

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Îlots de chaleur urbains : comment adapter les outils numériques à la conception architecturale ?

Auteur : Sadek, Ramona

Promoteur(s) : de Boissieu, Aurélie; Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en "urban and environmental engineering"

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14597>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Année académique : 2021-2022

ILOTS DE CHALEUR URBAINS : COMMENT ADAPTER LES OUTILS NUMERIQUES A LA CONCEPTION ARCHITECTURALE ? CAS D'ETUDE EN FRANCE

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du
grade de master Ingénieur Civil Architecte par
SADEK Ramona

Promotrice : Prof. DE BOISSIEU Aurélie - LUCID

Copromoteur : Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury : CALIXTE Xaviera, DISSAUX Thomas

TABLE DES MATIERES

Résumé	3
Abstract	3
Remerciements	4
Avant-propos	5
Abbréviations / acronymes	6
Table des figures	6
1. INTRODUCTION	8
1.1. Informations générales : les dangers des îlots de chaleur urbains (ICU)	8
1.2. Pertinence du sujet : difficulté de l'intégration des ICU en conception	10
1.3. Objectifs de la recherche	11
1.4. Questions de recherche	11
Table des matières explicitée	11
2. ETAT DE L'ART	12
2.1. Les îlots de chaleur urbains	12
2.1.1. Définition	12
2.1.2. Mesure et confort thermique extérieur	14
2.1.3. Causes d'apparition	17
2.1.4. Stratégies de réduction	19
2.1.5. Solutions de réduction	24
2.2. Les outils numériques en conception architecturale	27
2.2.1. Le potentiel du numérique en conception	27
2.2.2. Les simulations numériques et leurs enjeux	29
2.2.3. Veille technologique	30
3. METHODOLOGIE	36
3.1. Description des méthodes employées	36
3.1.1. Concepts clefs	36
3.1.2. Normes utilisées	37
3.1.3. Choix du type d'évaluation	38
3.2. Opérationnalisation : données et indicateurs	40
3.2.1. Observations pendant l'essai	41
3.2.2. Enquête qualitative	43
3.2.3. Enquête quantitative auprès des utilisateurs	43
3.3. Sélection des variables et conditions de l'étude	44
3.3.1. Personnes et logiciels cibles	44
3.3.2. Tâches à effectuer	46

3.3.3. Cas d'étude	47
3.4. Préparation de l'expérience	49
3.4.1. Environnement de l'évaluation	49
3.4.2. Protocole de l'évaluation	50
3.4.3. Expérience 0	52
3.5. Analyse des données	52
3.5.1. Entretiens qualitatifs	52
3.5.2. Essais utilisateurs	52
3.6. Conditions aux limites et critères de qualité	53
4. RESULTATS	54
4.1. Entretiens ciblés	54
4.1.1. L'intégration des ICU aujourd'hui	54
4.1.2. Les enjeux liés aux ICU	54
4.1.3. L'utilisation des outils numériques	56
4.2. Essai préalable en interne	59
4.3. Essai d'utilisabilité	60
4.3.1. Taux de réussite des tâches	60
4.3.2. Conformité aux exigences utilisateurs	61
4.3.3. Efficacité	63
4.3.4. Efficience	67
4.3.5. Satisfaction	70
Bilan comparatif des logiciels	74
5. DISCUSSIONS	75
5.1. Reformulation de l'objet de l'étude	75
5.2. Constatations et recommandations	76
5.3. Forces et limites	78
5.4. Implication en pratique et travaux futurs	79
CONCLUSION	80
BIBLIOGRAPHIE	82
Annexe 1 : Projets ICU	87
Annexe 2 : Profils utilisateurs	89
Annexe 3 : Grille observation	95
Annexe 4 : Calcul SUS	101

Titre	Îlots de chaleur urbains : comment adapter les outils numériques à la conception architecturale ? Cas d'étude en France.
Auteure	Ramona SADEK
Promotrice	Aurélie DE BOISSIEU
Co-promoteur	Shady ATTIA
Section	Faculté des Sciences Appliquées, Master Ingénieur Civil Architecte
Année académique	2021-2022

RESUME

Les îlots de chaleur urbains (ICU) augmentent la température dans les villes et sont de plus en plus dangereux pour l'homme et la planète. Cependant, peu de concepteurs incluent ce phénomène en conception et utilisent les outils numériques existants.

Cette recherche a pour but de mettre en évidence les freins et les leviers à la prise en compte des ICU en France. L'objectif est d'identifier les problèmes d'utilisabilité des logiciels par des architectes, et les pistes d'amélioration. Deux méthodes sont employées : des entretiens qualitatifs ciblés sur des acteurs du milieu (architecte, urbaniste, développeur) et des essais d'utilisabilité comparant deux logiciels répandus dans le domaine : ENVI-met et Solène Microclimat.

Il est constaté qu'en l'état, ces logiciels ne sont pas utilisables facilement par les architectes. La phase d'import des modèles 3D est particulièrement critique et leurs interfaces gagneraient à être plus autodescriptives. Cependant, ces améliorations subiront toujours la limite de la volonté des concepteurs. Cela est notamment confirmé par les discussions, qui identifient la mise en place de réglementations environnementales comme un levier important. Ainsi les avancées technologiques doivent impérativement s'accompagner d'un changement des mentalités.

ABSTRACT

Urban heat islands (UHI) rise the temperature in cities and are increasingly dangerous for humans and the planet. However, few designers include this phenomenon in their design and use the existing digital tools.

This research aims to highlight the brakes and levers to the consideration of UHI in France. The objective is to identify the problems of usability of software by architects, and the points of improvement. Two methods are used: qualitative interviews targeting actors in the field (architects, urban planners, developers) and usability tests comparing two widespread software programs: ENVI-met and Solène Microclimat.

It was found that in their current state, these softwares are not easily usable by architects. The importing phase of the 3D models is particularly critical and their interfaces would benefit from being more self-descriptive. However, these improvements will always be limited by the will of the designers. This is confirmed by the discussions, which identify the implementation of environmental regulations as an important lever. Thus, technological advances must imperatively be accompanied by a change in mentalities.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu mes professeurs Aurélie De Boissieu et Shady Attia pour la qualité de leur accompagnement tout au long de cette recherche. En particulier, je leur suis reconnaissante de m'avoir encouragée dans chacune de mes propositions et d'avoir su recentrer mon énergie à plusieurs reprises.

Je tiens également à remercier les personnes qui ont participé à mes expériences. Toutes m'ont aimablement offert de leur temps et ont échangé avec moi avec beaucoup de considération. Elles ont non seulement augmenté mon niveau de connaissance sur le sujet, mais m'ont également donné la curiosité d'aller plus loin.

Merci à ma famille, qui m'a soutenue moralement malgré la distance et constitue encore et toujours ma plus grande force. Cela s'applique également pour mes 8 années d'études supérieures. Je félicite Ronald Sadek qui a finalement obtenu son doctorat avant que je n'obtienne mes diplômes.

AVANT-PROPOS

Cette recherche a été initiée par un constat : aujourd'hui encore, malgré la prise de conscience face au dérèglement climatique, les enjeux environnementaux ne sont pas assez intégrés. Mon expérience personnelle en agence m'a tristement confirmée que les études environnementales sont encore trop consultatives. A moins d'être un architecte déjà sensibilisé et acteur de conceptions durables, le projet ne sera pas écoresponsable. En cela, ce travail est humblement motivé par l'envie de rompre davantage les silos entre environnement et architecture.

D'autre part, mon vécu d'élève ingénieure-architecte m'a largement sensibilisée à la fatigue de conception que génère la prise en compte de multiples facteurs. A la fois fascinée et sceptique face aux avancées numériques, cette recherche était également l'occasion d'évaluer le potentiel de ces solutions. Ainsi, un but secondaire à ce travail était de m'orienter en tant que future conceptrice face à la question suivante « Les bonnes pratiques sont-elles suffisantes pour construire de manière responsable ? »

Enfin, l'îlot de chaleur urbain est un sujet qui me permettait d'étendre mon domaine de connaissance à une échelle encore peu explorée : la ville. Ayant grandi en milieu urbain, j'ai toujours recherché la nature. J'ai trouvé réponse à ce besoin au travers de mes années de scoutisme, de mes divers voyages et, grâce à ce travail, de mon expérience en tant qu'actrice de la ville.

ABBREVIATIONS / ACRONYMES

ICU	Ilot de chaleur urbain
IFU	Ilot de fraîcheur urbain
IR	Infrarouge
PET	Température Physiologique Equivalente
UTCI	Index Universel du Confort Thermique
BPS	Simulation de Performances des Bâtiments
CAO	Conception Assistée par Ordinateur

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Températures seuils pour la thermorégulation, (Fahed 2018)	8
Figure 2. Augmentation de l'indicateur thermique de 1947 à 2021 (Météo France) ...	9
Figure 3. Représentation spatiale de l'îlot de chaleur urbain (Pigeon et al. 2008)	12
Figure 4. Représentation temporelle de l'îlot de chaleur urbain (Oke 1982)	12
Figure 5. Ecart des températures de l'air entre une gare et un parc à Paris (Apor 2012)	13
Figure 6. Ecart de températures surfaciques sur la place Richebé à Lille (Métropole de Lille 2017)	13
Figure 7. Représentation des Zones Climatiques Locales (LCZ) (I. D. Stewart and Oke 2012)	16
Figure 8. Phénomène de piège radiatif dû au canyon urbain (Fahed 2018)	17
Figure 9. Schéma récapitulatif des sources des ICU (adaptée de Filiatreault 2015)	19
Figure 10. Illustration des albédos en milieu urbain (Métropole de Lille 2017)	20
Figure 11. Effet de l'arbre sur l'îlot de chaleur urbain (Apor 2012)	22
Figure 12. Schéma de mise en place de stratégies pour réduire les ICU	24
Figure 13. Comparaison des solutions de mitigation en terme de bénéfices et impacts (ADEME 2021)	26
Figure 14. Eléments modifiables par l'architecte (diagonale grise) pour atteindre des objectifs climatiques. Leurs impacts (en dessous de la diagonale) et limites (au-dessus de la diagonale) en fonction de l'échelle d'implication (Mills 2003)	27
Figure 15. Tournant de pensée de la conception assistée par ordinateur au computationnel (Aurelie De Boissieu 2021)	28
Figure 16. Toiture de la gare de Waterloo par Grimshaw (https://grimshaw.global/ , consulté le 31/05/22)	28
Figure 17. Critères de développement pour les outils de BPS (Attia 2010)	29
Figure 18. Simulations de la température de l'air via ENVI-met (https://www.envi-met.com/fr/architectes/ , consulté le 07/03/2022)	33
Figure 19. Tranches de températures de Score ICU (https://www.construction21.org/ , consulté le 22/12/21)	33
Figure 20. Comparaison du Score ICU de deux scénarios (https://www.youtube.com/ , consulté le 22/12/2021)	34
Figure 21. Conception centrée sur l'opérateur humain (ISO 9241-210 : 2019)	36
Figure 22. Normes utilisées dans cette recherche	38
Figure 24. Schéma récapitulatif de la méthodologie	39
Figure 25. Méthodes employées pour l'évaluation de l'utilisabilité des logiciels	44

Figure 26. Plan masse du projet Rive Gauche à Montpellier (source : site architecte Tourre Sanchis)	47
Figure 27. Rendu extérieur d'un bâtiment du quartier Rive Gauche	48
Figure 28. Modélisation du cas d'étude (à gauche Google Earth, à droite modèle Sketchup)	49
Figure 29. Environnement et organisation spatiale de l'expérience.....	50
Figure 30. Mindmap résumant la prise en compte des ICU en France selon les personnes interrogées	56
Figure 31. Nuage de mots issu de l'entretien avec le co-fondateur de Score ICU....	57
Figure 32. Mindmap résumant les points de vue des personnes interrogées sur les outils numériques	58
Figure 33. Modification de l'albédo d'un mur sur ENVI-met.....	59
Figure 34. Application d'un matériau depuis la vue 3D sur ENVI-met (écran de l'utilisateur 1)	62
Figure 35. Séparation des murs sur Solène Microclimat (écran de l'utilisateur 2)	62
Figure 36. Répartition du temps de réalisation des tâches	63
Figure 37. Processus suivi par l'utilisateur 2 pour la réalisation de la tâche 1 "Repérer les hotspots"	64
Figure 38. Interface du "Headquarter" de ENVI-met.....	64
Figure 39. Nombre d'erreur d'utilisation et de défaut d'utilisation au cours de l'essai	65
Figure 40. Erreur de l'utilisateur 1 : oubli d'activer un îcone	66
Figure 41. Nombre d'aide extérieure suscitée par l'utilisateur 1 pendant l'essai.....	66
Figure 42. Nombre de clics total et superflus par tâche.....	68
Figure 43. Nombre d'éléments remplis au clavier par tâche	69
Figure 44. Nature des éléments remplis au clavier durant l'essai	69
Figure 45. Commentaires de l'utilisateur 2 durant la réalisation de la tâche n°1	70
Figure 46. Réponse des utilisateurs quant à l'interface des logiciels.....	71
Figure 47. Réponses des utilisateurs sur les outils simplificateurs	72
Figure 48. Matrice AFOM de Solene Microclimat (to do)	74
Figure 49. Matrice AFOM de ENVI-met (version d'essai)	74
 Tableau 1. Comparaison des indices de confort extérieur (Perini et al. 2017).....	15
Tableau 2. Indicateurs urbains inclus dans la typologie LCZ (François 2018).....	15
Tableau 3. Récapitulatif des mesures fondées sur la nature	25
Tableau 4. Récapitulatif des mesures fondées sur l'urbain	25
Tableau 5. Normes utilisées dans cette recherche en rapport avec l'utilisabilité	37
Tableau 6. Critères d'observation de l'essai d'usabilité	43
Tableau 7. Personnes interrogées dans le cadre des entretiens qualitatifs.....	45
Tableau 8. Description des logiciels testés.....	45
Tableau 9. Participants à l'essai d'utilisabilité	46
Tableau 10. Protocole de l'essai utilisateur	51
Tableau 11. Configuration pour l'essai de simulation ENVI-met.....	59
Tableau 12. Observations sur les utilisateurs durant les essais	60
Tableau 13. Réussite des tâches par les utilisateurs.....	60
Tableau 14. Conformité aux exigences utilisateurs	61
Tableau 15. Nature des aides suscitées par l'utilisateur 1 pendant l'essai	67
Tableau 16. Réponse des utilisateurs quant à leur ressenti suite à l'essai	70
Tableau 17. Score des deux logiciels suite au SUS	72
Tableau 18. Réponses des utilisateurs au SUS	73

1. INTRODUCTION

1.1. Informations générales : les dangers des îlots de chaleur urbains (ICU)

Les îlots de chaleur urbains (ICU) se traduisent par une hausse de la température dans les villes par rapport aux campagnes voisines (Iain Douglas Stewart 2011). Cette surchauffe génère de l'inconfort pour les piétons mais peut également entraîner des conséquences plus préoccupantes.

Tout d'abord d'un point de vue de la santé, en France la chaleur a causé près de 15 000 décès en 15 jours lors de la canicule de 2003, principalement à Paris et Lyon (Laaidi 2012). Plus récemment, durant l'été 2021 au Canada, des températures de 49,5°C ont été atteintes dans la ville de Vancouver, générant près de 500 décès en l'espace de 2 jours. Une étude sur 10 ans de 18 villes françaises attribue 1,2% de la mortalité totale annuelle à la chaleur (Corso, Pascal, and Wagner 2017). Cette étude montre également que le risque de mortalité apparaissait avec des températures moyennes journalières parfois très modérées (21°C). En effet, si le corps humain est soumis trop longtemps à une température trop élevée, les mécanismes de thermorégulation ne suffisent plus à le refroidir et le risque de décès augmente (Valette and Cordeau 2010). La figure ci-dessous illustre les températures permettant la thermorégulation du corps. C'est particulièrement le cas lors des nuits dites « tropicales » durant lesquelles les températures dépassent les 20°C. Les personnes âgées et celles en situation précaire sont les premières touchées par ce danger.

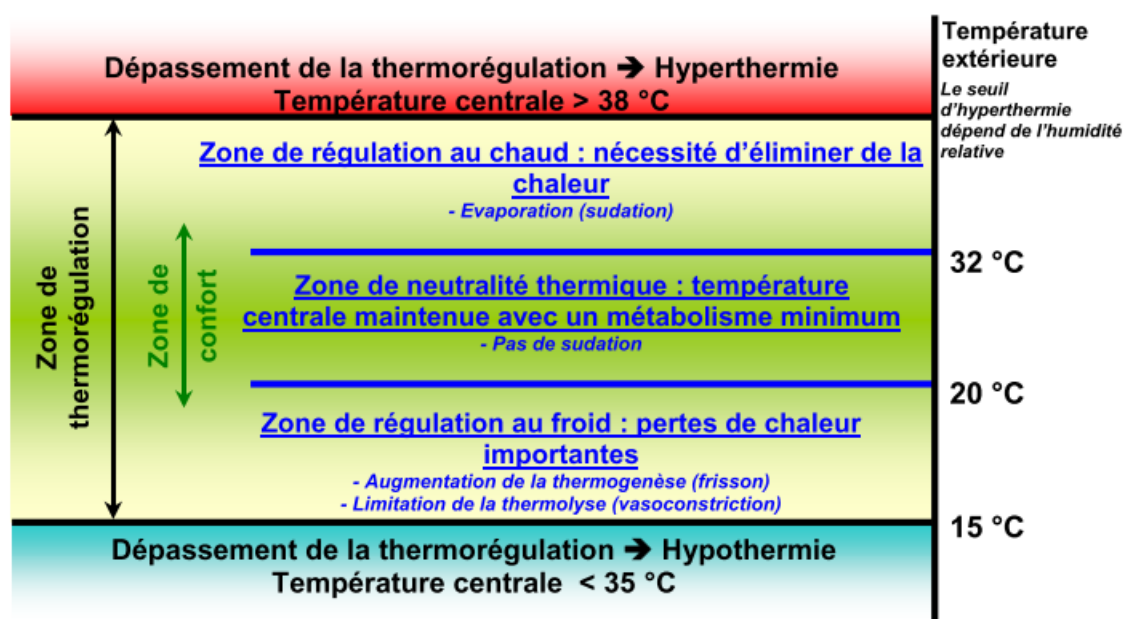


Figure 1. Températures seuils pour la thermorégulation, (Fahed 2018)

Pour l'Etat cela génère également un impact financier important. Santé Public France estime les coûts des passages aux urgences et des consultations SOS Médecins pour causes de chaleur entre 2015 et 2020 de 22 à 37 milliards d'euros. (Adélaïde 2021)

D'un point de vue énergétique, les ICU peuvent entraîner une augmentation de 19% de l'utilisation de la climatisation en été (Li et al. 2019). Or ces systèmes rejettent eux-

mêmes de la chaleur, ce qui augmente la température en ville. Plus encore, il a été montré qu'une ville qui subit un îlot de chaleur urbain voit l'efficacité des climatisations réduite de 25%, ce qui amène à surdimensionner ces systèmes (Santamouris et al. 2001). A cela s'ajoute que le pic de consommation d'électricité double en période de chaleur, ce qui surcharge le réseau électrique.

Une autre conséquence est l'augmentation des pluies. Les îlots de chaleur créent des courants d'air chaud ascendants qui favorisent la formation de dôme nuageux. Des pluies accrues sont alors plus fréquentes (U.S. Global Change Research Program 2018). Selon le taux d'imperméabilisation de la zone, cela peut surcharger les réseaux hydrauliques voire créer des inondations. La pollution de l'air peut aussi causer de nombreux problèmes de santé étant donné que les aérosols sont ramenés vers le sol.

Ces conséquences néfastes doivent toutefois être modérées. D'une part, les ICU permettent de réduire la consommation de chauffage en hiver de 18.7% (Li et al. 2019) là où 3.9% des décès sont attribués au froid (Corso, Pascal, and Wagner 2017). D'autre part les populations s'adaptent progressivement à la chaleur via une meilleure connaissance des risques et des mesures préventives (Fouillet et al. 2008).

Cependant, les prévisions de températures continuent d'augmenter et les hivers se réchauffent. La figure ci-dessous montre que cette fin d'année 2021 a été la plus chaude que la France ait connue depuis 1947. Quant à la période estivale, le dernier rapport du GIEC s'accorde sur le fait que les zones urbanisées seront de plus en plus affectées par des vagues de chaleur longues et intenses (IPCC (GIEC) 2021).

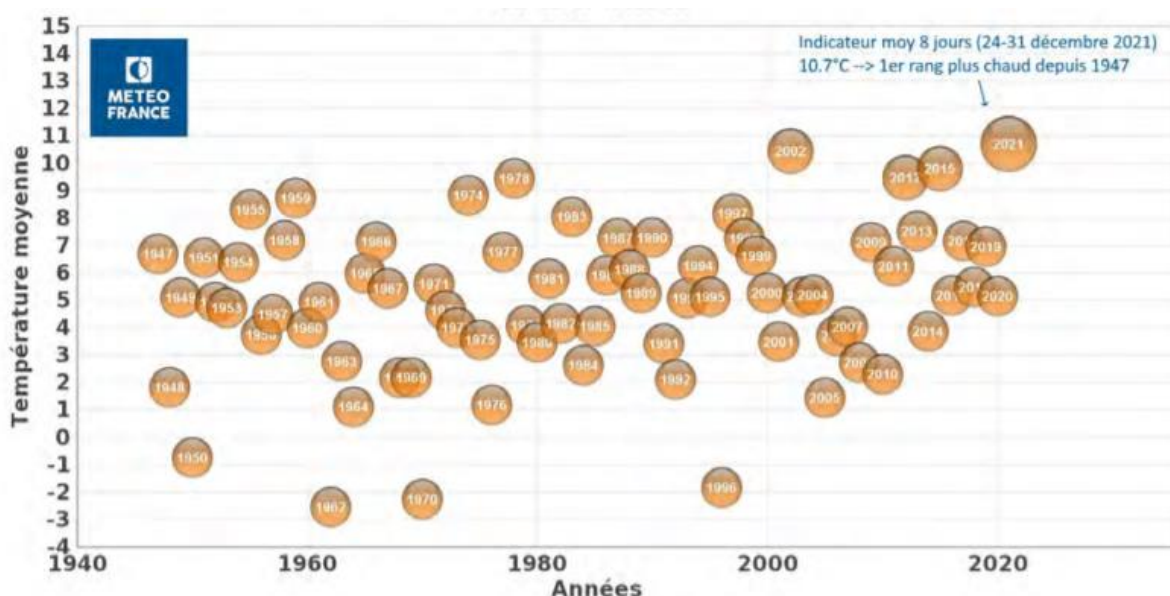


Figure 2. Augmentation de l'indicateur thermique de 1947 à 2021 (Météo France)

Les projections sur l'impact en termes de mortalité ne sont pas plus rassurantes. Avec un réchauffement du climat de +2°C, le taux de mortalité dû à la chaleur pourrait doubler (Pascal et al. 2020). Il est important de questionner aujourd'hui la prise en compte du phénomène d'îlot de chaleur urbain à l'échelle des acteurs de la ville.

1.2. Pertinence du sujet : difficulté de l'intégration des ICU en conception

Si les îlots de chaleur sont un problème global, il est de la responsabilité de chaque concepteur de réaliser, à l'échelle locale, un projet qui façonne la ville de manière résiliente.

Lors de ma propre expérience d'ingénieur-architecte stagiaire, j'ai pu constater que le sujet des ICU est très peu traité par les architectes. En effet, des discussions préalables avec des architectes mais également des ingénieurs en environnement ont montré que ce phénomène multifactoriel nécessite beaucoup de temps et d'énergie pour être traité. Cela s'est confirmé lors des recherches de cas d'étude où seul 23 projets sur les 186 parcourus abordent le sujet des ICU (cf : Annexe 1 « Projets ICU »). Cela peut s'expliquer par les raisons suivantes :

- La France n'est pas concernée par le phénomène des îlots de chaleur urbain. Cette hypothèse est révoquée par la littérature scientifique
- La prise de conscience de l'importance du sujet est encore trop faible. Cette hypothèse est infirmée par les entretiens
- Les ICU sont trop complexes pour intégrer le processus de conception architecturale. Cette hypothèse sera confirmée par les expériences

Ce manque de prise en compte est symptomatique de la surcharge de contraintes à laquelle l'architecte est déjà confronté en conception. En effet, devant le confort intérieur et les performances énergétiques demandées aux bâtiments, le confort thermique extérieur n'est pas prioritaire. D'autant plus qu'il s'agit d'un enjeu à l'échelle de la ville et non visible (contrairement à un feu ou une inondation) ce qui peut atténuer l'attention des architectes face aux dangers de ce phénomène. Mon expérience en agence m'a permis d'observer ce phénomène de surcharge cognitive mais a également mis en évidence un autre facteur significatif : le temps de calcul nécessaire pour traitement des ICU. Même avec l'utilisation de logiciels de simulation, les calculs de l'impact d'un bâtiment sur l'îlot de chaleur généré pouvaient prendre jusqu'à 2 semaines, ce qui ne rentre pas dans la majorité des délais des concours architectes.

Pourtant, le numérique constitue une clef dans l'analyse des îlots de chaleur urbains. Les progrès en climatologie urbaine sont en partie dus au développement des simulations numériques (DIAB et al. 2012). L'utilisation de ces outils permet de prendre en compte les multiples critères et de tester plusieurs scénarios pour choisir le meilleur. Les solutions ainsi intégrées en conception seront beaucoup plus efficaces que toute solution palliative ajoutée après l'exécution du projet. Les outils numériques utilisés durant les premières phases de conception permettent donc d'orienter le projet de manière à réduire plus efficacement les ICU.

Progressivement, cet enjeu intègre également les certifications. C'est notamment le cas avec le lancement de la certification HQE-Aménagement en 2011 et prochainement la 4^e version de la certification HQE Bâtiment Durable qui valorisent l'étude des ICU (source : <https://www.greenaffair.com/>, consulté le 22/12/21). Plus encore, on voit apparaître la notion d'îlot de fraîcheur urbain (IFU). Ces zones, souvent très végétales, sont des espaces recherchés par les villes puisqu'ils permettent de réduire la température tout en apportant une meilleure qualité de vie aux habitants. Inclure des IFU dans les projets est une réelle opportunité pour les architectes de participer à une conception de la ville plus résiliente.

1.3. Objectifs de la recherche

Le but global de cette recherche est d'améliorer la prise en compte des îlots de chaleur urbain par les architectes. L'objectif est donc de comprendre en quoi ce phénomène est difficile à traiter aujourd'hui et comment améliorer son intégration en conception au travers des outils numériques. Ainsi, les objectifs spécifiques sont :

- Identifier les enjeux et facteurs impactant les îlots de chaleur urbains
- Identifier les solutions numériques à disposition de l'architecte pour traiter cet enjeu
- Comparer deux outils de simulation répandus dans le traitement des ICU
- Mettre en évidence les problèmes d'utilisabilité de ces outils et pistes d'amélioration

Une finalité de ce document est de fournir des recommandations et un retour utilisateur aux développeurs des outils traitant des ICU.

1.4. Questions de recherche

La problématique de cette recherche est ainsi formulée :

Comment adapter les outils numériques traitant des îlots de chaleur urbains à la conception architecturale ? Cas d'étude en France.

Les sous-questions associées sont :

- Comment les architectes intègrent-ils l'enjeu des îlots de la chaleur urbains dans leur conception ?
- Les outils numériques traitant des ICU sont-ils adaptés à une utilisation par les architectes ?
- Quelles sont les pistes d'amélioration de ces outils pour l'intégration de cet enjeu en conception ?

Table des matières explicitée

Le premier chapitre de l'état de l'art permet de définir le phénomène d'îlot de chaleur urbain et les stratégies pour réduire son impact.

Le second chapitre se concentrera davantage sur les outils numériques existants pour traiter les ICU. A l'issue de cette partie, deux logiciels sont choisis pour être étudiés plus en profondeur.

La méthodologie permet de décrire la manière dont ces logiciels vont être évalués et comparés. Ce chapitre permet également d'expliquer comment des discussions ciblées vont permettre de mieux comprendre le contexte autour des ICU.

La partie résultat rend fait suite aux discussions diverses et à l'évaluation des logiciels. Elle met notamment en évidence les problèmes d'utilisabilité relevés qui seront traités ensuite dans la partie discussion.

Cette dernière partie permet d'établir des recommandations pour améliorer l'utilisabilité des outils pour les architectes et ainsi répondre à la problématique de recherche.

2. ETAT DE L'ART

2.1. Les îlots de chaleur urbains

2.1.1. DEFINITION

Les îlots de chaleur urbains sont définis par une différence de température ΔT_{u-r} entre les villes et les zones rurales voisines (cf figure 3). Cette surchauffe est particulièrement détectable la nuit (cf figure 4) du fait que la chaleur accumulée en journée est évacuée. Or la dissipation de cette chaleur est plus efficace dans « champs nu » que dans un centre bâti (Oke 1982). Les ICU peuvent durer de quelques heures à plusieurs années et s'étendre de 100 m à 10 000 m (Iain Douglas Stewart 2011).

Les premières documentations d'îlot de chaleur urbain ont été réalisées en 1833 par le météorologue britannique Luke Howard qui mesure que Londres est plus chaude que sa campagne (Howard 1833). Les travaux de Tim Oke dans les années 1970 ont ensuite largement contribué à la compréhension des ICU et leurs caractéristiques.

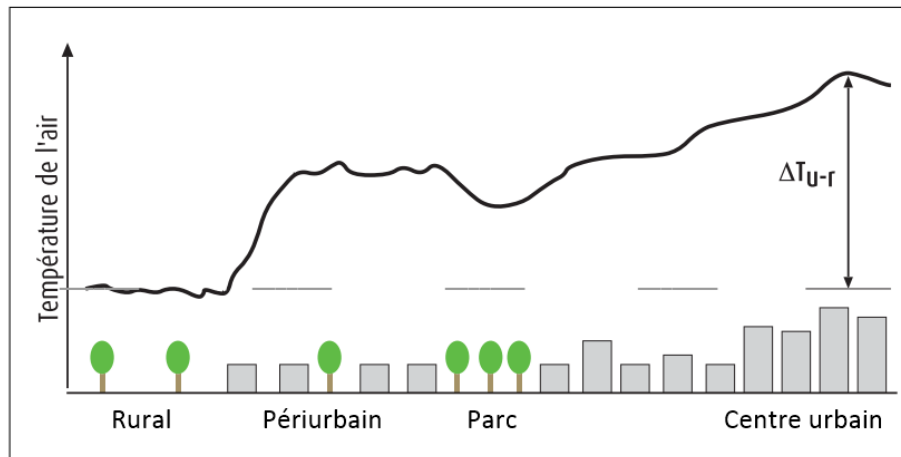


Figure 3. Représentation spatiale de l'îlot de chaleur urbain (Pigeon et al. 2008)

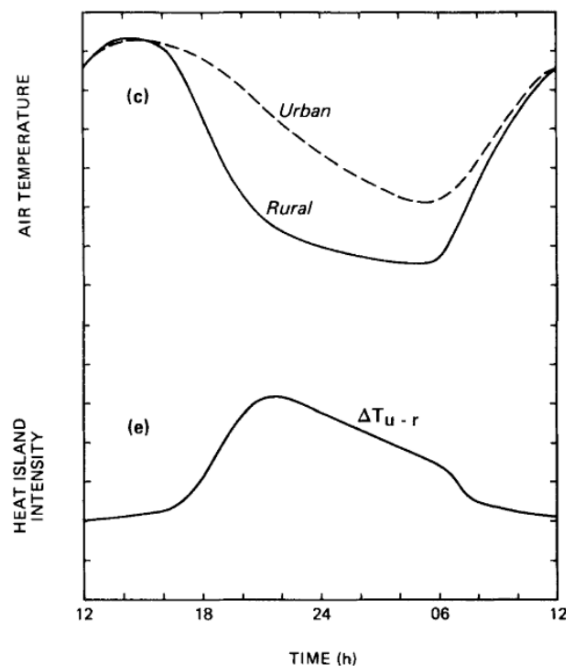


Figure 4. Représentation temporelle de l'îlot de chaleur urbain (Oke 1982)

L'écart de température est appelé « intensité de l'ICU ». En Europe, il représente en moyenne sur l'année 1 à 3°C et peut s'accroître à 10°C lors des nuits d'été (Valette and Cordeau 2010)(U.S. Global Change Research Program 2017). Cette intensité dépend fortement des conditions topographiques de la ville (latitude, proximité à la mer, relief), météorologiques (pluie, couverture nuageuse, vent), climatiques (tendance des températures, fréquence des pluies) et anthropologiques (minéralisation des sols, densité de population, trafic routier). La multiplicité de ces facteurs rend particulièrement difficile leur comparaison.

Pour quantifier l'intensité des ICU, deux courants de recherche se sont développés : en mesurant les températures de l'air (cf figure 5), on parle alors d'ICU atmosphérique, et en mesurant les températures de surface (cf figure 6), dit ICU surfaciques. On distingue également les ICU souterrains, liés à la conduction de chaleur dans le sol, mais ceux-ci sont très peu présents dans la littérature scientifique (Iain Douglas Stewart 2011).

Figure 15 – Mesures de températures de l'air relevées entre la gare de l'Est et le parc des Buttes-Chaumont le 1^{er} août 2011 vers 22h (20h UTC)

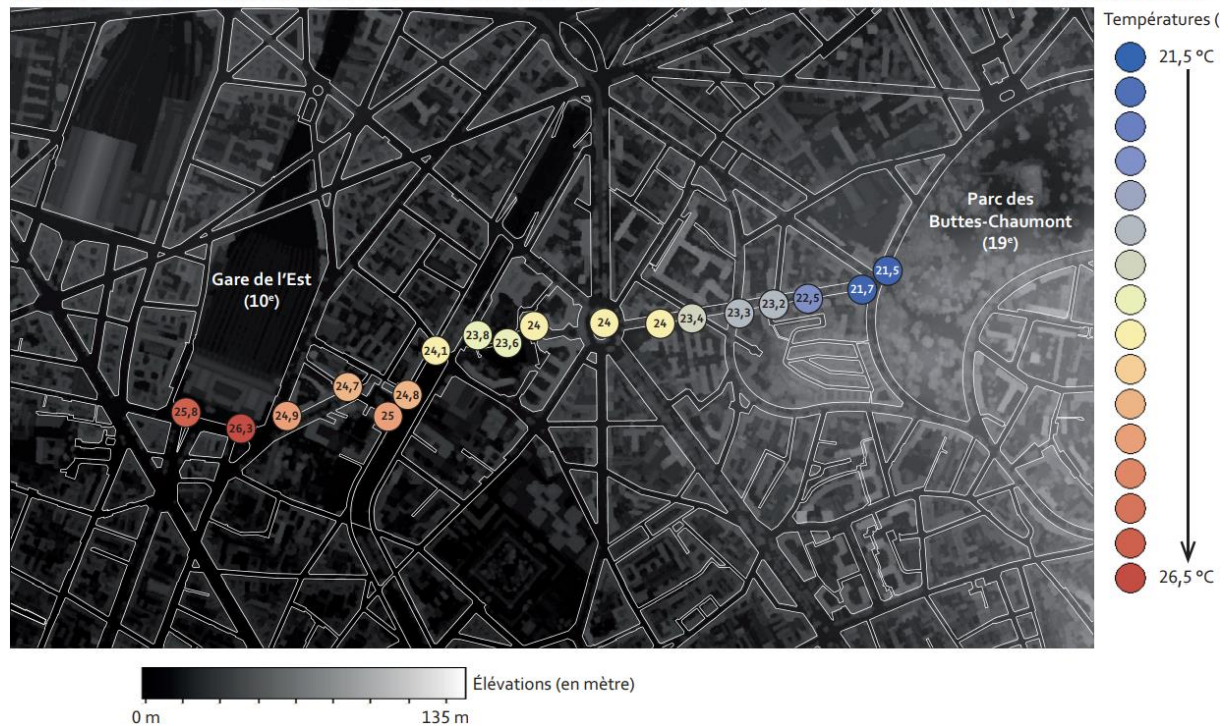


Figure 5. Ecart des températures de l'air entre une gare et un parc à Paris (Apar 2012)

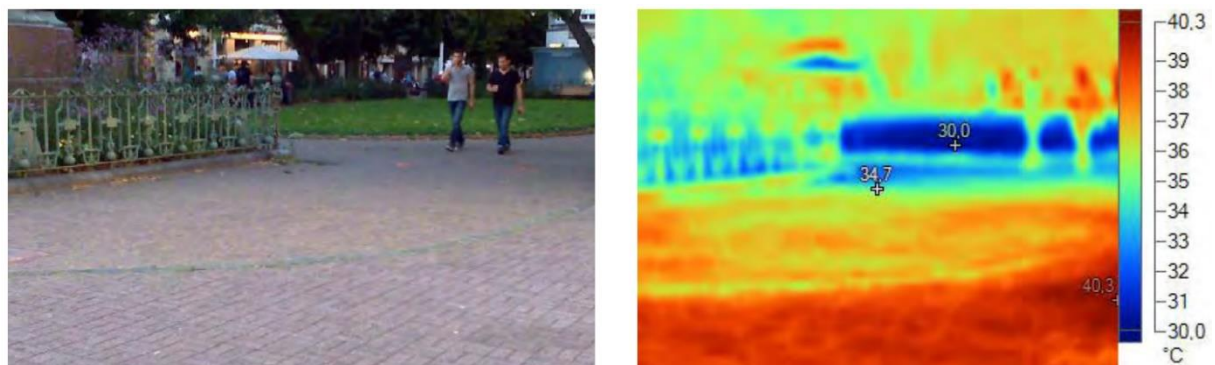


Figure 6. Ecart de températures surfaciques sur la place Richebé à Lille (Métropole de Lille 2017)

2.1.2. MESURE ET CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR

Il existe deux types d'ICU atmosphérique selon l'échelle verticale considérée : ceux dans la couche limite atmosphérique (zone impactée par l'action du vent combinée à l'effet Coriolis de la rotation de la terre (Monin 1970), de l'ordre de 1 000 m (Couche limite planétaire - Glossaire Meteo France n.d.)) et ceux dans la canopée urbaine (zone entre le sol et la surface des toits, fortement influencée par l'activité humaine (Oke 1976), de l'ordre de 100 m). Les ICU de la canopée urbaine sont les plus directement impactant pour l'homme et constituent le cœur des préoccupations.

Les températures de l'air sont généralement mesurée à 2 m du sol par des capteurs mobiles qui traversent la ville ou via des mesures ponctuelles entre centre-ville et périphérie rurale (Iain Douglas Stewart 2011).

Les ICU surfaciques quant à eux sont très présents dans la littérature du fait que la température de surface est une donnée disponible à l'échelle planétaire (via les mesures satellites)(Voogt and Oke 2003). Les écarts mesurés sont beaucoup plus importants. Par exemple, l'asphalte exposé au soleil peut atteindre des températures proche de 50°C (Doulos, Santamouris, and Livada 2004).

Les températures de surface et températures de l'air sont liées (Kawashima et al. 2000)(Mostovoy et al. 2006). Cependant, cette corrélation dépend de beaucoup de facteurs et il n'existe pas aujourd'hui de relation standardisée liant ces deux données (Yang, Wang, and Kaloush 2015)(Ward et al. 2016).

Pour évaluer le confort extérieur, la température moyenne radiante a été évaluée plus pertinente que la température de l'air. Le vent joue également un rôle important dans la perception de la chaleur (Perini et al. 2017). En effet, les transferts de chaleur entre le corps humain et son environnement se répartissent de la manière suivante :

- 35% par convection (à cause de la température de l'air et de la vitesse du vent)
- 35 % par rayonnement (dû au rayonnement solaire direct ou au rayonnement diffus émis par les matériaux environnants)
- 24 % par évaporation (en transpirant)
- 5% par la respiration et la digestion (éléments froids qui pénètrent dans le corps)
- 1% par conduction (pieds sur sol chaud)

Ces données sont notamment prises en compte au travers d'indicateurs internationaux : le Physiological Equivalent Temperature (PET) et le Universal Thermal Confort Index (UTCI). Ces indicateurs varient selon la géolocalisation, mais sont comparables pour les villes d'Europe de climat tempéré (cf tableau ci-dessous).

PMV (indoor)	PET (Germany)	UTCI	Sensation vote
	<4	<-40	Very cold
		-40-27	
-3	4-8	-27-13	cold
-2	8-13	-13/0	cool
-1	13-18	0-9	Slightly cool
0	18-23	9-26	Neutral
1	23-29	26-32	Slightly warm
2	29-35	32-38	Warm
3	35-41	38-46	Hot
	>41	>46	Very hot

Tableau 1. Comparaison des indices de confort extérieur (Perini et al. 2017)

Pour faciliter l'échange mondial autour des observations de températures urbaines, un système de classification des espaces urbains a été créé : les Zones Climatiques Locales (LCZ) (I. D. Stewart and Oke 2012). Cette classification est résumée schématiquement dans la figure 7 et prend en compte les indicateurs suivants :

Domaine d'intervention	Indicateur urbains
Morphologie urbaine	Facteur de vue du ciel
	Rapport d'aspect
	Hauteur moyenne des bâtiments
	Longueur de rugosité effective
Occupation des sols	Pourcentage de surface bâtie
	Pourcentage de surface imperméable
	Pourcentage de surface perméable
Matériaux urbains	Effusivité thermique
	Albédo
Métabolisme urbain	Flux de chaleur anthropique

Tableau 2. Indicateurs urbains inclus dans la typologie LCZ (François 2018)

Quatre variables modifiant significativement les zones au cours de l'année sont aussi incluses : le feuillage des arbres, la couverture de neige, l'assèchement des sols et leur engorgement en eau.

Built types

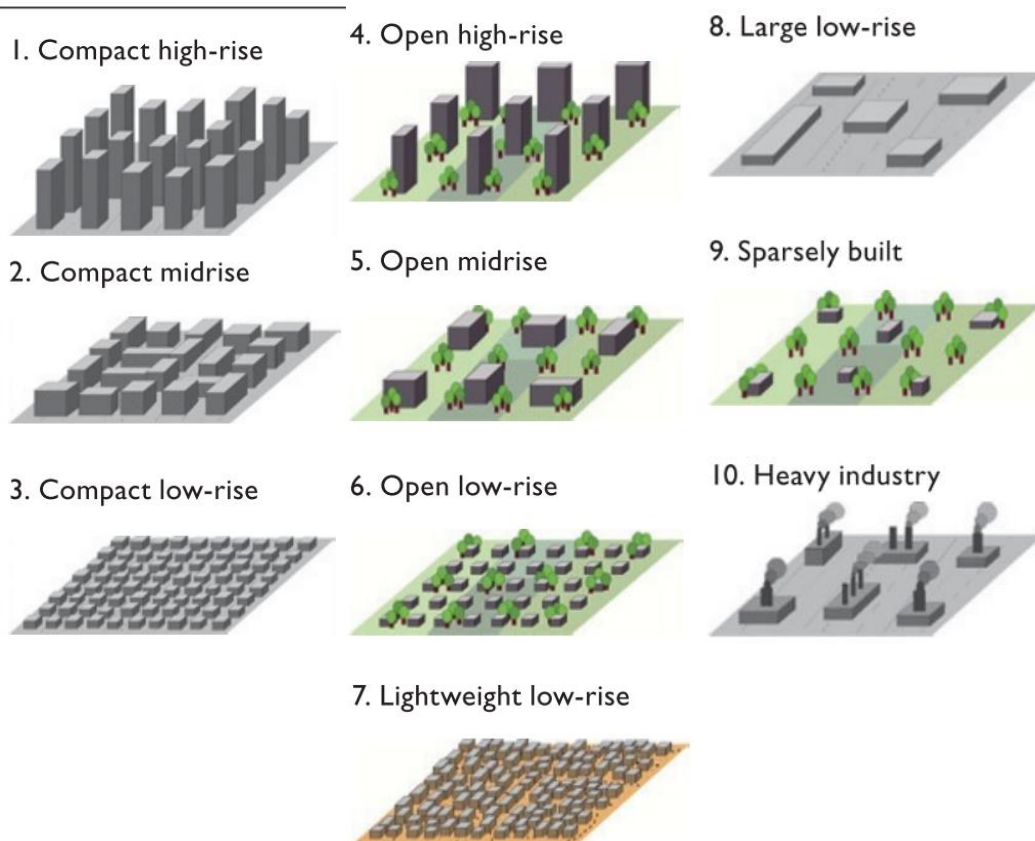


Figure 7. Représentation des Zones Climatiques Locales (LCZ) (I. D. Stewart and Oke 2012)

Cette classification permet déjà d'introduire les facteurs impactant les îlots de chaleur urbains.

2.1.3. CAUSES D'APPARITION

L'apparition des ICU est due à une combinaison de facteurs naturels (rayonnement solaire, réchauffement de la terre) et anthropologiques (densification urbaine, rejets de chaleur) (Valette and Cordeau 2010). Ce chapitre revient sur chacun de ces facteurs et permet d'identifier les leviers sur lesquels l'architecte peut agir.

Le soleil

Le rayonnement infra-rouge (IR) émis par le Soleil est la principale source de chaleur de la Terre. Ce rayonnement, de courte longueur d'onde, représente la moitié du rayonnement solaire total (Valette and Cordeau 2010). Au cours de leur propagation, les rayons sont réfléchis ou absorbés par les différents obstacles rencontrés (atmosphère, nuage, sol, toiture, etc.). Lorsque le rayonnement direct est absorbé, il est réémis plus tard sous forme de rayons IR de grande longueur d'onde. On parle alors de rayonnement diffus qui, à son tour, peut être réfléchi ou absorbé. C'est le rayonnement diffus émit par la ville qui est à l'origine de tout ICU nocturne.

En Belgique par exemple, la quantité d'énergie solaire reçue au sol représente 1 000 kWh/m²/an (Ensoleillement - Energie Plus Le Site 2010). Pour la commune de Uccle (région Bruxelles-Capitale), c'est en moyenne sur l'année 40% du rayonnement direct et 60% diffus (Ensoleillement - Energie Plus Le Site 2010). Ce ratio varie selon les saisons et la couverture nuageuse. Chaque surface de la ville reçoit ensuite une quantité d'énergie variable selon son orientation et son inclinaison par rapport au soleil, on parle « d'effet orientation » (Métropole de Lille 2017).

La forme urbaine et l'effet « canyon »

La succession des réflexions-absorptions des rayons solaires crée un phénomène de « piège à chaleur ». Cela se traduit par une augmentation de la température ambiante. Si ce phénomène peut être mis à profit comme c'est le cas dans les serres d'agriculture, il constitue un réel problème lorsqu'il est non souhaité.

Du fait de sa géométrie complexe, la ville offre de multiples surfaces de réflexion et d'absorption. En particulier, les rues étroites, bordées de part et d'autre de bâtiments hauts, sont les principaux pièges à chaleur. On les appelle « canyons urbains ». La représentation schématisée ci-dessous permet d'apprécier le phénomène de multiples réflexions qu'ils génèrent.

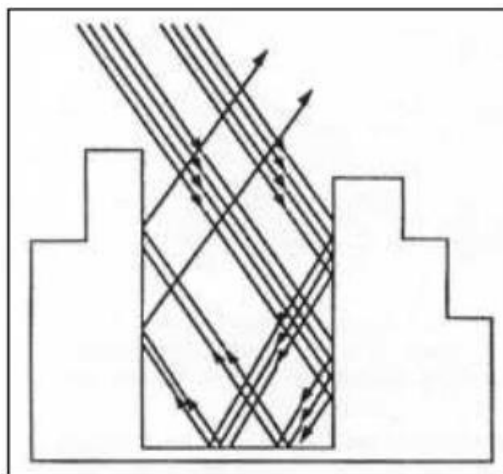


Figure 8. Phénomène de piège radiatif dû au canyon urbain (Fahed 2018)

Le jour, l'augmentation des rayons réfléchis dans la ville génère une augmentation de la température de l'air (jusqu'à une dizaine de degrés (Doya 2010)). Les matériaux absorbent une certaine quantité d'énergie, on parlera « d'effet matériaux » (Métropole de Lille 2017). La nuit, l'énergie accumulée est diffusée mais son évacuation vers l'atmosphère est entravée ce qui augmente les ICU nocturnes (Ryu and Baik 2012) (U.S. Global Change Research Program 2018). La ville de Lille estime que la morphologie urbaine est responsable de 1°C sur les 9°C mesurés entre Lille et Tourcoing (Métropole de Lille 2017). La question de la géométrie des rues se posait dès les recherches de Oke « *Does urban climate research have quantitative guidelines to offer regarding street geometry?* » (Oke 1988). Aujourd'hui il n'existe pas de réponse générique et il faut étudier ces rues au cas par cas.

L'humain

Les facteurs anthropogéniques contribuent à 36% des ICU diurne et 86% des ICU nocturnes (Grimmond et al. 2010). Parmi les sources, les transports motorisés sont parmi les plus grands contributeurs à la chaleur générée en ville. Comme vu précédemment, on compte aussi les climatiseurs et systèmes de chauffage. Un lien entre l'intensité des ICU et la densité de population a également été fait (Yang, Wang, and Kaloush 2015). Ces facteurs sont difficiles à modérer par un architecte. Il s'agit avant tout de sensibiliser la population quant aux rejets de chaleur et de limiter la densification des villes.

La météo

L'augmentation de chaleur est fortement influencée par les conditions météorologiques. En absence de vent, le refroidissement par convection diminue. En absence de nuage, l'ensoleillement direct est plus fort et augmente l'ICU diurne. Cependant, l'évacuation de chaleur est plus facile le soir et réduit l'ICU nocturne (Iain Douglas Stewart 2011). L'humidité relative de l'air impacte également la capacité de refroidissement par évaporation. Par exemple, le corps humain sue plus difficilement dans un climat humide et se refroidit donc moins bien.

Les vagues de chaleur

Les vagues de chaleur sont des périodes durant lesquelles les températures sont anormalement élevées et désagréables (Mach et al. 2014). Elles ont pour effet d'accentuer les ICU pouvant mettre en danger la santé occupants des bâtiments comme des passants. Lors des vagues de chaleur de juillet 2006 en Europe, les îlots de chaleur atteignaient en moyenne 16% de la superficie des villes. Leur intensité a été augmentée de 1.18°C (Ward et al. 2016). Lorsque ces vagues de chaleur sont accompagnées par une hausse d'humidité relative, les températures ressenties sont d'autant plus fortes (Valette and Cordeau 2010).

La figure ci-dessous reprend les sources à l'origine des îlots de chaleur urbains.

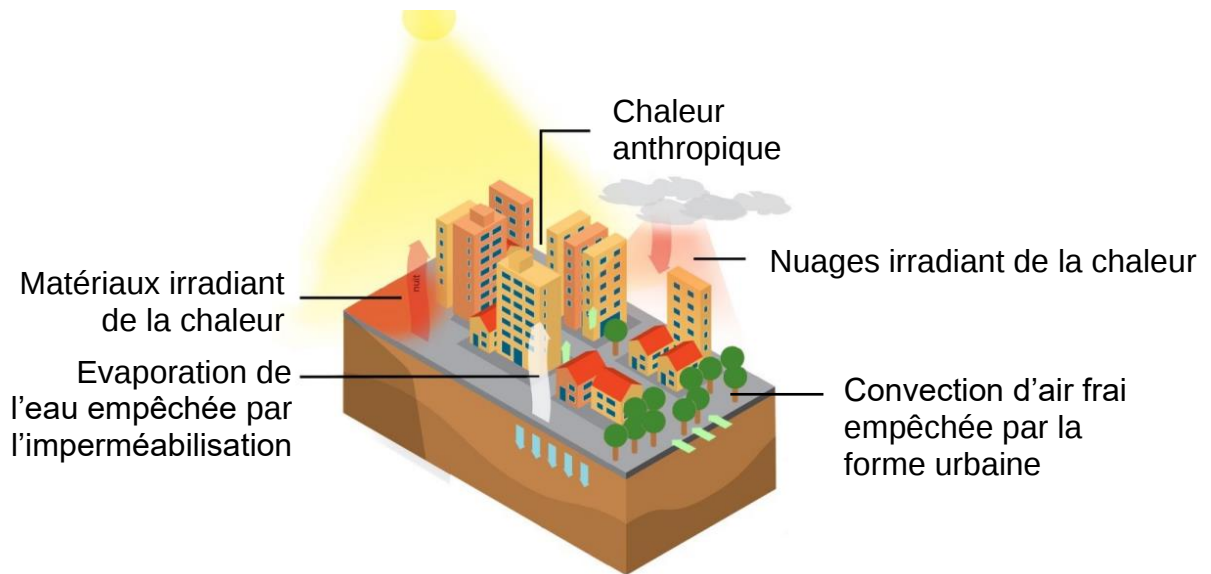


Figure 9. Schéma récapitulatif des sources des ICU (adaptée de Filiatreault 2015)

2.1.4. STRATEGIES DE REDUCTION

Si on ne peut pas contrôler l'énergie émise par le soleil, il est du ressort de l'architecte de contrôler la manière dont on la reçoit. Ce chapitre met en évidence les stratégies de mitigation des ICU.

Ombrage et compacité

Minimiser l'énergie reçue par le soleil est un premier levier pour réduire la surchauffe des villes. Cela peut être fait en réduisant les surfaces créées, par exemple en luttant contre l'étalement urbain.

A l'échelle de l'architecte, cela peut passer par la conception de bâtiments compacts (moins de mètre linéaire de mur pour une même surface au sol). Réduire l'exposition des façades via des études d'ombrage peut aussi permettre d'accumuler moins de chaleur. En effet, il a été montré que la nuit, les radiations provenant des surfaces verticales contribuent plus au réchauffement de l'atmosphère que l'absence de vent ou l'effet des rues canyon (Ryu and Baik 2012).

Ce levier est cependant fort limité le confort intérieur qui nécessite un minimum d'exposition directe et de lumière naturelle. Le programme architectural et le contexte dans lequel s'implante le bâtiment peuvent aussi impliquer des volumétries moins compactes.

L'albédo

Augmenter l'énergie réfléchie (afin de réduire la part absorbée et réémise par la ville) constitue une stratégie intéressante pour réduire les ICU. L'albédo, noté α , représente la fraction du rayonnement solaire réfléchi par un corps par rapport au rayonnement incident (Oke 1987). De manière générale, plus une surface est claire et lisse, plus elle réfléchit de rayons et plus son albédo est élevé. Une ville a un albédo moyen de 0.15 alors qu'un champ d'agriculture ou un océan ont un albédo autour de 0.25 (Oke 1987).

A l'échelle du matériau, la capacité de réflexion est influencée par l'orientation de la surface par rapport à la source lumineuse, son orientation par rapport à l'observateur, la nature du revêtement et son état de surface (Brusque and Coulomb 1996).

L'asphalte a un albédo de 0.1, la neige 0.9 (Mach et al. 2014)(Valette and Cordeau 2010). D'autres valeurs caractéristiques d'albédos en ville sont réunies dans la figure suivante :

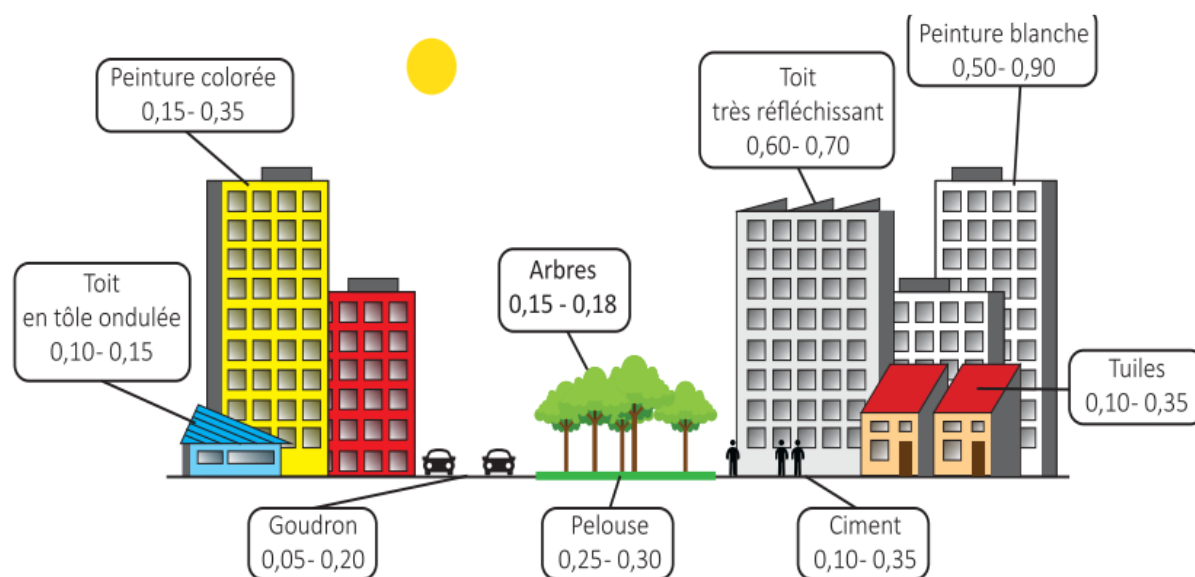


Figure 10. Illustration des albédos en milieu urbain (Métropole de Lille 2017)

De nombreuses études expérimentales montrent que l'augmentation de l'albédo d'un matériau réduit sa température de surface (Yang, Wang, and Kaloush 2015). Cette réduction peut aller de quelques degrés jusqu'à 20°C (Doulos, Santamouris, and Livada 2004)(Doya 2010).

L'effet sur la température de l'air est principalement étudié via des simulations numériques et les résultats divergent d'un effet quasi-négligeable à 10°C (Doulos, Santamouris, and Livada 2004).

La métropole de Lille a ainsi identifié que l'albédo est responsable de 1°C de la chaleur de la ville (Métropole de Lille 2017). En particulier, l'albédo des toits est fort impactante. Une étude faisant varier de 10% l'albédo des toits montre un impact de 7% sur l'albédo effectif d'un paysage urbain (Pigeon 2007)

Cependant, il est important de placer judicieusement les surfaces à fort albédo. En effet, dans un canyon urbain, si les rayons sont réfléchis vers un matériau voisin peu réfléchissant, ce dernier va absorber le rayonnement. Or ces rayons auraient pu être renvoyés directement vers l'atmosphère. Les études pionnières de Nunez et Oke (1977) montrent ainsi un pic de rayonnement IR en fin de journée par les surfaces orientées vers l'est dû à la réflexion des rayons sur les surfaces exposées ouest durant la journée. Il est nécessaire d'étudier davantage les interactions bâtiment-route-atmosphère à une échelle de voisinage proche (Yang, Wang, and Kaloush 2015).

Ce levier est également limité par le confort visuel des passants, qui ne doivent pas être ébloui par les rayons réfléchis. Enfin, l'entretien des surfaces joue un rôle important puisque le vieillissement des matériaux peut baisser leur réflectivité de 50% (Doya 2010).

Le vent

Le vent permet d'une part de remplacer l'air chaud dans l'ICU par un air plus frais et d'autre part d'évacuer la pollution souvent associée aux centres urbains. Encourager

la convection du vent, en particulier dans les rues canyon est un facteur de réduction de l'ICU (Iain Douglas Stewart 2011). Dans des conditions fortement ventées, la convection peut même dominer la variation de température générée par les différents albédos (Yang, Wang, and Kaloush 2015). A contrario, le blocage atmosphérique est capable de renforcer les sécheresses, de déclencher des vagues de chaleur et d'amplifier l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Dong et al. 2018).

Le vent peut provenir des conditions météorologiques extérieurs, mais il peut aussi être généré par le centre urbain lui-même. En effet, le gradient de température généré par l'ICU peut atteindre un niveau tel qu'il induit lui-même un flux de circulation de vent (Oke 1973). De la part géométrie de ses bâtiments et des espaces extérieurs générés, l'architecte peut favoriser des accélérations de vent (par effet Venturi), des tourbillons et flux plongeants, pour réduire la chaleur en ville (Iain Douglas Stewart 2011).

L'eau

L'imperméabilisation est un facteur fort impactant dans les ICU (Ward et al. 2016). Elle contribue à l'augmentation des températures de surface (Imhoff et al. 2010) et à la majeure partie de l'intensité des ICU en journée (Ryu and Baik 2012). La présence d'eau, en particulier en mouvement, permet de rafraîchir significativement la ville (Métropole de Lille 2017).

Lorsqu'il fait chaud, l'eau passe de l'état liquide à gazeux et consomme ainsi de l'énergie. La réaction d'évaporation permet ainsi de refroidir la surface hébergeant l'eau. L'architecte peut donc non seulement favoriser la présence d'eau dans ses projets, mais également les matériaux poreux et perméables. L'utilisation de tels revêtements permet de réduire la température de 1.3°C voire de 2.1°C quand ils sont judicieusement placés (Ferrari et al. 2020).

Il a été montré que suite à une pluie, l'évaporation est plus efficace avec des matériaux de faible albédo. En effet, étant donné qu'ils accumulent plus de chaleur leur capacité à évaporer l'eau qu'ils contiennent est plus forte. Cependant, l'effet d'un albédo élevé sur la température reste plus efficace qu'un refroidissement par évaporation (Ferrari et al. 2020).

L'eau agit également comme un « retardateur », puisqu'elle permet de transformer les radiations directes reçues en énergie latente (Ryu and Baik 2012). A cela s'ajoute le fait que plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau et donc, dans le cadre d'un ICU le refroidissement par évaporation devient d'autant plus intéressant (Valette and Cordeau 2010).

Toutefois, cette stratégie de mitigation doit être nuancée par le confort extérieur qui, à des fortes températures peut être plus désagréable avec un fort taux d'humidité relative.

La végétation

La végétation constitue une stratégie majeure dans la réduction des ICU. Un ensemble de solutions dites « solutions fondées sur la nature » et détaillées dans la suite de l'état de l'art utilise les propriétés rafraîchissantes de la végétation. De nombreuses études démontrent une corrélation entre la réduction des effets d'une vague de chaleur et le taux d'occupation de la végétation (forêt, terrains de sport verts, infrastructures végétalisées) (Kawashima et al. 2000) (Ward et al. 2016)(U.S. Global Change

Research Program 2018)(Wu et al. 2016)(Cynthia, Sarah, and Geoff 2014). Des simulations montrent que l'ajout de 5% d'arbres peut réduire la température surfacique de 1°C alors que le remplacement des espaces verts par de l'asphalte l'augmente de 3,2°C (Cynthia, Sarah, and Geoff 2014).

D'une part, les végétaux évacuent par évapotranspiration des particules d'eau qui refroidissent l'air (Peng et al., 2012).(Ward et al. 2016). D'autre part, les feuilles des arbres réfléchissent une partie des rayons solaires et permettent de créer de l'ombrage (cf figure 11).

Cependant, ce levier est limité par l'entretien et l'apport en eau qu'il nécessite. En cas de sécheresse, l'évapotranspiration est notamment amoindrie du fait du manque d'eau (Ward et al. 2016). Il est aussi important de noter que l'ombre générée et la quantité de chaleur accumulée par les bâtiments est plus efficace que celles par la végétation. Enfin la vitesse du vent est réduite sous les arbres, ce qui peut augmenter l'ICU (Dong et al. 2018).

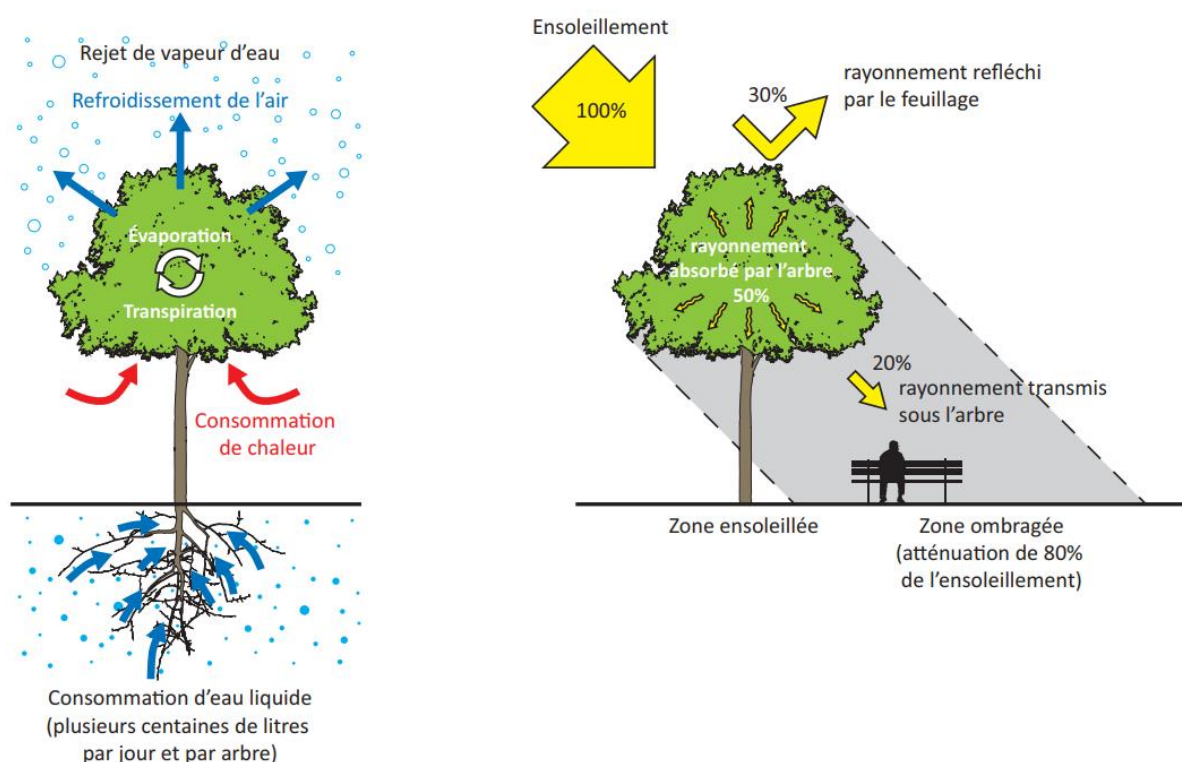


Figure 11. Effet de l'arbre sur l'îlot de chaleur urbain (Apur 2012)

Le rapport d'aspect

Le rapport d'aspect est lié à la géométrie urbaine. On le définit par le rapport entre la hauteur moyenne des parois d'un canyon H et la largeur de ce canyon W (Oke 1988). La tendance générale est que les ICU nocturnes augmentent avec la hauteur et la densité des bâtiments (Ryu and Baik 2012). Pour un canyon de rapport d'aspect égal à 1, l'absorption du rayonnement est environ 20% plus forte qu'une surface plane du même matériau (Pigeon 2007).

Il a été montré que des hauteurs variables de bâtiment peuvent réduire de moitié l'intensité maximale d'un ICU comparé à une rue de même rapport d'aspect moyen mais de hauteur homogène (Nakata-Osaki, Souza, and Rodrigues 2018). Cette

réduction est d'autant plus forte que les facettes du canyon ont des albédos différents (Pigeon 2007).

Il n'y a pas de consensus sur la valeur de rapport d'aspect en France aujourd'hui. En effet, augmenter ce rapport génère plus d'ombre sur la rue. Mais cela augmente l'effet piège à chaleur et diminue de l'albédo global des rues (1% de variation pour une variation de H/W de 1 à 3) (Pigeon 2007). Au contraire, réduire ce rapport augmente l'exposition solaire mais généralement une meilleure convection du vent (Oke 1988). Il est donc important pour les architectes d'être conscient de ce facteur et de l'intégrer au cas par cas dans leur projet.

Le facteur de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir d'une surface considérée (Colombert 2008). Il a été constaté une corrélation entre l'intensité des ICU et le facteur de vue à ciel ouvert (Sobstyl et al. 2018). Si la surface est à l'ombre, maximiser ce facteur (avoir une vue dégagée sur le ciel) peut permettre une meilleure évacuation de la chaleur le soir. Si la surface est fortement exposée, minimiser ce facteur (avoir une vue encombrée sur le ciel) permettra de réduire l'énergie reçue en journée. La volumétrie urbaine permet de réduire l'intensité des ICU de 24% en journée mais elle l'augmente de 28% la nuit. Cette augmentation est notamment due à la chaleur accumulée dans les parois verticales, les pièges à chaleur et la réduction du vent (Grimmond et al. 2010). Comme pour le rapport d'aspect, un optimum est donc à trouver selon l'exposition de la surface.

L'inertie thermique

Enfin, le choix des matériaux et leur capacité à stocker la chaleur peut constituer un levier.

Pour réduire la chaleur émise la nuit des matériaux de faible inertie peuvent être choisis puisque, de fait, ils absorbent moins de chaleur le jour (Ryu and Baik 2012). Cependant, l'énergie qui n'est pas réfléchi, ni absorbée par les matériaux le jour est directement transmise à l'intérieur du bâtiment et peut générer de l'inconfort et l'augmentation de l'utilisation de la climatisation.

Pour réduire l'ICU diurne, il serait au contraire plus pertinent d'augmenter l'inertie des matériaux pour « capturer » plus de chaleur en journée. Cela permettrait aussi de réduire la consommation de chauffage la nuit.

L'inertie des matériaux est donc également un facteur à considérer au cas par cas. Il n'existe pas de règles de bonne pratique à ce sujet qui doit être étudié en fonction de l'occupation du bâtiment et du déphasage temporel de chaleur souhaité.

La figure ci-dessous reprend des éléments de mitigation de la chaleur en ville et permet d'introduire quelques solutions concrètes.

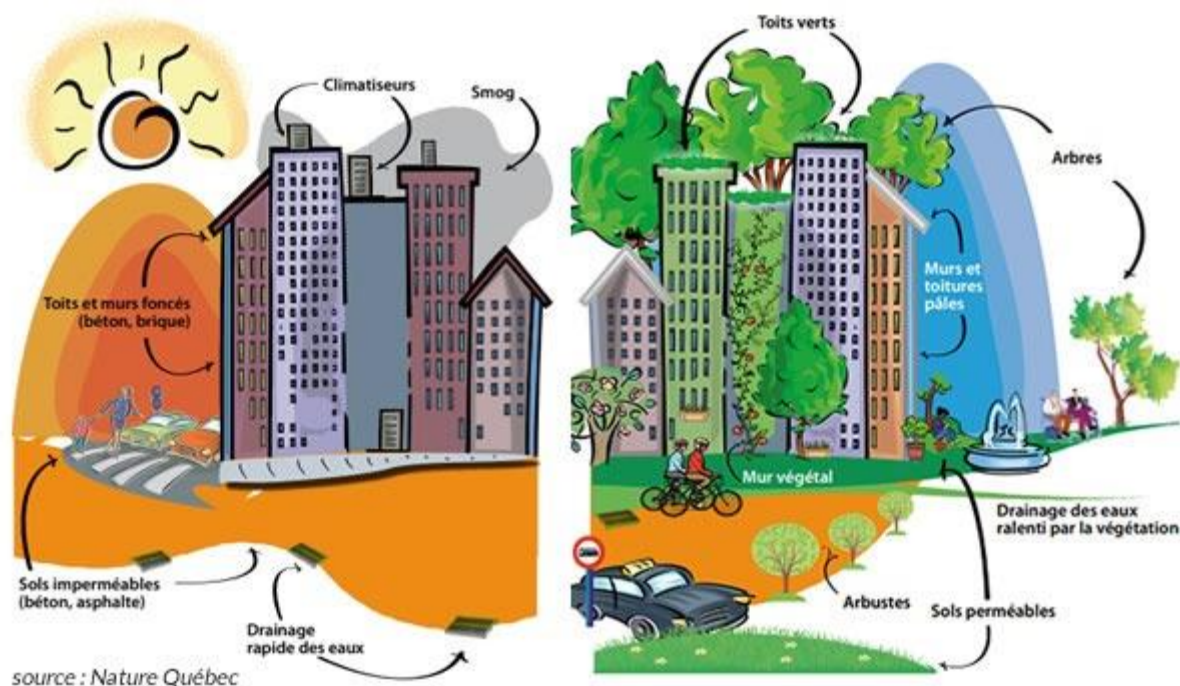


Figure 12. Schéma de mise en place de stratégies pour réduire les ICU

2.1.5. SOLUTIONS DE REDUCTION

En accord avec les stratégies précédemment énoncées, différentes solutions sont développées. On distingue notamment trois types de solutions (ADEME 2021) :

- Les solutions fondées sur la nature, dite solutions vertes
- Les solutions fondées sur l'urbain, ou solutions grises
- Les solutions fondées sur le comportement humain, ou solutions douces

Deux documents comparant les coûts et impacts de diverses solutions ont principalement été utilisés dans cette étude. Le premier est édité par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie également connue en France comme l'« Agence de la transition écologique » (ADEME 2021). Le second se concentre sur les solutions fondées sur la nature et est rédigé par l'Université Libre de Bruxelles (Stessens et al. 2019). Ces documents permettent notamment d'établir la liste non-exhaustive de solutions suivante :

Mesures fondées sur la nature	Sources
Toiture verte	(Stessens et al. 2019) (Valette and Cordeau 2010)(ADEME 2021)
Toiture bleue-verte « smart »	(Stessens et al. 2019)
Toiture bleue	(Stessens et al. 2019)
Façade végétale	(Stessens et al. 2019) (Valette and Cordeau 2010) (ADEME 2021)
Pelouse / jardin	(Kawashima et al. 2000) (Wu et al. 2016) (Cynthia, Sarah, and Geoff 2014) (Stessens et al. 2019)(ADEME 2021)

Ferme urbaine	(Stessens et al. 2019)
Parc / forêt urbaine	(Stessens et al. 2019)(ADEME 2021)
Zone de filtrage biologique	(Stessens et al. 2019)
Plans d'eau et rivières	(Stessens et al. 2019) (Valette and Cordeau 2010) (Ward et al. 2016) (Imhoff et al. 2010) (Ward et al. 2016) (Ferrari et al. 2020)(ADEME 2021)
Végétalisation des berges	(Stessens et al. 2019)
Jardins flottant	(Stessens et al. 2019)
Noues	(Stessens et al. 2019)
Jardins de pluie	(Stessens et al. 2019)
Plaine inondable	(Stessens et al. 2019)
Gestion des eaux pluviales	(Stessens et al. 2019)(ADEME 2021)
Allée d'arbre	(Stessens et al. 2019) (Valette and Cordeau 2010)(ADEME 2021)

Tableau 3. Récapitulatif des mesures fondées sur la nature

Mesures basées sur l'urbain	Sources
Modifier la forme du bâti	(Grimmond et al. 2010)(ADEME 2021)
Réduire le rapport d'aspect	(Nakata-Osaki, Souza, and Rodrigues 2018) (Ryu and Baik 2012)
Toiture « cool »	(Stessens et al. 2019) , (Doya 2010)
Revêtement perméable	(Stessens et al. 2019) (Valette and Cordeau 2010)(Ryu and Baik 2012) (ADEME 2021)
Porosité des matériaux	(Ferrari et al. 2020) (Iain Douglas Stewart 2011) (Ryu and Baik 2012)(ADEME 2021)
Structure d'ombrage	(Stessens et al. 2019)(ADEME 2021)
Chemin cyclo-pédestre	(Stessens et al. 2019)
Fort albédo des matériaux	(Mach et al. 2014) (Valette and Cordeau 2010)(Asaeda, Ca, and Wake 1996) (Yang, Wang, and Kaloush 2015) (Pigeon 2007) (Doya 2010)(ADEME 2021)
Pavé inversé	(Valette and Cordeau 2010)
Inertie matériau et isolation	(Valette and Cordeau 2010) (Ryu and Baik 2012) (ADEME 2021)
Augmenter le masque solaire	(Valette and Cordeau 2010) (Dain et al. 2015)
Réduire densité du bâti	(Valette and Cordeau 2010) (Ryu and Baik 2012)
Convection vent	(Ryu and Baik 2012) (Yang, Wang, and Kaloush 2015)
Augmenter humidité relative des matériaux	(Ryu and Baik 2012)
Augmenter facteur vue du ciel	(Ryu and Baik 2012) (Sobstyl et al. 2018)

Tableau 4. Récapitulatif des mesures fondées sur l'urbain

Lorsqu'elles sont mises en œuvre ensemble, l'ADEME montre que ces solutions peuvent réduire la température de l'air de 4.2°C la nuit et de réduire les consommations énergétiques de 60%.

La mise en place d'une peinture blanche rafraîchissante « Cool Roof » sur le toit du Leclerc à Quimper a également permis des économies de 15 000 € et 178 MWh d'électricité en un an (PIB Isolation 2017).

Le niveau de connaissances sur l'impact de ces solutions n'est toutefois pas égal et leur effet reste pour beaucoup à prouver. La figure ci-dessous montre les coûts et bénéfices de diverses solutions.



Figure 13. Comparaison des solutions de mitigation en terme de bénéfices et impacts (ADEME 2021)

2.2. Les outils numériques en conception architecturale

2.2.1. LE POTENTIEL DU NUMERIQUE EN CONCEPTION

Dans la conception, une pratique assez courante est l'optimisation "passive" : quelques options sont conçues et comparées mentalement (en fonction de l'expérience subjective du concepteur) pour en choisir « la meilleure ». Cette approche mène souvent à des résultats erronés (Carallo 2021). D'autant plus qu'il est difficile de considérer plusieurs variables en même temps.

Dans le cas des îlots de chaleur urbains, plusieurs stratégies peuvent être envisagées. Le choix dépend de leur efficacité, des coûts engendrés mais également des éléments modifiables du projet. En effet, selon l'échelle à laquelle l'architecte est impliqué, ces éléments modifiables sont plus ou moins nombreux et impactant (cf figure ci-dessous). Quoiqu'il en soit, ce phénomène multifactoriel et multicritère ne peut se contenter de l'optimisation passive.

Objectif	Impacts	Limites		
		Bâtiments	Groupes de bâtiments	Implantation
Confort intérieur	Bâtiments	Localisation Matériaux Design (e.g. forme, orientation, etc.)	Accès à la lumière, à l'énergie solaire, au vent Qualité de l'air	Codes du bâtiment
Confort extérieur Santé en extérieur	Groupes de bâtiments	Changement climatique local : Emissions Matériaux/surfaces Dimensions du bâtiment – interférence des flux et zones d'ombre	Emplacement des bâtiments Aménagement, paysage, matériaux et surfaces extérieurs Dimensions et orientation des rues	Guides sur les densités, les hauteurs, les usages, les espaces végétalisés
Utilisation de l'énergie Qualité de l'air Protection contre les extrêmes	Implantation	Efficacité énergétique Qualité de l'air Effet du climat urbain	Mode et intensité des flux du trafic Efficacité énergétique Qualité de l'air Effet du climat urbain	Zonage Etendue et forme globales Politique des transports

Figure 14. Eléments modifiables par l'architecte (diagonale grise) pour atteindre des objectifs climatiques. Leurs impacts (en dessous de la diagonale) et limites (au-dessus de la diagonale) en fonction de l'échelle d'implication (Mills 2003)

Le développement des technologies durant les années 1970 a amené un changement des mentalités, qui jusqu'alors considéraient très peu tout ce qui était non-humain (Warwick 2006). Les capacités croissantes des ordinateurs permettent d'effectuer les tâches chronophages ou trop complexes pour être gérée par l'humain seul. Ainsi, les outils numériques intègrent progressivement la recherche et permettent de gérer les phénomènes environnementaux complexes. Une communauté d'expert se génère autour des Simulations de Performances des Bâtiments (BPS)(Attia 2010). En parallèle, la Conception Assistée par l'Ordinateur (CAO) se repend dans les bureaux d'architecture à la fin des années 80 (Aurelie De Boissieu 2021).

Ce n'est qu'à la fin des années 90 que les outils BPS diversifient leur public en incluant les architectes, jusqu'alors considérés comme non-spécialistes (Mahdavi et al. 2003). D'une part, cela a légitimé l'importance des décisions prise en phase de conception pour les performances environnementales. D'autre part, cela a reconnu les outils BPS

comme un support pour l'aide à la décision. Progressivement, ces logiciels trouvent une place tôt dans le processus de conception et en amont.

Les évolutions technologiques se poursuivant, le nombre de logiciels de modélisation 3D et de simulations toujours plus performants augmente. Si ces outils permettent d'accélérer les processus traditionnels existants, le développement de l'intelligence artificielle ouvre encore des nouveaux modes de pensées. L'optimisation peut être poussée au stade où des solutions non anticipées par le concepteur émergent. On parlera alors de conception computationnelle (Computational Design, CD) (Ostwald 2010). La figure ci-dessous illustre le tournant de pensée associé à l'utilisation de l'ordinateur en conception.

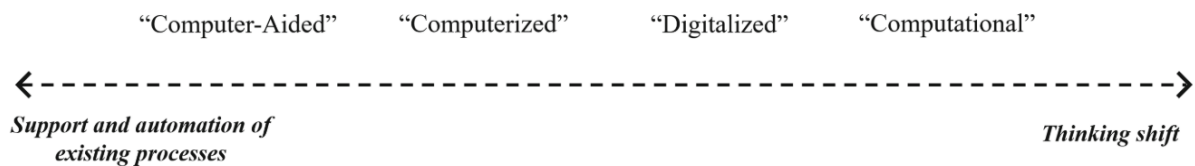


Figure 15. Tournant de pensée de la conception assistée par ordinateur au computationnel (Aurelie De Boissieu 2021)

Il est toutefois important d'éveiller l'attention des concepteurs sur l'utilisation réfléchie de ces outils. Particulièrement dans le cas où l'architecte ne développe pas lui-même le logiciel ou l'algorithme. La question de la responsabilité quant aux solutions émergentes peut alors se poser. Dans *The Stones of Venice*, Ruskin philosophe britannique du XIX^e siècle, soutient que le processus de conception doit être visible dans l'œuvre finie. Il prend en exemple la construction d'un hexagone. Les croisements d'arc générés par l'utilisation d'un compas permettraient « avec élégance » de façonner l'objet tout en laissant à un novice la possibilité de comprendre et de répéter cette forme.

Aujourd'hui, de plus en plus d'ouvrages parviennent à allier CD et architecture de manière lisible. C'est le cas par exemple de la gare de Waterloo à Londres. Le processus d'optimisation paramétrique mené par le bureau Grimshaw se lit dans la géométrie des poutres treillis (cf image ci-dessous). Ces avancées technologiques constituent un potentiel important pour l'architecture. Appliqués aux enjeux environnementaux tels que les ICU cela ouvre un champ de possibilité prometteur.



Figure 16. Toiture de la gare de Waterloo par Grimshaw (<https://grimshaw.global/>, consulté le 31/05/22)

2.2.2. LES SIMULATIONS NUMERIQUES ET LEURS ENJEUX

Aujourd'hui, la conception computationnelle est en fort développement et s'associe aux outils de simulations. On peut notamment citer le logiciel de programmation visuelle « Grasshopper » avec le plug-in « Ladybug Tools » (cf partie 2.2.3). Le concepteur n'est plus seulement un utilisateur, mais devient presque un « spécialiste » (Aurélié de Boissieu 2020). Cependant, les avancées dans ce domaine se sont produites si rapidement qu'elles ont généré beaucoup de nouveaux outils et de rôles encore flous parmi les utilisateurs. Cette abondance de logiciels peut constituer en soi une barrière à leur adoption et on observe finalement que peu de concepteurs les utilisent. Associée à la problématique spécifique des îlots de chaleur urbains, le champ d'acteurs est d'autant plus restreint.

En l'absence d'enquête sur l'utilisation des outils existants, la poursuite des recherches et leur développement est vulnérable à la dérive académique (Clarke and Hensen 2015). Il est donc primordial de fournir un retour d'information pratique pour orienter ces avancées.

A cela s'ajoutent les enjeux autour de la précision et la performance de ces outils. De nombreux bâtiments ne fonctionnent pas comme prévu dû à des simplifications en conception ou à l'incertitude des données de modélisation. Des analyses telles que l'incertitude¹ et la sensibilité² permettent une quantification du risque et l'évaluation des facteurs influents (Attia n.d.). Cela permet de prendre des décisions mieux informées et ainsi de concevoir des projets plus viables.

Entre performance et facilité d'utilisation, les outils numériques balancent et se démultiplient. A cela s'ajoute d'autres enjeux tels que l'interopérabilité avec les logiciels de modélisation utilisés par les architectes tels que Rhino, ArchiCAD, Revit ou encore plus historiquement AutoCAD et Sketchup. La figure ci-dessous reprend les critères identifiés comme importants pour le développement des outils BPS, applicables ici pour les outils traitants des ICU.

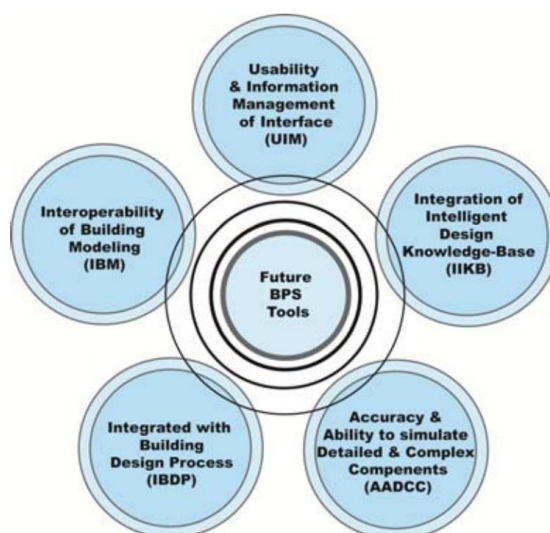


Figure 17. Critères de développement pour les outils de BPS (Attia 2010)

¹ Analyse d'incertitude : détermine la variation de la sortie due aux changements (réels) de l'entrée.

² Analyse de sensibilité : détermine les paramètres d'entrée auxquels la sortie du modèle est sensible.

Aujourd'hui les utilisateurs ont besoin de comparer plusieurs analyses d'alternatives sans être submergés par des paramétrages complexes (Attia 2010). Cette recherche n'étudiera pas davantage les pistes offertes par le CD mais parcourra les logiciels de simulation existants et permettant de traiter les ICU. Elle se concentrera notamment sur l'enjeu de l'utilisabilité de ces outils.

2.2.3. VEILLE TECHNOLOGIQUE

Les simulations de dynamique des fluides computationnelles (CFD) constituent une approximation numérique pour décrire le mouvement des fluides tels que l'air. Les logiciels de CFD sont particulièrement attirants pour les architectes du fait de leur capacité à retranscrire visuellement les résultats de simulations complexes en 3D (Attia 2010). Les codes CFD se divisent généralement en trois parties (M H et al. 2018) :

- Un préprocesseur : pour entrer la géométrie de l'objet, générer une maille divisant l'objet et définir les conditions initiales et aux limites.
- Un solveur : pour résoudre sur chaque élément les équations discrétisées de mécanique des fluides selon une méthode définie (différences finies, éléments finis ou volumes finis).
- Un post-processeur : pour afficher les résultats sous un format graphique

La littérature scientifique fait majoritairement référence à un logiciel de CFD pour le phénomène des ICU : ENVI-met. Cependant, aucune étude comparant la facilité d'utilisation de ce logiciel par rapport à d'autres dans le même domaine n'a été trouvée. Afin d'étudier le potentiel et les obstacles de cet outil de manière plus complète une veille technologique des outils existants a donc été menée. Cette recherche est basée sur les sources suivantes :

- Discussion avec des développeurs lors des entretiens préalables
- Recherches internet avec les mots-clefs : « urban heat island tool » ; « external confort tool » ; « urban heat island simulation » ; « urban heat island optimization » ; « PET » ; « UTCI »
- Lecture d'études et articles scientifiques (CuminCAD, Scopus, Google scholar)
- Conférence et tutoriels vidéos sur les ICU et logiciels (youtube)
- Bouche à oreille et divers postes d'actualité (Linkedin, Github)

Pour trier les logiciels trouvés durant cette veille, les critères suivants ont été parcourus (dernière mise à jour 21/02/2022) :

- Capable de prédire un indicateur de confort extérieur (PET ou UTCI)
- Applicable en France
- Disponible en version d'essai (durée ou fonction limitée) ou gratuite
- Accepte au moins un des formats de fichier suivant : Skp, 3dm, rvt, pln
- Capable de prendre en compte l'effet de la végétation (noté « Végét. ») étant donné l'importance de cette solution sur la réduction des ICU

Logiciels	Application				Disponibilité		Interopérabilité			
	PET	UTCI	Végét.	France	Essai	Gratuit	.skp	.3dm	.rvt	.pln
ENVI-met	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	?	?
Grasshopper	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	?
Ladybug tools										
Archiwizard				✓			✓		✓	
Solene microclimat	✓	✓	✓	✓	Sous demande		✓	?	?	?
ECOTECT			?	✓		✓	✓		✓	
Autodesk CFD				✓	✓		✓		✓	
Urbawin			?	✓		✓	?	?	?	?
Urbasun			?	✓	?	?	?	?	?	?
Autodesk Insights				✓		✓			✓	
Trnsys			?	✓		✓	✓			
Score ICU			✓	✓			✓	✓	✓	✓
Simscale			?	✓	?	?		✓	✓	
Diaclimap	En cours de développement									
TEB-Surfex	?	?	✓	✓		✓	?	?	?	?
Right Place, Right Tree			✓			✓				
UHI Tool	?	✓	?			✓	?	?	?	?
ICEtool	?	?	✓	✓		✓	?	?	?	?
THIS – Tool for Heat Island Simulation	?	?		✓			?	?	?	?
Urban Weather Generator			?	✓		✓				
ArcGIS	✓	✓	?	✓	✓		✓			

Table 1. Sélection des logiciels à tester dans cette étude

Les logiciels retenus suite à ce tri sont les suivants :

Nom du logiciel	Logo	Version disponible
ENVI-met		5.0.2
Solene microclimat		7

Une attention particulière sera toutefois apportée à deux autres outils :

- Ladybug tools, très utilisé pour des simulations sur Grasshopper
- Score ICU, qui est un outil simpliste, sans simulations, très utilisé par la ville de Lyon (cf : interview avec Olivier Papin)

ENVI-met

Ce logiciel, développé par Michael Bruse (géographe allemand et un professeur de la géomatique à l'Université de Mayence) en 1998, permet de calculer le microclimat d'une ville au mètre carré près. Le logiciel est décliné en plusieurs modules :

- SPACES : pour modéliser le bâtiment
- ENVI-guide : pour régler les conditions météorologiques
La version gratuite ne permet pas à priori d'inclure un fichier .epw de données météorologiques
- ENVI-core : pour réaliser les simulations
- LEONARDO : pour visualiser et analyser les résultats de simulation
- BIO-met : pour post-traiter les résultats en termes de confort thermique humain

L'atout principal de ce logiciel est une prise en compte holistique de l'environnement, incluant les effets de la végétation et de l'eau sur la température de l'air. Les profils de la végétation tels que la densité de feuillage influent beaucoup sur les résultats (Wu et al. 2016) et peuvent ici être adaptés. Cependant, la modélisation au sein de ce logiciel semble laborieuse (carré par carré) et ne permet pas de faire des formes complexes et courbes.

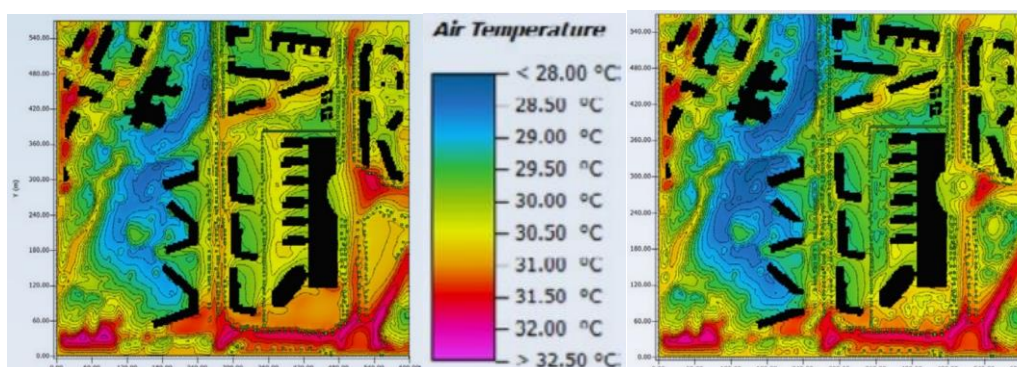


Figure 18. Simulations de la température de l'air via ENVI-met (<https://www.envi-met.com/fr/architectes/>, consulté le 07/03/2022)

SOLENE MICROCLIMAT

Ce logiciel est développé depuis les années 1990 par des chercheurs du Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture (CERMA) de l'Ecole d'Architecture de Nantes. A l'image des autres logiciels CFD, Solène-Microclimat fait appel à plusieurs modules. En plus du bilan radiatif, des échanges convectifs thermiques et aérauliques, Solène-microclimat considère aussi l'inertie thermique des parois dans la simulation.

Un avantage majeur de ce logiciel est qu'il permet de traiter des géométries plus complexes ne respectant pas forcément une grille orthogonale. Codé en langage informatique Python, ce logiciel permet également l'écriture et l'import de diverses fonctions par l'utilisateur. Cependant, il ne prend pas en compte le bilan hydrique et ne considère pour l'eau que l'effet de l'évapotranspiration (Fahed 2018). Aussi, ce logiciel ne fonctionne pour le moment que sur le système d'exploitation Linux ce qui peut constituer un frein pour beaucoup d'architectes.

Score ICU

Cet outil a été développé en 2016 par E6 Consulting (bureau d'étude et de conseil en ingénierie et énergétique), l'Atelier Colin (architecte) et Poli Paysages (paysagiste). Le projet a été initié suite à un constat répété sur plusieurs agglomérations de France : les zones chaudes des villes correspondent souvent aux lieux les plus minéralisés (exemple : parking exposé au soleil) et les zones fraîches à des espaces verts (exemple : un parc ombragé) (Indura 2020).

Partant de ce constat, un classement de 9 tranches de température (cf figure ci-dessous), associée à des paysages urbains, a été déterminé empiriquement. A chaque tranche correspond un coefficient de pondération allant de 0 à 1.

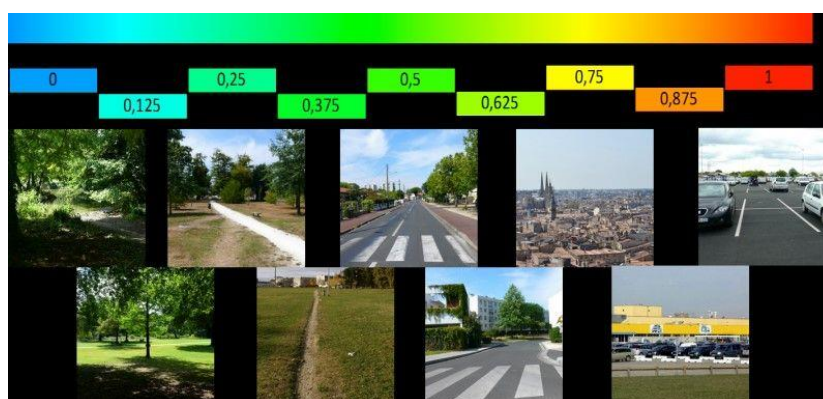


Figure 19. Tranches de températures de Score ICU (<https://www.construction21.org/>, consulté le 22/12/21)

L'outil s'utilise en quatre étapes :

- Effectuer une simulation d'ombre portée sur un logiciel de modélisation 3D
 Cela détermine l'exposition des matériaux pour les classer parmi les tranches
- Colorier sur le plan masse la tranche associée à chaque matériau
- Mesurer la surface occupée par chaque tranche
- Calculer le score ICU en fonction de la part de chaque tranche et de son coefficient de pondération

Plus le score est proche de 0, plus le projet est estimé réducteur de chaleur (cf figure ci-dessous)

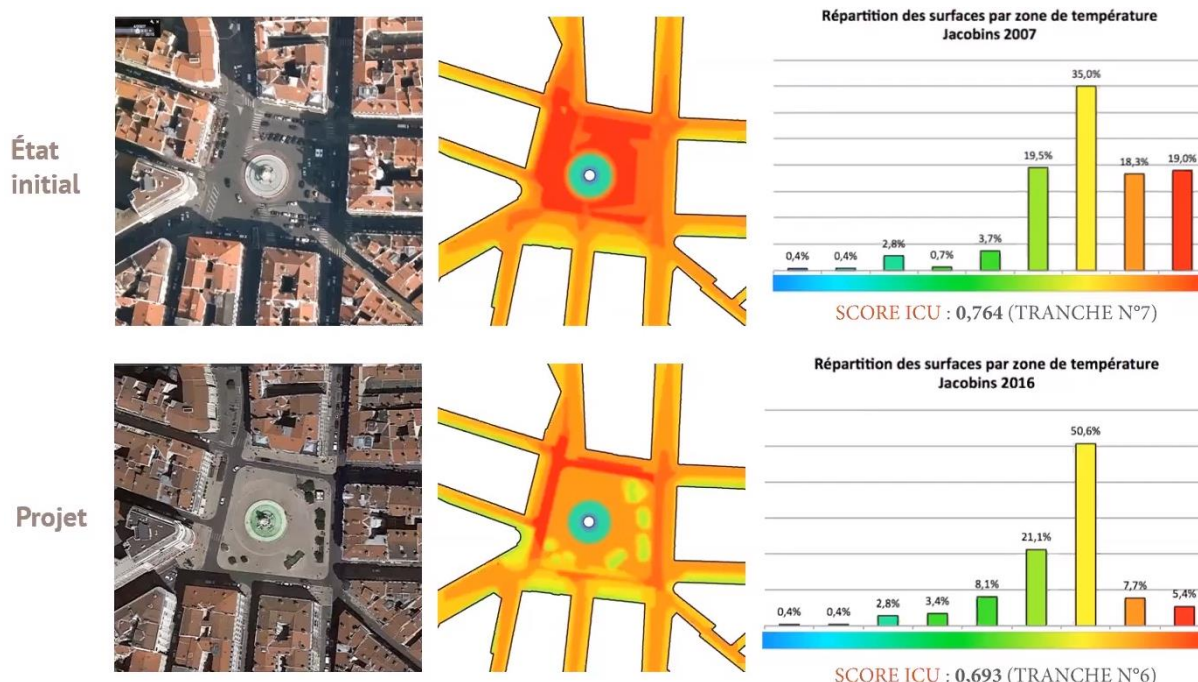


Figure 20. Comparaison du Score ICU de deux scénarios (<https://www.youtube.com/>, consulté le 22/12/2021)

L'avantage principal de ce type d'outil est sa simplicité d'utilisation. Du fait qu'aucune simulation n'est lancée, il est aussi très concurrentiel en termes de durée. Ainsi, il permet d'aborder le sujet des ICU plus facilement et d'intégrer quelques règles de bonnes pratiques. Cependant, les performances estimées par ces outils ne sont pas comparables aux outils de CFD. Beaucoup de facteurs ne sont pas pris en compte (vent, évapotranspiration, température ambiante, inertie thermique, forme urbaine). A cela s'ajoute que, bien qu'utilisé par les collectivités de Bordeaux et de Lyon, la validité de l'outil reste à prouver.

LADYBUG TOOLS

Ladybug Tools est une collection d'applications informatiques gratuites destinées à la conception environnementale. Cet ensemble relie des logiciels CAO à des simulations validées par des ingénieurs (<https://www.ladybug.tools/>, consulté le 28/12/2021). Il est notamment disponible au travers du plugin de programmation visuelle Grasshopper, associé au logiciel de modélisation Rhinoceros et plus récemment via Dynamo associé à Revit. Ladybug Tools met à disposition les modules suivants :

- Ladybug principalement pour les études solaires
- Honeybee pour les performances intérieures des bâtiments
- Dragonfly pour les consommations énergétiques à l'échelle du quartier
- Butterfly pour les études liées au vent

L'avantage principale de cet outil est son lien direct avec les logiciels de conception architecturale. Pour les connaisseurs, il permet aussi de modifier et coder ses propres fonctions. Cependant, il nécessite un bagage en programmation qui n'est pas accessible à tous. Les simulations sont également assez lourdes et requièrent un ordinateur compétent. De plus, bien qu'il permette de calculer l'indicateur UTCI, il ne prend pas en compte l'eau et la végétation. L'indicateur PET quant à lui fait l'objet de révisions (Walther and Goestchel 2018).

Ainsi cet outil avait initialement été envisagé dans le cadre de cette étude. Des simulations avaient notamment été menées pour évaluer l'impact de la volumétrie des bâtiments sur le confort extérieur. Cependant l'étude face aux inconvénients précédemment énoncés cette étude n'a pas été poursuivie et il a été choisi de se concentrer sur les deux logiciels premièrement présentés.

3. METHODOLOGIE

L'importance de traiter les ICU en conception et les outils numériques permettant de le faire ont été mis en évidence dans l'état de l'art. Il s'agit dans cette partie d'établir une méthodologie pour répondre aux questions de recherches, à savoir :

- Comment les architectes intègrent-ils l'enjeu des îlots de la chaleur urbain en dans leur conception ?
- Les outils numériques traitant des ICU sont-ils adaptés à l'utilisation par les architectes ?
- Quelles sont les pistes d'amélioration des outils pour l'intégration de cet enjeu en conception ?

3.1. Description des méthodes employées

3.1.1. CONCEPTS CLEFS

L'utilisabilité est le degré selon lequel un système, un produit ou un service peut être utilisé, par des utilisateurs spécifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifié (ISO 9241-210 :2010, 2.13). Cette notion inclut la manière dont les informations sont représentées, le contrôle des données, la facilité de navigation sur l'interface utilisateur mais aussi la facilité de prise en main (Attia 2010).

La conception centrée sur l'opérateur humain est une approche ayant pour objectif d'améliorer l'utilisabilité des systèmes interactifs en se concentrant sur l'utilisation du système concerné, et en appliquant les connaissances techniques existantes en matière de facteurs humains/d'ergonomie et d'utilisabilité (ISO 921 : 2019). Lors du développement du projet, cette approche suit 4 étapes décrites dans la figure 21 :

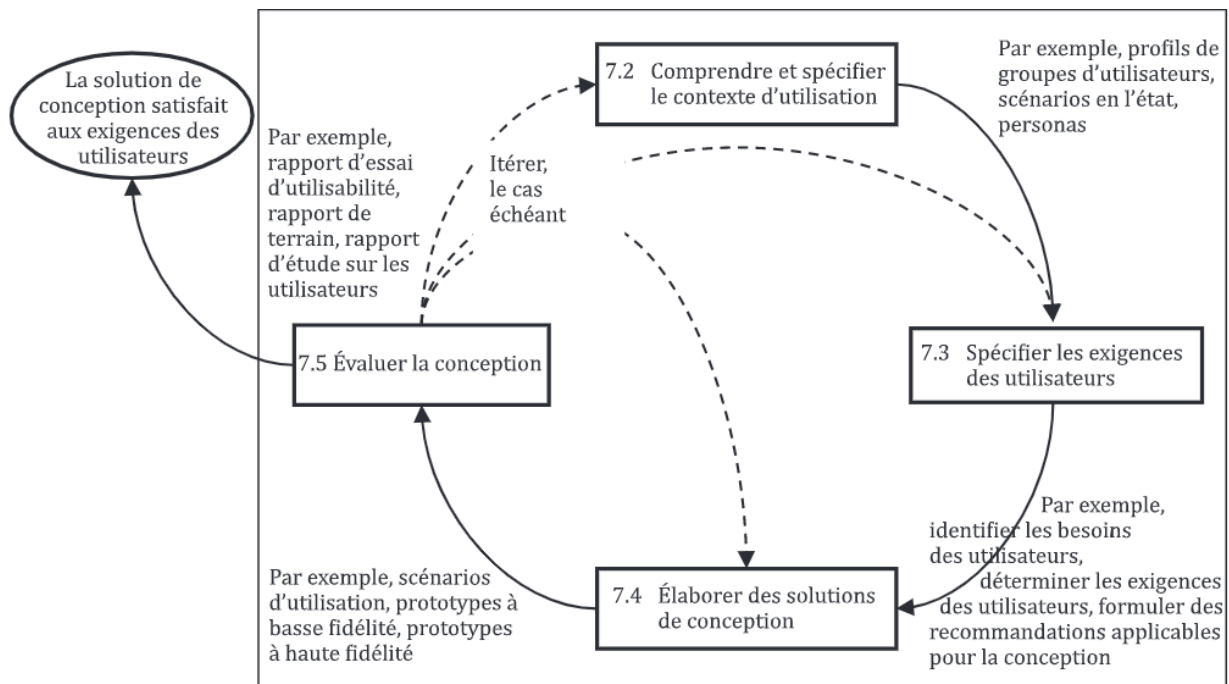


Figure 21. Conception centrée sur l'opérateur humain (ISO 9241-210 : 2019)

Ici, les projets sont déjà développés (logiciels en fonction) mais il est question de les évaluer (étape 7.5 du schéma ci-dessus).

L'évaluation se concentrera sur les 3 principes de l'utilisabilité :

- Efficacité : précision et degré d'achèvement (exhaustivité) selon lesquels l'utilisateur atteint des objectifs spécifiés (ISO 9241-11 : 1998, 3.2)
- Efficience : rapport entre les ressources dépensées et la précision et le degré d'achèvement selon lesquels l'utilisateur atteint des objectifs spécifiés (ISO 9241-11 : 1998, 3.3)
- Satisfaction : absence d'inconfort et attitude positive envers l'usage d'un produit (ISO 9241 - 11 : 1998)

3.1.2. NORMES UTILISEES

L'utilisabilité est définie internationalement au travers des normes ISO. Les normes utilisées dans le cadre de cette recherche sont regroupées dans le tableau suivant :

Norme	Titre	Usage pour cette recherche
ISO 9241-210 : 2019	Ergonomie de l'interaction homme-système — Partie 210: Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs	• Définir l'approche de la conception centrée sur l'opérateur humain • Spécifier les exigences utilisateurs basées sur les principes de l'utilisabilité
ISO 9241-110 : 2020	Ergonomie de l'interaction homme-système — Partie 110 : Principes d'interaction	• Spécifier les besoins utilisateurs dans l'interaction avec le système
ISO/IEC 25 010 : 2011	Ingénierie des systèmes et du logiciel — Exigences de qualité et évaluation des systèmes et du logiciel (SQuaRE) — Modèles de qualité du système et du logiciel	• Spécifier les caractéristiques pour évaluer la qualité d'un logiciel
ISO/IEC TR 25 060 : 2017	Ingénierie des systèmes et du logiciel — Exigences de qualité et évaluation des systèmes et du logiciel (SQuaRE) – Format de l'Industrie Commune (CIF) pour l'utilisation – Structure générale pour les informations liées à l'utilisabilité	• Définir une terminologie des informations liées à la conception centrée sur l'humain • Spécifier les informations liées à l'utilisabilité
NBN EN ISO 25 066 : 2019	Ingénierie des systèmes et du logiciel — Exigences de qualité et évaluation des systèmes et du logiciel (SQuaRE) – Format de l'Industrie Commune (CIF) pour l'utilisation – Rapport d'évaluation	• Comprendre comment documenter un rapport d'évaluation de l'utilisabilité

Tableau 5. Normes utilisées dans cette recherche en rapport avec l'utilisabilité

Ces normes permettent notamment d'établir un cadre pour l'évaluation de l'utilisabilité, son contexte d'utilisation et les exigences dérivées comme résumé dans la figure ci-dessous :

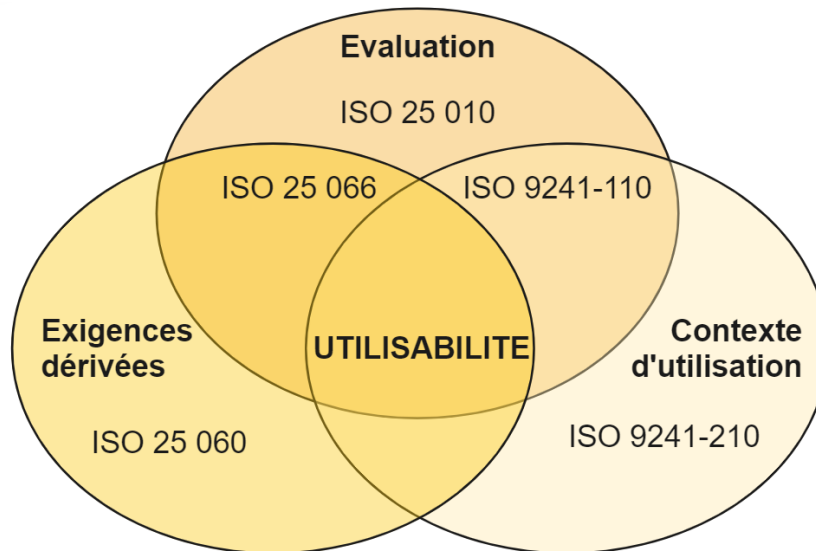


Figure 22. Normes utilisées dans cette recherche

3.1.3. CHOIX DU TYPE D'EVALUATION

L'évaluation des logiciels par rapport aux exigences des architectes peut s'effectuer via trois types de rapport (ISO 9241-210) :

- Rapport de terrain
- Rapport d'étude sur les utilisateurs
- Rapport d'essai d'utilisabilité

Les deux premières possibilités ont été écartées devant la difficulté de trouver une agence d'architecture / un architecte réunissant les critères nécessaires, à savoir :

- Travailler actuellement sur un projet prenant en compte les îlots de chaleur urbain
- Utiliser un logiciel en interne pour traiter des îlots de chaleur urbain
- Pouvoir accueillir une personne extérieure

Outre ce constat, la réalisation d'essai utilisateur a été choisie car elle est particulièrement adaptée à cette recherche :

- Au niveau de la temporalité : elle permet d'agir en plusieurs étapes
 - Une phase théorique :
 - Compréhension du phénomène des ICU
 - Identification des solutions de mitigation du phénomène pour le choix des tâches à effectuer
 - Veille technologique pour le choix des logiciels à tester

- Une phase d'expérimentation
 - Le test et la comparaison des logiciels
 - Une série d'entretiens qualitatifs
- Au niveau de l'organisation : elle permet de maîtriser l'environnement de l'expérience
- Au niveau de la récolte de données : elle permet de cibler des utilisateurs et des logiciels

Des entretiens qualitatifs ciblés en dehors des essais seront aussi menés. Leur but est d'élargir le sujet et de comprendre le contexte du traitement des ICU aujourd'hui.

La figure ci-dessous reprend schématiquement la méthodologie choisie :

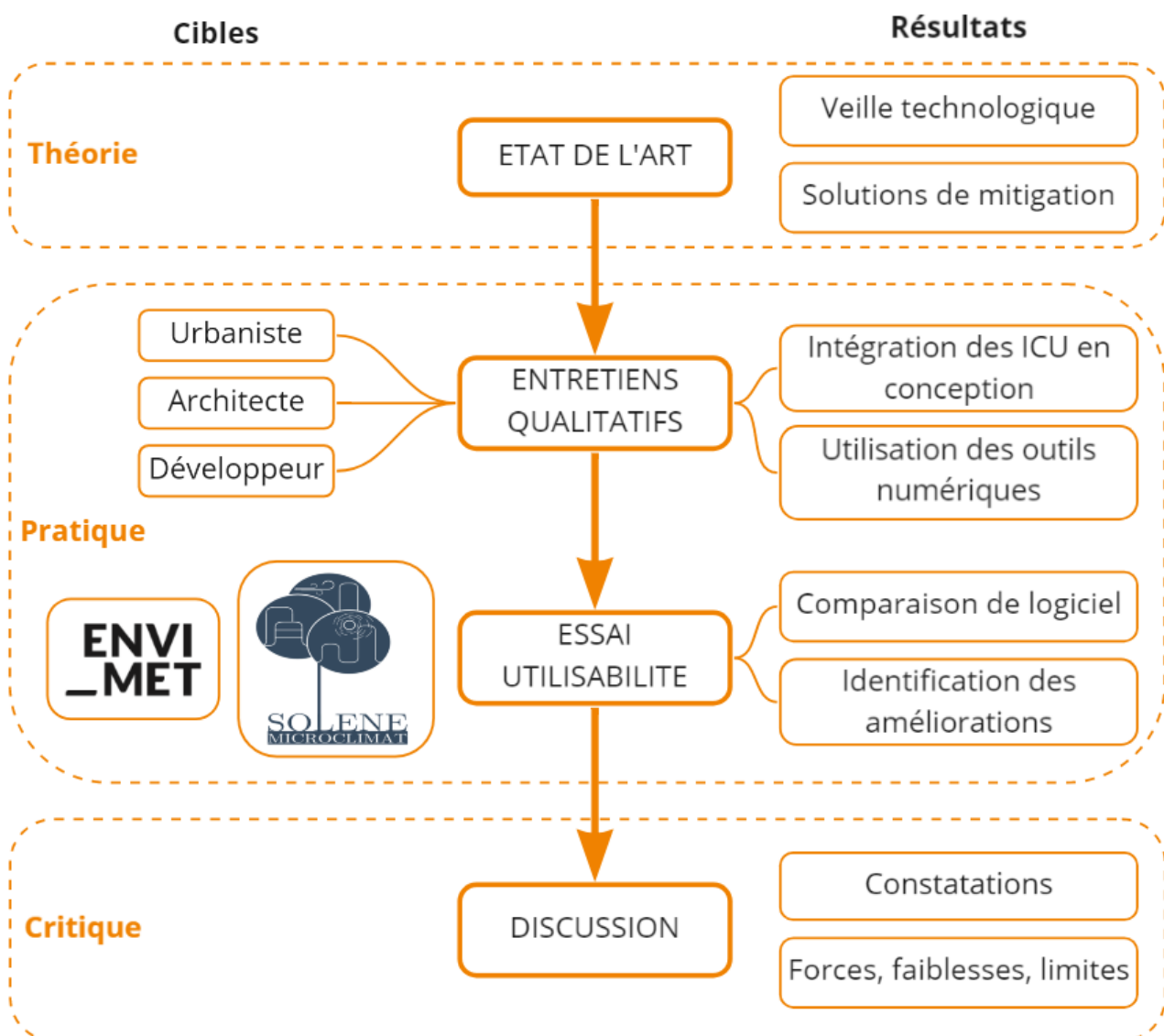


Figure 23. Schéma récapitulatif de la méthodologie

Les essais d'utilisabilité combineront plusieurs méthodes d'évaluation (NBN EN ISO 25 066) :

- Une observation du comportement des utilisateurs pendant les essais pour identifier les problèmes réels d'utilisabilité
- Une enquête qualitative auprès des utilisateurs pour recueillir leurs impressions
- Une enquête quantitative pour mesurer leur taux de satisfaction

Les objectifs de cet essai sont :

- Collecter de nouvelles informations sur les besoins des utilisateurs
- Fournir un retour d'information sur les atouts et les lacunes du logiciel du point de vue utilisateurs
- Evaluer si les exigences des architectes sont satisfaites
- Etablir des références pour permettre de futures comparaisons avec d'autres logiciels ou d'autres versions d'un même logiciel

Les informations récoltées dans cette étude sont destinées aux développeurs de logiciels, aux architectes et chefs de projets.

Ces informations permettraient de les assister dans les situations suivantes :

- Améliorer l'utilisabilité du logiciel
- Permettre des décisions de reconception du produit
- Définir une base pour comparer les futures évaluations du logiciel
- Comparer entre eux des logiciels
- Comparer le produit au travers des besoins de différents utilisateurs
- Permettre des décisions d'acquisition du produit
- Identifier les erreurs dans le processus de développement

Il est important de noter qu'une itération des essais n'est pas possible dans le délai imparti de cette étude. L'itération est un principe de la conception centrée sur l'humain qui permet de réduire les incertitudes des données récoltées.

3.2. Opérationnalisation : données et indicateurs

Il n'existe pas de système de notation commun ou même de langage pour décrire ce que fait un outil (Crawley et al. 2008). Cependant les normes et exemples d'évaluation donnée en annexe permettent d'identifier des critères pertinents pour l'analyse de ces outils.

3.2.1. OBSERVATIONS PENDANT L'ESSAI

Conformément aux 3 principes de l'utilisabilité, un ensemble de critères d'observations à remplir pendant et après les essais sont définis.

Efficacité

Ce principe évalue la précision et le degré d'achèvement des tâches. Il serait à ce titre intéressant de comparer la précision des résultats de simulations des outils. Cependant, pour des raisons de durée de l'expérience, aucune simulation ne sera lancée avec les utilisateurs.

La durée de réalisation des tâches est le premier critère évalué. En comptabilisant 5 tâches, la durée de chacune sera limitée à 10 minutes. A partir de 6 minutes le participant est invité oralement à passer à la tâche suivante.

Les erreurs d'utilisation constituent le deuxième critère relevé. Ces derniers incluent l'incapacité de l'utilisateur à effectuer une tâche (IEC 62 366-1 : 2015, 3.21). Cependant une erreur peut être étroitement liée à un défaut d'utilisabilité, c'est-à-dire un problème venant du système lui-même. Les défauts d'utilisabilité peuvent prendre différentes formes : informations perturbatrices lors d'une tâche, informations insuffisantes sur l'interface utilisateur, restriction de navigation... (ISO 25 066).

Enfin, le nombre d'aide extérieure sollicitée permettra de sonder la capacité du logiciel à permettre à l'utilisateur d'aller, seul, au bout des tâches. Ces aides peuvent prendre les formes suivantes :

- Question directe à l'observateur
- Recherche sur internet (forum, tuto vidéo, notice...)
- Recherche dans les fichiers/projets personnels de l'utilisateur

Efficiency

Le rapport entre les ressources dépensées et l'efficacité pour chaque tâche repose sur

- les performances du matériel employé (ordinateur)
- les compétences de l'utilisateur vis-à-vis du logiciel
- la complexité des séquences d'action requise par le logiciel

La ressource en mémoire utilisée par l'ordinateur (nombre de giga de RAM) au cours de chaque tâche permet d'évaluer les performances logistiques requises.

Les compétences de l'utilisateur sont relevées lors du remplissage préalable d'une fiche de présentation (cf Annexe 2 « Profil utilisateur »).

Le nombre et la nature des clics pour réaliser chaque tâche permettront de rendre compte de la complexité des séquences d'action requise. De même les éléments à remplir au clavier seront relevés. Cependant, ces éléments peuvent aussi révéler à quel point l'utilisateur est désorienté par le logiciel. Dans la mesure du possible, les

actions non effectives (ne participant pas directement à la réalisation de la tâche) seront distinguées. Ces dernières peuvent par exemple prendre les formes suivantes :

- Clics ou élément tapé au clavier lié à une recherche
- Clics liés à des moments où le logiciel/l'ordinateur est bloqué

Satisfaction

Contrairement aux deux premiers principes dont les critères sont mesurés pour chaque tâche, la satisfaction est évaluée sur l'ensemble de l'expérience. Cela tient notamment compte du fait que l'agacement d'un utilisateur peut survenir du fait du temps cumulé des tâches. De même la répétition de problèmes rencontrés peut générer une frustration progressive.

Deux familles de critères sont évaluées : la conformité aux exigences utilisateurs et les signes de mécontentement.

Les exigences utilisateurs sont définies dans le cadre d'un architecte en phase de conception et fondées sur les exemples donnés dans l'ISO 9241-110, à savoir :

- Il est possible d'annuler facilement une action qui vient d'être effectuée
- Il est possible de modifier la géométrie de l'objet directement depuis le logiciel
- Le caractère autodescriptif du logiciel suffit au repérage des fonctions
- L'état du traitement ou de la tâche en cours est clairement indiqué
- Le logiciel fournit un bouton d'aide ou un forum pour aider à résoudre des problèmes

Ces critères seront posées oralement par l'observateur durant l'essai au moment opportun de manière à être infirmées ou confirmées par l'utilisateur.

Tout signe d'insatisfaction (plaintes orales, soupir, gesticulation sur le siège) durant l'expérience sont également notés.

Enfin, toute information complémentaire permettant de justifier une observation sera notée afin de mieux interpréter les résultats. Le tableau 6 reprend l'ensemble des critères relevés durant l'expérience et figurant dans la grille d'observation (cf Annexe 3 « Grille observation »)

Principe	Critère	Indicateur
Efficacité	Durée d'une tâche	Ordre de grandeur en seconde (avec tolérance)
	Erreur d'utilisation	• Nombre d'avertissements/erreurs • Nature
	Aide extérieure	• Nombre • Nature
Efficience	Clics pour réaliser une tâche	Ordre de grandeur en nombre de clic (avec tolérance)
	Éléments à remplir au clavier pour réaliser une tâche	• Nombre de mots/valeurs • Nature
	Ressource en mémoire d'ordinateur	• Nombre de giga maximal utilisé
Satisfaction	Exigences utilisateurs	Oui/non selon l'atteinte des objectifs
	Signe de mécontentement durant la tâche	• Nombre de signe • Nature

Tableau 6. Critères d'observation de l'essai d'usabilité

3.2.2. ENQUETE QUALITATIVE

Tout au long de l'essai, il est demandé aux utilisateurs d'utiliser la technique de pensée à voix haute « Thinking Aloud » afin de comprendre les intentions de l'utilisateur et les problèmes qu'il rencontre (Lee 1999).

Ce suivi est complété par une discussion après les essais permettant de revenir éventuellement sur un événement de l'expérience. Cet entretien a également pour vocation de valider les tâches proposées et d'aborder d'autres sujets liés aux logiciels d'îlot de chaleur en phase de conception.

En dehors de l'essai, les entretiens semi-dirigés permettront de mettre en évidence les freins et leviers à la prise en compte des ICU en conception. Des questions sur l'utilisation des logiciels de simulation seront aussi abordées.

3.2.3. ENQUETE QUANTITATIVE AUPRES DES UTILISATEURS

Pour mesurer quantitativement l'utilisabilité auprès des utilisateurs, le « System Usability Scale » (SUS) de John Brooke est utilisé. Cette méthode a été développée par le chercheur en 1986 en Angleterre pour analyser les interactions humains-systèmes électroniques dans les bureaux. Aujourd'hui elle est très utilisée en phase de développement de système interactif.

Le SUS est une échelle de préférence, dit « Likert Scale », qui se compose de 10 critères, sous forme d'affirmations, auxquels l'utilisateur doit répondre par un numéro allant de 1 à 5 selon le degré d'accord (1 : pas du tout d'accord – 5 : tout à fait d'accord).

La figure 25 reprend de manière schématique les méthodes d'évaluation employées dans l'essai d'utilisabilité.

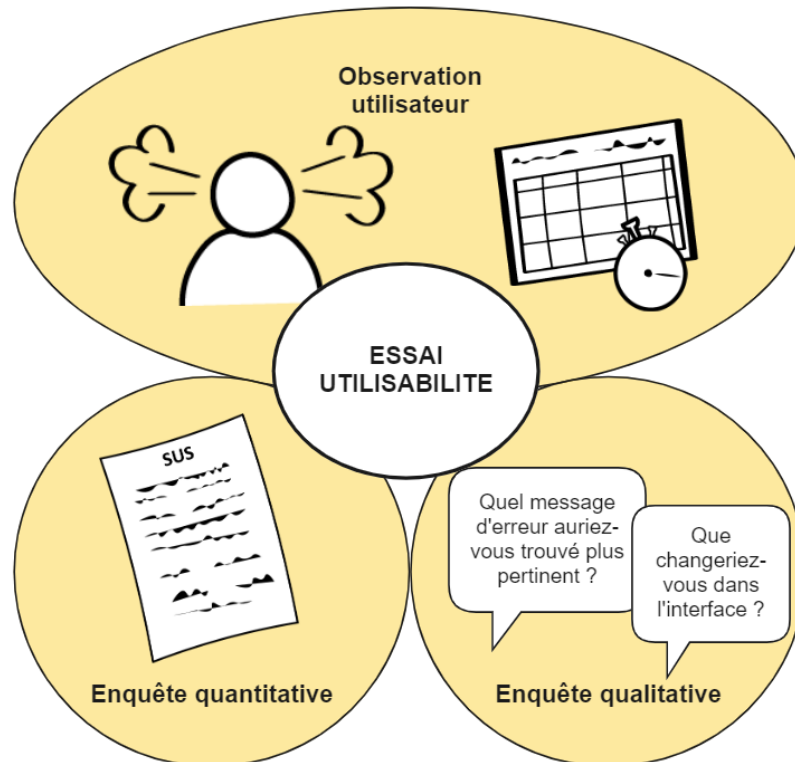


Figure 24. Méthodes employées pour l'évaluation de l'utilisabilité des logiciels

3.3. Sélection des variables et conditions de l'étude

3.3.1. PERSONNES ET LOGICIELS CIBLES

Les entretiens qualitatifs

Les personnes ciblées pour les entretiens qualitatifs doivent remplir les critères suivants :

- La personne a déjà travaillé sur les îlots de chaleur urbains
- La personne travaille dans un climat tempéré océanique (France et Belgique privilégiées)

Bien que l'étude se concentre sur les architectes, ces entretiens visent à comprendre les enjeux dans un point de vue plus global. Ainsi, au moins un représentant de profession suivante est recherché :

- Architecte
- Urbaniste
- Développeur d'outil numérique

Les personnes interrogées sont regroupées dans le tableau suivant :

Nom	Prénom	Localisation	Domaine	Lien avec les ICU
Papin	Olivier	Lyon, France	Ingénierie	Co-créateur de outil « Score ICU »
Levi	Eytan	Paris, France	Architecture	Co-fondateur de solution « Roofcape »
Joshi	Mitali	Liège, Belgique	Planification urbaine	Doctorat sur l'influence des toitures végétalisées
Arrar	Hicham	Liège, Belgique	Architecture	Doctorat sur le confort thermique extérieur
Cuny	Damien	Lille, France	Environnement	Recherches sur les milieux anthropisés

Tableau 7. Personnes interrogées dans le cadre des entretiens qualitatifs

Les essais d'utilisabilité

Les données sur les logiciels à tester pour l'essai d'utilisabilité sont regroupées dans le tableau suivant (ISO 25 066) :

Nom officiel	Partie évaluée	Description	Groupe d'utilisateur visés	Contexte d'utilisation prévu
ENVI-met	Version d'essai 5.0.2	Outil de simulation numérique permettant de calculer le microclimat d'une ville	Architectes, paysagistes, étudiants et secteur public	Etudes d'environnement et d'urbanisme
Solene Microclimat	Version complète délivrée par l'école d'architecture de Nantes	Outil de simulation numérique pour analyser l'aménagement urbain et son impact sur le climat	Etudiants et chercheurs	

Tableau 8. Description des logiciels testés

Le nombre de participants recommandé pour ces essais est généralement compris entre 4 et 12. Le recrutement a été fait en visant une représentativité des deux logiciels et des genres. A l'image des recherches pour une observation sur le terrain, peu de personnes répondaient à tous les critères à savoir :

- Utiliser un des logiciels traitant des ICU
- Travailler sur des projets en France ou en Belgique
- Participer à la phase de conception de projets liés aux ICU

Les participants pour l'essai d'utilisabilité sont réunis de manière anonyme dans le tableau suivant :

N° utilisateur	Genre	Maîtrise déclarée du logiciel	Logiciel testé	Ordinateur utilisé
1	M	Moyen	ENVI-met	Dell M 4700
2	F	Moyen	Solene Microclimat	PC fixe Acer

Tableau 9. Participants à l'essai d'utilisabilité

La fiche de présentation détaillée de chaque utilisateur disponible en annexe reprend notamment la date de première prise en main des logiciels et de la dernière utilisation pour mieux interpréter les résultats des essais.

3.3.2. TACHES A EFFECTUER

Il a été choisi de demander à l'utilisateur de réaliser 5. Le choix des tâches a été fait pour que l'utilisateur parcoure un panel varié de stratégies de mitigation, mais également diverses fonctions des logiciels. La pertinence des tâches sélectionnées est notamment validée durant les entretiens qualitatifs qui suivent l'expérience.

La première tâche demandée à l'utilisateur est de repérer les points chauds, dit « hotspot ». C'est la base de toute stratégie concernant les îlots de chaleur urbains. Cela permet de savoir où appliquer les solutions en priorité. Cette tâche inclut les étapes de l'insertion de la maquette dans le logiciel jusqu'à l'étape du lancement des simulations.

Le choix des 4 autres tâches reprend les diverses stratégies de réduction des ICU énoncées dans l'état de l'art. Les solutions répertoriées sont notamment triées selon les critères suivants :

- La solution est appliquée à l'échelle du bâtiment et son environnement proche
- La solution est fréquemment employée en pratique
- Son impact sur la réduction de la chaleur est jugé efficace

Il est important de noter que dans une étude plus exhaustive ces critères devraient également inclure le coût financier et l'acceptation sociale des solutions. Ici, il s'agit d'un exemple de tri au travers de critères techniques.

Ainsi, les tâches choisies pour l'essai sont les suivantes :

N°	Tâche
1	Repérer les « hotspots » (points chauds)
2	Augmenter l'ombrage de 20% (avec des arbres)
3	Augmenter l'albédo des murs
4	Augmenter la perméabilité du sol
5	Modifier la géométrie des bâtiments pour augmenter la convection du vent

Table 2. Tâches à tester par l'utilisateur lors de l'essai d'utilisabilité

Pour la tâche n°2, l'ajout d'une quantification (20%) est arbitraire. Cela permettra de sonder la capacité du logiciel à réaliser des études d'ombrage quantifiables.

Rive Gauche a été conçu par l'architecte Pierre TOURRE, associé au Bureau d'études Energie et développement durable TRIBU et au paysagiste Marc Richie. La volonté de concevoir un quartier durable a été affirmée dès le concours d'urbanisme. En particulier, dans le contexte de réchauffement climatique, la réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain a été recherchée. Ainsi, l'orientation et la forme des bâtiments ont été optimisées pour prendre en compte les vents et valoriser l'ensoleillement en hiver. La réalisation de logements traversants, isolés par l'extérieur et avec des revêtements réfléchissants (cf figure 27 ci-dessous, rendus 3D extérieur) permet également de réduire les consommations énergétiques. Enfin une attention particulière a été portée par rapport au taux d'imperméabilisation du sol, notamment pour prendre en compte des éventuels débordements du Lez (Tribu 2007).



Figure 26. Rendu extérieur d'un bâtiment du quartier Rive Gauche

Création de la maquette 3D

L'ensemble des documents rassemblés comprend :

- Un plan masse
- Une coupe
- Une vue de façade
- Des images de rendus 3D
- Une maquette 3D du contexte existant (via Cadmapper)
- Une visite 3D via Googlemap et GoogleEarth

A partir de cela, une maquette volumétrique a été reconstituée sur Sketchup. Etant donné que l'expérience se situe en phase d'esquisse, le niveau de détail du LOD 100 (volumétrie sans ouvertures) a été jugé suffisant.

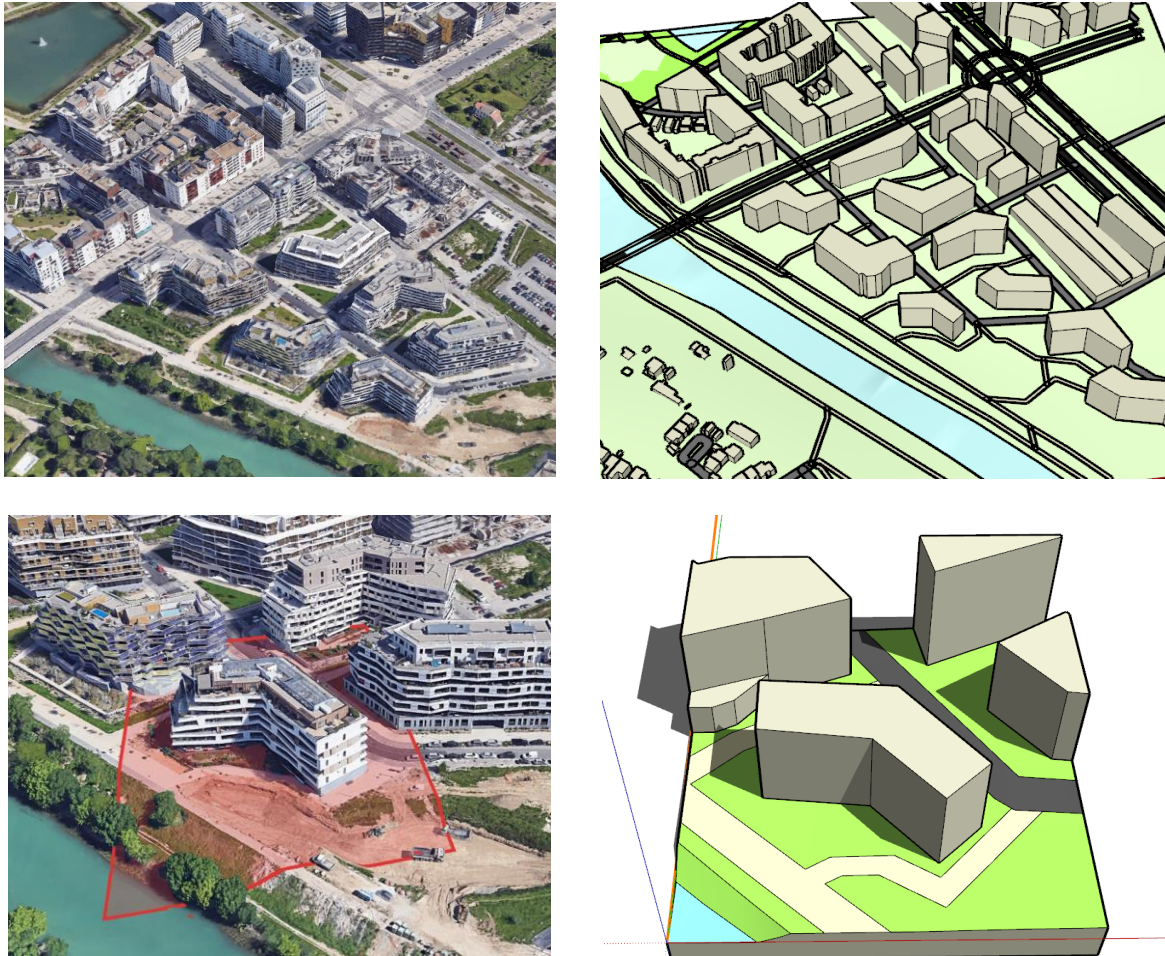


Figure 27. Modélisation du cas d'étude (à gauche Google Earth, à droite modèle Sketchup)

La version gratuite de ENVI-met ne permet de travailler que sur une maquette de taille maximale 50 m x 50 m. Il a donc été choisi de cibler la maquette de manière à avoir au moins un bâtiment en entier, une route et le passage de l'eau (cf figure 28 en bas à droite).

3.4. Préparation de l'expérience

3.4.1. ENVIRONNEMENT DE L'EVALUATION

Pour s'assurer d'une expérience sans perturbations et permettre de filmer l'essai, il est préférable de choisir un lieu peu fréquenté. Une salle de la faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège a été réservée pour l'occasion. Le matériel employé pour l'expérience consiste en :

- Un ordinateur
- Une caméra avec trépied

- Une table et deux chaises
- (Eventuellement) un second écran
- Une souris d'ordinateur et un clavier

L'observateur et l'utilisateur s'assoient devant le même poste de travail, la caméra est placée à l'arrière de manière à filmer l'utilisateur et l'écran de l'ordinateur. L'écran de l'utilisateur est également enregistré en capture d'écran vidéo. Cette disposition est reprise dans le schéma suivant :

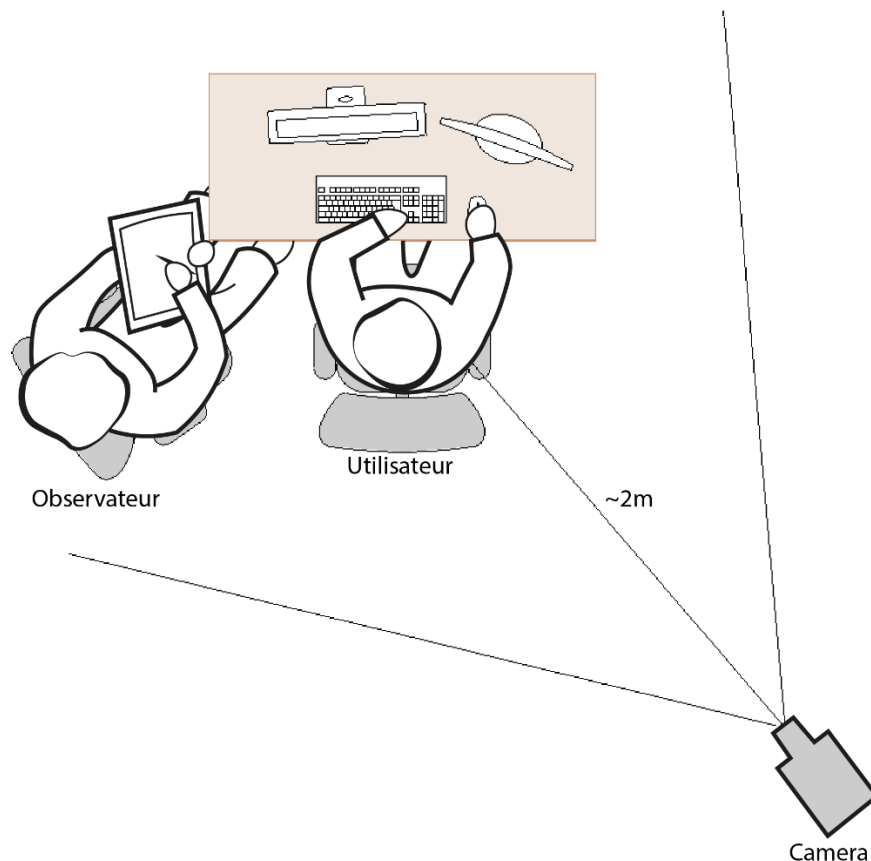


Figure 28. Environnement et organisation spatiale de l'expérience

3.4.2. PROTOCOLE DE L'ÉVALUATION

Avant l'arrivée de l'utilisateur, la salle et le poste de travail sont préparés.

Dans un premier temps, le but et les modalités de l'expérience sont rappelés oralement à l'utilisateur. Il est notamment précisé à l'utilisateur que l'observateur remplit une grille durant l'essai qui n'a pas pour but d'évaluer ses compétences mais bien la capacité du logiciel à répondre à ses besoins.

Bien que mentionné dans le formulaire de consentement préalablement signé par l'utilisateur, il lui est également rappelé que l'expérience est filmée. Sans objection de la part de l'utilisateur, les enregistrements vidéo (caméra et écran) démarrent.

Dans un deuxième temps, la fiche descriptive du profil de l'utilisateur est remplie conjointement avec l'organisateur sur ordinateur ou sous format papier.

L'utilisateur est alors invité à commencer la réalisation des tâches.

Suite à l'achèvement des 5 tâches, l'échelle d'évaluation SUS est expliquée à l'utilisateur. Il est notamment rappelé qu'en l'absence d'avis, l'utilisateur doit choisir le centre de l'échelle, donc 3 (Brooke 2020). L'utilisateur peut remplir ce formulaire dans un format papier ou numérique, en anglais ou français.

Enfin, un retour d'expérience sous forme de discussion semi-dirigée peut avoir lieu.

Ces étapes sont reprises dans le tableau suivant :

Etape	Résumé	Durée	Description	Document rempli
0	Préparation	15 min	- Allumer l'ordinateur - Ouvrir le logiciel - Mettre la maquette 3D sur l'ordinateur - Installer la caméra	
Arrivée de l'utilisateur				
1	Accueil	5 min	- Proposition d'une boisson chaude - Installation sur le poste de travail - Explication de l'expérience	
Début de l'enregistrement vidéo				
2	Identification	5 min	- Remplissage de la fiche d'identification	Profil_utilisateur
Début de l'essai				
3	Essai Usabilité	50 min	- Réalisation des tâches par l'utilisateur - Prise de notes par l'organisateur	Grille_observations
Fin de l'essai				
4	SUS	10 min	- Présentation de l'échelle SUS - Remplissage	Retour_quantitatif_SUS
6	Discussion	libre	- Retour et partage d'expérience	Retour_qualitatif_essai
Fin de l'enregistrement vidéo				
Durée totale avec l'utilisateur : 1h10				

Tableau 10. Protocole de l'essai utilisateur

Par précaution, il est demandé aux participants de l'expérience de prévoir 1h30 de leur temps.

3.4.3. EXPERIENCE 0

La première expérience a été réalisée quelques jours avant la suivante pour évaluer la faisabilité de l'essai et éventuellement l'adapter. Les décisions prises suite à cette expérience 0 sont :

- L'abandon du critère « ressource de mémoire de l'ordinateur utilisée » du fait de l'incapacité à afficher le gestionnaire des tâches en continu en parallèle de l'utilisation des logiciels, des éventuelles recherches internet, de l'enregistrement en capture d'écran etc...
- Le rapprochement de la caméra à quelques centimètres de l'utilisateur pour mieux voir l'écran
- La prévision de 2h plutôt qu'1h30 dans l'emploi du temps des participants
- La simplification de la maquette 3D utilisée pour l'essai à un contexte de 30 m par 30 m
- La réalisation de l'expérience directement dans l'environnement de travail de l'utilisateur (dans son bureau plutôt que dans une salle réservée). En effet ces lieux sont tout aussi calmes et plus confortables pour l'utilisateur. D'autant plus que dans le cas du logiciel Solene Microclimat, les exécutable sont déjà installés sur l'ordinateur de la participante.
- La mesure de la durée de « bug » par l'ordinateur a également été enlevée puisque sans simulations ces temps sont plus courts que la tolérance des mesures (2min).
- La nature des clics est également retirée car trop difficile à suivre.

3.5. Analyse des données

3.5.1. ENTRETIENS QUALITATIFS

Etant donné les profils variés des personnes interrogées, les questions sont divisées en une partie commune et une personnalisée.

Les réponses seront confrontées entre elles et résumées à l'aide de « mindmap » via le site en ligne Miro. Ces cartographies conceptuelles (ou cartographie des " idées ") sont définies comme « une représentation visuelle non linéaire des idées et de leurs relations » (Davies 2011). Souvent utilisées pour explorer des associations de concepts, l'avantage principal des mindmap repose dans leur flexibilité de structuration. Cela se prête particulièrement bien à l'analyse des entretiens semi-dirigés, dont l'orientation de la discussion peut varier.

3.5.2. ESSAIS UTILISATEURS

La grille d'observation sera remplie manuellement durant l'expérience et complétée en différé sur ordinateur. Un tableur Excel permettra notamment le comptage des données et la génération des graphiques et diagrammes d'analyse.

3.6. Conditions aux limites et critères de qualité

Les éléments non pris en compte dans l'étude sont :

- Les qualités techniques des logiciels en termes de simulation
- L'accessibilité³ des logiciels aux différents profils d'utilisateurs
- Une étude quantitative sur un large échantillon d'architecte

Un soin sera apporté dans les échanges qualitatifs pour poser des questions ouvertes et non orientés.

Les mesures sont également accompagnées des tolérances suivantes :

- Durée totale des essais et entretiens : +/- 2 minutes
Cela est dû à l'arrêt des enregistrements au bout d'une certaine durée et à la relance manuelle d'un nouvel enregistrement vidéo
- Durée des échanges entre l'observateur et l'utilisateur au cours de la réalisation des tâches : +/- 10 secondes
Les échanges de moins de 5 secondes entre deux actions de l'utilisateur ne sont pas comptés
- Nombre de clics : +/- 10 clics
Les clics « non-effectifs » comprennent autant que faire se peut :
 - les doublons de clics
 - les clics d'orientation (dans la vue 3D, ou placement des fenêtres)
 - les clics de « réveil » du logiciel après un long moment sans action
 - les clics répétés suite à une erreur d'utilisation
- Le nombre d'élément rempli au clavier ne compte pas le nombre de caractères ou de mot/valeur mais le nombre de champ rempli
Ce critère ne compte pas les raccourcis clavier.

³ Accessibilité : mesure dans laquelle un produit ou un système peut être utilisé par des personnes présentant le plus large éventail possible de caractéristiques et de capacités pour atteindre un objectif précis dans un contexte d'utilisation donné (ISO/IEC 25 010).

4. RESULTATS

4.1. Entretiens ciblés

4.1.1. L'INTEGRATION DES ICU AUJOURD'HUI

Les entretiens ont permis de mettre en évidence que les îlots de chaleur urbains sont assez considérés aujourd'hui, mais qu'ils pourraient être mieux intégrés aux divers projets.

En effet, Eytan Levi, architecte à Paris, affirme qu'il ne connaît plus de concepteur qui ne parle pas de sujets environnementaux et de lutte contre les îlots de chaleur urbains, en partie grâce aux réglementations. C'est en se questionnant sur son rôle « *En tant que jeune architecte, quel impact a-t-on sur la manière dont les villes se forment et se construisent ?* » qu'il décide, avec deux autres anciens étudiant au MIT, de lancer la start-up de toitures végétales Roofscape.

Damien Cuny, environnementaliste spécialisé en sciences végétales et fongiques à Lille, le rejoint sur le fait que l'enjeu des îlots de chaleur urbain est assez connu en France. Ce professeur, également directeur d'un groupe de recherche sur les milieux anthropisés, ajoute notamment « *l'îlot de chaleur est un sujet qui est intéressant sur plusieurs dimensions [...] et qui s'intègre, pour nous, à une réflexion plus large sur l'écosystème urbain* ». Il aborde en effet l'importance qu'a chaque acteur dans les stratégies de mitigation « *la climatisation contribue aussi à cette chaleur résiduelle en ville donc finalement cette réflexion architecturale sur un bâtiment elle n'est pas déconnectée pas du tout la problématique climatique en ville d'une manière générale* ». Ainsi il cite également l'importance de travailler sur l'orientation des bâtiments, le choix des matériaux, l'intégration de la végétation dans le cœur des villes telles que Lille qui sont trop minérales. Cette approche holistique est également soutenue par l'architecte qui énonce « *Je ne pense pas qu'il y ait de solution qui soit véritablement bonne ou mauvaise, si elles ne sont pas mises en place avec autre chose* ». En particulier il insiste sur l'importance de faire évoluer les mentalités en parallèle de travailler sur des solutions techniques.

Selon Olivier Papin, ingénieur et cofondateur de l'outil Score ICU précédemment présenté énonce cependant que tous les acteurs n'intègrent pas encore facilement cet enjeu « *Aujourd'hui les collectivités doivent sous-traiter pour les modélisations numériques. Elles ne vont pas sous-traiter à chaque fois qu'il y a un aménagement de place, de rue, de jardin, il fallait un outil qui permette de traiter le sujet facilement* ». Son témoignage révèle également le potentiel d'amélioration de l'intégration des ICU via les outils numériques.

4.1.2. LES ENJEUX LIES AUX ICU

Arrar Hicham, architecte et chercheur à Liège explique son utilisation des outils numériques « *avec le logiciel, on génère les heatmap (carte de températures) qui nous montrent les hotspots (zones les plus chaudes), et après on peut proposer et tester différentes stratégies* ». Il relève également le frein que peut constituer la prise en main de ces outils, surtout s'ils ne sont pas utilisés régulièrement.

Un second élément, revenus plusieurs fois au cours des discussions est l'enjeu politique lié au ICU. En effet, aujourd'hui trouver des solutions techniques ne suffit pas si leur mise en œuvre rencontre des obstacles. C'est le problème auquel est notamment confrontée la start-up Roofscape. Pour installer ses plateformes végétalisées sur les toits en pente de Paris elle nécessite des autorisations de la ville qui nécessite beaucoup d'effort explique Eytan Levi. Pour lui, les réglementations constituent un réel levier pour faire avancer les choses et coordonner les différents acteurs. Damien Cuny, affirme également qu'il n'y a pas, à sa connaissance, de réglementation aujourd'hui imposant la prise en compte des ICU en conception. Il rejoint l'avis qu'il s'agit d'un levier important, en apportant toutefois une nuance quant à la rigidité de certaines réglementations « *un autre angle qui peut être réglementaire et qui peut être efficace c'est d'obliger à avoir des critères de performances énergétiques et thermiques en ce qui concerne la chaleur extérieure et ça c'est pas mal parce que ça laisse de la liberté, ça laisse manager les autres contraintes* ».

Ce professeur insiste également sur un autre point : l'importance de ne pas miser toutes les stratégies de mitigation sur le végétal « *Alors c'est un environnementaliste qui vous dit ça donc je le dis avec précaution, mais les végétaux ce n'est pas la panacée universelle* ». A la question sur les désavantages liés aux végétaux il énonce de manière non exhaustive :

- les allergènes, qui est le risque qu'il regarde en premier
- l'entretien
- les risques de chutes
- la réduction de la convection du vent

Ainsi, il regrette de ne pas voir davantage d'études sur les autres solutions telles que celles fondées sur les matériaux « *je trouve qu'on ne travaille pas beaucoup sur les matériaux et c'est quand même la source qui rediffuse la chaleur la nuit* ». Selon lui le fait de n'envisager que les solutions fondées sur la nature, plutôt que d'avoir une approche plus combinée des solutions, peut constituer un frein au traitement des ICU.

Enfin un dernier point important serait d'aborder l'enjeu des ICU à une échelle plus humaine. L'architecte Eytan Levi met notamment en évidence une question de légitimité qu'il peut rencontrer lié à sa formation « *en architecture en général cette notion de légitimité, que ce soit sur des sujets environnementaux ou non, revient très souvent* ». Mais selon lui, le bien-fondé des solutions telles que les toitures végétales devraient dépasser ce frein. Deuxièmement, il soutient que l'humain est à intégrer jusque dans la solution si on veut qu'elle fonctionne « *Il faut s'assurer qu'il y a un intérêt à investir dedans pour des particuliers ou des collectivités* ». Cette notion est intimement liée au coût financier qui pour lui est un frein majeur dans la lutte contre les ICU. Ainsi son concept permet par exemple d'augmenter l'espace extérieur accessible pour les habitants. En créant cette plus-value il favorise le développement de la solution de mitigation des toitures végétales et s'assure de trouver des personnes intéressées. Mitali Joshi, urbaniste et chercheuse à Liège, travaille notamment sur l'impact des toitures végétalisées et affirme « *Ici les gens voulaient que ce soit le plus facile à mettre en place et à adapter, d'où l'intérêt pour les toitures plates* ».

La mindmap ci-dessous (figure 30) résume les éléments évoqués lors des discussions sur la prise en compte des îlots de chaleur urbains. Chaque élément de la mindmap est associé par une couleur à l'interlocuteur l'ayant évoqué.

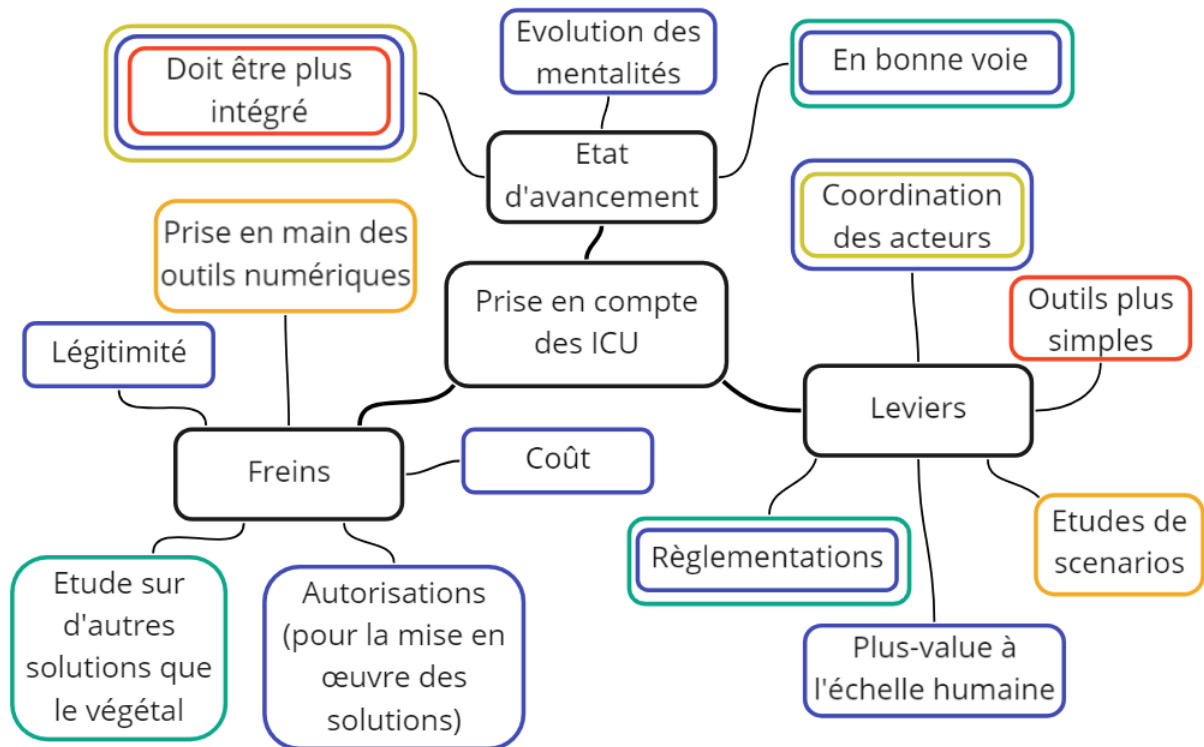


Figure 29. Mindmap résumant la prise en compte des ICU en France selon les personnes interrogées



A cela, Eytan Levi ajoute aussi une notion importante qui est la mise en concurrence de même espace pour différents enjeux. Il prend l'exemple des toitures : faut-il favoriser les infrastructures de traitement des eaux pluviales, l'installation de panneaux solaires, la végétalisation, l'accessibilité aux habitants ? Ces conflits d'usage et d'exploitation constituent un enjeu majeur pour lequel il convient que des outils d'aide à la décision peuvent être utiles.

4.1.3. L'UTILISATION DES OUTILS NUMERIQUES

Olivier Papin est le seul concepteur d'outil ayant pu répondre à la demande d'entretien. Il présente son outil, Score ICU, comme un outil de simplification et d'intégration des bonnes pratiques sur les projets d'aménagement. Un nuage de mot a été généré reprenant ses éléments de réponse dans la figure ci-dessous :

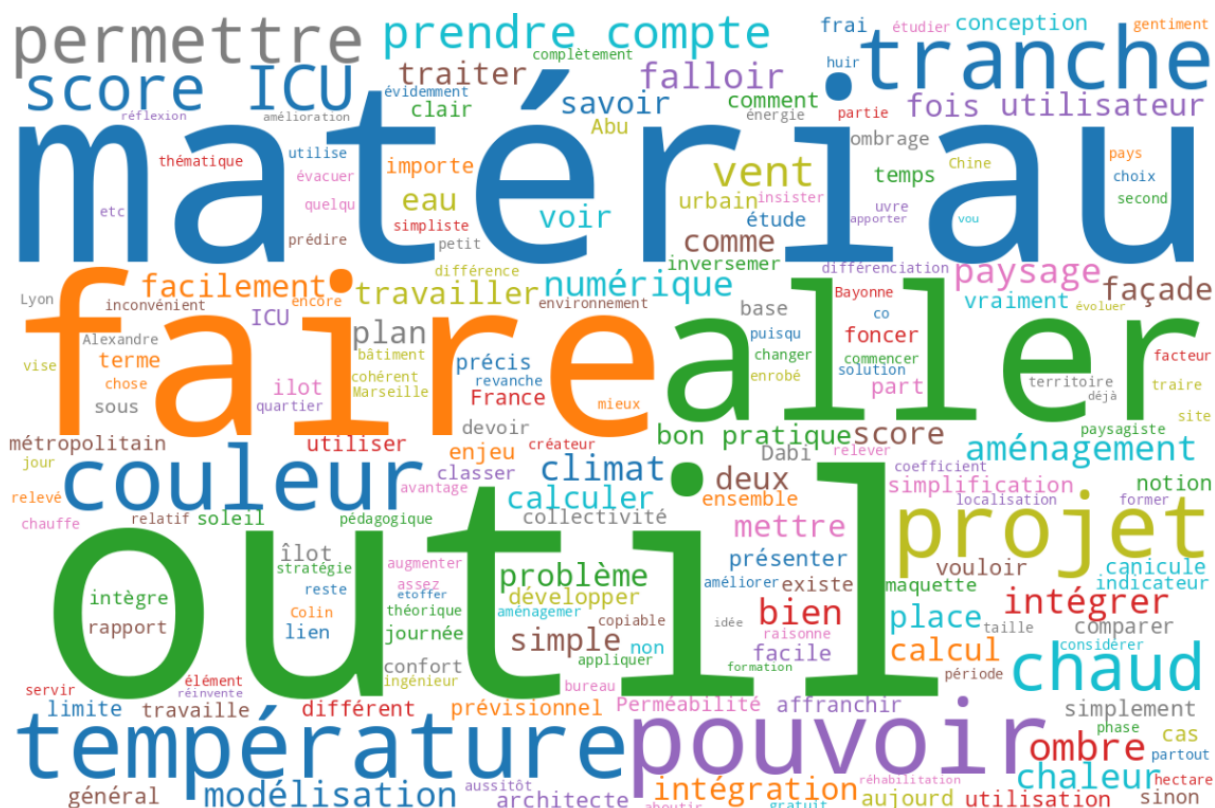


Figure 30. Nuage de mots issu de l'entretien avec le co-fondateur de Score ICU

Cette figure permet d'identifier nettement l'importance que les matériaux ont dans cet outil qui, en effet, ne prend pas en compte d'autre facteur tels que le vent ou l'eau. Bien que cet outil ne génère pas de simulation, il est intéressant de sonder l'avis des différents interlocuteurs sur de pareils outils simplistes.

Les questions orientées vers les outils numériques ont permis de mettre en évidence qu'ils sont jugés nécessaires au traitement des îlots de chaleur urbain mais que leur utilisation est mitigée.

La chercheuse Mitali Joshi affirme « *Ce serait vraiment bien si les architectes pouvaient les utiliser car ils concevraient les bâtiments avec toutes ces données intégrées* ». Cependant elle consent également qu'aujourd'hui ces logiciels ne sont pas « *user-friendly* » c'est-à-dire qu'ils peuvent être difficiles à lire et à utiliser. De même elle affirme que la prise en main peut être longue et énergivore « *Il faut y consacrer un moment pour comprendre comment ils marchent avant de pouvoir travailler avec* ». Bien que l'architecte Arrar Hicham soit satisfait de l'utilisation des outils, il confirme également que leur utilisation peut s'avérer fastidieuse « *Pour l'ombrage, on va travailler avec un logiciel, pour le vent avec un autre logiciel... Il y a un aller-retour de logiciels, on n'a pas vraiment le temps d'aller dans ce genre de détails* ». Le temps est en effet un frein également cité par les autres personnes interrogées.

Olivier Papin justifie ainsi la pertinence de son outil simpliste « *il faut comparer le temps d'utilisation avec les modélisations numériques* », sous-entendant que les modélisations numériques telles qu'avec ENVI-met ou Solenne Microclimat prennent beaucoup de temps. Arrar Hicham nuance toutefois l'utilisation de pareils outils simpliste « *C'est beaucoup plus facile à faire mais c'est moins complet. Tout dépend de l'échelle du projet et du degré de détails qu'on cherche* ». Rejoint par Mitali Joshi

« *Cela dépend complètement de ce qu'on veut, si c'est une compréhension basique de la zone ça peut le faire mais au-delà il faut un outil plus précis* ».

Pour l'environnementaliste Damien Cuny, les outils numériques sont une réelle richesse dans les projets. Cependant il insiste sur le fait qu'il faut « *garder la tête froide* » et qu'un certain degré de transparence est indispensable. Le professeur ajoute également qu'il y a beaucoup de modèles qui sont utilisés et qui ne tiennent pas compte de paramètres assez importants. Pour Olivier Papin au contraire, les paramètres peuvent être hiérarchisés et simplifiés dans un but de rendre plus accessible le traitement de cet enjeu.

L'urbaniste Mitali Joshi accorde également beaucoup d'importance à cette transparence. A cela, le professeur Damien Cuny ajoute qu'il est important de toujours fournir le degré de fiabilité des données « *Quand je produis des cartes chez moi dans mon labo, il y a toujours une notice d'erreur* ».

L'intérêt pour les logiciels de simulation n'est cependant pas partagé par tous. Ainsi Eytan Levi affirme « *Je pense que ces outils numériques sont importants et nécessaires mais je sais aussi que c'est pas ce qui, nous, nous intéresse* ». Il relève également que tout n'est pas quantifiable et qu'en voulant utiliser des outils qui se veulent exhaustifs cela peut brider la créativité « *En travaillant seulement avec des nombres tu peux aussi limiter la créativité, limiter l'innovation sur des nouvelles solutions qui n'ont pas encore été explorées* ». De même, Olivier Papin estime qu'il ne cherche pas à obtenir des données quantifiables ou une température prévisionnelle mais surtout à encourager l'intégration de bonne pratique.

Les éléments clefs des discussions autour de ces outils sont repris dans la mindmap suivante (figure 32) :

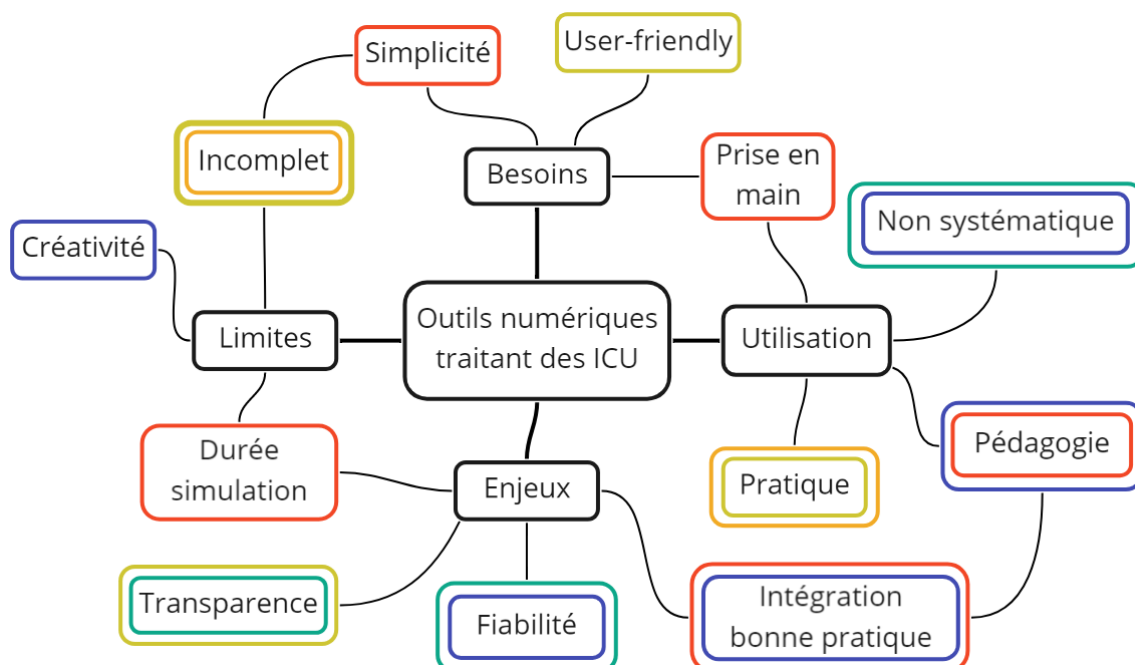


Figure 31. Mindmap résumant les points de vue des personnes interrogées sur les outils numériques



4.2. Essai préalable en interne

L'ensemble des tâches demandées aux utilisateurs a été testé au préalable en interne avec la version gratuite de ENVI-met. Les limites détectées pendant cet essai sont :

- La taille de la maquette importée (maximum 50 m x 50m)
- Le nombre de cœurs du processeur de l'ordinateur utilisé (maximum 1)
- L'impossibilité d'importer des fichiers météo pour les simulations

Basée sur le fichier .epw de la station météorologique de Montpellier (à 6km du cas d'étude), une simulation a été lancée avec les données suivantes :

Période simulation	Vitesse vent	Direction vent	Températures
18 août 2021 de 5h à 21h	6 m/s	300°	Minimum : 21°C Maximum : 35°C

Tableau 11. Configuration pour l'essai de simulation ENVI-met

Du fait de la limitation logistique à un cœur du processeur, la simulation pour un scénario a nécessité 51h. Cela a confirmé le choix de ne pas réaliser de simulation dans les essais.

Un point d'attention est à noter quant au vocabulaire employé dans le logiciel. Pour la réalisation de la tâche 3 et 4, il est nécessaire d'aller dans l'onglet Data Base d'ENVI-met et de modifier la valeur du paramètre « Reflection » pour l'albedo (cf : figures 33) et « Water content at saturation » pour la perméabilité. Cette dernière valeur correspond à la capacité d'eau que le sol peut contenir avant le ruissellement.

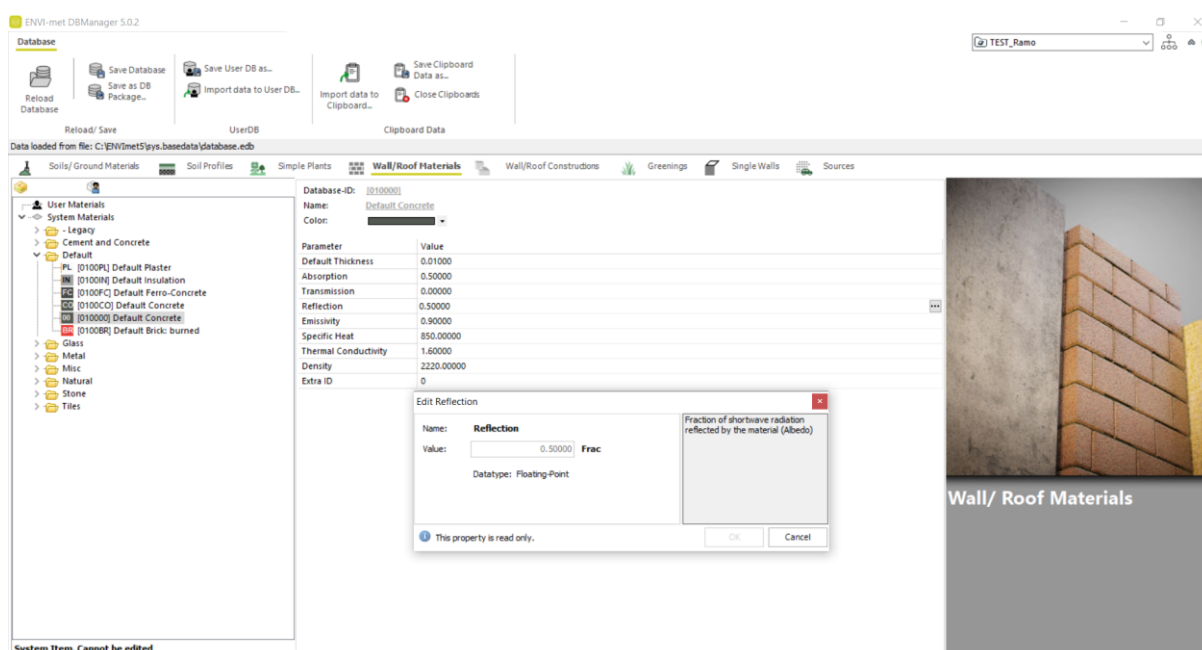


Figure 32. Modification de l'albédo d'un mur sur ENVI-met

4.3. Essai d'utilisabilité

Pour bien interpréter les résultats, il est important de prendre en compte la différence des profils des deux utilisateurs. Outre les fiches de présentations, les observations suivantes ont été faites durant les essais :

Utilisateur 1 (ENVI-met)	Utilisateur 2 (Solene Microclimat)
• Peu à l'aise avec le logiciel dû à la dernière utilisation (un an avant l'essai) • Conditions physique impactée par une allergie au pollen (rhume prononcé et interrompant régulièrement l'essai).	• Très à l'aise avec le logiciel dû à la fréquence d'utilisation (la veille de l'essai) • Intérêt prononcé pour le codage. Cela n'est pas forcément le cas d'un autre utilisateur qui aurait donc plus de mal avec ce logiciel.

Tableau 12. Observations sur les utilisateurs durant les essais

Un autre élément important à noter est qu'au cours de l'expérience n°1, un nouveau modèle dissocié du cas d'étude a été réalisé par l'utilisateur pour s'assurer que les problèmes rencontrés ne provenaient pas de la maquette donnée. Cette modification n'impacte cependant pas les résultats de l'étude étant donné qu'aucune simulation n'a été lancée et que l'essai se concentre sur la prise en main et l'utilisabilité des logiciels indépendamment du cas d'étude.

4.3.1. TAUX DE REUSSITE DES TACHES

Le taux de réussite des tâches demandées est très divergeant comme le montre le tableau récapitulatif suivant :

N°	Tâche	Utilisateur 1 (ENVI-met)	Utilisateur 2 (Solene Microclimat)
1	Repérer les « hotspots » (points chauds)	✓	✓
2	Augmenter l'ombrage de 20% (avec des arbres)	✗	✗
3	Augmenter l'albédo des murs	✗	✓
4	Augmenter la perméabilité du sol	✗	✓
5	Modifier la géométrie des bâtiments pour augmenter la convection du vent	✗	✓
Taux de réussite		20 %	80 %

Tableau 13. Réussite des tâches par les utilisateurs

La tâche n°1 a été considérée comme réussie si l'utilisateur est parvenu jusqu'à l'étape de lancement de la simulation. L'utilisateur de Solene Microclimat, qui travaillait sur son PC fixe et avec le logiciel complet a pu lancer les simulations, dont les résultats étaient disponibles 1h après.

Dans les deux cas, la tâche n°2 n'a pas réellement été essayée. Si les deux utilisateurs ont su expliquer comment ajouter un arbre, ils affirmaient ne pas savoir comment réaliser une projection solaire avec ces logiciels et souhaitaient passer rapidement à la tâche suivante.

La réalisation des tâches n°3 et 4 a généré un sentiment de confort pour les deux utilisateurs, visiblement pour souvent confrontés à ces tâches. La stratégie de réalisation était similaire pour les deux tâches (scinder/sélectionner les surfaces d'intérêts et modifier les matériaux ou propriétés de matériaux). Cependant l'utilisateur d'ENVI-met n'a pas pu aller au bout de ces tâches du fait qu'il n'a pas su trouver où changer les propriétés des matériaux.

Enfin, la tâche n°5, comme pour la tâche n°2 a suscité de l'inconfort dans la stratégie de réalisation pour les deux utilisateurs qui ne savaient pas instinctivement comment réaliser une simulation de convection du vent simplement. Si l'utilisateur 2 a su aller au bout de la tâche avec Solene Microclimat, ce n'est pas le cas de l'utilisateur d'ENVI-met qui n'a pas trouvé comment cibler les simulations pour ne lancer que celle de la convection.

4.3.2. CONFORMITE AUX EXIGENCES UTILISATEURS

Les deux logiciels répondent peu aux exigences que peut nécessiter un architecte en phase de conception. Les résultats suite aux essais sont résumés dans le tableau suivant :

Exigence	Utilisateur 1	Utilisateur 2
Il est possible d'annuler facilement une action qui vient d'être effectuée	✗	✗
Le caractère autodescriptif du logiciel suffit au repérage des fonctions	✗	✗
Le logiciel fournit un bouton d'aide ou un forum pour aider à résoudre des problèmes	✓	✓
Il est possible de modifier la géométrie de l'objet directement depuis le logiciel	✓	✗
L'état du traitement ou de la tâche en cours est clairement indiqué	✓	✓
Taux de conformité	60 %	40 %

Tableau 14. Conformité aux exigences utilisateurs

Dans les deux cas, l'annulation d'une action comme le placement d'un arbre au mauvais endroit n'est pas réalisable facilement. L'utilisation classique du raccourci clavier « Ctrl » + « Z » ou l'annulation de la tâche habituellement disponible dans le menu « Edition » n'est pas possible ici. Dans la pratique, ce manque de flexibilité s'est avéré très embêtant pour les utilisateurs qui ont tous deux émis une plainte à ce sujet durant l'essai.

Le repérage des fonctions a également été jugé difficile, voire impossible en absence de tutoriel ou d'une personne pour expliquer à côté.

Les deux logiciels disposent d'une boîte de dialogue pour aider l'utilisateur devant certaines actions ou face à un problème. Il n'existe pas de forum pour Solene Microclimat, le logiciel n'étant pas encore commercialisé et utilisé internationalement.

Une différence majeure observée entre les deux logiciels est la capacité à modifier la matérialité des surfaces directement sur la volumétrie 3D. ENVI-met permet d'un simple clic de souris d'appliquer un matériau à un élément de la maille (cf figure 34) là où Solene Microclimat nécessite de sectionner à l'avance sur Gmsh les surfaces selon leur matérialité et de recréer un maillage pour chacune d'entre elle (cf figure 35).

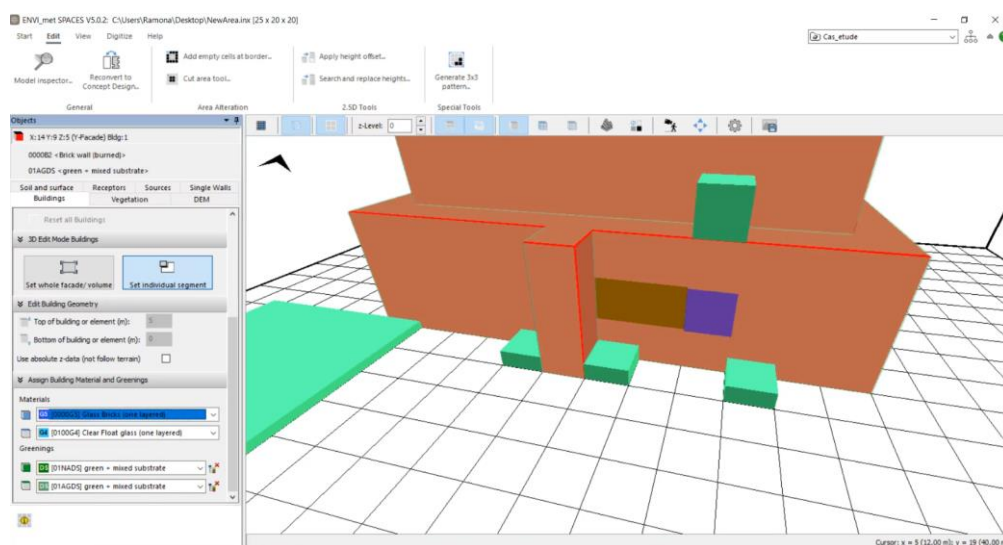


Figure 33. Application d'un matériau depuis la vue 3D sur ENVI-met (écran de l'utilisateur 1)

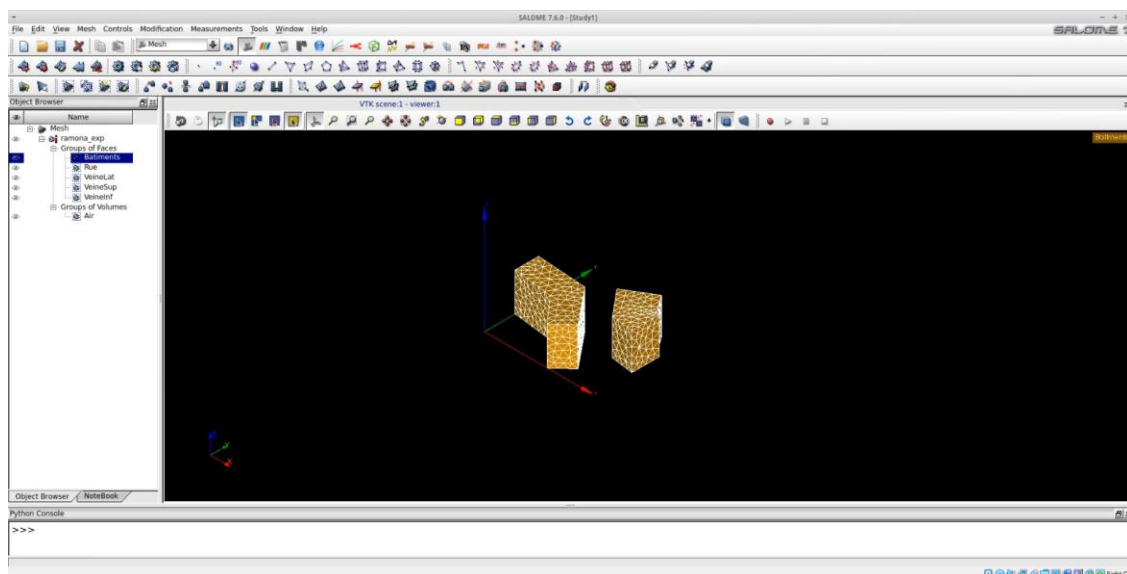


Figure 34. Séparation des murs sur Solène Microclimat (écran de l'utilisateur 2)

Enfin, dans les deux logiciels l'état de traitement de la simulation ou de la tâche en cours est clairement indiqué et permet à l'utilisateur de mieux prévoir la suite des événements.

4.3.3. EFFICACITE

Durées de réalisation des tâches

Dans les deux essais, l'utilisateur préfère prendre plus de temps et aller au bout des tâches, dépassant la durée de 10min cible initialement fixée. La répartition du temps de chaque utilisateur est décrite dans les diagrammes suivants (cf figure 36). Ces durées ne prennent pas en compte les interactions avec l'observateur.

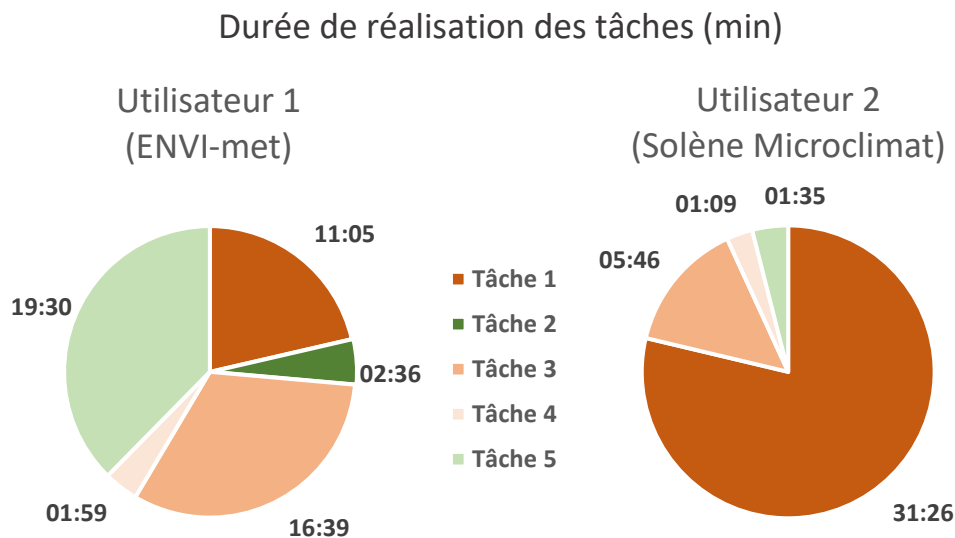


Figure 35. Répartition du temps de réalisation des tâches

Pour l'utilisateur 1 (ENVI-met), les deux tâches ayant pris le plus de temps sont :

- l'augmentation de l'albédo (tâche 3) : la majorité du temps ayant été consacrée à la résolution d'un problème de manipulation de la volumétrie 3D et à la recherche des paramètres du matériau → aucun de ces problèmes n'a été résolu
- la convection du vent (tâche 5) : la plus grande partie du temps ayant été consacrée à la recherche d'un moyen pour modifier l'orientation des bâtiments → problème non résolu également.

Les $\frac{3}{4}$ du temps de l'utilisateur 2 (Solene Microclimat) ont été attribués à la première tâche (repérage des hotspot) du fait de la multiplicité des étapes à suivre avant de pouvoir lancer une première simulation. En effet, deux logiciels préalables sont nécessaires avant de pouvoir travailler sur Solene Microclimat.

Le processus reprenant les étapes et problèmes que l'utilisateur 2 a rencontré de l'intégration de la maquette Sketchup jusqu'au lancement de la simulation a été établi dans la figure ci-dessous :

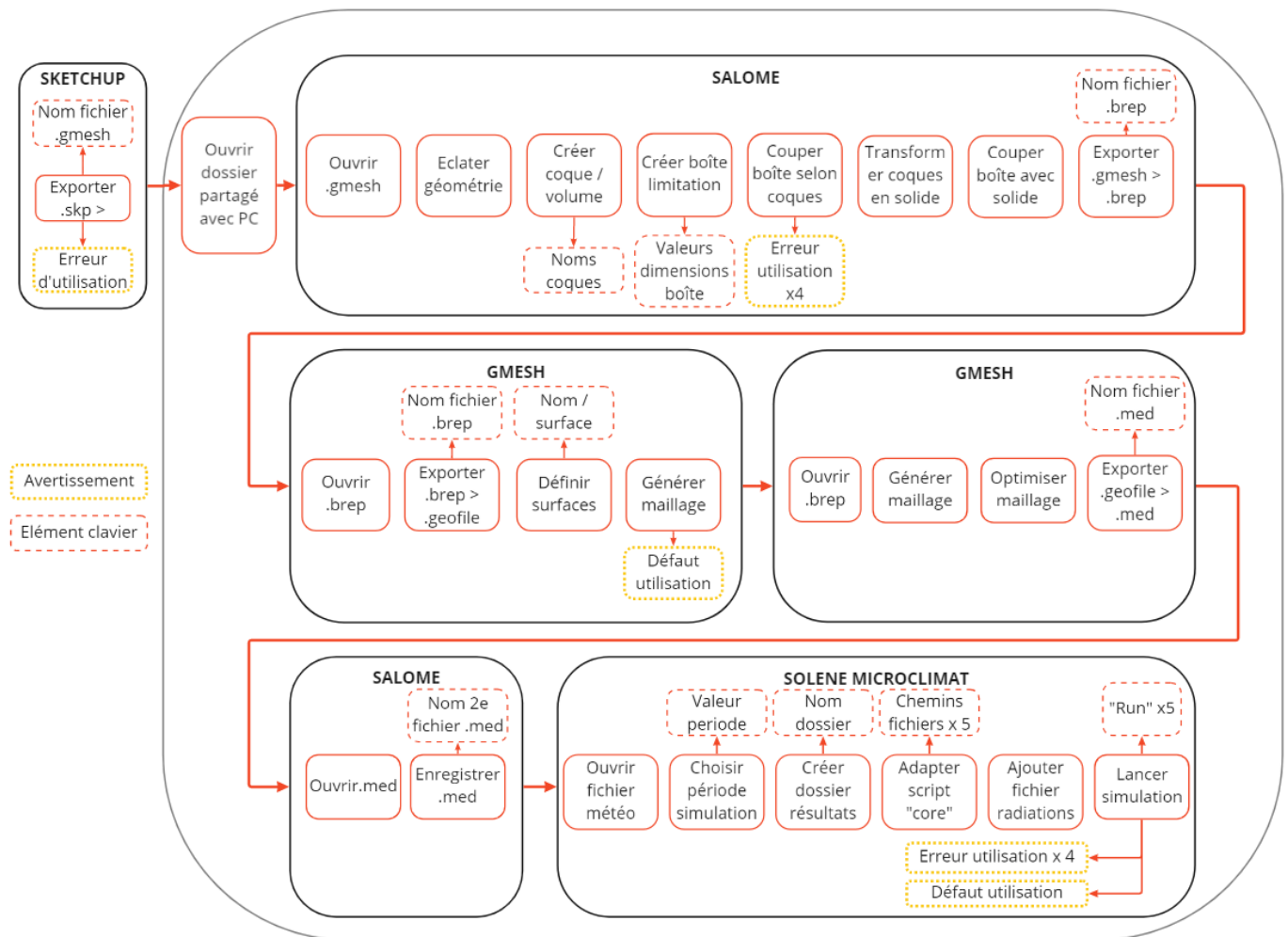


Figure 36. Processus suivi par l'utilisateur 2 pour la réalisation de la tâche 1 "Repérer les hotspots"

A cela s'ajoute le logiciel Paraview, une fois les simulations réalisées pour visualiser les résultats en sortie.

Cette multiplicité des logiciels est caractéristique des logiciels de CFD. Elle n'a pas été expérimentée pendant l'essai par l'utilisateur 1 mais elle tout aussi présente sur ENVI-met (cf figure ci-dessous)

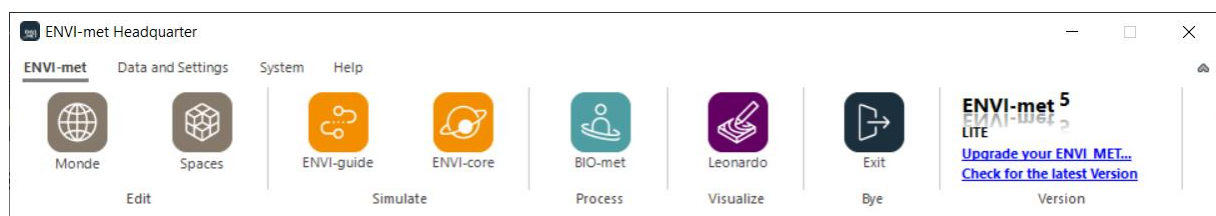


Figure 37. Interface du "Headquarter" de ENVI-met

Erreurs et défauts d'utilisabilité

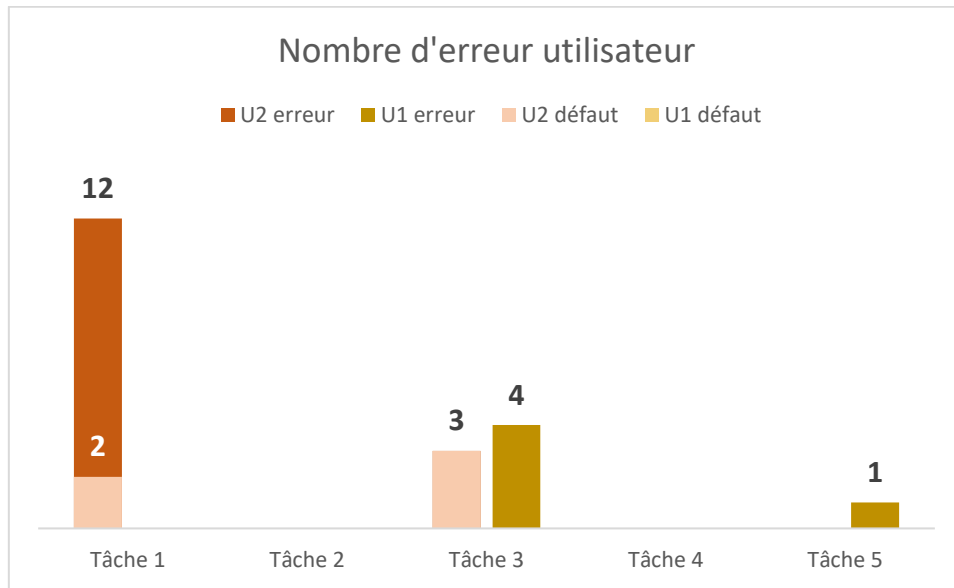


Figure 38. Nombre d'erreur d'utilisation et de défaut d'utilisation au cours de l'essai

La tâche n°1 est celle qui a suscité le plus d'erreur chez l'utilisateur 2 (cf figure 37 récapitulant le nombre d'erreurs et défauts rencontrés). Durant cette tâche 4 problèmes principaux sont apparus (en jaune dans le schéma de processus):

- Un avertissement Sketchup dû à l'arrêt de la tâche en cours (export) par l'utilisateur
- Plusieurs avertissements de Salome lors du « découpage » de la boîte modélisant l'air avec les coques représentant les bâtiments
→ cela était dû à une erreur de l'utilisateur qui essayait de couper un volume avec des surfaces. Une conversion des surfaces en volume a permis de résoudre le problème.
- Un message d'erreur et un arrêt du logiciel Gmsh lors de la génération du maillage.
Ces deux problèmes constituent les 2 défauts du logiciel identifiés dans la tâche 1 du diagramme ci-dessus. Comme indiqué par l'utilisateur durant l'essai, le logiciel Gmsh utilisé est très ancien et est sujet à beaucoup de « bug ». Une relance du logiciel et un deuxième essai de génération du maillage a permis de résoudre le problème.
- Plusieurs lignes de codes en rouge au moment de lancer la simulation sur Solene Microclimat. Cette erreur d'utilisation provenait d'un problème de chemin de fichier vers le dossier créé pour les résultats. L'utilisateur a dû parcourir l'ensemble des scripts à plusieurs reprises pour trouver et corriger les chemins erronés.

Durant la réalisation de la tâche n°3, des défauts d'utilisabilité ont également émergé du fait de l'utilisation de Gmsh. En effet, pour modifier l'albédo des murs, l'utilisateur devait ré-ouvrir ce logiciel, séparer les surfaces des murs et des toits qui constituent les bâtiments et qui étaient considérées jusqu'à présent comme un même élément, et re-générer un maillage pour ces surfaces.

Les erreurs de l'utilisateur 1 (ENVI-met) sont toutes liées à des oublis ou au manque d'information donnée au logiciel (telle que la sélection d'un objet avant de lui appliquer une fonction). En particulier, une erreur durant la tâche n°3 a généré une perte de temps et d'énergie importante de l'utilisateur : l'activation de l'icône à côté des matériaux pour pouvoir les appliquer à une surface (cf figure ci-dessous)

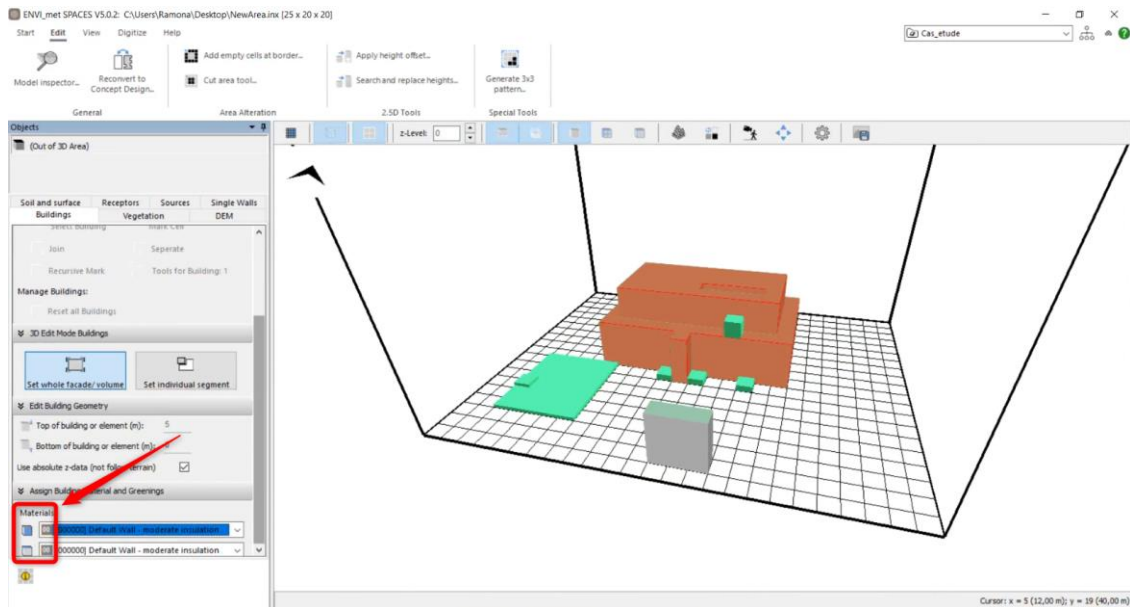


Figure 39. Erreur de l'utilisateur 1 : oubli d'activer un icône

Aide extérieure

Seul l'utilisateur 1 a suscité des aides extérieures durant l'essai (cf figure 41 ci-dessous). Pour la tâche 2, après seulement quelques secondes de discussion, l'utilisateur a très vite souhaité vérifier sur internet si une projection solaire était possible avec ENVI-met. Le peu d'information sur le sujet a constitué une réponse négative à sa question. Pour les tâches 3 et 5, l'aide a été suscitée après 3 à 4 minutes de recherche seule par l'utilisateur.

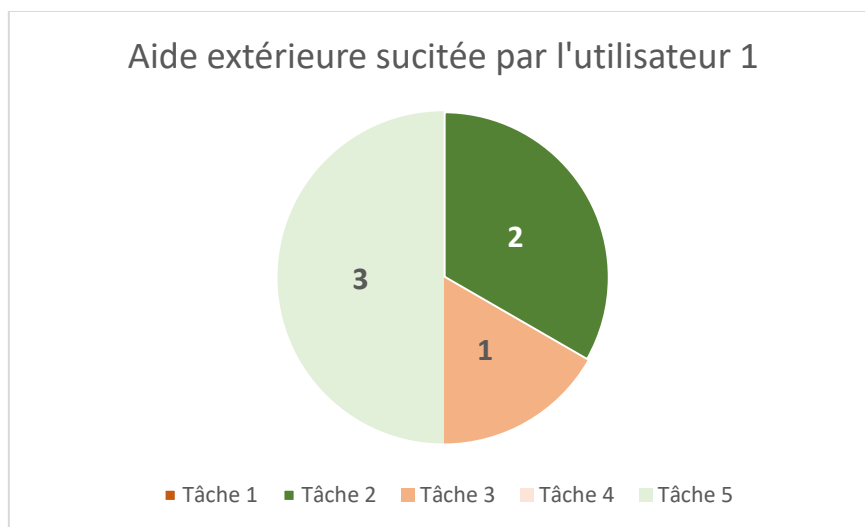


Figure 40. Nombre d'aide extérieure suscitée par l'utilisateur 1 pendant l'essai

Ces recherches avaient pour but de trouver des solutions aux problèmes suivants :

- Entrer dans les paramètres des matériaux
- Changer l'orientation d'un bâtiment
- Ouvrir un fichier météo
- Lancer uniquement une simulation de vent

Il est intéressant de noter la proportion des aides sous forme de tutoriels vidéo (4 sur les 6 au total) comme le montre le tableau ci-dessous

Aide extérieure	6
<i>dont vidéo youtube</i>	4
<i>dont article scientifique</i>	1
<i>dont forum</i>	1

Tableau 15. Nature des aides suscitées par l'utilisateur 1 pendant l'essai

Pour conclure, en termes d'efficacité ENVI-met comme Solene Microclimat peuvent être améliorés particulièrement pour la phase d'import de la maquette 3D et de lancement des simulations qui ont largement dépassé les délais impartis. Cette phase passée, la réalisation des autres tâches pour un utilisateur novice (qui connaît la méthode de réalisation) est globalement rapide et efficace. En phase de conception, il serait donc intéressant pour l'architecte de réaliser directement les différents scénarios de volumétries possibles pour les rentrer d'un seul coup et ne pas répéter la tâche n°1 qui est très fastidieuse et fait perdre en efficacité.

Cependant cela est limité par le fait que, dans un objectif d'optimisation, l'utilisateur souhaite proposer des variantes en fonction des résultats de simulation et doit donc d'office répéter toutes les étapes. Une forte piste d'amélioration pour Solene Microclimat est la mise à jour du logiciel Gmsh qui génère beaucoup de défauts d'utilisation là où ENVI-met semble être plus fonctionnel.

Enfin pour les deux logiciels, davantage de message d'avertissement et d'indications sur l'utilisation des fonctions semble nécessaire pour aider un utilisateur débutant ou qui n'aurait pas utilisé le logiciel depuis longtemps à prendre rapidement ses marques.

4.3.4. EFFICIENCE

Les ressources en termes d'énergie dépensée par l'utilisateur ont été traduites en nombre de clic (cf figure 42) et d'éléments remplis au clavier (cf figure 43) qui sont généralement associés au nombre d'étapes requises par chaque tâche.

Nombre de clics

Nombre de clics total et superflus

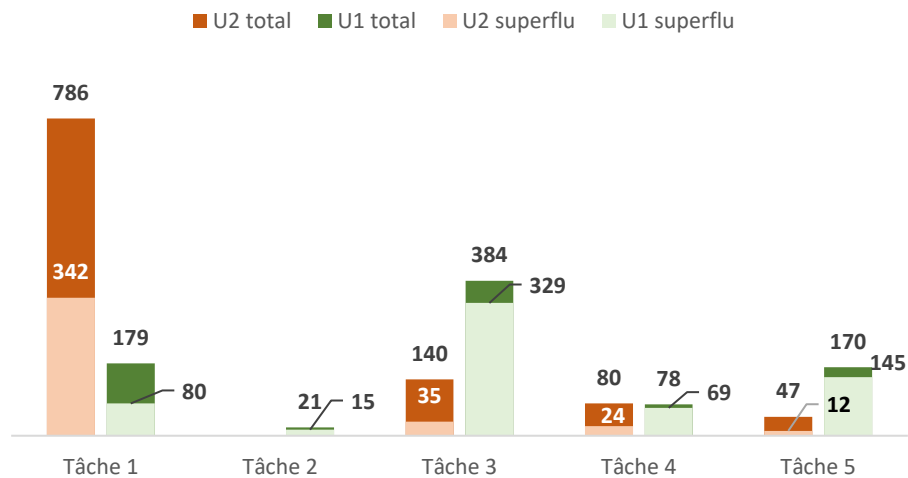


Figure 41. Nombre de clics total et superflus par tâche

La disproportion dans le nombre de clics entre les tâches est due au fait que la première tâche inclut l'import de la maquette 3D et toutes les étapes associées. Des dizaines de clics sont attribuables aux chemins pour accéder aux divers fichiers d'enregistrement qui ont de plus dû être répétés à cause des erreurs utilisateurs. Souvent des double-clics sont également utilisés pour ouvrir les dossiers et sous-dossiers.

En revanche, cette tâche étant effectuée, le nombre de clics réalisé par l'utilisateur 2 a considérablement baissé, le reste des tâches étant beaucoup plus rapide et simple à effectuer.

En ce qui concerne l'utilisateur d'ENVI-met, le nombre de clics le plus important a eu lieu pour la tâche n°3. Mais on remarque que plus du $\frac{3}{4}$ sont des clics considérés comme superflus, ce sont majoritairement ceux liés aux problèmes de navigation sur la 3D.

La tâche n°1 est également significative en nombre de clics du fait du nombre important de sélection d'objets et d'attributions à des matériaux que nécessite l'import de la maquette dans le logiciel.

Éléments remplis au clavier

Les éléments remplis au clavier suivent la même tendance que le nombre de clics (cf : figure 43) et se justifie globalement de la même manière.

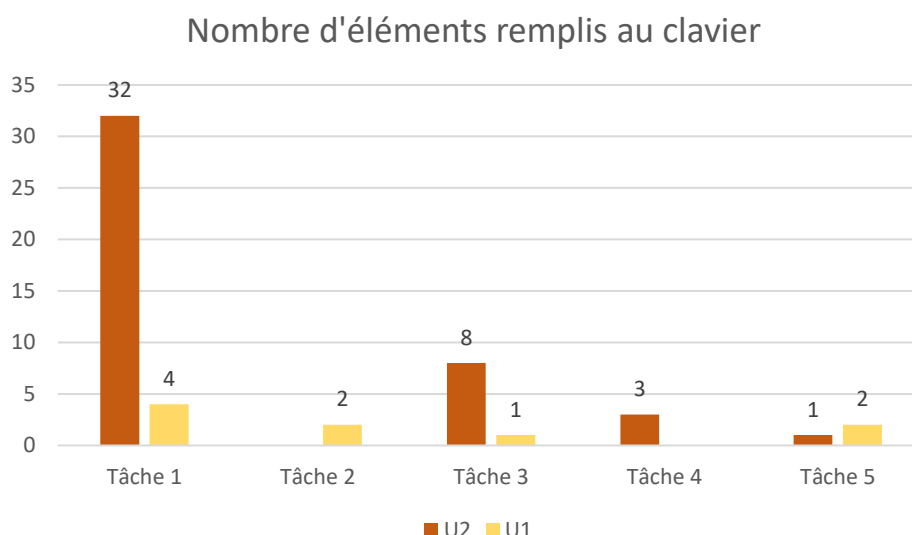


Figure 42. Nombre d'éléments remplis au clavier par tâche

Pour l'utilisateur 1 (ENVI-met) il est important de noter que ces éléments ne sont pas représentatifs de l'efficacité des tâches étant donné qu'il n'est pas arrivé au bout.

Par exemple, lors de l'essai interne préalable la tâche n°3 a nécessité 4 éléments remplis au clavier (au lieu de 1 par l'utilisateur 1). Aussi, la tâche n°1 a nécessité 8 éléments (au lieu de 4) du fait que la manipulation ait commencé depuis le logiciel Sketchup alors que lors de l'essai l'utilisateur 1 a démarré directement sur ENVI-met.

La nature des éléments remplis au clavier pour les deux utilisateurs est résumée dans le graphique suivant :

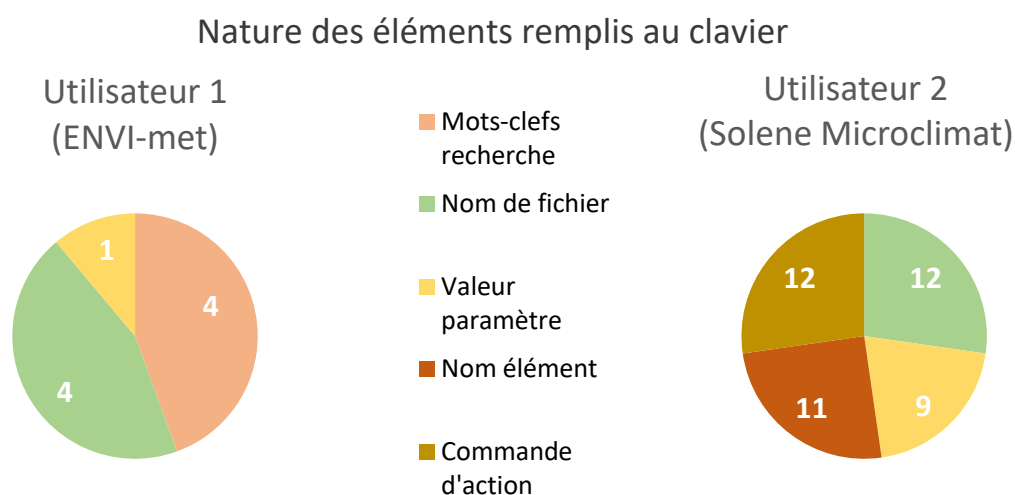


Figure 43. Nature des éléments remplis au clavier durant l'essai

Pour conclure, l'efficacité du logiciel ENVI-met semble plus importante que celle de Solene Microclimat. L'écart se remarque particulièrement sur la tâche n°1 d'import de la maquette et de lancement des simulations. Le logiciel Solene Microclimat gagnerait à automatiser les chemins de dossier en choisissant un espace de travail initial vers lequel tous les fichiers sont renvoyés. Cependant du fait que Solene Microclimat fonctionne à partir d'un script Python, le potentiel pour rendre ce logiciel plus efficace et adapté à l'utilisateur est bien plus important que ENVI-met, qui

ne permet pas vraiment à l'utilisateur de le personnaliser et de l'optimiser à son utilisation.

4.3.5. SATISFACTION

Ressentis généraux

Au cours des discussions complémentaires à l'essai, les deux utilisateurs ont affirmé être satisfaits par l'utilisation de ces logiciels. A la question « Comment vous sentez-vous suite à la réalisation de cet essai » les réponses ont été les suivantes :

Utilisateur 1 (ENVI-met)	Utilisateur 2 (Solene Microclimat) (Traduit de l'anglais)
« C'est le type de logiciel qu'il faut vraiment pratiquer souvent pour être fluide avec. Déjà que juste d'une version à une autre ça change, à chaque mise à jour il faut se réhabituer, alors quand ça fait longtemps que tu ne l'utilises pas tu peux vraiment te perdre. »	« Une fois que la géométrie est rentrée c'était plutôt facile pour moi de réaliser les autres tâches. Mais la géométrie peut être parfois vraiment prenante, il faut bien savoir d'où on prend son fichier quitte à le refaire soi-même parfois. Gmsh est un peu problématique, mais Salome et le reste des logiciels marche très bien. »

Tableau 16. Réponse des utilisateurs quant à leur ressenti suite à l'essai

Ces réponses sont assez représentatives de l'essai des deux utilisateurs qui révèlent deux problèmes majeurs suivant :

- Pour l'utilisateur 1 : la (re)prise en main d'ENVI-met n'est pas satisfaisante
- Pour l'utilisateur 2 : l'utilisation de Gmsh n'est pas satisfaisante

Les diverses remarques de l'utilisateur 2 durant la tâche critique n°1 ont également été relevées dans la figure suivante :

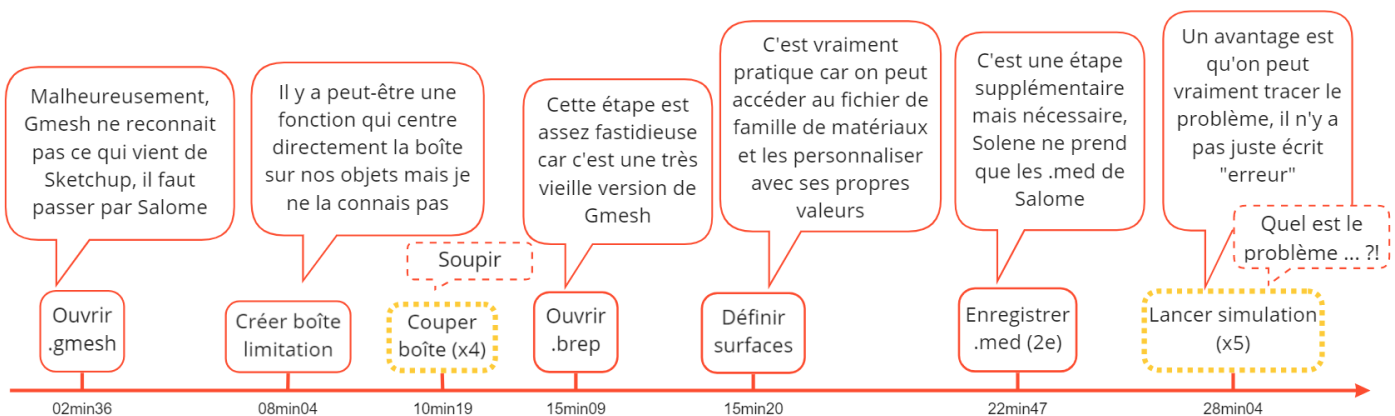


Figure 44. Commentaires de l'utilisateur 2 durant la réalisation de la tâche n°1

Les remarques négatives faites par l'utilisateur durant l'expérience soulignent en majorité des problèmes d'interopérabilité entre formats acceptés par les logiciels. Plusieurs remarques positives ont également été faites sur la transparence des informations et la flexibilité apportée par le codage.

Interface utilisateur

Au niveau de l'interface utilisateur, les réponses présentées sous forme de nuage de mot ci-dessous ont mis en évidence d'autre piste d'amélioration :

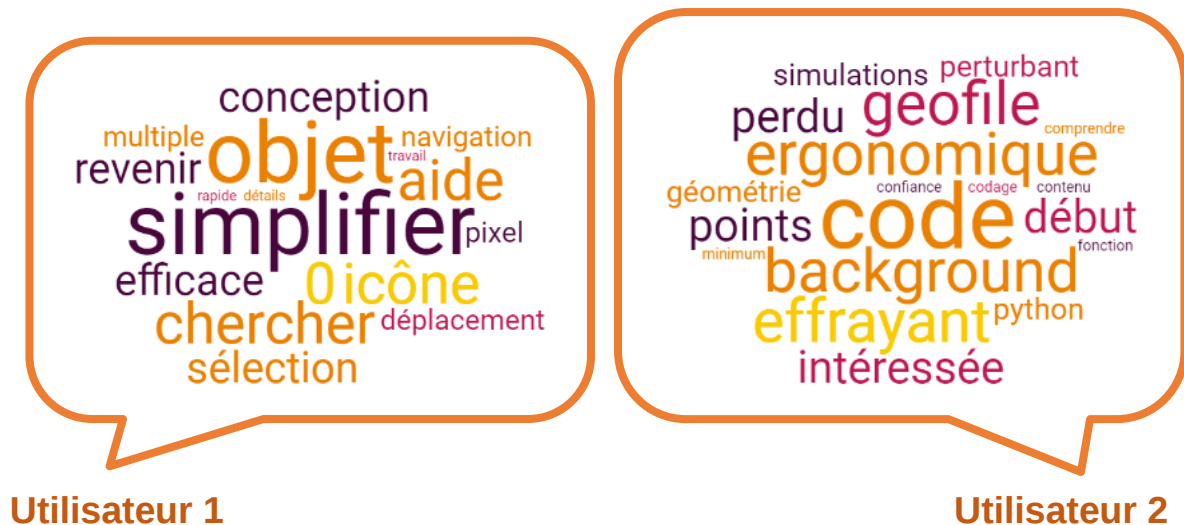


Figure 45. Réponse des utilisateurs quant à l'interface des logiciels

Pour Solene Microclimat, l'utilisateur 2 est conscient que l'interface peut être effrayante pour quelqu'un qui n'a pas de connaissances en codage. Mais il met aussi en évidence le fait qu'il pourrait être intéressant de proposer à l'utilisateur ou non d'accéder à un degré de détail de manière à ce que ceux qui souhaitent comprendre ou modifier le code le puissent alors que ceux qui souhaitent simplement lancer les simulations ne soient pas confrontés à toute la partie python.

Pour ENVI-met, bien que plus accessible aux utilisateurs, l'interface doit encore être simplifiée. En particulier l'utilisateur 1 préconise de s'inspirer des logiciels de conception 3D utilisés en architecture pour simplifier la navigation 3D, la sélection multiple, le déplacement d'objet. Pour conclure, il relève un point important « En fait il faudrait qu'il y ait plus la notion d'objet que de pixel ».

Prise en main par les architectes

Les durées de prises en main estimées par les utilisateurs pour un architecte qui souhaiterait utiliser ces logiciels sont :

- ENVI-met : plusieurs jours, avec l'aide indispensable de tutoriels et l'accompagnement préférentiel d'une personne travaillant déjà avec le logiciel
- Solene Microclimat : une semaine, avec l'aide indispensable d'une personne travaillant déjà avec le logiciel, les tutoriels délivrés par l'école d'Architecture de Nantes et beaucoup de motivation personnelle

Aux deux utilisateurs, il a également été demandé l'avis de l'utilisation d'outil simpliste tel que Score ICU. Les réponses se rejoignent (cf figure 46) sur le fait qu'il s'agit d'outils intéressants pour comprendre rapidement le contexte mais incomplets et insuffisants pour quelqu'un qui souhaiterait rechercher une solution optimale.



Figure 46. Réponses des utilisateurs sur les outils simplificateurs

Les mots suivants ont notamment été prononcés par les deux utilisateurs :

- Basique → dans l'idée où ces outils peuvent répondre à des besoins basiques
- Recherche / chercheur → associé à l'idée que, hormis pour une utilisation purement exécutive, ces outils ne suffisent pas à la recherche
- Données/détails → puisque ces outils simplistes sont très limités en terme de contextualisation et de prise en compte de données

En outre l'utilisation de pareils outils pour un architecte a été jugée pratique mais à compléter avec des outils plus performants et précis.

System Usability Scale (SUS)

Le score total établi par les réponses au SUS est le suivant, le calcul est détaillé en annexe (cf Annexe 4 « Calcul SUS ») conformément aux consignes de l'auteur du système SUS (Brooke 2020) :

ENVI-met	Solene Microclimat
55 / 100	67.5 / 100

Tableau 17. Score des deux logiciels suite au SUS

Dans les deux cas les notes sont légèrement supérieures à la moyenne, ce qui correspond à une utilisabilité acceptable mais qui peut être améliorée.

Les notes données par les utilisateurs pour chaque item sont détaillées dans le tableau suivant :

SUS	U1	U2
1. Je pense que j'aimerais utiliser ce logiciel fréquemment	3	5
2. Je trouve ce logiciel inutilement complexe	3	3
3. Je pense que ce logiciel est facile à utiliser	3	4
4. Je pense que j'aurai besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce logiciel	3	3
5. J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce logiciel ont été bien intégrées	4	4
6. Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans ce logiciel.	3	1
7. J'imagine que la plupart des gens serait capable d'apprendre à utiliser ce logiciel très rapidement.	4	3
8. J'ai trouvé ce logiciel très lourd à utiliser.	2	2
9. Je me sentais très à l'aise en utilisant ce logiciel.	4	3
10. J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel.	5	3

Tableau 18. Réponses des utilisateurs au SUS

Les notes les plus extrême (1 : pas du tout d'accord – 5 : tout à fait d'accord) concernent les items 1, 6 et 10 ce qui signifie :

- Que l'utilisateur de Solene Microclimat, est d'accord sur le fait qu'il utiliserait fréquemment le logiciel (et c'est ce qui se passe réellement) alors que celui d'ENVI-met ne l'utiliserait pas aussi fréquemment mais cela a été justifié par la fréquence des projets sur lesquels il travaille
- Que l'utilisateur de Solene Microclimat pense que le logiciel est très cohérent, contrairement à l'utilisateur d'ENVI-met qui est plus modéré sur cet item
- Que l'utilisateur d'ENVI-met considère qu'il a dû apprendre beaucoup de chose avant de pouvoir utiliser le logiciel, ne serait-ce selon lui que sur le phénomène des îlots de chaleur urbains. Malgré l'apprentissage en autodidacte de python, l'utilisateur de Solene Microclimat n'a pas considéré avoir eu à apprendre beaucoup de chose avant de pouvoir utiliser le logiciel.

Pour conclure malgré les problèmes rencontrés et les défauts relevés, les utilisateurs des deux logiciels en sont satisfaits et préconisent leur utilisation pour les architectes. L'utilisateur d'ENVI-met confirme qu'une fois pris en main, ce logiciel est très pratique et satisfaisant à utiliser. L'utilisateur de Solene Microclimat apprécie particulièrement l'accès aux données encodées dans le logiciel et la possibilité de les modifier. Pour les deux logiciels, la lisibilité de l'interface pourrait être améliorée en rendant les fonctions et modules plus autodescriptifs et pédagogiques.

BILAN COMPARATIF DES LOGICIELS

A partir des résultats de ces essais les matrices récapitulatives des Atouts, Faiblesses, Opportunités et Menaces (AFOM) pour les deux logiciels testés ont été établies :



Figure 47. Matrice AFOM de Solene Microclimat (to do)



Figure 48. Matrice AFOM de ENVI-met (version d'essai)

5. DISCUSSIONS

5.1. Reformulation de l'objet de l'étude

Suite à ces résultats, en particulier suite aux discussions ciblées, la problématique initiale « Comment adapter les outils numériques traitant des îlots de chaleur urbains à la conception architecturale ? Cas d'étude en France. » peut être étendue. En effet, malgré les questions centrées sur l'utilisation des logiciels, les divers interlocuteurs orientaient naturellement la discussion vers les enjeux plus globaux associés au ICU. Ainsi, les sous-questions de recherche peuvent évoluer de la manière suivante :

- Quels sont les freins et les leviers dans la prise en compte des îlots de chaleur urbains aujourd'hui ?
→ Initialement cette question s'intéressait au « Comment » les ICU étaient pris en compte mais les tournures des discussions ont souligné les problèmes concrets rencontrés.
- Comment augmenter l'utilisabilité des outils numériques traitant des ICU pour la conception architecturale ?
→ Ici les sous-questions 2 et 3 sont reprises, elles abordaient respectivement « est-ce que les outils sont adaptés » et « quelles sont les pistes d'améliorations ».
- L'utilisation d'outils numériques traitant des ICU est-elle pertinente en conception architecturale ?
→ Cette sous-questions est ajoutée du fait des diverses discussions qui questionnaient les pratiques. Cependant cette recherche n'avait pas pour but premier d'y répondre donc elle ne fait qu'esquisser des éléments de réponses.

La méthodologie suivie reste valable pour répondre à ces questions.

5.2. Constatations et recommandations

La première sous-question est principalement répondue par les entretiens ciblés. Les freins au traitement des îlots de chaleur urbains relevés sont :

- La multiplicité des enjeux associés (politiques, techniques, financiers, autres enjeux environnementaux en conflit)
- Le manque de coordination entre les parties prenantes (urbanistes, élus locaux, architectes, ingénieurs, développeurs)
- Le manque de visibilité sur les impacts réels à court et long terme des solutions
- Le manque de considération des solutions combinées et des autres solutions que celles fondées sur le végétal
- La complexité des outils numériques

Il est important de noter que ce dernier constat n'a été identifié que par les personnes travaillant déjà avec des logiciels pour les ICU. Les autres personnes interrogées n'étant pas sensibles à cet enjeu du fait qu'elles n'ont pas le besoin et/ou l'envie d'utiliser ces logiciels.

Les recommandations pour améliorer le traitement des ICU sont donc les suivantes :

- La mise en place de politiques et réglementations coordonnant les actions
Il faudrait éviter toutefois de créer un cadre trop rigide et difficile à appliquer.
- Une prise de conscience globalisée
 - de l'importance de traiter cet enjeu
 - des diverses solutions de mitigation (dont les changements de comportement anthropologique)
- L'association du traitement des ICU avec d'autres enjeux créant une plus-value à l'échelle humaine
 - pour les habitants : espaces extérieurs plus agréables, baisse de la consommation énergétique (due à l'arrêt de climatisation par exemple)
 - pour les concepteurs : baisse de l'empreinte énergétique des bâtiments, baisse de la fatigue (grâce à des outils d'aide à la décision)
- La création d'outils permettant l'échange entre les parties prenantes.
Attention toutefois que ces outils ne brident pas l'émergence de nouvelles solutions et que le degré de fiabilité des données soit toujours explicite.

Cette question doit également être complétée par les limites relevées, à savoir :

- Le coût financier
 - Liés à l'implication de différents acteurs sur les projets
 - Liés à l'application et l'entretien de solution de mitigation de la chaleur
 - Liés à la recherche et l'amélioration continue des logiciels
- Le temps
 - Que les concepteurs peuvent investir à la prise en main d'outils
 - Que les maîtres d'ouvrage acceptent pour des études préalables
 - Dont les réglementations ont besoin pour être mise en place
- La volonté collective et les mentalités, si elles évoluent moins rapidement que les dangers et les avancées liées aux ICU

Concernant les outils numériques, il est possible de conclure que dans l'état actuel des choses les logiciels traitant les îlots de chaleur urbains ne sont pas adaptés à la conception architecturale. Les constats suivants ont été effectués :

- L'utilisation de ces outils, une fois la prise en main effectuée, est satisfaisante
- Ces logiciels ne sont pas efficaces concernant la phase de préparation (importation de la maquette, remplissage des paramètres de matériau et de simulation)
- Solene Microclimat n'est pas efficient dans l'organisation des fichiers d'enregistrements
- ENVI-met n'est pas efficient dans sa navigation 3D
- Il est de plus en plus facile de se former sur ENVI-met grâce à la quantité de tutoriels vidéo, forum et articles disponibles sur internet
- L'accès au code Python et la transparence de Solene Microclimat permet une grande maîtrise des données et une flexibilité pour l'utilisateur

Une réponse peut donc être donnée à la seconde sous-question « Comment mieux adapter les outils numériques traitant des ICU à la conception architecturale ? » via les recommandations suivantes :

- Faciliter l'étape d'intégration des maquettes dans les logiciels
Pour permettre plus facilement des « allers-retours » entre le logiciel de conception et celui lié aux ICU → ENVI-met dispose déjà d'un plugin Sketchup (qui a été testé dans le cadre de cette étude) et développe un plugin en lien avec Grasshopper
- Augmenter l'interopérabilité via plus de formats de fichiers acceptés
- Créer des interfaces utilisateurs plus autodescriptives
- Pour le logiciel Solene Microclimat :
 - Mettre à jour le module Gmsh
 - Donner dans les exécutable du logiciel un script qui permet à l'utilisateur de créer un espace de travail vers lequel les paramétrages, résultats de simulations et autres fichiers intermédiaires sont directement renvoyés.
- Pour le logiciel ENVI-met :
 - Améliorer la maniabilité des projets en 3D en s'inspirant des logiciels de modélisation utilisés par les architectes
 - Augmenter et détailler plus explicitement les avertissements en cas d'erreur utilisateurs

Enfin, la réponse à la dernière sous-question « L'utilisation d'outils numériques traitant des ICU est-elle pertinente en conception architecturale ? » est mitigée. En effet, si tous les participants à cette recherche affirment que les outils numériques sont nécessaires et permettent de traiter les îlots de chaleur urbains, tous ne les utilisent pas et ne souhaitent pas forcément le faire. Les constats suivants ont notamment été réalisés :

- Les utilisateurs des logiciels recommandent ces outils en conception architecturale
- Il y a un besoin d'outils plus simples, pédagogiques et faciles à prendre en main
- Les concepteurs semblent pouvoir se contenter de règles de bonnes pratiques sans faire appel à une justification par des simulations

Il semble dans tous les cas que le traitement des îlots de chaleur urbains soit bien intégrés dans la conscience des concepteurs et que leur traitement, via des outils numériques internes ou via un travail commun avec des bureaux d'étude environnementaux, soit en voie de développement. La conclusion à cette sous-question est que l'utilisation d'outils numériques traitant des îlots de chaleur urbain en conception architecturale est pertinente. Cependant elle n'est pas indispensable, et le traitement des ICU, même sans outils numériques, par tous les concepteurs serait déjà une avancée positive. Il faut également ajouter que l'utilisation de ces outils n'est pas suffisante au traitement de cet enjeu et qu'à toutes les échelles il est nécessaire de s'y intéresser.

5.3. Forces et limites

Les précédents résultats doivent être utilisés avec beaucoup de précautions. La raison principale est qu'ils sont tirés de trop peu de données de base. En particulier, le faible nombre de participants aux essais utilisateurs est la principale limite de ce travail.

D'autre part, les utilisateurs ont une influence importante sur les résultats de l'expérience. S'ils sont très connaisseurs du logiciel, le nombre d'erreurs d'utilisation, le nombre de clics et la durée de réalisation des tâches s'en retrouveront réduits et le logiciel sera donc jugé plus efficace et efficient.

Quant au constat sur la complexité des préparations avant de pouvoir exploiter les modèles, il est important de noter que c'est un résultat caractéristique dans le domaine du numérique. En effet, en data science, il a été estimé que 80% du travail consistait à préparer les données et 20% à les exploiter (Aurelie De Boissieu 2021). L'interprétation des conclusions précédentes sur les logiciels testés et les recommandations sont donc à relativiser avec les enjeux rencontrés de manière générale dans le numérique.

Concernant les entretiens qualitatifs, le fait d'employer une méthode semi-dirigée impliquait une certaine flexibilité dans l'orientation de la discussion. Ainsi les données récoltées ne sont pas aisément comparables entre elles du fait que les sujets abordés dans les discussions divergeaient parfois beaucoup. Cependant c'est également cette flexibilité qui a permis de faire émerger la question de la pertinence des outils en conception et le sujet de l'importance de l'enjeu politique.

La force principale de cette recherche est son originalité. En effet le sujet des îlots de chaleur urbains est encore très peu traité dans l'université (seulement deux travaux de

fin d'études à ce jour). D'autant plus sous le prisme de l'utilisabilité des outils, aucun travail similaire n'a été trouvé. Cela a permis une certaine élasticité dans le choix du sujet et les expériences associées. Cependant, ce manque de base de comparaison a placé cette recherche en tant que pionnière dans le domaine et de ce fait, la faisabilité et l'intérêt de chaque proposition ne pouvait être découverte qu'en la testant. Ainsi, beaucoup de temps et d'énergie ont été dépensés durant l'année à tester des propositions (étude de l'influence de la volumétrie des bâtiments sur les ICU, création d'un outil d'aide à la décision via du design paramétrique, tests des logiciels existants), réduisant le temps accordé au sujet final.

Enfin, une richesse de ce travail est le soin qui a été apporté pour faire intervenir des personnes pertinentes. L'importance de s'adresser à des personnes travaillant dans des villes froides telle que Lille ou Liège permettait de légitimer davantage l'ampleur du phénomène des ICU, qui ne concerne dans l'imaginaire collectif que les villes chaudes. Des efforts ont également été dépensés pour réussir à interroger au moins un fondateur des outils abordés.

5.4. Implication en pratique et travaux futurs

Cette étude pourrait être complétée de plusieurs manières :

- Réaliser les essais d'utilisabilité sur un plus grand nombre de personnes
- Répéter les essais d'utilisabilité pour enrichir les résultats (principe d'itération)
- Interroger davantage les architectes sur leur intérêt pour les outils de simulation

Pour s'abroger de l'influence de l'utilisateur, un nombre plus conséquent d'utilisateur avec différents niveaux de maîtrises des logiciels serait à recommander.

Cette recherche pourrait également être étendue via les pistes suivantes :

- Réaliser des essais d'utilisabilité sur un plus grand nombre de logiciels
- Interroger davantage d'acteurs liés aux ICU, notamment :
 - des élus locaux quant à leur politique environnementale
 - des citoyens quant à leur acceptation des solutions de mitigation
- Réaliser des observations en entreprise des pratiques liées au traitement des îlots de chaleur urbains.

En l'état, cette étude peut être utilisée pour améliorer l'utilisabilité des logiciels ENVI-met et Solene Microclimat dans une approche centrée sur l'opérateur humain. Elle permet également d'avoir un premier avis et une première comparaison de deux logiciels répandus en France pour le traitement des ICU, et ainsi de permettre à tout concepteur, tout utilisateur de faire un meilleur choix selon ses besoins. Enfin ce travail peut orienter de futures recherches sur les enjeux à approfondir concernant les îlots de chaleur urbains.

CONCLUSION

Les îlots de chaleur urbains (ICU) se traduisent par une augmentation de la température en ville par rapport à sa périphérie. Ce phénomène représente un danger grandissant pour les villes. Non seulement les ICU impactent le confort extérieur mais ils représentent également une menace mortelle. Cela est aggravé par le réchauffement climatique et les vagues de chaleur de plus en plus fréquentes et intenses. Loin de ne concerner que les villes chaudes, de plus en plus d'étude sont menées dans des villes telles que Lille pour lutter contre la chaleur en ville. Cependant, si la communauté scientifique semble éveillée sur le sujet, en pratique peu de projets architecturaux semblent intégrer cet enjeu. En parallèle, de plus en plus d'outils numériques sont développés pour traiter les ICU de manière plus ou moins précise. Là encore, très peu d'architecte et concepteur en utilisent. La question du « pourquoi » se pose alors.

Cette recherche a pour but de comprendre comment les îlots de chaleur urbains sont pris en compte aujourd'hui par les concepteurs et comment améliorer leur intégration. En particulier, partant du postulat que les outils numériques sont un levier à la prise en compte des ICU, un travail a été effectué sur l'utilisabilité des logiciels de simulation. Ce postulat a notamment été confirmé par des entretiens qualitatifs ciblés.

Durant ces entretiens, architectes mais également urbaniste, environnementaliste et ingénieur ont été interrogés. Les freins principaux identifiés à la prise en compte des ICU en conception sont la complexité du phénomène (et des outils associés) et le manque de coordination des différents acteurs. La mise en place de réglementation pour imposer des critères de performances thermiques extérieurs seraient un levier efficace à l'intégration de cet enjeu. Cependant, cela doit toujours être accompagné par une sensibilisation autour de l'importance de traiter les ICU et des moyens pour le faire. L'amélioration de l'utilisabilité des outils est aussi une piste qui permettrait aux concepteurs portant un intérêt au numérique de traiter plus facilement cet enjeu.

Deux logiciels se distinguent notamment en France par leur fréquence d'utilisation dans la littérature scientifique : ENVI-met et Solene Microclimat. Des essais d'utilisabilité ont été menés sur ces logiciels, conformément à l'ISO 9241-210. Il a été demandé aux utilisateurs de réaliser des tâches sur le cas d'étude du quartier Rive Gauche à Montpellier. Ces tâches consistaient en l'application de solutions pour réduire l'effet des ICU, basée sur les différentes stratégies de mitigation identifiées dans l'état de l'art. Les 3 principes de la conception fondée sur l'opérateur humain ont été employés pour juger ces essais à savoir : l'efficacité, l'efficience et la satisfaction. Si les utilisateurs affirment être satisfaits de l'utilisation de ces logiciels, l'efficacité et l'efficience peuvent être grandement améliorées. En effet, en l'état, ces logiciels ne sont pas jugés facilement utilisables par des architectes.

Pour le logiciel Solene Microclimat une forte piste d'amélioration serait la mise à jour de son module Gmsh qui génère beaucoup de problèmes. Le processus d'intégration de la maquette 3D est également à simplifier pour faciliter des « allers-retours » entre le logiciel de conception de l'architecte et le logiciel de simulation. La mise en place d'espace de travail automatisé est aussi recommandée. L'accessibilité aux codes Python régissant le logiciel est très appréciée et permet une grande flexibilité dans l'utilisation.

Pour ENVI-met la piste principale d'amélioration réside dans la navigation 3D du modèle qui est actuellement très laborieuse. La version gratuite testée limite l'utilisation des ressources de l'ordinateur à un cœur du processeur ce qui décuple les durées de simulation et constitue un frein majeur à son utilisation répandue. Des développements prometteurs en lien avec les logiciels Sketchup et Grasshopper sont des pistes à approfondir.

Enfin, ces deux logiciels ont été jugés peu « user-friendly ». Une interface plus ergonomique et autodescriptive seraient à recommander. L'échange au travers de forum et tutoriel vidéo est également une source continue de développement.

Ces résultats et recommandations peuvent être utilisés par les développeurs de ces outils, dans un but d'amélioration continue, et par des architectes ou tout autre utilisateur qui souhaiterait avoir un premier avis sur ces logiciels. Cependant ils doivent être nuancés par le fait qu'un nombre trop faible de participant a été recueilli pour tirer des conclusions réellement exploitables. Dans de travaux futurs il serait donc intéressant de répéter la méthodologie sur un plus grand nombre de personnes, en incluant davantage d'architectes. Davantage de logiciels pourraient aussi être testés et comparés. En particulier, le plug-in de Ladybug Tools s'il évolue de manière à inclure la végétation serait intéressant. Cette recherche se place en pionnière dans l'intersection entre l'utilisabilité des outils numériques et les îlots de chaleur urbain. En cela elle permet d'établir une première base pour de futurs travaux plus approfondis et quantitatif.

Il est important de noter que les recherches pour améliorer l'intégration des ICU en conception sont en développement. On voit également cet enjeu apparaître dans les écoles d'architecture, permettant de sensibiliser les générations futures de concepteurs et d'envisager l'avenir des villes plus sereinement.

BIBLIOGRAPHIE

- Adélaïde, Lucie. 2021. "Évaluation Monétaire Des Effets Sanitaires Des Canicules En France Métropolitaine Entre 2015 et 2020 / Economic Evaluation of Heatwaves Health Effects in France from 2015 to 2020." : 215–23.
- ADEME. 2021. *Rafraîchir Les Villes, Des Solutions Variées*.
- Apur. 2012. "Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris - Cahier#1." : 1–44.
- Asaeda, Takashi, Vu Thanh Ca, and Akio Wake. 1996. "Heat Storage of Pavement and Its Effect on the Lower Atmosphere." *Atmospheric Environment* 30(3): 413–27.
- Attia, Shady. 2010. "Building Performance Simulation Tools: Selection Criteria and User Survey."
- . "Course: Building Performance Simulation and Monitoring."
- De Boissieu, Aurelie. 2021. *Introduction to Computational Design: Subsets, Challenges in Practice and Emerging Roles*. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3_3.
- Boissieu, Aurélie de. 2020. "Super-Utilisateurs Ou Super-Spécialistes ? Cartographie Des Catalyseurs de La Transformation Numérique En Agence d'architecture." *Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère* (9|10). <http://journals.openedition.org/craup/5551> (October 25, 2021).
- Brooke, John. 2020. "SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale." *Usability Evaluation In Industry* (July): 207–12.
- Brusque, Corinne, and Jean-Marie Coulomb. 1996. *Propriétés de Réflexion Des Surfaces*.
- Carallo, Marinella il. 2021. "OFFICE BUILDING DESIGN IN HONG KONG ISLAND THROUGH SHAPE OPTIMIZATION." Politecnico di Milano.
- Clarke, J. A., and J. L.M. Hensen. 2015. "Integrated Building Performance Simulation: Progress, Prospects and Requirements." *Building and Environment* 91: 294–306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>.
- Colombert, M. 2008. "Contribution à l'Analyse de La Prise En Compte Du Climat Urbain Dans Les Différents Moyens d'Intervention Sur La Ville. Contribution to the Analysis of Various Means to Take into Account Urban Climate." : 540.
- Corso, Magali, Mathilde Pascal, and Véréne Wagner. 2017. "Impact of Heat and Cold on Total Mortality in France Between 2000 and 2010." : 634–40. http://invs.santepubliquefrance.fr/beh/2017/31/pdf/2017_31_1.pdf.
- "Couche Limite Planétaire - Glossaire Meteo France." *Meteo France*: 171–86. http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/designation/717_curieux_view.html (January 30, 2022).
- Crawley, Drury B., Jon W. Hand, Michaël Kummert, and Brent T. Griffith. 2008. "Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs." *Building and Environment* 43(4): 661–73.

- Cynthia, Skelhorn, Lindley Sarah, and Levermore Geoff. 2014. "The Impact of Vegetation Types on Air and Surface Temperatures in a Temperate City: A Fine Scale Assessment in Manchester, UK." *Elsevier*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0169204613001916?token=8E1D773648AB17559A30F522588FFC1E57974FD2D3F48AF36DD5CB0D13B7930FEA0580D6C17E5ECBD21D8ECAE0CB20CC&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220122164528> (January 22, 2022).
- Dain, Jeong et al. 2015. 9th International Conference on Urban Climate *Validation of ENVI-Met PMV Values by in-Situ Measurements*.
- Davies, Martin. 2011. "Concept Mapping, Mind Mapping and Argument Mapping: What Are the Differences and Do They Matter?" *Higher Education* 62(3): 279–301.
- DIAB, Youssef, Morgane Colombert, Jean-Luc Salagnac, and Denis Morand. 2012. "Le Climat et La Ville : La Nécessité d'une Recherche Croisant Les Disciplines." <http://journals.openedition.org/vertigo> (Hors-série 12). <http://journals.openedition.org/vertigo/11811> (November 23, 2021).
- Dong, Li, Chandana Mitra, Seth Greer, and Ethan Burt. 2018. 9 Atmosphere 2018, Vol. 9, Page 33 *The Dynamical Linkage of Atmospheric Blocking to Drought, Heatwave and Urban Heat Island in Southeastern US: A Multi-Scale Case Study*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/1/33/htm> (January 24, 2022).
- Doulos, L., M. Santamouris, and I. Livada. 2004. "Passive Cooling of Outdoor Urban Spaces. The Role of Materials." *Solar Energy* 77(2): 231–49.
- Doya, Maxime. 2010. "Analyse de l'impact Des Propriétés Radiatives de Façades Pour La Performance Énergétique de Bâtiments d'un Environnement Urbain Dense." "Ensoleillement - Energie Plus Le Site." 2010. <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/> (March 19, 2022).
- Fahed, Jeff. 2018. "Etude Numérique Du Potentiel de Rafrachissement Des Techniques de Réduction Des Ilots de Chaleur Urbain (ICU) Sous Climat Méditerranéen. Génie Civil. INSA de Toulouse, 2018. Français. NNT: 2018ISAT0024. Tel-02003346." UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.
- Ferrari, A., A. Kubilay, D. Derome, and J. Carmeliet. 2020. "The Use of Permeable and Reflective Pavements as a Potential Strategy for Urban Heat Island Mitigation." *Urban Climate* 31(March 2019): 100534. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100534>.
- Filiatreault, Ysabelle. 2015. "CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ÎLOTS DE CHALEUR: INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LES MESURES D'ADAPTATION." 3(2): 124–33.
- Fouillet, A. et al. 2008. "Has the Impact of Heat Waves on Mortality Changed in France since the European Heat Wave of Summer 2003? A Study of the 2006 Heat Wave." *International Journal of Epidemiology* 37(2): 309–17. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-41849092453&origin=resultslist> (November 7, 2021).
- Grimmond, C. S.B. et al. 2010. "The International Urban Energy Balance Models

- Comparison Project: First Results from Phase 1." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49(6): 1268–92.
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/49/6/2010jamc2354.1.xml>
(January 22, 2022).
- Howard, Luke. 1833. *THE CLIMATE OF LONDON (Volume 1)*. International Association for Urban Climate (IAUC). <https://www.urban-climate.org/resources/classic-texts/> (November 6, 2021).
- Imhoff, Marc L., Ping Zhang, Robert E. Wolfe, and Lahouari Bounoua. 2010. "Remote Sensing of the Urban Heat Island Effect across Biomes in the Continental USA." *Remote Sensing of Environment* 114(3): 504–13.
- Indura. 2020. "Webinaire Indura Score ICU - E6 - Grand Lyon - YouTube." <https://www.youtube.com/watch?v=9VYIypZ3Fyc> (January 22, 2022).
- IPCC (GIEC). 2021. Cambridge University Press *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, . https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Kawashima, Shigeto, Tomoyuki Ishida, Mitsuo Minomura, and Tetsuhisa Miwa. 2000. "Relations between Surface Temperature and Air Temperature on a Local Scale during Winter Nights." *Journal of Applied Meteorology* 39(9): 1570–79.
- Laaidi, Karine. 2012. "Rôle Des Îlots de Chaleur Urbains Dans La Surmortalité Observée Pendant Les Vagues de Chaleur. Synthèse Des Études Réalisées Par L'institut de Veille Sanitaire Sur La Vague de Chaleur d'août 2003." *Santé Publique France*. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/documents/rapport-synthese/role-des-ilots-de-chaleur-urbains-dans-la-surmortalite-observee-pendant-les-vagues-de-chaleur.-synthese-des-etudes-realisees-par-l-institut>.
- Lee, Sung Heum. 1999. "Usability Testing for Developing Effective Interactive Multimedia Software: Concepts, Dimensions, and Procedures." *Educational Technology and Society* 2(2): 34–49.
- Li, Xiaoma et al. 2019. "Urban Heat Island Impacts on Building Energy Consumption: A Review of Approaches and Findings." *Energy* 174: 407–19. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>.
- M H, Zawawi et al. 2018. "A Review: Fundamentals of Computational Fluid Dynamics (CFD)." *AIP Conference Proceedings* 2030(November).
- Mach, K.J., S Planton, and C von Stechow. 2014. "GIEC, 2014: Annexe II: Glossaire."
- Mahdavi, A, S Feurer, A Redlein, and G Suter. 2003. "An Inquiry into the Building Performance Simulation Tools Usage by Architects in Austria." *Eighth International IBPSA ...*: 777–84. http://www.ibpsa.org/%5Cproceedings%5CBS2003%5CBS03_0777_784.pdf.
- Métropole de Lille, Agence de développement et d'urbanisme. 2017. "Les Îlots de Chaleur Urbains (ICU)."

- Monin, A. S. 1970. *THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER*. www.annualreviews.org (January 25, 2022).
- Mostovoy, Georgy V et al. 2006. "GIScience & Remote Sensing Statistical Estimation of Daily Maximum and Minimum Air Temperatures from MODIS LST Data over the State of Mississippi." <https://doi.org/10.2747/1548-1603.43.1.78> (February 4, 2022).
- Nakata-Osaki, Camila Mayumi, Léa Cristina Lucas Souza, and Daniel Souto Rodrigues. 2018. "THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS Extension Model to Calculate Urban Heat Island Intensity Based on Urban Geometry." *Computers, Environment and Urban Systems* 67: 157–68.
- Oke, T. R. 1973. "City Size and the Urban Heat Island." *Atmospheric Environment* (1967) 7(8): 769–79.
- . 1976. "The Distinction between Canopy and Boundary-Layer Urban Heat Islands." *Atmosphere* 14(4): 268–77.
- . 1982. "The Energetic Basis of the Urban Heat Island." *Quart. J. R. Met. Soc* 108(455): 551.
- . 1987. *Boundary Layer Climate (Second Edition)*.
- . 1988. "Street Design and Urban Canopy Layer Climate." *Energy and Buildings* 11(1–3): 103–13.
- Ostwald, Michael J. 2010. 38 <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.481172> *Ethics and the Auto-Generative Design Process*. Routledge . <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613218.2010.481172> (January 27, 2022).
- Pascal, Mathilde et al. 2020. "Influence de Caractéristiques Urbaines Sur La Relation Entre Température et Mortalité En Île-de-France." *Santé Publique France*. www.santepubliquefrance.fr (November 23, 2021).
- Perini, Katia, Ata Chokhachian, Sen Dong, and Thomas Auer. 2017. "Modeling and Simulating Urban Outdoor Comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by Grasshopper." *Energy and Buildings* 152: 373–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.061>.
- PIB Isolation. 2017. "Avis d'expert - Effet Sur Les Consommations Électriques Dues à La Peinture de Toit COOLROOF Sur Le Toit de l'hyper E. Leclerc." 33(0): 1–22.
- Pigeon, Grégoire. 2007. "Les Échanges Surface-Atmosphère En Zone Urbaine Projet CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL."
- Pigeon, Grégoire, Aude LEMONSU, Valery MASSON, and Julia HIDALGO. 2008. "De l'observation Du Microclimat Urbain à La Modélisation Intégrée de La Ville." *La Météorologie* 8(62): 39.
- Ryu, Young Hee, and Jong Jin Baik. 2012. "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Intensity." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51(5): 842–54.
- Santamouris, M. et al. 2001. "On the Impact of Urban Climate on the Energy Consumption of Buildings." *Solar Energy* 70(3): 201–16.

- Sobstyl, J M et al. 2018. "Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime." *Physical Review Letters* 120(10). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01729976> (November 6, 2021).
- Stessens, Philip, Ahmed Khan, Frank Canters, and Amy Philips. 2019. *CO-NATURE > LIVING LAB - Nature-Based Solutions and Perception of Green Space Value in Brussels*.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke. 2012. 93 Bulletin of the American Meteorological Society *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. American Meteorological Society. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml> (January 15, 2022).
- Stewart, Iain Douglas. 2011. *Redefining the Urban Heat Island*. <https://circle.ubc.ca/handle/2429/38069>.
- Tribu. 2007. *ZAC PORT MARIANNE RIVE GAUCHE – Montpellier (34)*.
- U.S. Global Change Research Program. 2017. "Fourth National Climate Assessment Volume I Climate Science Special Report." *Fourth National Climate Assessment I*: 213–20.
- . 2018. "Fourth National Climate Assessment Volume II Impacts, Risks, and Adaptation in the United States." *Fourth National Climate Assessment II*: 1515. <https://nca2018.globalchange.gov/>.
- Valette, Emmanuelle, and Erwan Cordeau. 2010. "Les Îlots de Chaleur Urbains. Répertoire de Fiches Connaissance." *L'Institut Paris Région (IAU îdF)*. <http://www.iau-idf.fr> (November 6, 2021).
- Voogt, J. A., and T. R. Oke. 2003. "Thermal Remote Sensing of Urban Climates." *Remote Sensing of Environment* 86(3): 370–84.
- Walther, E., and Q. Goestchel. 2018. "The P.E.T. Comfort Index: Questioning the Model." *Building and Environment* 137(February): 1–10.
- Ward, Kathrin, Steffen Lauf, Birgit Kleinschmit, and Wilfried Endlicher. 2016. "Heat Waves and Urban Heat Islands in Europe: A Review of Relevant Drivers." *Science of the Total Environment* 569–570: 527–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>.
- Warwick, Fox. 2006. *A Theory of General Ethics: Human Relationships, Nature, and the Built Environment*. Massachusetts Institute of Technology. https://books.google.fr/books?hl=en&lr=&id=Za39KlwEGMc&oi=fnd&pg=PR7&ots=po-SUXfB--&sig=eE2IFp4B41SxvF3aI6US2LR18To&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (January 27, 2022).
- Wu, Zhifeng et al. 2016. 13 International Journal of Environmental Research and Public Health *The Impact of Greenspace on Thermal Comfort in a Residential Quarter of Beijing, China*. MDPI.
- Yang, Jiachuan, Zhi Hua Wang, and Kamil E. Kaloush. 2015. "Environmental Impacts of Reflective Materials: Is High Albedo a 'silver Bullet' for Mitigating Urban Heat Island?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47: 830–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>.

ANNEXE 1 : PROJETS ICU

Nom du projet	Localisation	Sources (consultées pour la dernière fois le 22/04/22)
Cool Roof sur le toit du E.Leclerc	Quimper, France	(PIB Isolation 2017) https://coolroof-france.com/realisations/cool-roof-sur-le-toit-du-e-leclerc-quimper/
CENTRE BEAUGRENELLE	Paris, France	https://www.greenaffair.com/references/analyse-des-risques-centre-beaugrenelle/
Sakura	Val-de-Fontenay, France	https://www.greenaffair.com/references/accompagnement-entreprise-sakura/
Aquarello	Bondy, France	https://www.greenaffair.com/references/aquarello-developpement-durable/
Ivry Confluences	Ivry-sur-Seine, France	https://www.greenaffair.com/references/zac-ivry-confluences/
The Link	Puteaux la Défense, France	https://www.greenaffair.com/references/the-link-future-plus-haute-tour-de-france-a-haute-qualite-environnementale/
Stationord	Paris, France	https://www.greenaffair.com/references/gare-du-nord/
Grandes Serres de Pantin	Pantin, France	https://www.greenaffair.com/references/grandes-serres-de-pantin-a-pointe-confort-de-lefficacite-energetique/
Siège Aldès	Vénissieux, France	https://www.greenaffair.com/references/amco-developpement-durable-siege-aldes/
Rive Gauche	Montpellier, France	http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/operation/1650/
ZAC du Tasta	Bordeaux, France	https://www.graine-nouvelle-aquitaine.fr/fileadmin/user_upload/redacteur/Documents_pdf/Sante-envir_matinees_conf/Presentations_intervenants/EIS_Une_aide_a_la_decision.pdf
Développement Urbain	Toulouse, France	https://www.tribu-concevoirdurable.fr/images/stories/tribu/References/Toulouse-Secteur-Nord/toulouse-secteur-nord_tribu.pdf
Fiches d'actions	Mantes-la-jolie, France	https://www.tribu-concevoirdurable.fr/references/amenagement/etude-ilot-de-chaleur-urbain-mantes-la-jolie-78.html

Place Delille	Clermont Ferrand, France	https://www.cerema.fr/fr/actualites/ilots-chaleur-agir-territoires-adapter-villes-au-changement
Montaigne Transformation	Paris, France	https://www.archdaily.com/981325/50-avenue-montaigne-transformation-fresh-architectures?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
La Cité Maraîchère	Romainville, France	https://www.archdaily.com/972872/la-cite-maraichere-in-romainville-ilimelgo?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
Morland Mixité Capitale	Paris, France	https://www.archdaily.com/982090/morland-mixite-capitale-david-chipperfield-architects-plus-calq?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
tmSN House	Saint Nicolas, Belgique	https://www.archdaily.com/951851/tmsn-house-blaf-architecten?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
Projet Canopée	Liège, Belgique	https://www.liege.be/fr/vivre-a-liege/environnement/plan-canopee?fbclid=IwAR3fpmI2-9LmihKrCieXeJ1zVUkoFp05DVg8x-ietmy_FAQ0Xab7BBtOI
Smart Pop	Liège, Belgique	https://eo.belspo.be/fr/actualites/smartpop-coup-de-chaud-sur-les-villes?fbclid=IwAR3nU5guiJdIUU0k5n8LcfXIN9_9UzFQMzm2Up_I5YcrCjbCvhoHRqDda9w
Les cours Oasis	Paris, France	https://www.paris.fr/pages/les-cours-oasis-7389
Jouer dans la nature, Planvers	Anvers, Belgique	https://www.antwerpen.be/nl/overzicht/plantwerpen/speelnatuur
Ose le vert, recrée ta cour	Wallonie, Belgique	https://www.oselevert.be/

ANNEXE 2 : PROFILS UTILISATEURS

Utilisateur 1

Modalités de l'essai			
Logiciel testé	ENVI-met 5.0.2 version gratuite	Date du test	17/05/2022
Utilisateur	1	Heure de début	10h13
Ordinateur utilisé	Modèle : DELL M 4700 Mémoire RAM : 16 Go Processeur : Inter Core i7	Heure de fin	12h28

Description utilisateur	
Profession	Architecte chercheur
Genre	Masculin
Ordinateur utilisé habituellement	Modèle : ? Mémoire RAM : 32Go Processeur : i7 6 ^e generation
Logiciel utilisé	ENVI-met 5.0.2 (version gratuite)

Rapport au logiciel	
Première prise en main	Mars 2019
Dernière utilisation	Janvier 2021
Degré de maîtrise annoncé	Moyen
Moyen d'apprentissage	Tutoriels vidéo + un ami lui a expliqué
Version utilisée	ENVI-met 5.0 et ENVI-met 4.4.6
Nombre de projet avec le logiciel	4 projets
Fréquence d'utilisation du logiciel	A chaque projet (1 fois / 3 mois)
Connaissance autre logiciel	Extension Ladybug de Grasshopper
Utilisation autre logiciel	Pleiades
Raisons choix logiciel	Pratique et conseillé par un ami

NOTES DE L'OBSERVATEUR :

L'utilisateur a l'habitude d'utiliser ENVI-met uniquement pour générer des cartes thermiques et de ce fait n'était pas à l'aise avec les autres tâches demandées. Toutefois la stratégie pour réaliser les tâches étaient généralement claire, seule la réalisation était laborieuse, principalement dû au fait que l'utilisateur n'a pas travaillé avec ENVI-met depuis 1 an. Beaucoup de temps et de clics durant l'expérience étaient donc consacrés à de la recherche de fonctions ou à des résolutions de problème parallèles (navigation 3D, application d'un matériau sur une maille etc...). Ces derniers sont comptabilisés comme « non effectif » dans les résultats.

QUESTIONS DURANT L'ESSAI :

- Pourquoi y-a-t'il autant de problèmes selon toi, quelles seraient les sources ?
« *Ca peut venir du modèle 3D, c'est peut-être aussi parce que ça fait longtemps que je n'ai pas utilisé le logiciel, et aussi parce que l'ordinateur n'est pas très fluide. Mais j'avoue que le fait que ça fait un moment que je n'ai pas travaillé avec pèse beaucoup !* »

- Combien de temps dure en moyenne une simulation ?
« *1h max pour un grand canyon* »

DISCUSSION APRES L'ESSAI :

- Comment te sens-tu vis-à-vis de l'essai que tu viens de réaliser ?
« *C'est le type de logiciel qu'il faut vraiment pratiquer souvent pour être fluide avec. Déjà que juste d'une version à une autre ça change, à chaque mise à jour il faut se réhabituer, alors quand ça fait longtemps que tu ne l'utilises pas tu peux vraiment te perdre.* »

- Comment trouves-tu les interfaces utilisateurs ?
« *Tu dois vraiment tout chercher, il n'y a pas vraiment d'icône d'aide efficace, à chaque fois on a l'impression de revenir à 0. Il faudrait s'inspirer des logiciels de conception 3D et simplifier la sélection multiple, simplifier la navigation 3D, le déplacement d'objet... En fait qu'il y ait plus la notion d'objet que de pixel. Ce sont tous ces détails qui rendent vraiment plus rapide le travail.*»

- Quelles recommandations tu ferais aux concepteurs du logiciel ?
« *Ajouter contrôle Z !* »

- Combien de temps penses-tu que cela prendrait d'apprendre le logiciel ?
« *Plusieurs jours ? La prise en main est un peu compliquée mais par contre une fois que tu es à l'aise c'est très efficace.* »

- Que penses-tu du choix des tâches à effectuer ?
« *Elles sont toutes pertinentes.* »

- Globalement comment décrirais-tu ta satisfaction face à ce logiciel ?
« *La première fois est compliquée, mais la prise en main est facile et le logiciel est très pratique ensuite, quand je l'utilisais régulièrement j'en étais très satisfait. C'est vraiment le type de logiciel qu'il faut pratiquer pour se souvenir.* »

Utilisateur 2

Modalités de l'essai			
Logiciel testé	Solene Microclimat	Date du test	20/05/2022
Utilisateur	2	Heure de début	09h31
Ordinateur utilisé	Son ordinateur	Heure de fin	11h18

Description utilisateur	
Profession	Planificateur urbain, chercheur
Genre	Féminin
Ordinateur utilisé habituellement	Modèle : ? Mémoire RAM : 16Go (la machine virtuelle prend 8Go) Processeur : Intel Core i7-9700F
Logiciel utilisé	Solene Microclimat

Rapport au logiciel	
Première prise en main	Début 2021
Dernière utilisation	19/05/2022 (veille de l'expérience)
Degré de maîtrise annoncé	Moyen
Moyen d'apprentissage	Tutoriels vidéo donné par l'université + cours avec quelqu'un + apprentissage codage Python autodidacte
Version utilisée	Il n'y en a qu'une pour le moment (celle délivrée par l'Université de Nantes)
Nombre de projet avec le logiciel	Un seul
Fréquence d'utilisation du logiciel	Plusieurs fois par semaine
Connaissance autre logiciel	ENVI-met
Utilisation autre logiciel	Non
Raisons choix logiciel	Possibilité de rentrer dans le détail du code et personnaliser tout + tout est traçable + validé 2-3 fois en France

NOTES DE L'OBSERVATEUR

- Très à l'aise avec le logiciel dû à la fréquence d'utilisation
- Comportement calme et pédagogue durant l'essai
- Patience et attitude positive devant les échecs ou problèmes répétés
- A prendre en compte :
 - Intérêt prononcé pour le codage. Cela n'est pas forcément le cas d'un autre utilisateur qui aurait donc plus de mal avec ce logiciel.
 - Soucieuse de bien faire, l'utilisatrice préférerait prendre plus de temps et aller au bout des tâches. Un utilisateur en phase de conception pourrait ne pas avoir cette patience.

QUESTIONS DURANT L'ESSAI

- Pour utiliser Solene tu as dû installer Linux et une machine virtuelle, comment te sens-tu par rapport à cela ?
« Je suis très intéressée par ces choses là donc c'était plutôt excitant, mais Linux n'est pas aussi 'user-friendly' qu'on a l'habitude. C'est plus pour coder, mais littéralement pour utiliser une souris ce n'est pas très pratique. -rires- »
- Comme tu l'indiques, Gmesh est très vieux et fastidieux à ouvrir, sais-tu si des mises-à-jour sont prévues ?
« Oui, ils sont en train de travailler dessus pour en faire un produit plus fini, mais pas forcément pour le commercialiser. »
- Que penses-tu du fait d'avoir eu à ouvrir 3 logiciels différents avant d'arriver à l'étape de lancement des simulations ?
« C'est un peu long mais je pense que c'est normal, le maillage est toujours un problème dans les logiciels. Au début j'étais assez découragée en voyant tout le processus mais maintenant ça ne me pose aucun problème. Et quand j'en ai discuté avec l'équipe ils s'accordaient avec moi sur le fait que c'est la partie douloureuse, mais qu'une fois cela fait les simulations et l'exploitation de la maquette est beaucoup plus simple et intéressante. »
- Combien de temps en moyenne dure une simulation ?
« De 15 min à 30min, pour une simulation sur une journée »
- Etant donné que Solene calcule les flux de radiations directs, penses-tu que cela pourrait être une piste pour la tâche sur les ombrages (en cherchant à réduire les flux reçus) ?
« Oh oui complètement, mais ça me demanderait trop d'effort actuellement pour le faire -rire-. Une autre piste serait l'albédo, qui change à l'ombre, et donc changer l'albédo des matériaux considérés à l'ombre. Mais il faut savoir comment évolue l'ombre du matériau à l'ombre (s'il augmente ou diminue). »

- Où trouves-tu les lignes de code que tu ajoutes pour les fonctions ? Y-a-t-il des plateformes de partage, des forums, ou un Github pour les utilisateurs de Solene ?
« Pas spécialement pour Solene, les exécutables et codes étaient donnés et ce sont ceux que j'utilise. Mais je ne suis pas censée les donner à n'importe qui. Dans le tutoriel il y a des codes basiques, et chacun peut en ajouter. Actuellement je crois que le logiciel n'est pas internationalement utilisé mais il serait intéressant d'avoir un forum ! »
- Comment l'eau est-elle abordée dans le logiciel ?
« Uniquement au travers de formule d'évapotranspiration. Il faut créer un volume pour l'eau puis il faut créer une fonction qui indique de combien l'eau s'évapore par heure. Ce n'est pas très bien fait actuellement par Solene. »

DISCUSSION APRES L'ESSAI

- Comment te sens-tu vis-à-vis de l'essai que tu viens de réaliser ?
« Une fois que la géométrie est rentrée c'était plutôt facile pour moi de changer l'albédo et de réaliser les tâches. Mais la géométrie peut être parfois vraiment prenante, il faut bien savoir d'où on prend son fichier quitte à le refaire soit-même parfois. Gmesh est un peu problématique, mais Salomé et le reste des logiciels marche très bien. »
- Comment trouves-tu les interfaces utilisateurs ?
« Ce n'est pas très ergonomique mais il faut avoir un background de code sinon ça peut être un peu effrayant, sinon quand on ouvre un geofile au début et qu'on voit tous les points on peut être perdu. Mais parce que j'étais intéressée par le code et la géométrie de manière générale c'était ok pour moi. Et aussi pour lancer les simulations c'est un code python, donc si tu ne t'y connais pas ça peut être perturbant mais si on te passe le code et que tu as confiance dans son contenu alors tu peux juste le lancer. Mais c'est mieux d'avoir un minimum de bagage en codage tout de même, au moins pour comprendre ce que fait chaque fonction. »
- Combien de temps penses-tu que cela prendrait d'apprendre le logiciel ?
« Si tu as les tutos tu peux facilement les suivre étape par étape. Ça m'a pris une semaine de me mettre à l'aise avec toutes les fonctions. Après pour créer des géométries ça peut prendre beaucoup de temps si elles sont complexes donc peut-être si un architecte a des murs courbes par exemple je ne pense pas que le logiciel pourra les supporter, il devra simplifier ses géométries. Peut-être qu'à l'avenir ils amélioreront ce point, mais je crois que c'est le même problème avec ENVI-met. Mais dans tous les cas ces concepts sont très différents de ce que les architectes apprennent, ils sauront les forces et faiblesses des solutions de réductions d'îlot de chaleur mais pas le détail des calculs des flux donc pour comprendre tout il faudra qu'ils investissent du temps pour comprendre les concepts pour comprendre les résultats. »

- Que penses-tu du choix des tâches à effectuer ?

« Elles sont pertinentes et représentatives de ce qu'un architecte pourrait chercher à faire. Je pense qu'il faudrait développer plus les tâches liées à la végétation puisque c'est une solution communément employée et pour moi c'était compliqué de réaliser celle avec les ombrages mais probablement parce que je ne sais pas encore le faire avec le logiciel. Aussi la tâche avec l'optimisation du vent, pour le moment je ne saurais pas la faire sans me plonger dans les résultats et réaliser plusieurs simulations ce qui prend beaucoup de temps contrairement au fait simplement d'ajouter de la végétation quelque part. »

- Globalement comment décrirais-tu ta satisfaction face à ce logiciel ?

« En tant que chercheuse j'en suis très satisfaite car je peux rentrer dans le moindre détail, mais pour un architecte je pense que je voudrais quelque chose de bien plus simple »

ANNEXE 3 : GRILLE OBSERVATION

Utilisateur 1

Tâche	Timing video	Timing tâche	Moment réel	Durée	EVENT	Erreur utilisation	Défaut utilisation	Aide	Element clavier	Commentaire utilisateur
0	00:11:18		10:12:00							
1			10:00:42							
2	00:13:16	00:00:00	10:13:58	00:13:16						
	00:14:51	00:01:35	10:15:33	00:01:35				Recherche	Mots-clefs recherche internet	
	00:15:11	00:01:55	10:15:53	00:00:20					Mots-clefs recherche internet	
	00:15:50	00:02:34	10:16:32	00:00:39	Ouverture article scopus					
	00:17:55	00:04:39	10:18:37	00:02:05						"En fait on travaille sur l'omb"
	00:18:13	00:04:57	10:18:55	00:00:18						"Quand on veut simuler l'omb"
	00:21:40	00:08:24	10:22:22	00:03:27						
2		00:08:24	10:22:22			0	0	1	2	
	00:21:45	00:00:00	10:22:27	00:00:05						
	00:23:25	00:01:40	10:24:07	00:01:40	Sélectionner les bâtiments					
	00:25:23	00:03:38	10:26:05	00:01:58						"Là j'aimerais juste sélectionner"
	00:26:01	00:04:16	10:26:43	00:00:38	Joindre les bâtiments	Avertissement "Pas de bâtiments marqué pour être joints"				
	00:26:06	00:04:21	10:26:48	00:00:05	Joindre les bâtiments	Avertissement "Pas de bâtiments marqué pour être joints"				
	00:27:58	00:06:13	10:28:40	00:01:52	Afficher vue 3D					
	00:28:32	00:06:47	10:29:14	00:00:34						"Ce qui manque cruellement"
	00:29:52	00:08:07	10:30:34	00:01:20						"Il est passé où..."
	00:32:00	00:10:15	10:32:42	00:02:08	Désélectionner tout					
	00:33:03	00:11:18	10:33:45	00:01:03	Fermeture réouverture					
	00:35:50	00:14:05	10:36:32	00:02:47						"Ne recommence pas s'il te p"
	00:40:24	00:18:39	10:41:06	00:04:34	Sélectionner onglet "Outils et propriétés"	Avertissement "Sélectionner un bâtiment avant"				
	00:40:33	00:18:48	10:41:15	00:00:09	Appliquer matériaux					
	00:44:30	00:22:45	10:45:12	00:03:57						"Il y a un soucis, je n'compr"
	00:45:15	00:23:30	10:45:57	00:00:45	Fermer maquette	Oubli de coconvertir en "Modèle de conception détaillé"				
3		00:23:30				4	0	0	0	
1	00:45:23	00:00:00	10:46:05	00:00:08	Ouvrir SPACES					
	00:47:08	00:01:45	10:47:50	00:01:45	Créer nouvelle aire					Valeurs dimensions grid x3
	00:47:21	00:01:58	10:48:03	00:00:13	Ajouter localisation					Valeurs position sur terre
	00:48:06	00:02:43	10:48:48	00:00:45	Créer bâtiments					Valeur hauteur bâtiment
	00:48:34	00:03:11	10:49:16	00:00:28						"Ctrl + Z ne marche pas"
	00:49:09	00:03:46	10:49:51	00:00:35	Créer sol					Il y a déjà un sol par défaut d
	00:49:52	00:04:29	10:50:34	00:00:43	Enregistrer modèle .inx					Nom fichier
1		00:04:29				0	0	0	4	
	00:50:27	00:00:00	10:51:09	00:00:35	Changer modèle à "Modèle de conception détaillé"					

Tâche	Timing video	Timing tâche	Moment réel	Durée	EVENT	Erreur utilisation	Défaut utilisation	Aide	Element clavier	Commentaire utilisateur
3bis	00:52:05	00:01:38	10:52:47	00:00:05	Editer sur la vue 3D					
	00:53:15	00:02:48	10:53:57	00:01:10						
	00:00:00		10:53:57		VIDEO2					
	00:00:17	00:03:05	10:55:03	00:00:17	Paramètre matériau					
	00:00:40	00:03:28	10:55:20	00:00:23				recherche internet pour le	Mots-clefs recherche internet	
	00:01:21	00:04:09	10:55:43	00:00:41						"Je pense qu'il n'y a pas le dét
	00:01:53	00:04:41	10:56:24	00:00:32						"Ca m'énerve quand le moind
	00:08:21	00:11:09	10:56:56	00:06:28						
3bis		00:11:09				0	0	1	1	
4	00:08:21	00:00:00	10:56:56	00:08:21						
	00:10:00	00:01:39	11:05:17	00:01:39						"Généralement il vaut mieux
	00:11:42	00:03:21	11:06:56	00:01:42						"Là j'aurais bien aimé pouvoir
	00:12:30	00:04:09	11:08:38	00:00:48						"La navigation n'est vraiment
	00:15:06	00:06:45	11:09:26	00:02:36						"Comme pour l'albedo, il faut
4		00:06:45				0	0	0	0	
?	00:15:50	00:00:00	11:09:26	00:00:44	Mur végétal					
	00:22:50	00:07:00	11:10:10	00:07:00						"Les commentaires dans l'ong
	00:26:40	00:10:50	11:17:10	00:03:50						"J'aime pas quand quelque ch
	00:27:58	00:12:08	11:21:00	00:01:18		Il n'avait pas activé l'icone pour modifier la façade !				
	00:29:41	00:13:51	11:22:18	00:01:43						"Pour un nouvel utilisateur, se
	00:31:36	00:15:46	11:24:01	00:01:55	Recherche détail matériaux					
5	00:32:16	00:00:00	11:25:56	00:00:40						
	00:33:40	00:01:24	11:26:36	00:01:24						"Là je cherche l'outil pour orie
	00:34:00	00:01:44	11:28:00	00:00:20		Avertissement "Pas de bâtiments marqué pour être séparés"				
	00:35:35	00:03:19	11:29:35	00:01:35	Changer orientation modèle				Valeur angle par rapport au nord	
	00:36:24	00:04:08	11:30:24	00:00:49				Recherche	Mots-clefs recherche internet	
	00:38:06	00:05:50	11:32:06	00:01:42						"En fait il est plus dans l'exécutif, tu fais ton modèle
		00:08:44	11:35:00	00:02:54	Ouvrir ENVI-guide					
		00:09:29	11:35:45	00:00:45	Ouvrir modèle simple force					
	00:00:00	00:10:44	11:37:00	00:01:15	Enregistrement m4a					
	00:00:38	00:11:22	11:37:38	00:00:38				Recherche internet pour	"Je cherche où je peux mettre	
	00:04:06	00:14:50	11:41:06	00:03:28	Ouvrir modèle "full forcing"					"Le simple va calculer juste av
	00:05:47	00:16:31	11:42:47	00:01:41						
	00:07:47	00:18:31	11:44:47	00:02:00				Recherche internet pour le vent dans la version gratuite		
	00:09:32	00:20:16	11:46:32	00:01:45						
	00:12:46	00:23:30	11:49:46	00:03:14						
5			00:23:30			1	0	3	2	

Tâche	1	2	3	4	5	3 bis
Validité de la tâche	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Justification		Ne sait pas faire	Problème vue 3D et pour changer matériau	N'a pas cherché Database	Ne sais pas faire	
Durée totale (s)	00:04:29	00:08:24	00:23:30	00:06:45	00:23:30	00:11:09
dont durée effective	00:03:05	00:02:36	00:16:39	00:01:59	00:19:30	00:03:42
dont durée interaction	00:01:24	00:05:48	00:06:51	00:04:46	00:04:00	00:07:27
Clics total (odg)	179	21	384	78	170	102
dont clic effectif	99	6	55	9	25	37
dont clic autre	80	15	329	69	145	65
Erreur d'utilisation	0	0	4	0	1	0
Défaut d'utilisation	0	0	0	0	0	0
Aide extérieur	0	1	0	0	3	1
Element clavier	4	2	0	0	2	1
Conformité aux exigences de l'utilisateur			Oui/Non			
Il est possible d'annuler facilement une action qui vient d'être effectuée			Non			
Le caractère autodéscriptif du logiciel suffit au repérage des fonctions			Non			
Le logiciel fournit un bouton d'aide ou un forum pour aider à résoudre des problèmes			Oui			
Il est possible de modifier la géométrie de l'objet directement depuis le logiciel			Oui			
L'état du traitement ou de la tâche en cours est clairement indiqué			Oui			

Utilisateur 2

Tâche	Timing video	Timing tâche	Moment réel	Durée	EVENT	Erreur utilisation	Défaut utilisation	Aide	Element clavier	Commentaire utilisateur
0	00:03:36		09:31:00		Remplissage Profil_utilisateur					
	00:11:06		09:38:30	00:07:30						
	00:13:35		09:40:59	00:02:29	Explication fonctionnement Solene					
	00:14:45		09:42:09	00:01:10						
	00:14:48	00:00:00	09:42:12	00:00:03	Export Skp > gmesh					
	00:16:35	00:01:47	09:43:59	00:01:47		Avertissement car elle a quitté l'action en cours (export volume vers gmesh)				
	00:16:46	00:01:58	09:44:10	00:00:11					Nom fichier pour export gmesh volume	
	00:17:12	00:02:24	09:44:36	00:00:26					Nom fichier pour export gmesh surface	
	00:18:58	00:04:10	09:46:22	00:01:46	Lancement VM					
	00:19:36	00:04:48	09:47:00	00:00:38	Partage fichier PC > VM					
	00:19:49	00:05:01	09:47:13	00:00:13	OUVERTURE SALOME					
	00:19:54	00:05:06	09:47:18	00:00:05	Ouverture géométrie					
	00:20:00	00:05:12	09:47:24	00:00:06	BUG MEA CULPA	Boite de dialogue Ligne de code en rouge car géométrie Sketchup mal fermée				
	00:27:52	00:13:04	09:55:16	00:07:52	Ouverture géométrie ok					
	00:28:18	00:13:30	09:55:42	00:00:26	"Explode" géométrie					
	00:29:18	00:14:30	09:56:42	00:01:00	Construction coque pour volumes					Nom bâtiment 1 associés à la coque créée
	00:30:09	00:15:21	09:57:33	00:00:51						"gmsh ne reconnaît pas tou
	00:30:25	00:15:37	09:57:49	00:00:16						Nom bâtiment 2 associés à la coque créée
	00:30:56	00:16:08	09:58:20	00:00:31	Création bounding box					Dimensions box
	00:32:57	00:18:09	10:00:21	00:02:01						"Peut-être qu'il y a un outil q
	00:34:25	00:19:37	10:01:49	00:01:28				Calcul cent	Dimensions box	
	00:34:47	00:19:59	10:02:11	00:00:22					Valeur pour dép	Vérification visuelle du bon c
	00:35:26	00:20:38	10:02:50	00:00:39	Couper la bounding box					
	00:35:46	00:20:58	10:03:10	00:00:20		Avertissement pendant qu'elle essaie de couper la box avec la surface de sol "Cannot				
	00:36:01	00:21:13	10:03:25	00:00:15		Avertissement pendant qu'elle essaie de couper la box a Souffle d'agacement				
	00:36:50	00:22:02	10:04:14	00:00:49		Avertissement pendant qu'elle essaie de couper la box avec la surface de sol "Cannot				
	00:36:52	00:22:04	10:04:16	00:00:02		Avertissement pendant qu'elle essaie de couper la box avec la surface de sol "Cannot				
	00:37:47	00:22:59	10:05:11	00:00:55		Avertissement pendant qu'elle essaie de couper la box avec la surface de sol "Cannot				

Tâche	Timing video	Timing tâche	Moment réel	Durée	EVENT	Erreur utilisation	Défaut utilisation	Aide	Element clavier	Commentaire utilisateur
	00:38:00	00:23:12	10:05:24	00:00:13	Explode box					"J'ai trouvé ! Je ne peux pas
	00:38:40	00:23:52	10:06:04	00:00:40						
	00:38:46	00:23:58	10:06:10	00:00:06	Couper la bounding box					Vérification visuelle de la bo
	00:41:07	00:26:19	10:08:31	00:02:21	Transormer coque en solide					
	00:41:25	00:26:37	10:08:49	00:00:18	Couper solide avec batiments					Vérification visuelle de l'ïcon
	00:41:45	00:26:57	10:09:09	00:00:20						
	00:42:05	00:27:17	10:09:29	00:00:20	Export brep				Nom fichier brep	
	00:42:39	00:27:51	10:10:03	00:00:34	OUVERTURE GMESH					"Cette étape est assez fastid
	00:45:06	00:30:18	10:12:30	00:02:27	Enregistrer en geofile				Nom fichier geofile (?)	
	00:45:20	00:30:32	10:12:44	00:00:14	Chercher le fichier sur gmesh					
	00:48:29	00:33:41	10:15:53	00:03:09	Définir les surfaces sur gmesh basés sur le fichier de					
	00:51:21	00:36:33	10:18:45	00:02:52	familles de matériaux					"C'est une chose vraiment pr
	00:51:39	00:36:51	10:19:03	00:00:18						"Pour les arbres il faut créer
	00:52:27	00:37:39	10:19:51	00:00:48						
1	00:53:07	00:38:19	10:20:31	00:00:40	VIDEO2					
	00:00:00		10:20:31							
	00:01:02	00:39:21	10:21:33	00:01:02	Définir les surfaces sur gmesh basés sur le fichier de familles de matériaux					
	00:01:12	00:39:31	10:21:43	00:00:10					Renommage dans le fichier	
	00:01:16	00:39:35	10:21:47	00:00:04					Nom de la surface superieure du volume	
	00:01:26	00:39:45	10:21:57	00:00:10					Nom de la surface inférieure du volume	
	00:01:32	00:39:51	10:22:03	00:00:06					Nom de la surface du sol	
	00:01:39	00:39:58	10:22:10	00:00:07					Nom surface des bâtiments	
	00:02:00	00:40:19	10:22:31	00:00:21	Mailler les surfaces					Distance entre les points du maillage (pour ci
	00:02:40	00:40:59	10:23:11	00:00:40						Distance entre les points du maillage (pour ci
	00:05:00	00:43:19	10:25:31	00:02:20						Distance entre les points du maillage (plus fin
	00:05:00	00:43:19	10:25:31	00:00:00	Lancement du meshing					Message d'erreur mais non justifié (car gmesh trop vieux)
	00:05:15	00:43:34	10:25:46	00:00:15	Fermeture et relance de gmesh					
	00:05:40	00:43:59	10:26:11	00:00:25						Recherche nom fichier geofile
	00:05:58	00:44:17	10:26:29	00:00:18		Crash				
	00:06:00	00:44:19	10:26:31	00:00:02	Maillage réussi					Recherche nom fichier geofile
	00:06:25	00:44:44	10:26:56	00:00:25						
	00:06:50	00:45:09	10:27:21	00:00:25						"Pas de surface ouverte don
	00:06:50	00:45:09	10:27:21	00:00:25	Fonction optimisation du mesh					"Pas de surface ouverte don
	00:07:09	00:45:28	10:27:40	00:00:19						
	00:07:15	00:45:34	10:27:46	00:00:06	Enregistrement mesh en .med				Nom fichier .med	
	00:07:45	00:46:04	10:28:16	00:00:30	Import du .med dans SALOME				?	
	00:09:37	00:47:56	10:30:08	00:01:52	Enregistrement en .med depuis SALOME					"C'est une étape supplément
	00:09:40	00:47:59	10:30:11	00:00:03	Ouverture fichier meteo (dans Solene ?)				Nom 2e fichier .med	
	00:10:31	00:48:50	10:31:02	00:00:51						"Par heure et par jour : Vites
	00:11:35	00:49:54	10:32:06	00:01:04						

Tâche	Timing video	Timing tâche	Moment réel	Durée	EVENT	Erreur utilisation	Défaut utilisation	Aide	Element clavier	Commentaire utilisateur
	00:12:00	00:50:19	10:32:31	00:00:25	Depuis le script core chemin vers les dossier (de météo, de géométrie, de famille, de matériau)					
	00:13:50	00:52:09	10:34:21	00:01:50	Création dossier pour simulation					Nom dossier projet
	00:15:39	00:53:58	10:36:10	00:01:49	Depuis le core, changement des nom des fichiers .med					Nom dans fichiers dans le core x4 ou 5
	00:16:11	00:54:30	10:36:42	00:00:32	MAIN SCRIPT					
	00:16:35	00:54:54	10:37:06	00:00:24	Ajout du fichier de radiation (optionnel pour les simulations basiques)					
	00:17:21	00:55:40	10:37:52	00:00:46						"Beaucoup d'éléments pourr
	00:17:49	00:56:08	10:38:20	00:00:28	Terminal pour lancer simulation					
	00:17:55	00:56:14	10:38:26	00:00:06						"Run" dans la boîte d'exécution
	00:18:00	00:56:19	10:38:31	00:00:05						Copie-colle le nom du fichier pour la simulati

	00:18:30	00:56:49	10:39:01	00:00:30		Echec simulation "Cannot create a regular file" car elle a oublié de changer le "case f				
	00:19:04	00:57:23	10:39:35	00:00:34						Changement case folder
	00:19:30	00:57:49	10:40:01	00:00:26	2e lancement	Echec simulation				"Run" dans la b "Quel est le problèème... ?!
	00:20:13	00:58:32	10:40:44	00:00:43	3e lancement					"Run" dans la boîte d'exécution
	00:20:23	00:58:42	10:40:54	00:00:10						"Quel est le probleme et où
	00:20:34	00:58:53	10:41:05	00:00:11		Les erreurs venait du fait que ces simulations allaient encore dans le mauvais fichier				
	00:20:48	00:59:07	10:41:19	00:00:14						"Run" dans la b "Ok ce sont des choses dont
	00:21:07	00:59:26	10:41:38	00:00:19	4e lancement	Echec simulation				"Maintenant quel fichier n'e
	00:21:50	01:00:09	10:42:21	00:00:43						"Un avantage c'est qu'on pe
	00:22:23	01:00:42	10:42:54	00:00:33						"Parfois ces choses arrivent
	00:22:31	01:00:50	10:43:02	00:00:08	Eteint et rallume Solene					
	00:23:00	01:01:19	10:43:31	00:00:29						"Parfois je ne fais 'run' que s
	00:23:10	01:01:29	10:43:41	00:00:10	5e lancement					"Run" dans la boîte d'exécution
	00:23:18	01:01:37	10:43:49	00:00:08		Echec simulation				Souffle d'agacement mor : C'est ok si on ne lance pas la simulation, on peut passer à la tâche suivante."
	00:23:40	01:01:59	10:44:11	00:00:22						
	00:26:00	01:04:19	10:46:31	00:02:20	6e lancement (réussi)					"Run" dans la boîte d'exécution
1		01:04:19				12	2	1	32	
2	00:26:08	00:00:00	10:46:39	00:00:08						
	00:26:38	00:00:30	10:47:09	00:00:30						"Je ne sais pas comment fair
2		00:00:30				0	0	0	0	
	00:26:42	00:00:00	10:47:13	00:00:04						

	00:27:33	00:00:51	10:48:04	00:00:51	OUVERTURE GMESH					Gmesh dans la barre de recherche
	00:27:57	00:01:15	10:48:28	00:00:24	Supression de la ligne qui "join" toutes les surfaces du bâtiment					
	00:28:35	00:01:53	10:49:06	00:00:38			Bâtiment qui disparaît de l'écran, récupéré grâce à "Show all"			
	00:28:55	00:02:13	10:49:26	00:00:20	Définition surface toit					Nom de la surface pour le toit
	00:29:30	00:02:48	10:50:01	00:00:35			Bâtiment qui disparaît de l'écran, récupéré Souffle + regard en l'air			
	00:30:26	00:03:44	10:50:57	00:00:56	Définition surface murs		Ecran noir répété			
	00:30:39	00:03:57	10:51:10	00:00:13						Nom de la surface pour les murs

Tâche	Timing video	Timing tâche	Moment réel	Durée	EVENT	Erreur utilisation	Défaut utilisation	Aide	Element clavier	Commentaire utilisateur
	00:33:05	00:06:23	10:53:36	00:00:04	Changement albedo murs				Nom murs	
	00:33:43	00:07:01	10:54:14	00:00:38					Valeur albedo n	"Il y avait une valeur par défaut"
	00:40:21	00:13:39	11:00:52	00:06:38	Discussion					"L'avantage d'avoir plusieurs"
	00:40:47	00:14:05	11:01:18	00:00:26	Remaillage des murs					
	00:41:37	00:14:55	11:02:08	00:00:50	Lancement maillage					"Si on sait à l'avance qu'on va"
	00:42:10	00:15:28	11:02:41	00:00:33						
	00:42:57	00:16:15	11:03:28	00:00:47	Enregistrement maillage				Nom nouveau fichier .med	
	00:44:50	00:18:08	11:05:21	00:01:53	Export depuis Salome					"Il faut être clair dans sa tête"
	00:46:15	00:19:33	11:06:46	00:01:25					Nom fichier .med	
3		00:19:33				0	3	0	8	
4	00:46:33	00:00:00	11:07:04	00:00:18	SALOME Ouverture fichier					
	00:49:04	00:02:31	11:09:35	00:02:31						
	00:49:36	00:03:03	11:10:07	00:00:32	Chgt materiau sol				Nom matériau surface sol en "veg"	
	00:49:45	00:03:12	11:10:16	00:00:09	Export du maillage					
	00:49:55	00:03:22	11:10:26	00:00:10					Nom fichier .med	

	00:50:23	00:03:50	11:10:54	00:00:28	Chgt propriété sol dans le fichier famille				Valeur propriété de "veg"	
	00:51:28	00:04:55	11:11:59	00:01:05						"Je n'ai jamais travaillé avec"
4		00:04:55				0	0	0	3	
5	00:51:54	00:00:00	11:12:25	00:00:26	VIDEO3					
	00:53:06	00:01:12	11:13:37	00:01:12						
			11:13:37							
	00:00:25	00:01:37	11:14:02	00:00:25	Ouverture PARAVIEW					
	00:00:45	00:01:57	11:14:22	00:00:20	Ouverture fichier résultats simulations					
	00:01:14	00:02:26	11:14:51	00:00:29	Découpage du volume d'air				Valeur de coupe (selon hauteur des bâtiment)	
5		00:05:36				0	0	0	1	

Tâche	1	2	3	4	5	5 hypothétique
Validité de la tâche	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	
Justification		Ne sait pas comment faire			/!\ Refaire partie 1 puisque nouveau Skp /!\	
Durée totale (s)	01:04:19	00:00:30	00:19:33	00:04:55	00:05:36	
dont durée effective	00:31:26	00:00:03	00:05:46	00:01:09	00:01:35	00:33:01
dont durée interaction	00:32:53	00:00:27	00:13:47	00:03:46	00:04:01	
Clics total (odg)	786	0	140	80	47	833
dont clic effectif	444	0	105	56	35	479
dont clic "bug"	342	0	35	24	12	354
Erreur d'utilisation	12	0	0	0	0	12
Défaut d'utilisation	2	0	3	0	0	2
Aide extérieur	1	0	0	0	0	1
Element clavier	32	0	8	3	1	33
Conformité aux exigences de l'utilisateur	Oui/Non					
Il est possible d'annuler facilement une action qui vient d'être effectuée	Non ("Ctrl + Z" ne fonctionne pas toujours)					
Le caractère autodescriptif du logiciel suffit au repérage des fonctions	Non (Il faut avoir eu les tutoriels avant)					
Le logiciel fournit un bouton d'aide ou un forum pour aider à résoudre des problèmes	Oui bouton d'aide / Non forum					
Il est possible de modifier la géométrie de l'objet directement depuis le logiciel	Non (passage par Gmesh)					
L'état du traitement ou de la tâche en cours est clairement indiqué	Oui					

ANNEXE 4 : CALCUL SUS

System Usability Scale (SUS)	Utilisateur 1		Utilisateur 2	
	Note	Score	Note	Score
1. Je pense que j'aimerais utiliser ce logiciel fréquemment	3	2	5	4
2. Je trouve ce logiciel inutilement complexe	3	2	3	2
3. Je pense que ce logiciel est facile à utiliser	3	2	4	3
4. Je pense que j'aurai besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce logiciel	3	2	3	2
5. J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce logiciel ont été bien intégrées	4	3	4	3
6. Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans ce logiciel.	3	2	1	4
7. J'imagine que la plupart des gens serait capable d'apprendre à utiliser ce logiciel très rapidement.	4	3	3	2
8. J'ai trouvé ce logiciel très lourd à utiliser.	2	3	2	3
9. Je me sentais très à l'aise en utilisant ce logiciel.	4	3	3	2
10. J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce logiciel.	5	0	3	2
Total		22		27
Usability Score	55/100		67.5/100	

Les règles de calculs sont les suivantes (Brooke, 2020) :

Pour les items 1, 3, 5, 7 et 9 le score consiste en : la note moins 1 point.

Pour les items 2, 4, 6, 8 et 10 le score consiste en : 5 moins la note

Le total est ensuite multiplié par 2.5