

ÇA (SUR)CHAUFFE DANS LES ÉCOLES

Analyse de l'impact du changement climatique et de l'effet d'îlot de chaleur
sur le confort d'été d'un bâtiment scolaire

01/06/2020

Analyse de l'impact du changement climatique et de l'effet d'îlot de chaleur sur le confort d'été d'un bâtiment scolaire



Figure 1 : Les protections solaires sont les premiers remparts aux surchauffes dans les bâtiments. Ce projet illustre différents systèmes architecturaux pour se protéger du soleil : auvents, volets coulissants, éléments fixes, ouvrants pliants et végétation.

Cet article est une version développée de l'article du mois publié en juin 2020 sur le site du cluster Ecobuild. Il est complété de nos sources et développement des concepts plus en détail, à destination des bureaux d'études, d'architecture et maîtres d'ouvrages curieux.

MK Engineering a été, depuis le début des années 2000, un bureau précurseur en solutions durables, tant au niveau des consommations énergétiques que de la gestion intégrée de l'eau de pluie sur la parcelle. Forts de ces expériences, le bureau entend pousser la réflexion plus loin sur les enjeux qui nous attendent dans les décennies à venir. Le bureau intègre une équipe de recherche et innovation qui s'attaque aux thématiques suivantes :

- L'usage : comment replacer l'utilisateur au centre des préoccupations et dans la définition des besoins ? Comment prendre en compte une diversité d'utilisateurs de bâtiments ?
- Le métabolisme (les énergies, l'eau, les matériaux) : comment le réduire en maintenant des conditions de confort et de sécurité optimaux ?
- Le futur : comment anticiper le changement climatique, à quelles adaptations s'attendre sur les manières d'habiter, de travailler, d'occuper un bâtiment, et quelles sources énergétiques seront les plus pertinentes pour alimenter les bâtiments ?

C'est l'aspect du changement climatique du dernier point qui est développé ci-après.

Ces dix dernières années ont vu l'émergence de projets **d'écoles passives à Bruxelles**. Si d'un point de vue des consommations, les objectifs sont proches des ambitions, au niveau du **confort d'été** ce n'est pas toujours le cas ; certains projets performants énergétiquement présentent plus de surchauffe que ce qui avait été prédit lors des études. Comment expliquer cette **discordance entre les prédictions calculées et les résultats vécus** ? Forts de notre expérience en bâtiments scolaires, crèches et bureaux passifs à Bruxelles, chez MK Engineering, nous avons mis en évidence plusieurs facteurs :

- **L'usage réel** du bâtiment. Bien souvent, la programmation renseignée en début d'étude n'est plus actuelle lors de la prise de possession du bâtiment. Par exemple, un local informatique a changé de place, la demi-classe occupée quelques heures par semaine pour le cours de néerlandais est occupée à 100%, ...
- Les **conditions climatiques** utilisées dans la simulation ne correspondent plus aux réalités mesurées ces dernières années ;
- **L'effet d'îlot de chaleur** (température plus élevée en milieu urbain qu'en milieu rural) n'est habituellement pas modélisé lors des études, or il est bien présent.

En ce qui concerne le premier point de l'usage réel, nous renvoyons volontiers le lecteur au benchmark¹ réalisé par ULiège, qui analyse les écoles nZES et leurs consommations réelles. Nous nous penchons ici sur les deux derniers points.

Cet article n'a pas la prétention de quantifier scientifiquement les évolutions de surchauffes, mais bien de d'attirer l'attention sur une tendance à laquelle nous devons faire face, et révéler les manquements dans les simulations actuelles.

De la même manière, nous ne développons pas les concepts de confort de l'occupant (PMV – Predicted Mean Vote, PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied), ni de confort adaptatif (NBN EN 15251) qui sont par ailleurs des éléments très pertinents dans le calcul du confort thermique d'été.

L'article fait donc le focus sur l'impact sur les résultats des simulations des changements climatiques et de l'effet d'îlot de chaleur.

1. Changement climatique

La vérification du confort se fait par simulation statique (logiciel PEB, PHPP) et/ou simulation dynamique (étude heure par heure des conditions du bâtiment modélisé en détails).

Le fichier météorologique utilisé dans les logiciels **PEB et PHPP** a été publié en 1979², il y a 40 ans, et celui de la **simulation dynamique** est une année typique appelée « IWEW »³, qui est dérivée des observations de 1982 à 1999, soit, il y a ± 30 ans. **Le climat a-t-il évolué depuis lors ?**

Dans le graphique ci-dessous (Figure 2), on observe que la **température moyenne annuelle** à Uccle a **augmenté d'environ 1°C** depuis ces observations. Ce graphique reprend également des projections pour les **années futures** suivant des scénarios plus ou moins pessimistes (pour les explications de ces différents scénarios, voir ci-après).

¹ Attia, S., Shadmanfara, N et Ricci, F. « Developing two benchmark models for nearly zero energy schools », Applied Energy, 263 (2020) 114614

² Dogniaux, R. et Lemoine, M. Recherches « Performances du bâtiment », biennale 1977-1979. Recherche Confort thermique et visuel. Thème I. Périodes météorologiques. Bruxelles, IC-IB, 1980.

³ ASHRAE. International weather for energy calculations (IWEW Weather Files) user's manual and CD-ROM. ASHRAE Atlanta; 2001.

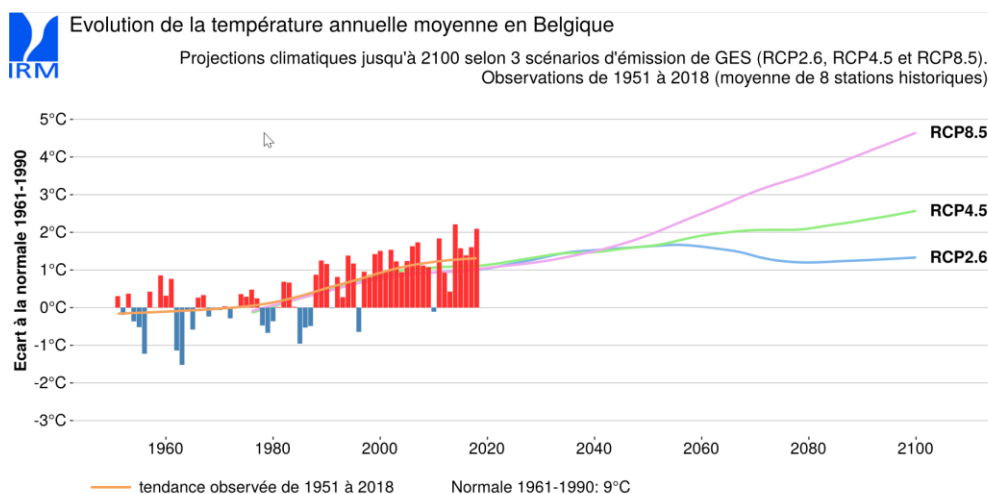


Figure 2 : Evolution de la température annuelle moyenne en Belgique (source : IRM⁴)

1.1 Scénarios climatiques

Le GIEC⁵, dans ses rapports, émet des scénarios d'hypothèses d'évolution de l'activité humaine pour pouvoir évaluer le réchauffement climatique. Une première série des scénarios a été définie dans le premier rapport, en 1990, et ces **scénarios** sont regroupés en familles nommées **A** (les plus pessimistes, si l'activité humaine continue telle quelle), **B**, **C**, et **D** (scénarios les plus optimistes). Chaque famille est sous-divisée en plusieurs groupes et sous-groupes de scénarios (A1A, A1B, ...).

Dans son rapport de 2014, le GIEC propose **4 autres scénarios appelés « RCP »** (Representative Concentration Pathways), c'est-à-dire des profils d'évolution de concentration de gaz à effet de serre. Ces profils correspondent à la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète, en W/m^2 , qui est appelée « bilan radiatif », et caractérise l'**effet de serre**. Ces scénarios sont le **RCP8.5** (le plus pessimiste), **RCP6.0**, **RCP4.5** et **RCP2.6**, ce dernier, le plus optimiste, intégrant les effets de politiques volontaristes de réduction des émissions afin de limiter le réchauffement climatique à 2°C.

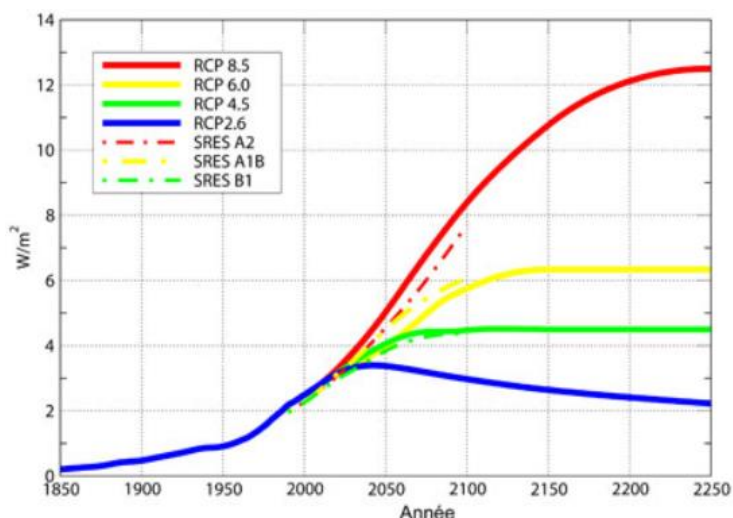


Figure 3 : Après 2006, les traits continus correspondent aux nouveaux scénarios dits RCP (Representative Concentration Pathways) et les traits pointillés aux scénarios des rapports 2001 et 2007 du GIEC – source :

<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/les-scenarios-du-giec>

⁴ <https://www.meteo.be/fr/climat/le-climat-a-lhorizon-2100>

⁵ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Réalise des rapports d'évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique.

1.2 Fichiers climatiques futurs

Pour concevoir des bâtiments résilients (soit des bâtiments capables de s'adapter aux événements afin de limiter les effets des catastrophes naturelles, changements climatiques et de retrouver un fonctionnement normal rapidement), il est important de baser les études de conception sur des fichiers climatiques qui prennent en compte l'augmentation de la température mondiale. Le réchauffement climatique est calculé par ce qu'on appelle des modèles généraux, **General Circulation Model** en anglais (**GCM**). Ces modèles sont composés des équations de Navier-Stokes et d'équations thermodynamiques appliquées à une sphère en rotation, la Terre. Ils permettent de simuler les processus physiques interagissant entre l'atmosphère, les océans, la cryosphère et la surface terrestre. Ils donnent des **résultats à l'échelle planétaire** (entre autres, l'augmentation moyenne de la température mondiale), et **se basent sur des scénarios** plus ou moins pessimistes d'évolution de l'activité humaine (voir point précédent « Scénarios climatiques »).

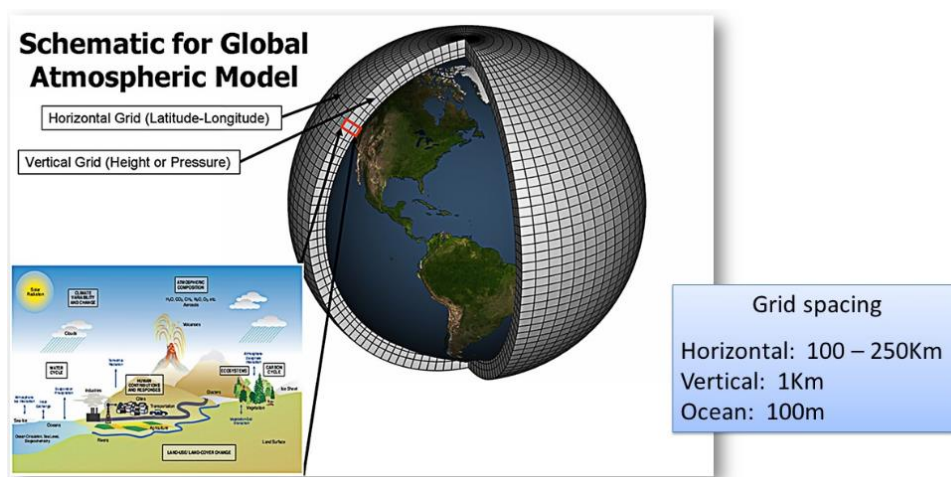


Figure 4 : résolution spatiale des GCM - source : http://climateilluminated.com/GCM_models/slides/1_GCM_models.html

Les données climatiques issues des GCM ne sont **pas directement exploitables** pour nos simulations, du fait de leur **résolution spatiale** (100 – 250 km) et **temporelle** (résultats mensuels) **trop grossières** (Figure 4). Pour réaliser une simulation thermique dynamique au niveau du bâtiment, nous avons besoins de données locales, idéalement à l'échelle du climat d'une ville, et d'un pas de temps horaire, voire sub-horaire. Les résultats des GCM nécessitent donc une mise à l'échelle appelée « **downscaling** ». Plusieurs techniques de downscaling existent, ayant chacune ses avantages et ses inconvénients.

1.2.1 Downscaling dynamique

Le downscaling dynamique se base sur les résultats du GCM pour en refaire des simulations plus détaillées à l'aide d'autres modèles beaucoup plus raffinés dans le temps et dans l'espace, appelés modèles régionaux ou en anglais **Regional Climate Model (RCM)**. Le climat est donc **simulé très précisément** (trame de 2,8 km, pas de 20 secondes) pour les années à venir. Cela nécessite néanmoins des moyens de calcul et des ressources informatiques particulièrement importantes, ainsi qu'une expertise de haut niveau (donc plutôt orienté vers des centres de recherche).

L'établissement de ces données climatiques au niveau européen est l'une des tâches principales du programme de recherche **EURO-CORDEX** (<https://www.euro-cordex.net/>) qui regroupe les experts de différents pays, dont l'IRM pour la Belgique. Malheureusement, ces données **ne sont pas en libre accès** et sont pour l'instant restreintes à une utilisation à des fins de recherche uniquement.

1.2.2 Downscaling statistique

Le downscaling statistique consiste à établir des données horaires et locales à partir des données globales données par les GCM, soit par une approche déterministe, dite « morphing » (on ne base alors sur un fichier météo typique actuel, avec données locales et horaires, auquel on applique des modifications), soit par une approche stochastique (génération de données aléatoires sur base de moyennes et autres paramètres statistiques).

a) Morphing

Cette approche consiste à additionner (shift) et/ou multiplier par une valeur (stretch) les variables climatiques d'un fichier météo horaire représentatif du climat actuel. Par exemple, sur base du fichier climatique IWECC actuel, couramment utilisé par les bureaux d'études dans les simulations EnergyPlus, on applique quelques opérations arithmétiques à la température extérieure, à l'ensoleillement, à la vitesse du vent, ... pour construire un nouveau fichier météo futur. Il y a deux outils disponibles gratuitement qui permettent d'effectuer cette opération : **WeatherShift** (<http://www.weather-shift.com/>) et **CCWorldWeatherGen**⁶ (<http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>). **Nous avons testé le deuxième.**

Le générateur CCWorldWeatherGen est un outil Excel permettant d'extrapoler des fichiers météo sous le format *.epw **pour les années 2020, 2050 et 2080**. L'extrapolation se base sur les données climatiques futures mises à disposition par le GIEC (le nom anglais du GIEC est « IPCC »: Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_TAR/index.html) via son centre de données en libre accès, le Data Distribution Center (DDC), qui rassemble les résultats de différents modèles GCM pour plusieurs scénarios de changement climatique. L'outil se base sur le modèle GCM appelé « HadCM3 », et le **scénario « A2 »**, qui est parmi les plus **peessimistes**, et donne comme résultat un fichier météo local avec données horaires au format *.epw.

Les résultats de température sont montrés aux figures 5 (hiver) et 6 (été). On voit que l'augmentation de température n'est pas uniforme toute l'année : les vagues de chaleur subissent des hausses de températures plus élevées (+9°C pour un pic de chaleur en 2080) que les températures hivernales (+4°C en 2080).

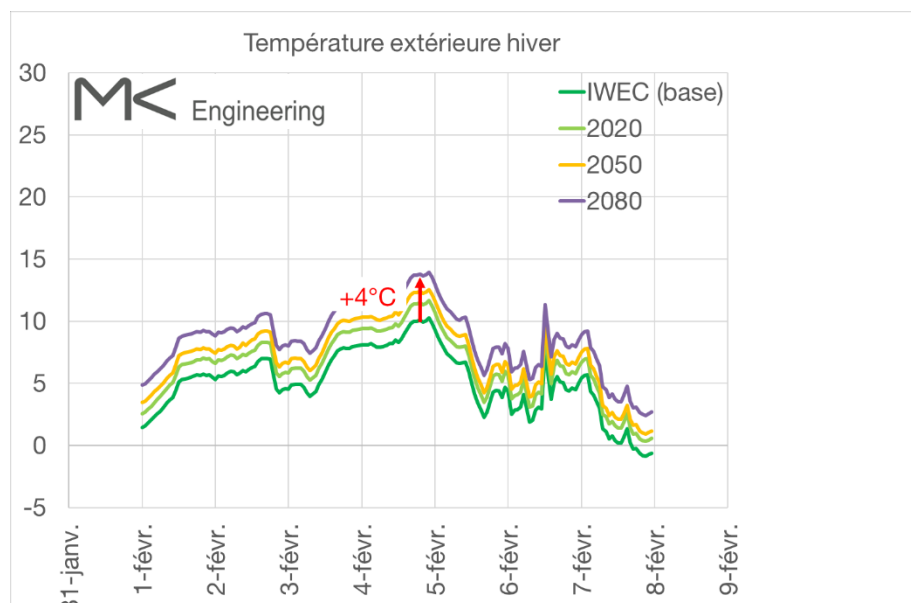


Figure 5 : température extérieure en hiver des données IWECC et l'extrapolation par l'outil CCWorldWeatherGen pour les années 2020, 2050 et 2080

⁶ M.F. Jentsch, A.S. Bahaj, P.A.B. James, CCWorldWeatherGen, « Climate change world weather file generator, Version 1.8 », University of Southampton, 2013.

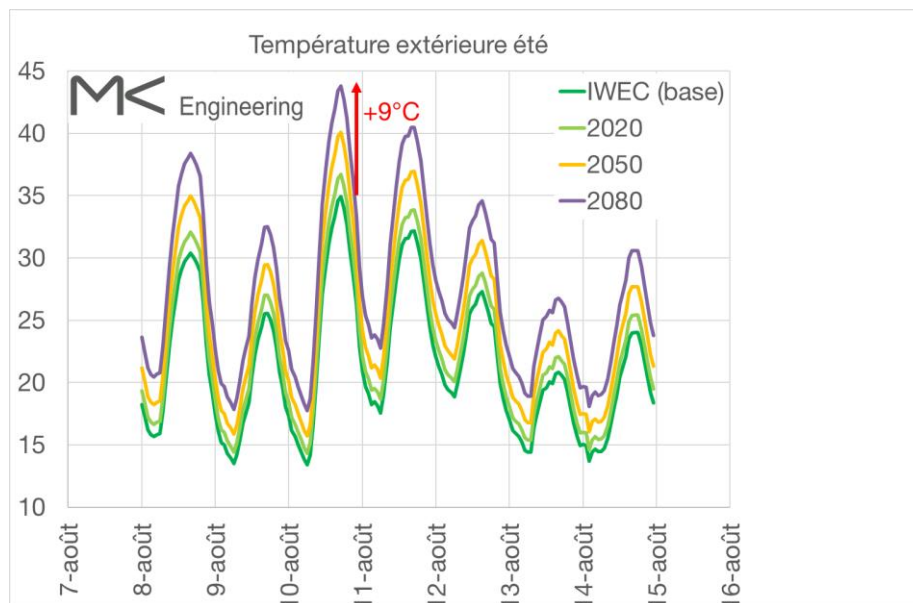


Figure 6 : température extérieure en été des données IWEc et l'extrapolation par l'outil CCWorldWeatherGen pour les années 2020, 2050 et 2080

Le tableau de la figure 7 illustre l'augmentation de la température moyenne annuelle pour les fichiers générés.

| | Référence IRM 1961-90 | IWEc 1982- 1999 | 2020 | 2050 | 2080 |
|--------------------------|--------------------------|--------------------|---------|---------|---------|
| T°moy annuelle Uccle | 9,8 | 10,29 | 11,20 | 12,33 | 13,99 |
| Augmentation de T°moy | + 0,0°C | + 0,5°C | + 1,4°C | + 2,5°C | + 4,2°C |

Figure 7 : températures moyennes annuelles extrapolées pour les années 2020, 2050 et 2080 par l'outil CCWorldWeatherGen (downscaling par morphing)

Attention cependant à la technique de morphing, car elle présente plusieurs inconvénients :

- Les variables climatiques futurs sont très analogues aux variables actuelles, sans prise en compte d'un éventuel changement du schéma journalier ;
- Il n'est pour l'instant pas possible d'obtenir une année extrême (en effet, on se base sur le fichier IWEc d'une année typique et non extrême) ;
- Il y a un décalage entre les modèles GCM qui prennent comme base le climat typique de la période 1961-1990, alors que le fichier IWEc se base sur les années 1982-1999 ; il y a donc un décalage entre les deux bases qui provoquera une surestimation du réchauffement climatique ;
- Il n'y a plus de lien physique entre les différentes variables climatiques car elles ont été transformées indépendamment les unes des autres.

Cependant, malgré tous ces inconvénients, c'est, à notre connaissance, la seule manière accessible aux bureaux d'étude, à l'heure actuelle, d'évaluer les effets du changement climatique sur les bâtiments par simulation dynamique.

b) Génération stochastique

La génération stochastique est une génération aléatoire d'un fichier météo futur en se basant d'une part sur des paramètres statistiques observés par le passé et d'autre part sur les données météo futures données par les GCM. Le logiciel Meteonorm (payant) permet de produire ces fichiers météo.

Cette méthode a l'avantage de pouvoir simuler des météos extrêmes qui n'ont encore jamais été observées, tout en restant statistiquement représentatives du climat local, ainsi que la possibilité de simuler une grande variété de conditions climatiques. Par contre, comme pour la méthode de morphing, il n'y a pas de prise en compte d'un éventuel changement du schéma journalier par rapport aux données historiques, et des études dénoncent la difficulté de modéliser certaines variables climatiques.

1.2.3 Année typique et année extrême

Terminons juste par souligner que des données météo, pour un scénario d'évolution donné, ou pour une période donnée, peuvent être soit représentatives d'une **année moyenne typique** du climat, soit d'une **année extrême** (extrêmement chaude ou extrêmement froide). Le fichier IWECE représente une année typique pour la période 1982-1999, et il en va de même pour ses extrapolations futures avec l'outil CCWorldWeatherGen ; or, des études récentes⁷ montrent l'intérêt de prendre en compte également les **années extrêmes pour concevoir les bâtiments de demain**. A l'heure actuelle, seules les méthodes de downscaling dynamiques sont capables de réaliser de telles prédictions avec fiabilité, nous espérons donc qu'elles seront rapidement rendues disponibles pour la conception par l'IRM.

1.3 Résultats

Le graphique ci-dessous (Figure 8) reprend les résultats d'une étude que nous avons réalisée pour une école présentant des températures excessives au printemps, alors qu'elle avait été modélisée selon les normes en vigueur pour évaluer le risque de surchauffe. Nous comparons les résultats de la simulation de base, réalisée avec le fichier météo IWECE (1982-1999) et des **fichiers météo hypothétiques** produits par l'outil CCWorldWeatherGen (downscaling par morphing), prenant en compte le **réchauffement climatique en 2020, 2050 et 2080** selon le scénario pessimiste **A2**, dans une classe orientée au sud.

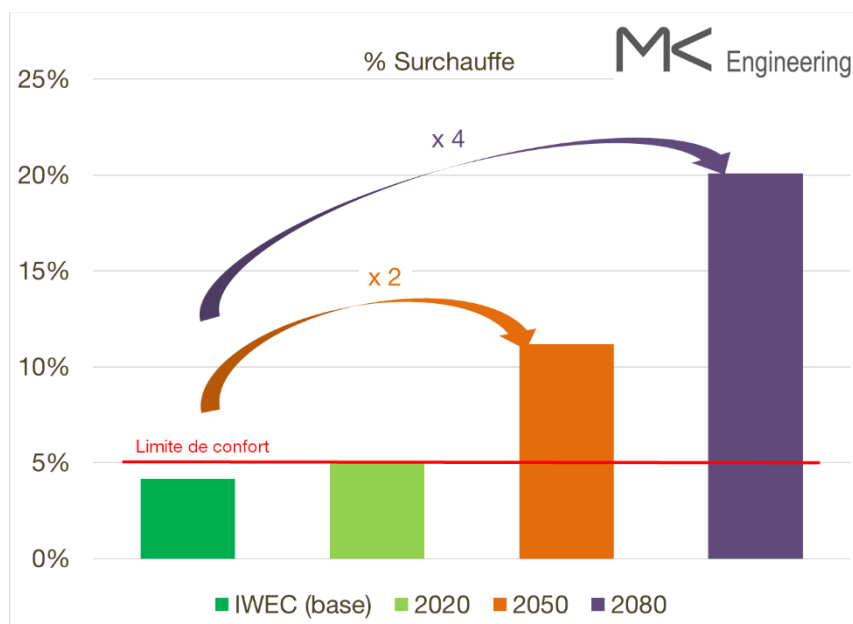


Figure 8 : nombre d'heures de surchauffe dans le bâtiment scolaire simulé en prenant en compte le réchauffement climatique (MK Engineering)

⁷ Moazami, A, Nik, V, Carlucci, S, Geving, S. « Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions », Applied Energy, Volume 238 (2019) pp. 696-720.

On voit que l'objectif pour la certification passive était atteint avec le fichier météo de base (IWEK), à savoir moins de 5% des heures d'occupation des locaux au-dessus de 25°C, alors que dans des **conditions plus défavorables** prenant en compte le **réchauffement climatique**, **ce critère est dépassé** ; il aura doublé en 2050 et quadruplé en 2080.

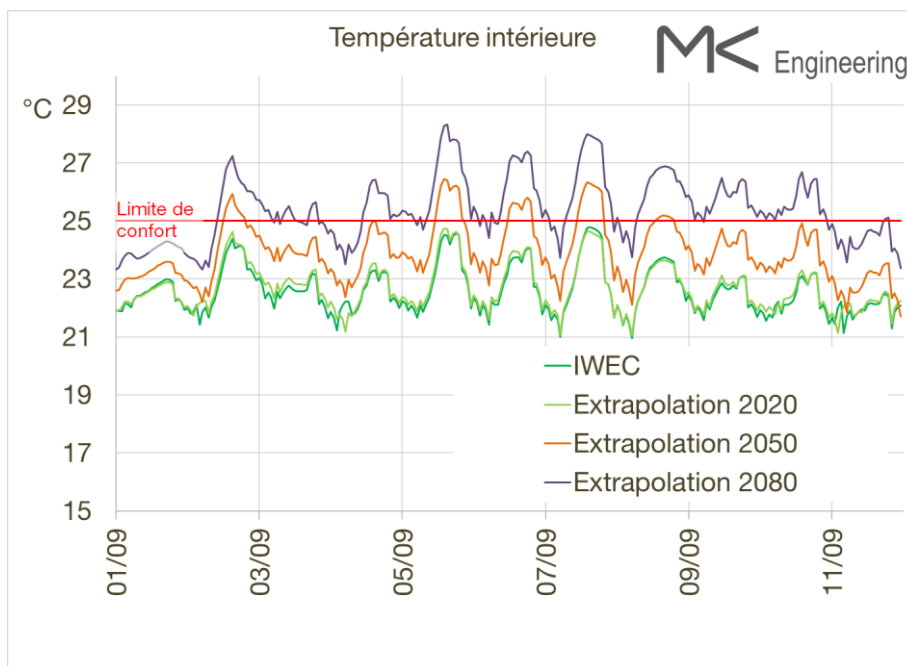


Figure 9 : température intérieure début septembre pour le fichier IWEK et sa projection en 2020, 2050 et 2080, pour une école donnée, classe orientée sud (MK Engineering)

Le graphique de la figure 9 montre l'évolution des températures intérieures pour la météo IWEK et son extrapolation en **2020, 2050 et 2080**. On voit que la **température** peut monter et devenir **inconfortable**, même en mi-saison, et qu'il sera plus difficile de se passer de refroidissement actif à l'avenir.

2. Effet îlot de chaleur

Un autre paramètre important est l'**effet d'îlot de chaleur (Urban Heat Island ou UHI)**. En effet, dans les villes, une différence de **2°C à 3°C⁸** par rapport à une zone rurale peut être mesurée (Figure 10). Cette différence est plus grande **la nuit**, ce qui induit un fort impact sur le night-cooling, qui peut donc s'avérer beaucoup moins efficace que prévu en zone urbaine.

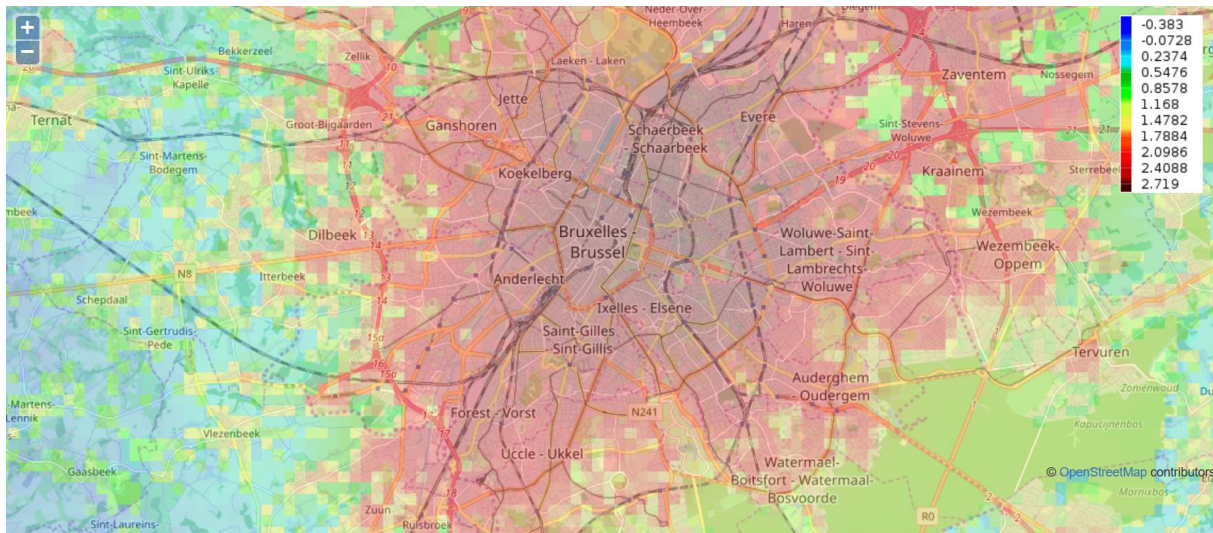


Figure 10 : Cartographie par le Vito de l'effet d'îlot de chaleur à Bruxelles⁹

Causes de l'îlot de chaleur

La différence de climat entre ville et campagne tire son origine de plusieurs facteurs :

- Il y a moins de végétation en ville, donc moins d'évapotranspiration pour rafraîchir l'air ;
- Les matériaux de revêtements ont des propriétés physiques différentes (albedo, émissivité, capacité thermique et conductivité thermique), ceux des villes stockant par conséquent plus de rayonnement solaire ;
- « Urban Canyon Effet » : les bâtiments hauts réfléchissent et absorbent plus de rayons solaires, tout en bloquant le vent ;
- (dans une moindre mesure :) le trafic routier, l'air chaud rejeté par les systèmes de refroidissement en été, les rejets thermiques de l'industrie et la pollution (par la modification des propriétés radiatives de l'atmosphère) contribuent également à rendre l'air plus chaud dans les villes que dans les campagnes.

L'effet d'îlot de chaleur se mesure en ΔT° entre la ville et la campagne, et plus précisément en différence de température d'air et différence de température de surface. Ces différences de températures évoluent au cours d'une journée de 24h et connaissent également des variations saisonnières.

Les mesures suivantes permettent d'atténuer l'effet d'îlot de chaleur :

- Toitures végétalisées
- Utilisation de revêtements de couleur claire (plus de réflexion, moins d'absorption de rayons solaires)
- Présence d'arbres (évapotranspiration et ombre)

⁸ <https://environnement.brussels/thematiques/air-climat/plan-forte-chaleur-et-pics-dozone/cartographie-des-ilots-de-fraicheur>

⁹ http://www.urban-climate.eu/services/eu_cities/

Résultats

L'effet d'îlot de chaleur est également l'objet de développements pour pouvoir en tenir compte dans les simulations dynamiques¹⁰. Ces données climatiques n'étant pas disponibles lors de notre étude de cas, nous avons artificiellement généré cet effet (addition d'un ΔT° sous forme d'une sinusoïde journalière, avec un maximum de 2°C à 5h du matin et un minimum de 0°C à 15h). Il est alors constaté que dans ce cas-ci, où le **night-cooling** est un élément prépondérant dans la stratégie de refroidissement de l'école, le **critère de confort est dépassé**, et ce même avec le fichier météo IWEK de base (Figure 11).

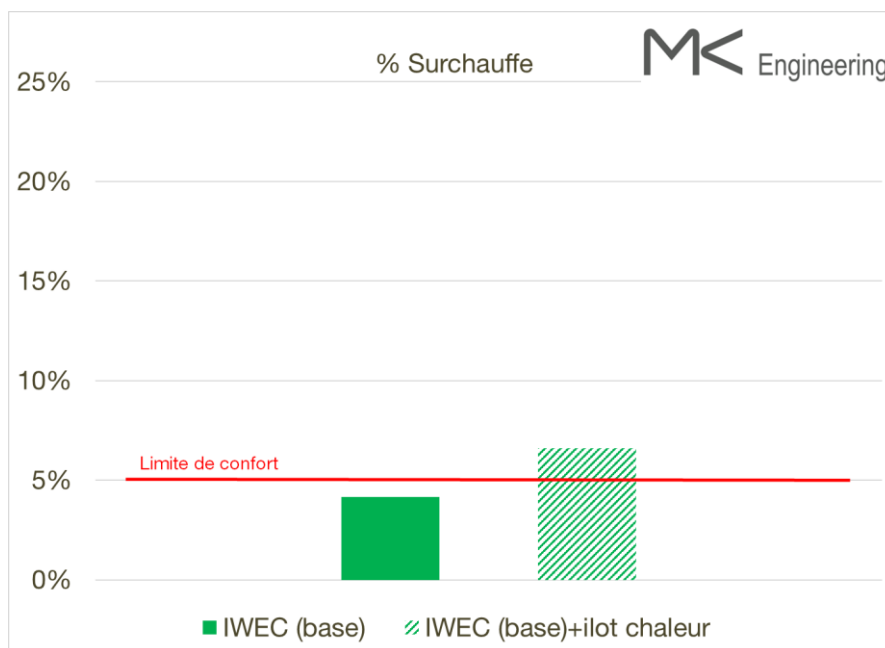


Figure 11 : nombre d'heures de surchauffe dans le bâtiment scolaire simulé en prenant en compte l'effet d'îlot de chaleur (MK Engineering)

Ce qu'on en retient...

La **surchauffe dans les bâtiments performants** est un défi pour la conception des bâtiments actuels. L'évolution de la programmation doit être anticipée par les auteurs de projets en concertation avec le maître d'ouvrage.

Au niveau de la **conception climatique**, il est nécessaire de vérifier le confort sur base d'une **année extrême** et il sera pertinent de simuler les bâtiments avec des **modèles climatiques futurs** pour s'assurer que dans 20 ans le confort pourra toujours être atteint.

Les **solutions passives** doivent être **privilegiées** (protections solaires, inertie thermique avec night-cooling) mais analysées au regard de ces paramètres **climatiques**, ainsi que de l'effet **d'îlot de chaleur**. Il sera vraisemblablement nécessaire de repenser les concepts architecturaux des bâtiments dans l'optique de diminuer ces surchauffes, et en dernier lieu, de recourir à des **systèmes actifs**. Cette étude ne porte que sur le confort d'été, il est évident que ces externalités ont également un impact sur le système de ventilation et les épaisseurs d'isolant à choisir pour la **période de chauffe**.

Toutes suggestions, ou demandes d'informations sont les bienvenues, n'hésitez pas à contacter Mirjana Velickovic (mve@mkengineering.be) responsable de la recherche sur l'évolution du climat et son impact sur la conception des bâtiments chez MK Engineering.

¹⁰ Kershawa, T, Sandersonb, M, Coleya, D, Eamesa, M. « Estimation of the urban heat island for UK climate change projections », Building Serv. Eng. Res. Technol. 31,3 (2010) pp. 251–263.