 24 000 nouveaux arbres sur la distribution et l'effet de l'îlot de chaleur à l'horizon 2050 et 2100. A cette fin, une cartographie des arbres du plan Canopée a d'abord été réalisée. Ensuite, de nouvelles simulations climatiques avec et sans les arbres du plan Canopée ont été réalisées à une résolution spatiale de 1 m². Enfin, l'impact des arbres sur les confort thermique des citoyens en extérieur a été évalué en comparant les différentes simulations entre elles.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. MISE À JOUR DE LA COUCHE D'ARBRES

Les arbres du Plan Canopée ont été ajoutés à la canopée existante. Ces nouveaux arbres se répartissent comme suit :

- 4 103 arbres publics plantés ;
- 5 431 arbres publics à planter ;
- 727 arbres publics avec une couronne reformée ;
- 1 712 arbres privés plantés ;
- 12 022 arbres privés à planter.

Soit un total de 23 995 arbres (Figure 1).

L'ensemble des données a été fourni par la Ville de Liège, à l'exception des 12 022 arbres privés à planter. Ces derniers ont été générés par répartition aléatoire dans les 32 quartiers à partir de la couche de la strate herbacée privée (générée dans la Tranche 2 du projet) et des objectifs de plantation par quartier fournis par la Ville. Plusieurs contraintes ont été appliquées de manière à obtenir une répartition réaliste et à atteindre les objectifs de plantation par quartier qui étaient fixés :

- espacement de 8 m entre les arbres ;
- espace minimum disponible de 4 m² ;
- recul de 5 m minimum par rapport aux bâtiments ;
- recul de 5 m minimum par rapport à la canopée existante.

Notons que des contraintes plus fortes (espacement de 10 m entre les arbres, espace minimum disponible de 9 m², et recul de 2 m minimum par rapport aux limites des parcelles cadastrales) ne permettent pas d'atteindre les objectifs de plantation dans plusieurs quartiers : Amercoeur-Longdoz, Angleur-Kinkempois, Boverie, Centre, Grivegnée, Guillemins-Fragnée, Outremeuse, Sainte-Marguerite, Sainte-Walburge, Vennes.

Par défaut, la hauteur des arbres a été fixée à 15 m et le diamètre de leur couronne à 10 m en concertation avec les autorités liégeoises.

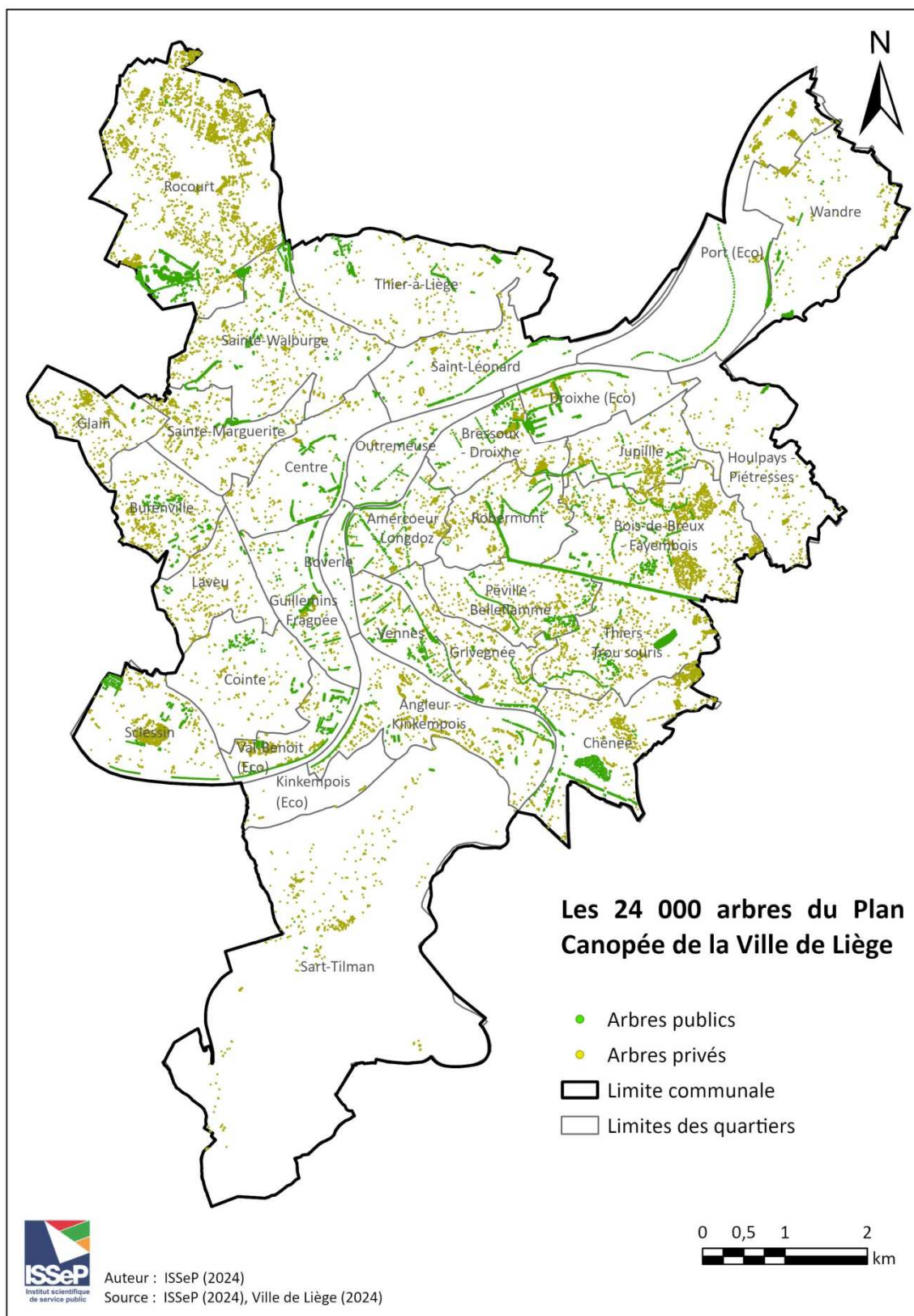


Figure 1. Localisation des 24 000 arbres du Plan Canopée de la Ville de Liège

2.2. SIMULATIONS DE L'IMPACT CLIMATIQUE DES NOUVEAUX ARBRES

La température au thermomètre à globe humide (*wet-bulb globe temperature* - WBGT) est le seul indice de température ressentie tenant compte des effets simultanés de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire sur l'homme. Cet indicateur de stress thermique est répertorié par l'Organisation Mondiale de la Santé dans son guide pour l'élaboration d'un système d'alerte au cas de vague de chaleur (WMO, 2015). Il a aussi l'avantage d'être utilisée dans la législation belge du travail et d'être la norme ISO pour le confort thermique (ISO 7243:2017).

Dans la Tranche 3 de Plan Canopée, une première simulation de l'indice WBGT a été réalisée à très haute résolution spatiale (1 m) en suivant la méthode de Liljegren et al., (2008) utilisée par Lauwaet et al. (2020). Cette simulation a permis de modéliser la WBGT à hauteur d'homme (2 m) pour un jour de canicule du climat présent en considérant la canopée actuelle (sans nouvelle plantation d'arbre). Le jour de canicule qui avait été choisi était le 25 juillet 2019, une des journées les plus chaudes jamais enregistrées en Belgique.

La WBGT à 1 m de résolution spatiale est modélisée à partir de simulations du modèle climat urbain UrbClim réalisée à 100 m grâce à une méthode de post-traitement à haute résolution. UrbClim simule le climat urbain, tandis que des calculs supplémentaires de radiation modélisent le confort thermique à échelle humaine (2 m de hauteur). Cela permet d'intégrer des facteurs microclimatiques tels que l'ombrage (des arbres et des bâtiments), le rayonnement reçu, et le vent pour évaluer le confort thermique.

Le modèle a depuis été optimisé avec notamment une amélioration des calculs sur les plans d'eau. La simulation du 25 juillet 2019 a ainsi été refaite de manière à prendre en compte ces nouvelles optimisations. Des corrections sur la hauteur des arbres ont également été appliquées dans cette simulation.

L'impact du changement climatique en 2050 et 2100 pour une journée chaude du même type que celui du 25 juillet 2019 a été calculé à partir des simulations d'ensemble de CMIP6 en utilisant le scénario SSP3-7.0. L'impact des 24 000 arbres du Plan Canopée a été modélisé en dédoublant ces simulations : simulations sans ces arbres et simulations avec ces arbres.

En résumé, ce sont donc 5 simulations de la WBGT qui ont été produites par le VITO :

- 25 juillet 2019 avec la canopée actuelle et optimisation du modèle ;
- Journée chaude typique de 2050 **sans** nouvelles plantations d'arbres ;
- Journée chaude typique de 2050 **avec** nouvelles plantations d'arbres ;
- Journée chaude typique de 2100 **sans** nouvelles plantations d'arbres ;
- Journée chaude typique de 2100 **avec** nouvelles plantations d'arbres ;

L'analyse de la valeur ajoutée des nouvelles plantations s'est focalisée sur le confort thermique en extérieur, c'est-à-dire en excluant les surfaces couvertes par les bâtiments. La superficie totale d'espaces extérieurs à Liège a été estimée à 5805,9 ha en soustrayant la superficie totale de la ville et les surfaces couvertes par les bâtiments (données de 2019).

L'effet des arbres sur l'indice WBGT à l'échelle du territoire communal a été estimé en calculant pour chaque pixel de 1 m² la différence de valeur de l'indice avec ou sans nouvelles plantations d'arbres en 2050 et en 2100.

Les seuils internationaux ont été utilisés comme référence pour déterminer les classes de stress thermique (Tableau 1) : https://en.wikipedia.org/wiki/Wet-bulb_globe_temperature

Tableau 1. Les classes de stress thermiques en fonction de la WBGT maximale

Catégorie	WBGT °F	WBGT °C	Appréciation
1	≤81,9	≤27,7	Très faible
2	82-84,9	27,8-29,4	Faible
3	85-87,9	29,5-31,0	Modéré
4	88-89,9	31,1-32,1	Elevé
5	≥90	≥32,2	Très élevé

3. RÉSULTATS

3.1. EVOLUTION CLIMATIQUE GÉNÉRALE

Dans les simulations de l'indice WBGT qui ont été réalisées, l'augmentation de la température l'air est de +1.17°C en 2050 et de +3.19°C en 2100 par rapport au 25 juillet 2019. Cela se traduit par des augmentations générales des moyennes journalières de l'indice WBGT d'environ la moitié de ces valeurs (puisque les températures de l'air n'expliquent qu'une partie de l'indice WBGT, et que l'humidité relative et le rayonnement solaire ne devraient pas changer pour la journée chaude typique que nous modélisons). Les configurations spatiales de ces cartes sont presque exactement les mêmes que celles des cartes de référence (2019), seules les valeurs sont plus élevées.

L'impact de ces augmentations de température sur le stress thermique en extérieur est non négligeable. L'évolution de la superficie d'espaces extérieurs affectée par les classes de stress thermique internationaux a été calculée pour les différents horizons temporels sans les nouveaux arbres du Plan Canopée (Figure 2). Les résultats montrent une croissance des espaces affectés par la classe de stress thermique la plus forte (WBGT max ≥32,2°C). Alors que cette classe n'affectait que 9,6% des espaces extérieur (560,1 sur 5805,9 ha) lors de la journée de canicule du 25 juillet 2019, cette part double (1206,9 ha) à l'horizon 2050 et quadruple (2325,2 ha) à l'horizon 2100. A l'inverse, les résultats montrent que une disparition de la classe de stress thermique la plus fraîche (≤27,7°C) à l'horizon 2100. Alors qu'ils concernaient 21,4% des espaces extérieur (1243,7 ha) en 2019, ces espaces ne concerneraient plus que 2,2% de ces espaces (131,1 ha) en 2050 lors des journées de canicule.

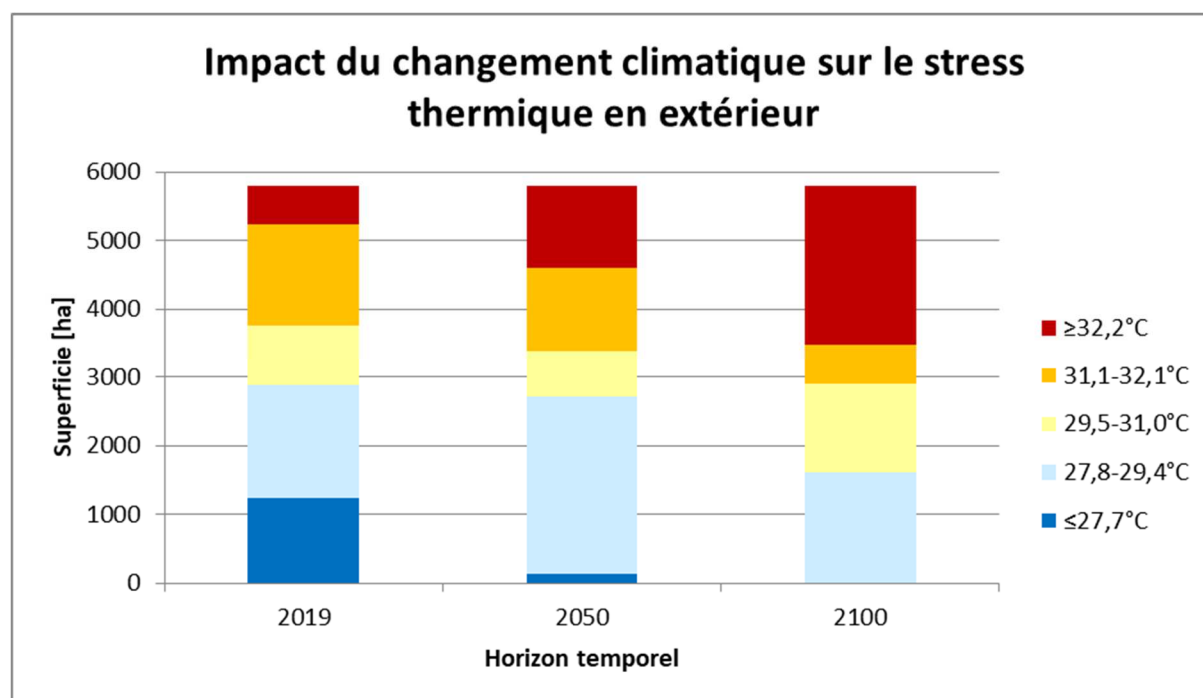


Figure 2. Evolution de l'impact du changement climatique sur les superficies d'espaces extérieurs affectées par les classes de stress thermique internationales pour trois horizons climatiques : 2019, 2050 et 2100.

3.2. IMPACT DES ARBRES

La plantation des 24 000 arbres du plan Canopée permettrait d'améliorer le confort thermique d'environ **462 ha** d'espaces extérieurs. Chaque arbre planté permettrait ainsi de rafraîchir environ 192 m² d'espace extérieur. La superficie rafraîchie varie d'un quartier à l'autre en raison de la stratégie de plantation adoptée par la Ville de Liège : de 0,49 ha dans le quartier de Kinkempois (Eco) à 79 ha rafraîchis dans le quartier de Rocourt avec une moyenne de 14,4 ha par quartier (Figure 3).

Notons que l'objectif du Plan Canopée est de développer environ 206 ha de couvert arboré supplémentaire. Les 24 000 arbres de la simulation représentent une surface de 24 000 x 78,5 m² = 188 ha. La différence est normale vu que tous les arbres ne sont pas plantés en même temps dans les faits. On peut donc dire qu'environ 200 ha de couvert arboré supplémentaire vont donc refroidir 462 ha d'espaces extérieurs, ce qui nous fait un ratio de 1 ha de couvert arboré refroidissant 2 ha d'espace extérieur en première approximation.

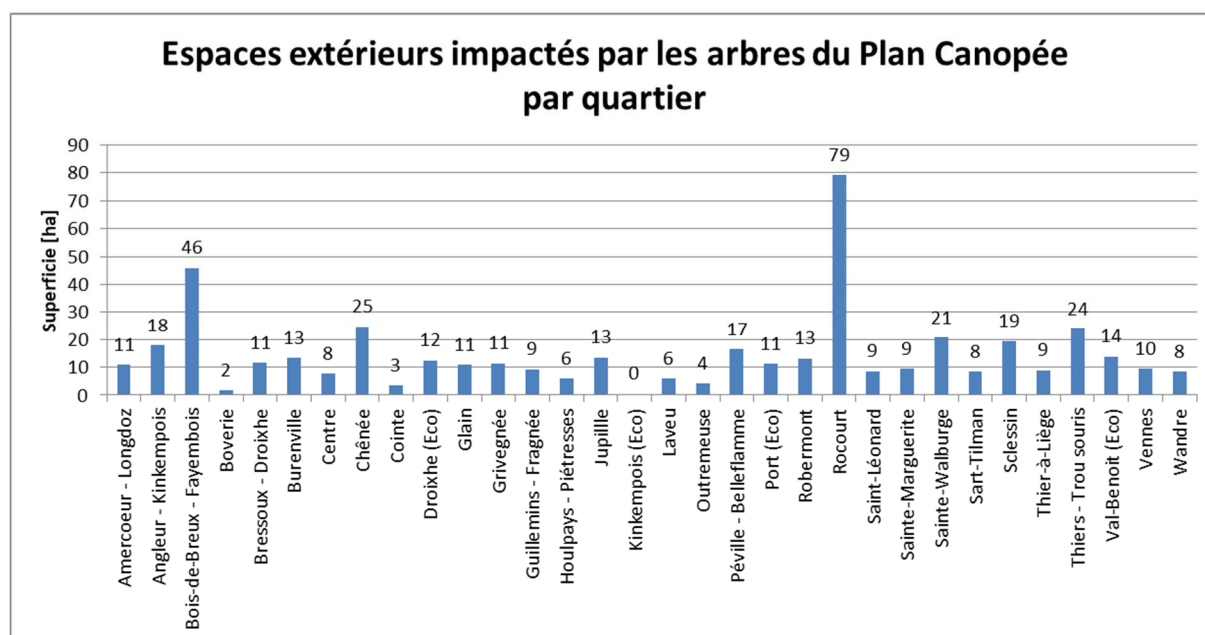


Figure 3. Ventilation par quartier des espaces extérieurs rafraîchis par les arbres du Plan Canopée.

En valeur absolue, les arbres du plan Canopée permettent de réduire localement l'indice WBGT maximum jusqu'à $-4,7^{\circ}\text{C}$ en 2050 et 2100. Son effet sur les WBGT moyenne journalière est de maximum $-2,0^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à une réduction de la température de l'air moyenne journalière jusqu'à environ $-4,0^{\circ}\text{C}$.

Les superficies d'espaces extérieurs affectées par différents seuils de diminution de l'indice WBGT maximum ont été calculées et sont présentées sur la Figure 4. Ces superficies varient très peu entre 2050 et 2100. Une diminution de l'indice WBGT maximum entre $-3,9^{\circ}\text{C}$ et $-3,0^{\circ}\text{C}$ est modélisée pour environ 30% des espaces extérieurs rafraîchis (~130 ha sur 462 ha).

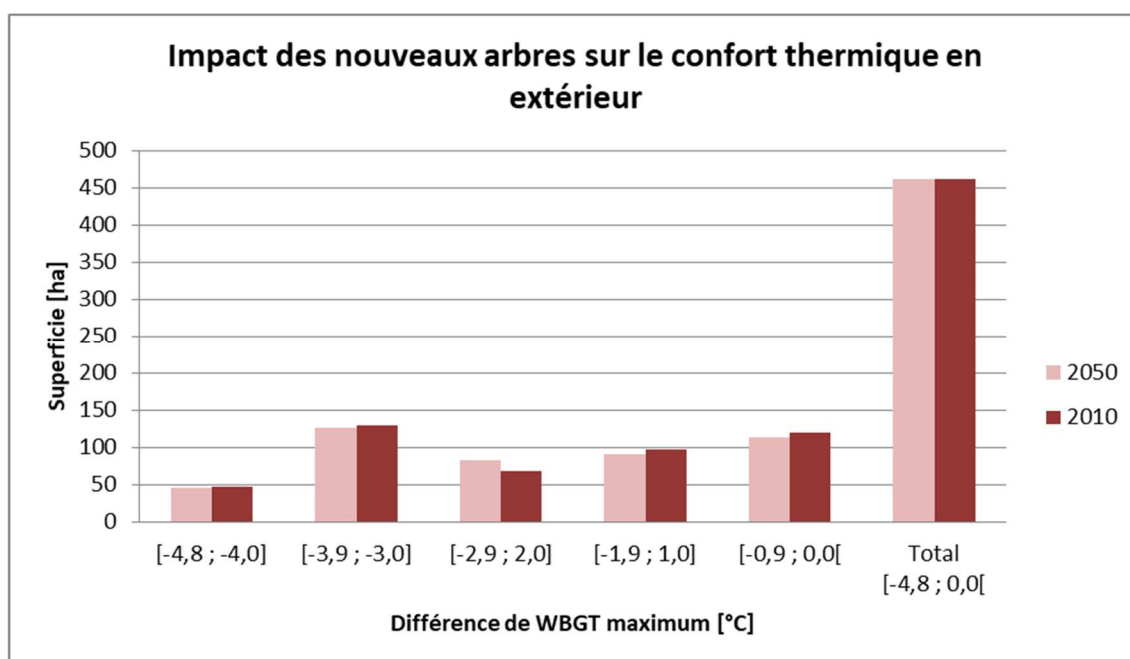


Figure 4. Superficies affectées par les nouveaux arbres pour différents seuils de diminution de la WBGT maximum pour 2050 et 2100.

Les Figures 5 à 8 illustrent l'impact des arbres sur l'indice WBGT maximum en 2050 et 2100 pour deux cas d'étude : l'Avenue Albert Mahiels et la Cité Freddy Terwagne.

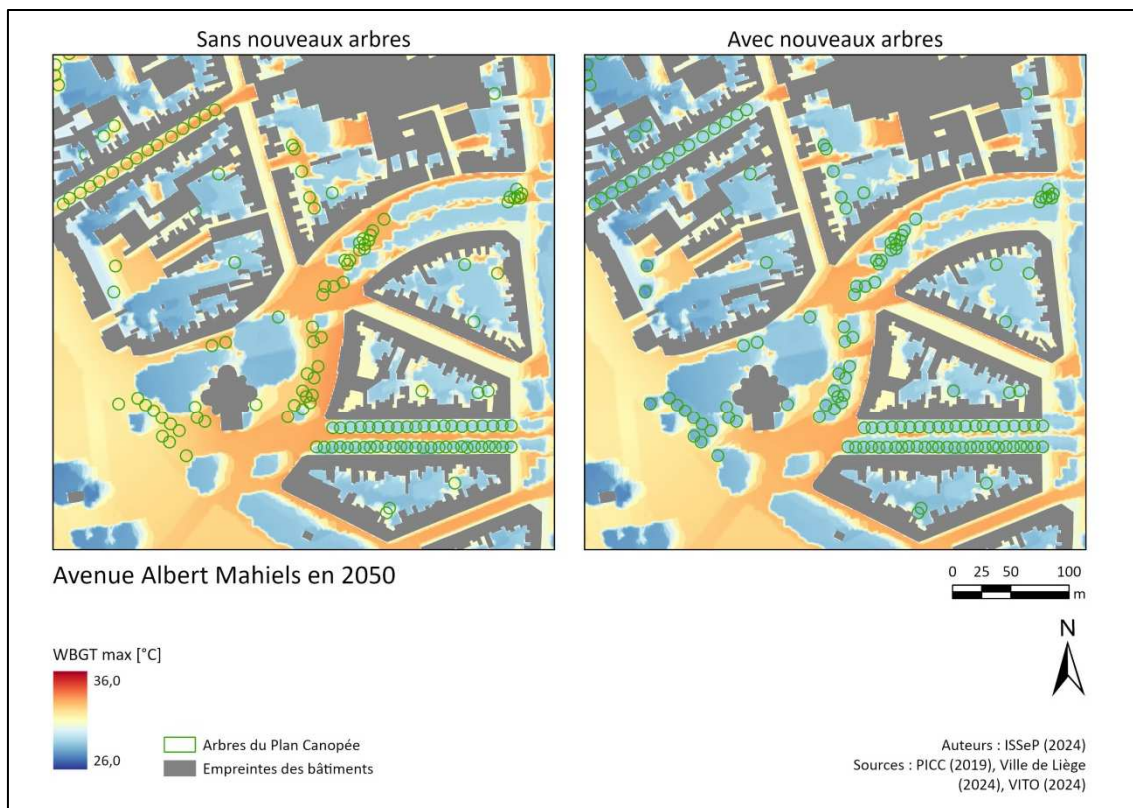


Figure 5. Cas d'étude de l'Avenue Albert Mahiels : simulation de WBGT maximum en 2050 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.



Figure 6. Cas d'étude de l'Avenue Albert Mahiels : simulation de WBGT maximum en 2100 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.

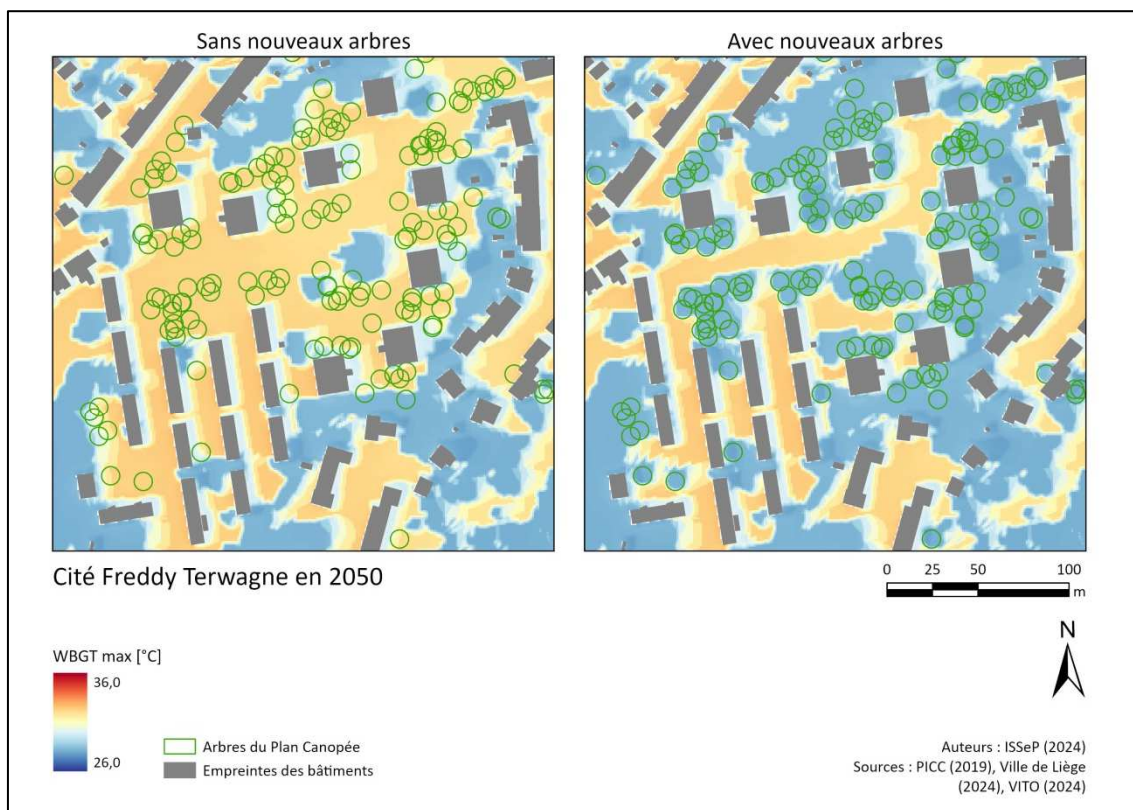


Figure 7. Cas d'étude de la Cité Freddy Terwagne : simulation de WBGT maximum en 2050 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.



Figure 8. Cas d'étude de la Cité Freddy Terwagne : simulation de WBGT maximum en 2100 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.

De plus grande différence entre 2050 et 2100 sont observées en termes de valeurs relatives. En 2050, l'impact relatif des arbres sur l'indice WBGT maximum va jusque -15% avec une moyenne de -7,0%. En 2100, ces valeurs sont de -14,4% et -6,8%. La superficie des espaces extérieurs affectés par un refroidissement inférieur à -12% s'érode entre 2050 et 2100 (Figure 9). On peut ainsi en déduire que l'impact relatif maximum des arbres sur le stress thermique diminue avec la hausse des températures due au changement climatique.

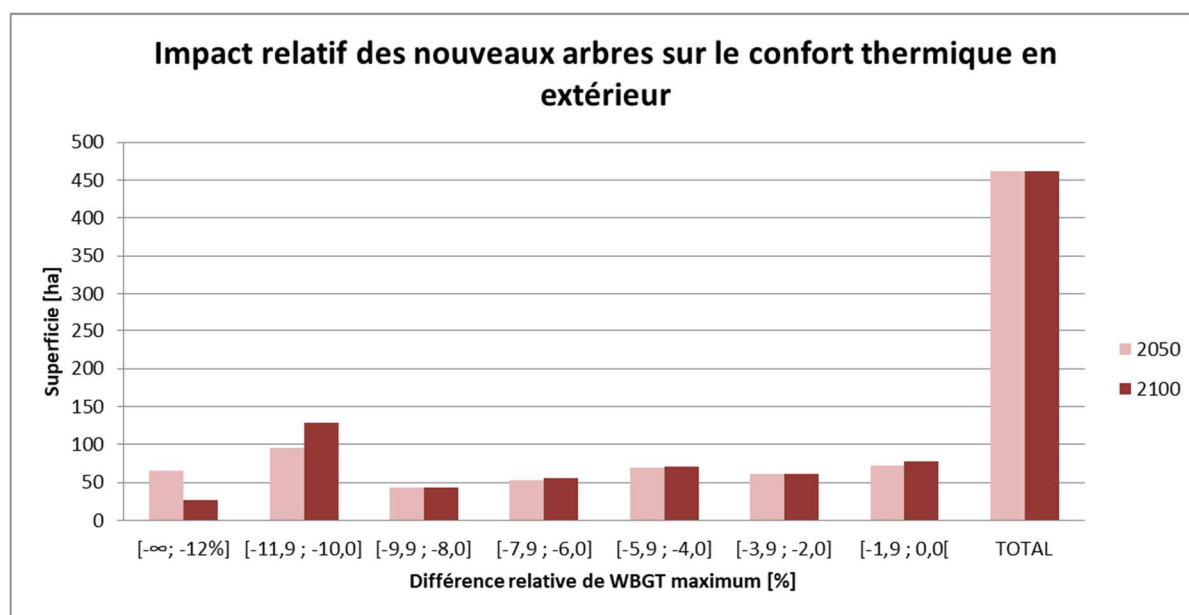


Figure 9. Superficies affectées par les nouveaux arbres pour différents seuils de diminution relative de la WBGT maximum pour 2050 et 2100.

Les arbres du Plan Canopée permettront de réduire l'exposition des citoyens à la classe de stress thermique la plus intense lors des journées chaudes (WBGT max $\geq 32,2^\circ\text{C}$). Si les arbres du Plan Canopée n'étaient pas plantés, les zones impactées par la classe de stress thermique la plus intenses concerneraient 203,1 ha sur 462 ha soit 44% en 2050, et 350,6 ha (76%) en 2100 (Figure 10). La présence de ces arbres permet de réduire ces zones de stress thermique très intense à 17,8 ha (3,84%) en 2050 et 66,2 ha (14%). Cela représente des diminutions de superficie -91 et -81% respectivement.

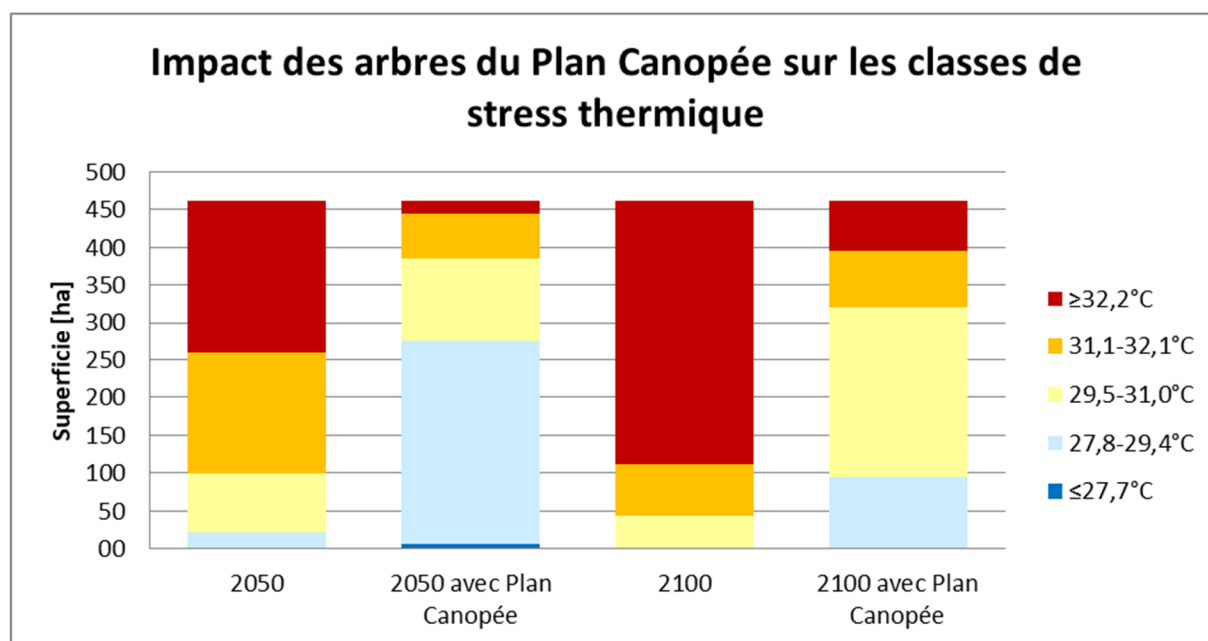


Figure 10. Impact des arbres du Plan Canopée sur les superficies d'espaces extérieurs affectées par les classes de stress thermique internationales en 2050 et 2100.

Les Figures 11 à 14 illustrent l'impact des arbres sur les classes internationales de stress thermique en 2050 et 2100 pour deux cas d'étude : l'Avenue Albert Mahiels et la Cité Freddy Terwagne.

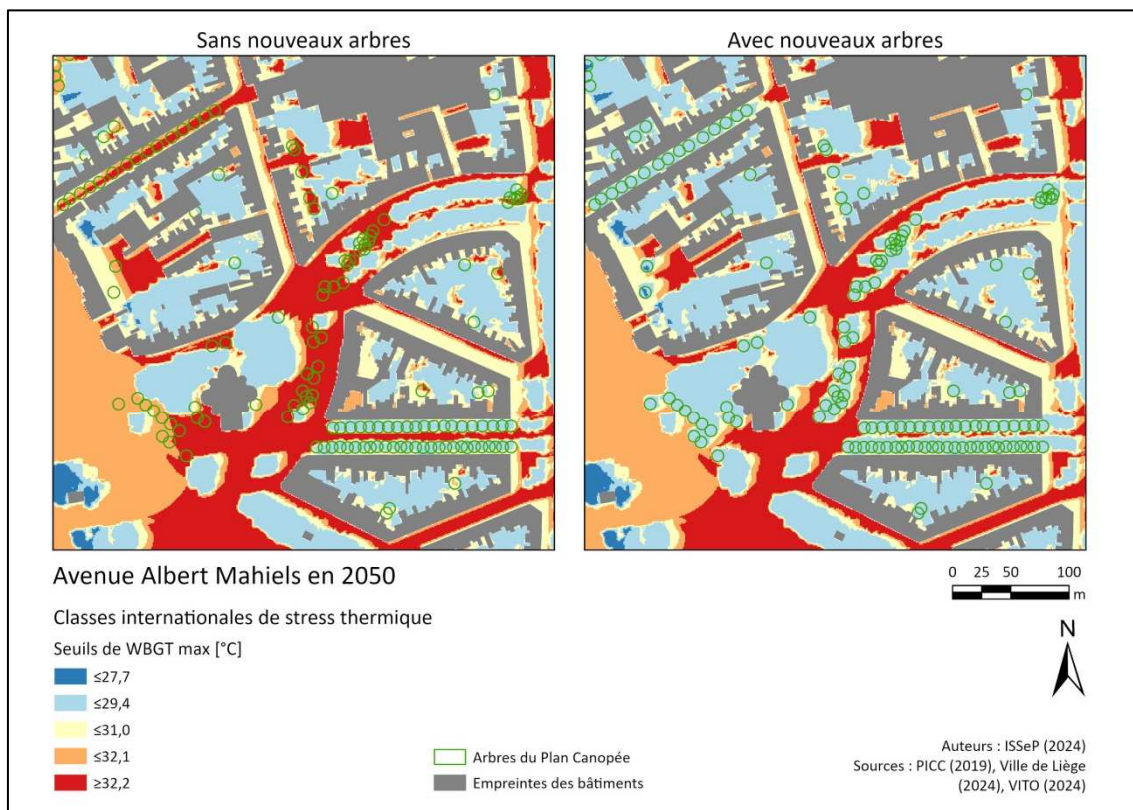


Figure 11. Cas d'étude de l'Avenue Albert Mahiels : classes internationales de stress thermique en 2050 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.

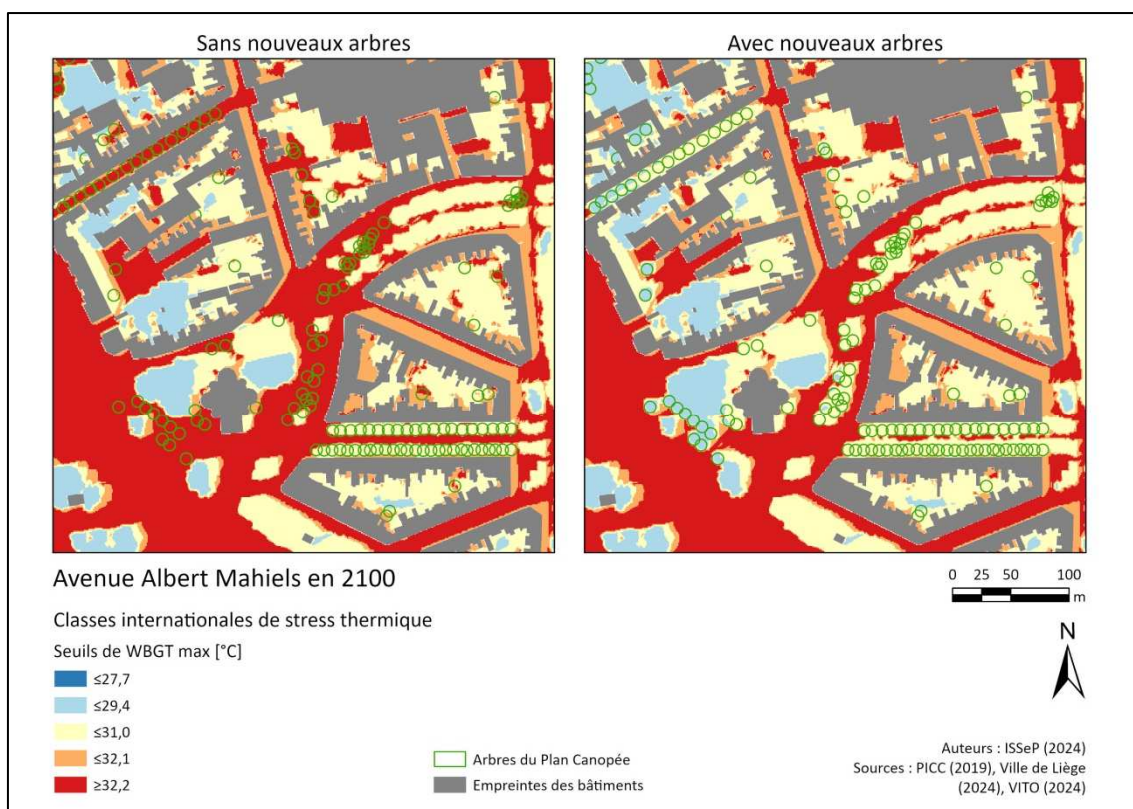


Figure 12. Cas d'étude de l'Avenue Albert Mahiels : classes internationales de stress thermique en 2100 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.



Figure 13. Cas d'étude de la Cité Freddy Terwagne : classes internationales de stress thermique en 2050 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.



Figure 14. Cas d'étude de la Cité Freddy Terwagne : classes internationales de stress thermique en 2100 sans et avec les nouveaux arbres du Plan Canopée.

4. DISCUSSION

L'impact des arbres est sans doute surestimé en 2050 et sous-estimé en 2100 en raison de la paramétrisation standard des arbres dans le modèle : la hauteur et le diamètre de couronne sont identiques dans les deux simulations (15 m et 10 m, respectivement).

5. CONCLUSION

Cette étude démontre l'impact positif qu'auront les arbres du Plan Canopée sur le confort thermique en extérieur des liégeoises et des liégeois lors des journées chaudes.

Dans un contexte de réchauffement climatique global, les événements extrêmes de température vont devenir pour fréquent et plus intense, affectant le confort thermique des citoyens. La modélisation de l'indice WBGT à très haute résolution (1 m) pour un jour de chaleur de type 25 juillet 2019 a permis d'estimer les impacts du changement climatique sur le confort thermique des liégeoises et des liégeois d'ici 2050 et 2100. Les espaces extérieurs impactés par la classe de stress thermique internationale la plus intense double en 2050 et quadruple en 2100 selon le scénario SSP3-7.0.

Avec la plantation de 24 000 nouveaux arbres, le Plan Canopée permettrait d'améliorer le confort thermique de 462 ha d'espace extérieur lors des journées chaudes. Chaque arbre planté permettrait ainsi d'améliorer le confort thermique d'environ 192 m² d'espace extérieur.

Rapportée à la surface couverte pour les nouveaux arbres, 1 ha de couvert arboré permet ainsi de refroidir environs 2 ha d'espace extérieur.

La présence d'arbre permet d'atténuer l'indice de WBGT maximum jusqu'à -4,75°C lors des journées chaudes. Son effet sur les WBGT moyenne journalière est de maximum -2,0°C, ce qui correspond à une réduction de la température de l'air moyenne journalière jusqu'à environ -4,0°C.

Le stress thermique serait considérablement réduit : dans les zones impactées par la présence des arbres du Plan Canopée, les espaces extérieurs soumis à la classe de stress thermique la plus intense sont réduits de -91 à -81% selon l'horizon climatique.

RÉFÉRENCES

Lauwaet, D., Maiheu, B., De Ridder, K., Boënné, W., Hooyberghs, H., Demuzere, M., & Verdonck, M.-L. (2020). Effectiveness of green and blue infrastructure to mitigate outdoor heat stress in the city of Ghent, Belgium. *Climate*, 8, 6. <https://doi.org/10.3390/cli8010006>

Liljegren, J.C.; Carhart, R.A.; Lawday, P.; Tschopp, S.; Sharp, R. (2008). Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological Measurements. *J. Occup. Environ. Hyg.*, 5, 645–655. <https://doi.org/10.1080/15459620802310770>

WMO (2015). Vagues de chaleur et santé : guide pour l'élaboration de systèmes.