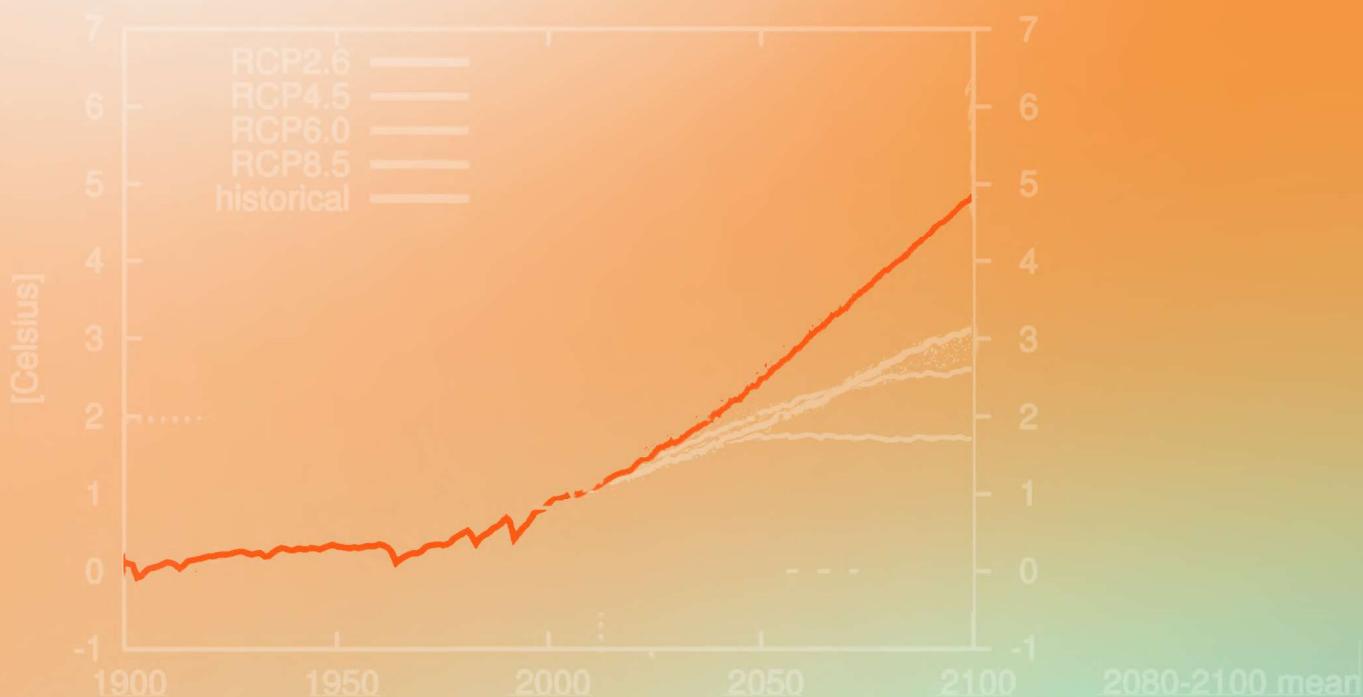
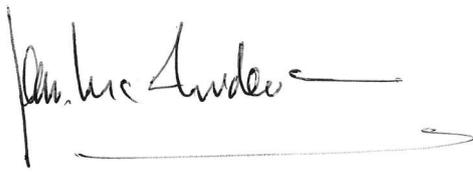


MAI 2025

LIVRE BLANC BÂTIMENT 2080

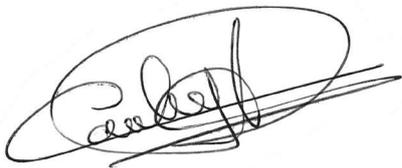
MAIRIE DE TOULOUSE, AIOC, CROAOC



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jean-Luc Moudenc', with a long horizontal flourish extending to the right.

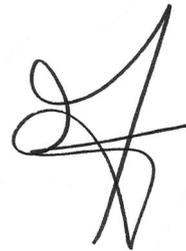
Jean-Luc MOUDENC

Président de Toulouse-Métropole
Maire de Toulouse

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Caroline Delas', enclosed within a large, loopy oval shape.

Caroline DELAS

Présidente du Conseil
de l'Ordre des Architectes
Occitanie

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marie Unal de Capdenac', featuring a stylized, abstract design with a large loop and a vertical stroke.

Marie UNAL DE CAPDENAC

Présidente de l'AiOc
(Association Ingénierie d'Occitanie)

Les bâtiments d'aujourd'hui sont-ils construits en adéquation avec les contraintes climatiques de demain ?

Le confort thermique et sanitaire sera-t-il assuré, nécessitera-t-il des adaptations, lesquelles ?

Comment intégrer les conséquences du réchauffement climatique à chaque étape d'un projet de construction ? Faut-il anticiper ces adaptations dès maintenant ou simplement laisser l'opportunité d'ajuster le plus facilement ces éléments à l'avenir ?

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Le **Maire de Toulouse** a interrogé la profession des constructeurs, l'**AIOc**, Association Ingénierie Occitanie, le **Conseil Régional de l'Ordre des Architectes Occitanie** ainsi que ses services afin de déterminer la capacité de résilience des bâtiments construits par la ville de Toulouse. Ce Livre Blanc explore différentes thématiques essentielles à la résilience du bâtiment en mettant l'accent sur le confort thermique, les enjeux climatiques et la sobriété énergétique. L'analyse s'est portée sur la capacité d'adaptation des bâtiments suivant leurs modes constructifs et choix énergétiques afin d'anticiper leur performance future dans un contexte climatique évolutif. Afin d'établir une base d'analyse homogène, un **scénario de référence** a été retenu.

Celui-ci vise à projeter le comportement des bâtiments actuels dans des conditions climatiques futures qui sont différentes de celles prises en compte lors de leur conception initiale. Pour cela, le scénario de référence adopté correspond à un réchauffement induit par une augmentation de l'intensité du rayonnement solaire sur terre (forçage radiatif 8.5W/m²), qui représente le scénario le plus défavorable établi par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Ce choix permet d'anticiper les conditions extrêmes et d'évaluer la capacité des bâtiments à s'y adapter.

MÉTHODOLOGIE ET ANALYSES

Dans le but d'objectiver la résilience des bâtiments de la ville de Toulouse, trois analyses de Simulation Thermique Dynamique (STD) ont été menées en utilisant un fichier météorologique correspondant au scénario de réchauffement retenu.

Ces études ont permis d'évaluer les performances de bâtiments conçus selon deux approches distinctes :

- Une **approche traditionnelle**, caractérisée par un usage important du béton, apportant une forte inertie thermique à la structure.
- Une **approche biosourcée**, favorisant l'utilisation de matériaux issus de la biomasse, réduisant l'inertie thermique mais visant à limiter l'impact environnemental du bâtiment.

L'objectif était d'identifier les **avantages et inconvénients** de ces approches en termes de **confort thermique** et d'**efficacité énergétique**.

Bien qu'aucune des deux stratégies ne puisse être désignée comme supérieure à l'autre de manière absolue, les simulations ont révélé qu'un **confort thermique acceptable** (températures ne dépassant pas 28°C plus de 1,5 % du temps d'occupation) pouvait être maintenu dans les deux cas, **sans ajout d'équipements supplémentaires en présence de géothermie**. Toutefois, cette performance repose sur une **augmentation significative de la consommation énergétique**, ce qui soulève des questions quant à la soutenabilité de cette approche à long terme.

PERSPECTIVES ET QUESTIONNEMENTS OUVERTS

Afin d'affiner ces analyses et d'améliorer la compréhension du comportement des bâtiments face aux évolutions climatiques, des études complémentaires basées sur la Simulation Thermique Dynamique (STD) doivent être réalisées. Plusieurs interrogations majeures restent en suspens :

- **Quelles stratégies** mettre en œuvre pour garantir un **confort thermique durable** dans le climat futur ?
- Comment **évaluer la pertinence** d'un projet architectural en tenant compte des **projections climatiques** dès la phase concours ?
- De quelle manière intégrer ces projections dès la conception des bâtiments pour **optimiser leur adaptation aux conditions à venir** ?

Ce Livre Blanc apporte des **éléments de réponse préliminaires** et vise à alimenter la réflexion collective sur les adaptations nécessaires pour **construire des bâtiments véritablement résilients** face aux défis du réchauffement climatique.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ EXÉCUTIF	p 07
I. INTRODUCTION & CONTEXTE	p 11
1 - Les données utilisées dans les Simulations Thermiques Dynamiques	p 12
2 - La situation climatique à venir à Toulouse et les risques associés	p 13
3 - Les températures ressenties	p 15
4 - Evolution de la conception des bâtiments entre 2024 et 2080	p 16
II. ÉTUDES DE CAS	p 17
A - Les hypothèses de calcul	p 17
B - Les groupes scolaires étudiés	p 18
C - Analyse comparative et conclusions	p 20
D - Enseignements à tirer pour la maîtrise d'ouvrage	p 22
III. PROPOSITION D' ACTIONS	p 25
A - Fixer des indicateurs de performance/d'évaluation de la qualité bioclimatique des projets dans les concours	p 25
B - Concevoir des plans masse bioclimatiques	p 25
C - Modifier la charte Simulation Thermique Dynamique	p 29
D - Mettre en œuvre des protections solaires	p 29
E - Diminuer les surfaces vitrées	p 30
F - Utiliser la ventilation naturelle pour renouveler l'air quand cela est possible	p 30
G - Développer les brasseurs d'airs	p 30
H - Mettre à profit l'inertie des bâtiments pour atténuer les pics de chaleur	p 30
I - Développer les îlots de fraîcheur à l'extérieur des bâtiments	p 31
J - Optimiser le rafraîchissement : quelles priorités ? A quelles échelles de temps ?	p 31

IV. BILAN ÉCONOMIQUE DE L'ADAPTATION DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	p 33
1 - Le ratio m ² /élève a-t-il évolué suite à la mise en œuvre du nouveau référentiel ?	p 33
2 - Facteurs d'augmentation des coûts des groupes scolaires :	p 34
V. FOCUS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS	p 37
1 - Qualité de l'Air Intérieur mesurée dans les bâtiments	p 37
2 - La maîtrise technique pour assurer une bonne QAI	p 42
VI. CONCLUSION	p 45
VII. ANNEXES	p 49

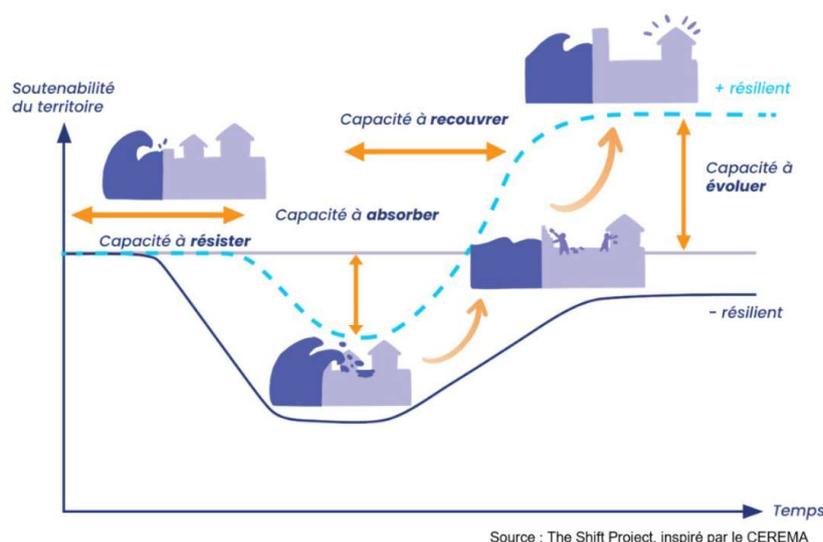
I. INTRODUCTION & CONTEXTE

Les bouleversements climatiques liés à l'activité humaine sont aujourd'hui avérés. Le rapport du GIEC détaille ces impacts et nous savons que les bouleversements climatiques vont engendrer des conditions de vie sur notre territoire que nous ne connaissons pas à ce jour. Divers scénarii annoncent les températures actuelles de Valence (Espagne) à Toulouse à l'horizon 2080. Les périodes de chaleur seraient plus intenses, plus longues, plus fréquentes et accompagnées de périodes de sécheresse et de phénomènes météo plus violents et concentrés. Tous ces changements actuels et à venir nécessitent de prévoir l'adaptation ou l'adaptabilité de nos lieux de vie et de travail. Les bâtiments d'aujourd'hui devront être confortables demain ou adaptables sans travaux nécessitant la déconstruction totale de l'édifice.

Ce Livre Blanc, après avoir présenté les enjeux du climat à venir pour la ville de Toulouse, abordera les évolutions que la conception des bâtiments devrait connaître entre aujourd'hui et 2080.

Il présentera ensuite les résultats de l'analyse comparative de la capacité de trois groupes scolaires de la ville de Toulouse ayant fait l'objet de procédés constructifs différents (traditionnel / biosourcé) à s'adapter au climat de demain. A l'issue de ces résultats des actions seront proposées pour assurer une conception des bâtiments pertinente avec les enjeux climatiques.

Enfin, un bilan économique de ces nouveaux procédés constructifs sera établi.

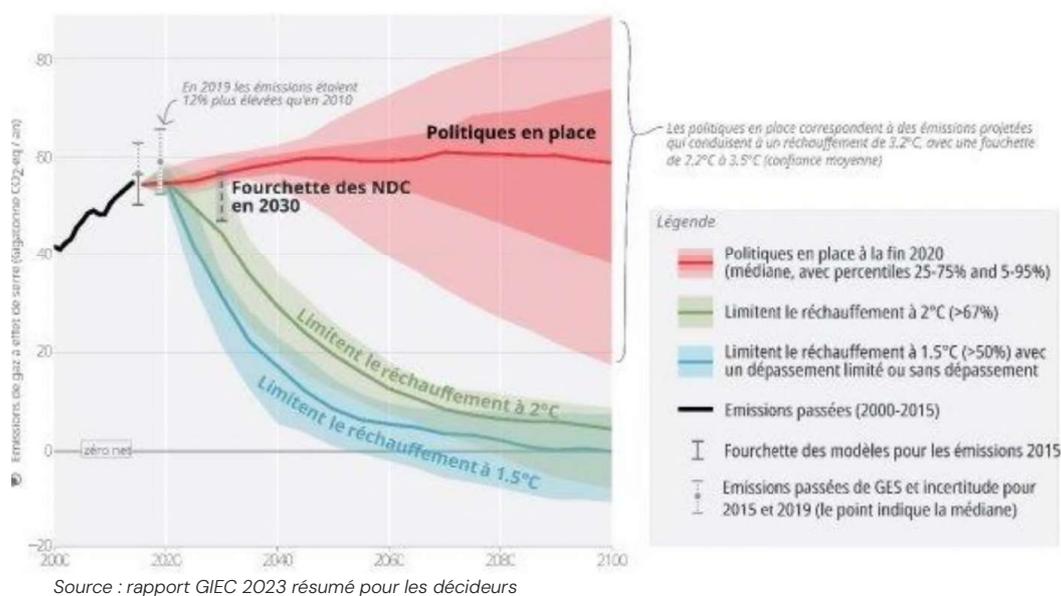


A QUEL CLIMAT S'ATTENDRE DANS LE FUTUR ?

La durée de vie d'un bâtiment construit en 2024 est de l'ordre de 50 ans mais, dans un climat changeant, les besoins d'aujourd'hui ne seront pas les mêmes à la fin de la vie du bâtiment. Aujourd'hui la référence demandée lors des missions Simulation Thermique Dynamique par la Ville de Toulouse est un scénario RCP4.5 en 2040. Dans cette partie nous questionnerons ce choix et proposerons une amélioration pour la prise en compte des évolutions à plus long terme.

1. Les données utilisées dans les Simulations Thermiques Dynamiques

Il est irréaliste de se préparer à un réchauffement mondial de seulement 2°C. De plus, au vu des fortes incertitudes sur la réalisation des engagements pris en faveur du climat, sur le climat en lui-même et sur l'évolution toujours croissante des émissions de gaz à effet de serre dans les années précédentes, il est difficile de ne pas considérer les scénarios les plus pessimistes.



Si les scénarios convergent autour de 2040, à partir de 2050, les différences sont importantes. Encore plus à l'horizon de fin de vie (théorique) des bâtiments vers 2070-2080.

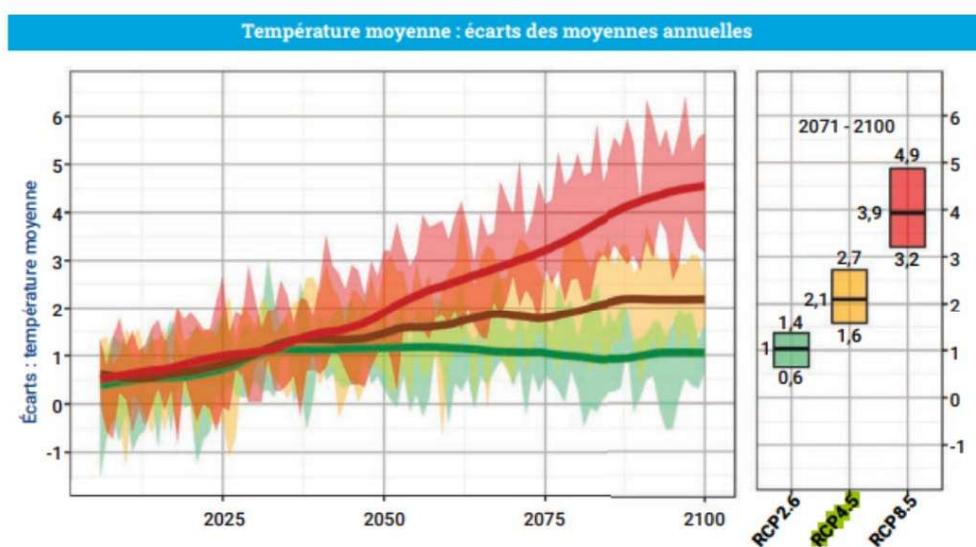


Figure 12 : Évolution de l'écart de température moyenne annuelle au cours du XXI^e siècle (par rapport à la référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP2.6 en vert, RCP4.5 en orange et RCP8.5 en rouge. Le trait continu correspond à la médiane lissée (moyenne glissante sur 20 ans). L'enveloppe de couleur illustre l'intervalle entre les centiles 5 et 95 de la distribution de l'ensemble des simulations. La boxplot de droite représente les écarts de température sur le dernier horizon temporel (2071-2100).

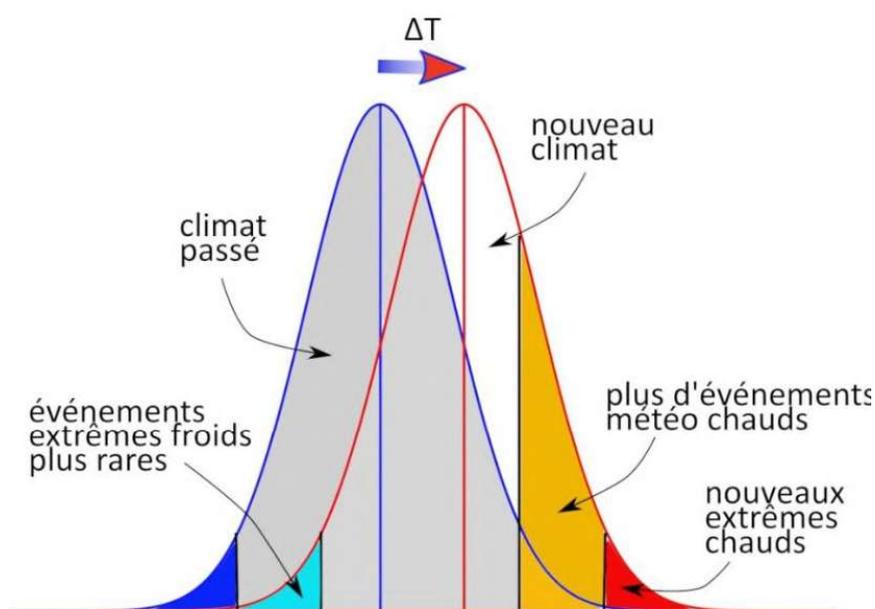
Source : rapport GIEC 2023 résumé pour les décideurs

Ces différences de l'ordre d'un à quelques degrés peuvent paraître minimes mais cette élévation moyenne sur l'ensemble de la planète cache des modifications considérables des climats locaux et en particulier toulousain.

La Trajectoire de réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC), retenue par le Ministère de la transition écologique, table sur un réchauffement de +3°C d'ici la fin du siècle soit en France métropolitaine +4°C.

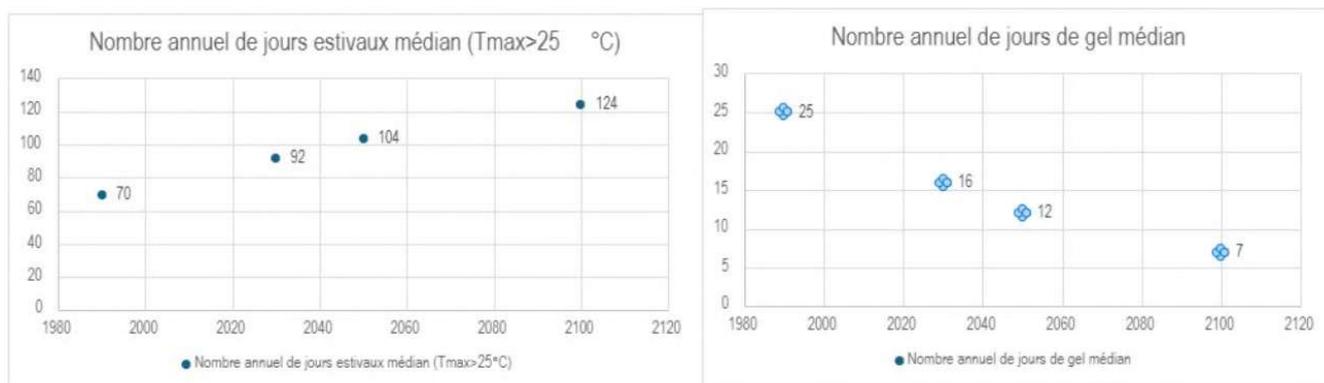
2. La situation climatique à venir à Toulouse et les risques associés

Quel que soit le scénario de climat futur, la température moyenne va augmenter, engendrant moins d'événements très froids mais plus d'événements très chauds.

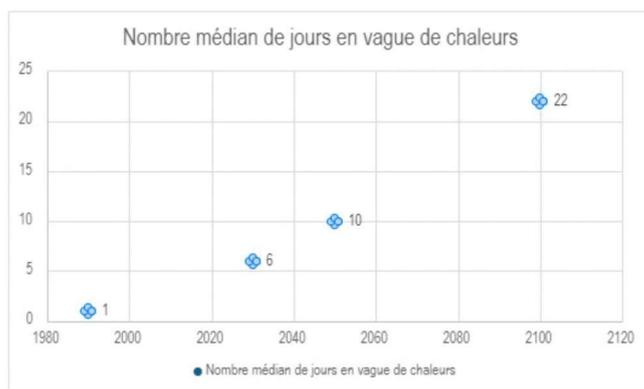


En pratique, il est possible de simuler ces événements pour avoir une idée du futur climat toulousain. Les graphiques ci-dessous correspondent aux estimations faites par Météo France selon la [Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique \(TRACC\)](#). Plus précisément,

- Jours de vagues de froid = au moins cinq jours consécutifs pour lesquels la température minimale quotidienne est inférieure de plus de cinq degrés à la normale
- Jours de gel = minimale moins de 0°
- Jours de vague de chaleur = au moins cinq jours consécutifs pour lesquels la température maximale quotidienne excède la normale de plus de cinq degrés.
- Canicule (à Toulouse) = durant 3 jours et 3 nuits, les températures maximales seront supérieures à 36 °C et les températures minimales supérieures à 21 °C.



Globalement, il faut s'attendre à des **hivers progressivement plus courts** et doux conjugués à des **étés plus longs et chauds**. Par rapport à 1990, les étés toulousains seront de 20 et 30 jours plus longs à horizons 2030 et 2050. Cet effet d'ailleurs est déjà visible. Dans le même temps, les jours d'hiver rigoureux seront de moins en moins fréquents. On observe déjà ces tendances sur les relevés de Météo France. Avec ces changements, on peut s'attendre à une baisse des besoins de chauffage l'hiver mais aussi à des évènements plus graves l'été.

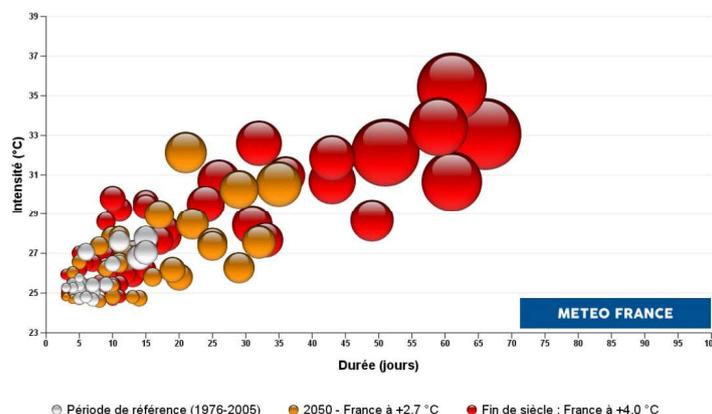


En particulier, les risques de vagues de chaleur et de canicule vont augmenter. La question se pose alors sur la capacité des bâtiments à « encaisser les chocs » de températures avec non seulement des pics mais aussi des difficultés à rafraîchir la nuit. En outre, des évènements comme la canicule de 2003 vont devenir plus fréquents et plus intenses.



Météo France évalue le risque de connaître un évènement aussi sévère décuplé dès aujourd'hui et peut être même multiplié par 50 d'ici à moins de 20 ans.

En résumé, **des évènements extrêmes et inédits vont avoir lieu de manière certaine sur la durée de vie des bâtiments et nécessitent une préparation adaptée.**



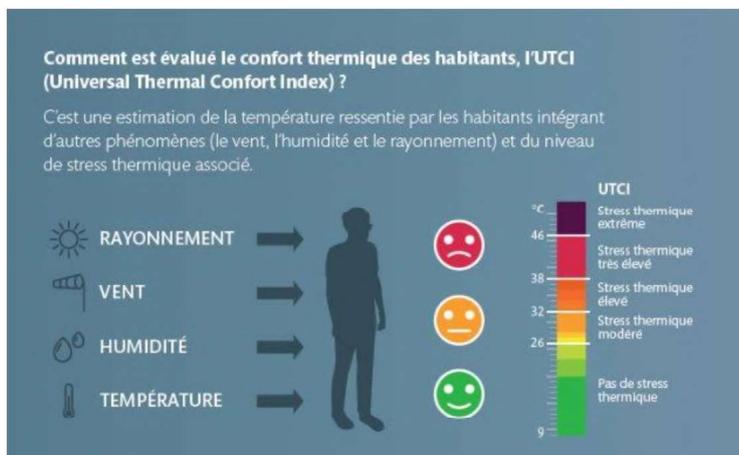
3. Les températures ressenties

Les fortes chaleurs ont un impact direct sur la santé publique. En lien direct avec les canicules de 2003 (intensité de 40°C durant 11 jours d'affilée) et 2023 (intensité de 29 °C pour une durée de 10 jours), 1500 décès supplémentaires ont été constatés, soit 10% de la mortalité en France. En élargissant à tout l'été, ce chiffre passe à 5000 décès. En 2022, été le plus chaud depuis 2003, ce sont plus de 10 000 décès en excès sur toute la France pour la période. Dans le contexte d'une intensification de ces vagues de chaleur et de jours chauds à très chauds, il est crucial de s'adapter et de pouvoir fournir des zones refuges aux populations les plus fragiles (en 2022 les plus de 75 ans ont été les plus touchés, 2272 décès en excès). Les canicules ont été telles qu'elles ont conduit les villes à autoriser les enfants à ne pas se rendre à l'école les jours de trop forte chaleur.

Au-delà de faire chuter la température dans un bâtiment, c'est le confort thermique, le ressenti, qu'il faut étudier et qui a un impact sur le stress thermique et les pathologies associées.

L'UTCI (Universal Thermal Comfort Index) est l'indice de climat thermique universel ou indice de confort. C'est un paramètre de biométéorologie humaine qui sert à évaluer les liens entre l'environnement extérieur et le bien-être humain. L'unité est le degré, c'est une température ressentie qui a été étudiée sous de nombreux angles.

Cet indicateur peut également prendre en compte l'activité et l'habillement.



4. Évolution de la conception des bâtiments entre 2024 et 2080

Les réglementations thermiques connues jusqu'à ce jour conduisent à apporter une attention particulière à la sobriété des consommations énergétiques liées aux besoins de chauffage, laissant une part minimale aux consommations liées au rafraîchissement.

Ainsi, une attention doit être portée à la versatilité des équipements de traitement d'air. En effet, si les bâtiments sont à ce jour conçus pour assurer des besoins en chauffage pendant les périodes hivernales, avec peu de besoins en froid pour la période estivale, les changements climatiques auxquels nous serons exposés en 2080 vont inverser cette tendance et nous imposeront certainement de revoir nos modèles de conception, basés aujourd'hui majoritairement sur la protection des déperditions thermiques d'hiver et des consommations associées ainsi que sur la maximisation des apports solaires passifs.

Le modèle du bâtiment 2080 sera peut-être différent avec une inversion probable de la tendance et l'accroissement des besoins de rafraîchissement au détriment des besoins de chauffage. Il est alors important pour limiter les coûts d'adaptation dans les années à venir d'étudier et d'anticiper à moindre coût des solutions réversibles qui répondront aux besoins de demain.

II. ÉTUDES DE CAS

A. Les hypothèses de calcul

Les études de cas se sont portées sur les **bâtiments scolaires**. La ville de Toulouse en a construit un nombre conséquent, ce qui lui permet de pouvoir tenir un observatoire pertinent et de comparer suffisamment de typologies différentes de constructions (lourde, légère, traditionnelle, biosourcée, compacte/étalée...).

De plus, ces bâtiments concentrent toutes les contraintes en termes de densité d'occupation et de besoins de rafraîchissement.

Par ailleurs les usages pour ces bâtiments étant bien définis, cela permet de pouvoir **comparer différents comportements de bâtiments** ayant des modes de fonctionnement absolument similaires.

Une **STD** renseigne sur le comportement d'un bâtiment selon une contrainte météorologique donnée et des usages donnés.

- L'étude a porté sur une comparaison du **comportement à court-moyen** (15 ans soit 2040) et **long terme** (50 ans soit 2070). Il a été retenu le scénario de réchauffement RCP8.5, soit le plus pessimiste anticipé par le GIEC. Ainsi une **année climatique typique de 2040 et une de 2070** de Toulouse ont été simulées.
- Ces simulations ont été comparées à une simulation avec une météo de Toulouse actuelle.

Elles se résument en deux questions :

1. Quel est le comportement du bâtiment dans le fonctionnement actuel des installations de régulation de la température ?

2. Que faudrait-il pour conserver le niveau actuel de confort en 2080, à savoir ne pas dépasser une température de 28°C plus de 1.5% du temps d'occupation ?

Le graphique suivant indique que les dispositions constructives des derniers groupes scolaires (géothermie, architecture bioclimatique, double flux...) permettent d'assurer le respect des conditions de confort sans l'installation de nouveaux équipements impliquant une proportion inversée entre le chaud et le froid et une augmentation des consommations énergétiques totales. Il présente les besoins énergétiques bruts des bâtiments (sans considérer l'efficacité énergétique des systèmes permettant de couvrir ces besoins).

Sachant que les consommations énergétiques des systèmes, de type pompe à chaleur ou autre, interviennent majoritairement en journée lorsque la production d'électricité d'origine photovoltaïque est la plus forte, cela permet de couvrir ces besoins sans faire appel à de l'électricité du réseau EDF. Le graphique montre donc une hausse des consommations annuelles en quantité totale mais si l'on parle coût financier, elles seront réduites grâce à l'utilisation de sources de production d'énergie que sont les panneaux photovoltaïques.

ÉVOLUTION DES BESOINS DE CHAUFFAGE ET DE RAFRAÎCHISSEMENT À L'HORIZON 2080



B. Les groupes scolaires étudiés

1. Le groupe scolaire Jules Géraud Saliège (par ESPAGNO & MILANI, architecte, SOCONER, BET - CVC PLB)



Dans un quartier en profonde transformation, le projet affirme un parti pris architectural sobre et ancré, conciliant insertion urbaine et qualité d'usage. L'implantation en U articule les fonctions autour d'un cœur végétal, assurant à la fois protection, lisibilité des flux et confort climatique. L'écriture architecturale, sobre et maîtrisée, s'appuie sur la préfabrication de panneaux en béton isolés, optimisant coûts, délais et qualité d'exécution. Les teintes et modénatures font écho à l'histoire maraîchère du site, inscrivant l'équipement dans la mémoire du lieu. Le projet conjugue rationalité constructive, performance environnementale et appropriation par les usagers.

2. Le groupe scolaire Canto Laouzetto de Saint-Simon (par OECO Architectes, OTCE, BET - TCE et SCOP Ecozimut, HQE-STD,)



Au cœur du **quartier Saint Simon**, ce groupe scolaire à taille humaine répond aux enjeux de démographie, d'éducation et de réchauffement climatique. L'implantation fractionnée en pavillons, avec des patios et des jeux de toitures, réduit l'échelle perçue et **crée un environnement propice à l'épanouissement des enfants**.

L'utilisation de matériaux durables, comme la terre cuite et le bois, et la mise en place de solutions bioclimatiques (*géothermie, ventilation naturelle, panneaux photovoltaïques*) garantissent un bâtiment économe en énergie. Les **espaces extérieurs généreux et arborés**, intégrés au quartier, favorisent le bien-être et l'apprentissage.

3. Le groupe scolaire Emilie du Chatelet (par IDP Architectes en association avec Tanka, Ecovitalis, BET Fluides)



Le parti pris architectural du projet repose sur une intégration harmonieuse au paysage, une modularité pédagogique innovante et une ambition environnementale forte. L'unité pédagogique, élément central et modulable, favorise une organisation souple des espaces et des usages dans le temps. L'architecture s'ouvre largement sur le parc de la Barigoude, créant une « fenêtre pédagogique » propice à l'expérimentation. L'implantation du bâtiment suit la pente naturelle du site, articulant les cours de récréation autour du paysage, entre minéral et végétal. La conception bioclimatique, l'usage de matériaux naturels et locaux, et les choix constructifs low-tech assurent confort et sobriété énergétique, incarnant une école exemplaire pour les générations futures.

C. Analyse comparative et conclusions

1. Analyse comparative

Inertie : *masse du bâtiment susceptible d'emmagasiner l'énergie ce qui permet de lisser les variations de température à l'intérieur du bâtiment, diminuer les pics de chaleur et assurer un déphasage (décalage dans le temps de la montée en température).*

Systèmes passifs : *Ces solutions exploitent les principes naturels pour maintenir une température agréable sans intervention mécanique. Elles reposent sur des phénomènes tels que la ventilation naturelle, l'inertie thermique des matériaux ou l'ombrage.*

Systèmes actifs : *Contrairement aux solutions passives, les systèmes actifs nécessitent une intervention mécanique pour générer ou transférer du froid. Ils incluent des équipements comme les climatiseurs ou les pompes à chaleur réversibles, qui utilisent des fluides frigorigènes ou des échangeurs thermiques pour abaisser la température intérieure.*

GRUPE SCOLAIRE	JULES GERAUD SALIEGE	CANTO LAOUZETTO	EMILIE DU CHATELET
Livraison	Juillet 2022	Août 2024	Juillet 2023
Scénario d'occupation	Utilisation des communs pendant les vacances scolaires		
Nb élèves / classe	27	27 ou 32	27 ou 32
Niveau de performance	E4C1	E4C1	E4C2
Matériaux	Béton	Hybride béton / Bio sourcés	Hybride béton / Bio sourcés
Apports/Protections solaires	Brises Soleil Orientables (BSO)	protection solaire en façade S-SO	Casquettes bien dimensionnées et brises soleil orientables
Orientation Bioclimatique	+	+	+++
Compacité du bâtiment	++	+	+++
Inertie	+++	+	++
Pompe à chaleur	OUI	OUI	OUI
Géothermie sur sondes verticales	OUI	OUI	OUI
Traitement de l'air	CTA Double Flux	CTA Double Flux	CTA Double Flux
Rafraîchissement passif	Géocooling	Géocooling Possibilité d'ajout batterie froide	Géocooling
Décharge structurelle	Freecooling	Freecooling	Freecooling
Brasseurs d'air	NON	OUI	NON
Panneaux photovoltaïques	OUI	OUI	OUI
Ratio au m ² Actualisé 04/2025 € HT (hors VRD)	1 853 € / m ²	2 204 € / m ²	2 032 € / m ²

D. Enseignements à tirer pour la maîtrise d'ouvrage

Dans deux cas sur trois, le confort actuel (dépassement de 28°C pendant moins de 1,5% du temps d'occupation) est assuré en 2080, simplement en augmentant les plages de fonctionnement des installations de rafraîchissement passif (Géocooling). Dans le troisième cas, le recours à une puissance active (Pompe à chaleur (PAC) en fonctionnement) permet de contenir l'inconfort à un niveau acceptable⁽¹⁾. Si l'on considère l'usage des brasseurs d'air, le confort est assuré. Il est donc intéressant que **nos projets futurs soient capables de fournir une puissance supplémentaire**, même si elle n'est pas indispensable maintenant. Dans l'idée d'une adaptabilité des bâtiments et pour lisser l'investissement, il est envisageable d'ajouter ces éléments de production de froid après la réception, aux alentours de 2040 où ils commenceront à être indispensables et/ou lorsque les équipements de production (PAC) arriveront en fin de vie. Il est par ailleurs très probable que ces derniers auront gagné en efficacité et en atténuation d'impact environnemental (pouvoir de réchauffement climatique diminué grâce aux évolutions technologiques et à la mutation des fluides frigorigènes). Toutefois, le système global doit avoir la capacité d'accueillir cette production de froid supplémentaire sans changer les systèmes de diffusion et sans rajouter des unités extérieures de pompe à chaleur qui augmentent la production de chaleur autour du bâtiment en été, lors du fonctionnement de la climatisation.

Un bâtiment avec une forte inertie couplée à un système de décharge performant semble mieux conserver le confort: moins de zones touchées (2% vs 30%), **moins de temps d'inconfort**. Le bâtiment inertiel conserve nos exigences de confort contrairement à l'autre. Les solutions jouant sur le ressenti, comme les brasseurs d'air, sont fondamentales pour limiter l'inconfort du bâtiment moins inertiel. Ce dernier reste conforme à la réglementation pour un bâtiment neuf actuel, en particulier la norme EN 16798-1, grâce aux brasseurs d'air.

Néanmoins, **les épisodes de chaleurs prolongés** comme les canicules devront être étudiés. En effet, les simulations ont été faites à partir d'une année typique, donc représentant les 20 ans autour de l'année choisie, sans événement extrême. Des fichiers 'été chaud' existent pour les années et scénarios climatiques visés. Il serait intéressant d'étudier le comportement des bâtiments dans ces conditions. Nous nous assurerions ainsi de la capacité à supporter des épisodes caniculaires qui seront plus longs et plus intenses. En l'absence de nuits fraîches, la décharge thermique naturelle (freecooling qui utilise l'air extérieur pour décharger la chaleur emmagasinée par la structure) n'est plus possible et le bâtiment « inertiel » devient difficile à faire redescendre en température. Le recours, à ce moment là, au géocooling ou à du rafraîchissement actif devient alors indispensable, quelque soit la solution ou le type de bâtiment considéré.

Au vu de l'augmentation des besoins énergétiques en froid supplémentaires, il faut s'attendre à certains problèmes techniques comme une **détérioration accrue des équipements ou une augmentation de la consommation d'énergie**. Cette dernière est toutefois à nuancer avec la production de photovoltaïque d'autant plus importante lors des périodes de fortes chaleurs. De plus, l'utilisation de la **géothermie** en geocooling permet de palier une augmentation de la consommation d'énergie (en particulier électricité) malgré une hausse des besoins. Dans ce contexte, il est essentiel d'adopter une approche visant à concilier performance énergétique et impact environnemental.

⁽¹⁾ Augmentation de la puissance de la PAC à sa fin de vie en 2040.

Un équilibre doit être trouvé entre les matériaux à forte inertie thermique et ceux à faible empreinte carbone, afin de concevoir des bâtiments durables.

Par exemple, la terre crue, qui allie à la fois des propriétés d'inertie thermique importante et un faible bilan carbone, incarne cette démarche vertueuse en contribuant à la régulation thermique naturelle tout en minimisant l'impact écologique du bâtiment.

A ce jour, la collectivité a bâti un nombre conséquent de bâtiment à Energie Positive. En particulier :

OPÉRATIONS	Date de Livraison	Puissance Crête installée (en kWc)	Production annuelle d'énergie (en kWh/an)	Équivalent en consommation annuelle de x foyers français
GS JOLIMONT	01/03/2025	73	91 250	16,6
GS ROQUEMAUREL	06/01/2025	202	252 500	45,9
ATELIER DU THÉÂTRE DU CAPITOLE	30/11/2024	500	625 000	113,6
CRECHE GUILLEMET	15/11/2024	18	22 500	4,1
MATERNELLE AUBRAC	25/10/2024	106	133 000	24,2
GS SAINT SIMON	26/08/2024	147	183 750	33,4
EXTENSION ÉCOLE MONS	31/07/2024	35	42 000	7,6
ÉQUIPEMENT MUTUALISÉ MIRAIL UNIVERSITÉ	01/07/2024	50	62 500	11,4
GS DORTIS	31/12/2023	189	237 500	43,2
CITÉ DE L'ESPACE	25/10/2023	28	33 600	6,1
GS BARIGOUDE	01/03/2023	120	160 000	29,1
ÉQUIPEMENT DE QUARTIER PAPUS	15/04/2023	70	84 000	15,3
ATELIERS MECA COLOMIERS	30/03/2023	83	103 125	18,8
ALPHAND MEITNER (SALIÈGE)	07/07/2022	120	144 000	26,2
CREMATORIUM	01/01/2022	20	24 000	4,4
TOTAL		1 761	2 198 725	400

Ces bâtiments, au delà d'intégrer de la production d'énergie renouvelable et notamment du photovoltaïque, font l'objet d'une démarche itérative et raisonnée de conception. En effet, nous exigeons que le travail de conception s'articule en deux temps :

- Premièrement, nous visons à diminuer au maximum les consommations énergétiques par un travail d'optimisation de conception, tant sur l'enveloppe que sur les installations techniques couvrant les besoins de chauffage, de ventilation, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et de climatisation lorsque cela est incontournable.
- Dans un second temps uniquement, nous imposons que les systèmes de production d'énergies renouvelables locales viennent compenser les consommations résiduelles.

Cette démarche vise à limiter le travers que pourraient adopter certains concepteurs en maximisant d'abord le dimensionnement de la production renouvelable sans avoir engagé d'efforts notables et suffisants sur le traitement de la performance du bâti. Cela se traduit par deux exigences simultanément respectées à savoir atteindre le niveau de performance énergétique équivalent au E3 de la labellisation E+C-, sans prise en compte de l'énergie produite par le photovoltaïque et également le niveau E4 pour être BEPOS (en considérant la production photovoltaïque). Les mêmes exigences sont traduites dans la nouvelle réglementation applicable (RE2020) avec des objectifs plus ambitieux que les seuils réglementaires à respecter.

Par ailleurs, au-delà du besoin propre du projet de construction concerné, nous exploitons le maximum de surface disponible en toiture pour implanter du photovoltaïque. Cela permet à la collectivité de s'inscrire dans une logique d'autoconsommation collective, autrement dit, l'excédent d'énergie produite est distribué pour des équipements publics environnants.

III. PROPOSITION D' ACTIONS

A. Fixer des indicateurs de performance/d'évaluation de la qualité bioclimatique des projets dans les concours

La ville de Toulouse (et la Métropole) mènent actuellement une réflexion sur la possibilité de fixer des indicateurs en phase concours afin de renforcer les exigences environnementales dans les programmes et de pouvoir juger dès la phase concours de la qualité bioclimatique des conceptions. Ces indicateurs traduiront l'effort engagé par les candidats sur la prise en compte de l'implantation optimale du projet sur la parcelle, sur sa compacité, sur la prise en compte optimale des dispositifs de protection solaires sur toute la période annuelle susceptible de générer des surchauffes dans les locaux, sur la nature des matériaux employés, sur l'impact carbone des éléments, sur l'inertie estimée structurelle et de remplissage et enfin sur les dispositifs techniques de traitement de la thermique (chauffage et rafraîchissement) et de la ventilation des locaux. Ces indicateurs permettront de qualifier et d'objectiver la nature des efforts engagés par les candidats concepteurs en vue de proposer un projet offrant le meilleur confort actuel et futur, sans occulter sa capacité à l'adaptabilité.

B. Concevoir des plans masse bioclimatiques

Construire aujourd'hui c'est construire pour demain !

Cette phrase qui peut paraître comme entendue engage les concepteurs à repenser leurs habitudes face à un monde changeant.

Se poser la question introduite par ce livre blanc est déjà le signe d'une conscience où des bâtiments, qui par nature immobile vont se retrouver dans un contexte climatique différent de celui du jour de leur livraison, ce qui semble inédit dans l'histoire de l'architecture.

Engager cette réflexion constitue l'une des questions majeures de l'architecture contemporaine. L'architecture a accompagné les révolutions et les changements de vie. Aujourd'hui elle s'adapte à un monde incertain dont les ressources s'épuisent et le climat se modifie. Depuis les années 70 nous nous soucions de notre impact sur l'environnement. Depuis peu et avec les premiers signes du réchauffement climatique, nous nous soucions de l'impact de l'environnement sur nos activités.

Dans ce contexte comment habiter le monde ?

Habiter c'est bien plus que s'abriter cela implique des enjeux multiples (culturels, politiques, sociaux, économiques, esthétiques, philosophiques, environnementaux, climatiques...).

Avant de parler de thermique autant rappeler qu'habiter nécessite une approche plus globale et que seule une approche climatique du monde à venir est insuffisante pour maintenir son habitabilité. Les modifications environnementales affectent de nombreuses limites planétaires dont plusieurs sont aujourd'hui dépassées. Aussi le rapport Nexus montre l'interconnexion des problématiques et

la nécessité de les traiter simultanément. Chaque construction est en interaction et affecte notre environnement, mobilise des ressources, utilise un sol, ... Si chaque environnement, chaque lieu est singulier, chaque projet l'est aussi. Il ne s'agira donc pas de proposer de solutions pour construire en 2025 à l'horizon 2080, mais de proposer un récit qui puise dans le savoir-faire des architectes pour construire entre plancher social et plafond environnemental.

Avec la RE2020 (Réglementation Environnementale 2020) nous savons faire des bâtiments économes performants et passifs mais qui ne semblent pas adaptés au climat à venir. Ils ne garantissent pas un confort d'été suffisant. Or celui-ci ira grandissant avec le réchauffement climatique et affectera notre santé et notre productivité.

La période moderne et l'abondance des ressources passées nous amène à penser que des systèmes tels que la climatisation nous permettront de vivre confortablement.

NB : l'idée n'est pas d'exclure la « Clim », mais de retarder et limiter sa diffusion massive comme cela peut être le cas dans d'autres régions du monde connaissant notre climat à venir.

Parmi le corpus des savoir-faire architecturaux nous allons vous proposer une esquisse de solution en 5 points :

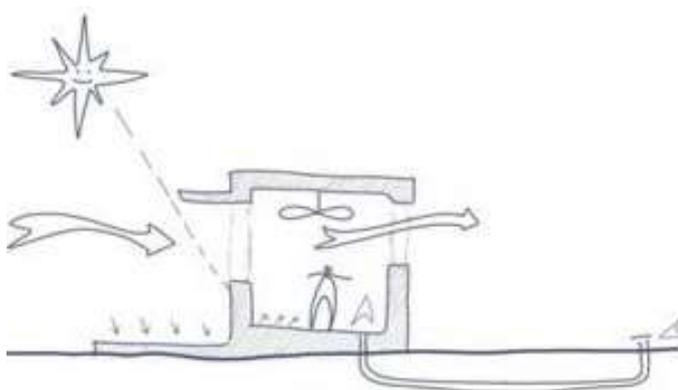
- L'architecture bioclimatique
- Les typologies et formes architecturales
- Les ressources locales
- Les usages
- Le potentiel climatique

L'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

L'architecture vernaculaire puis l'architecture bioclimatique savent adapter les bâtiments au climat. Elles ont appris à utiliser le climat pour créer des bâtiments économes et confortables. Elle commence par une maîtrise du climat, de la course du soleil, par une connaissance des lieux et du terrain. À Toulouse, l'architecture bioclimatique cherche à profiter du soleil d'hiver tout en s'en protégeant l'été.

Elle protège des pluies tout en se jouant du vent d'ouest. Une bonne orientation est essentielle.

- Elle développe des techniques et des dispositifs pour :
 - Capturer l'énergie gratuite du soleil (mur trombe, serre, plancher actif, ...)
 - Se protéger du soleil en utilisant les masques et en créant des brises soleil.
 - Apprendre à profiter des brises pour rafraîchir un intérieur.
- Elle développe une architecture de stockage (inertie) du chaud ou du froid entrant (murs épais, cuve à eau)
- Elle utilise le sol voisin pour préchauffer et refroidir l'air entrant (puits provençal)
- Elle développe la ventilation naturelle permettant de bénéficier d'un air sain et d'un flux d'air rafraîchissant
- Elle propose d'installer des destratificateurs d'air qui, en accélérant notre transpiration, nous rafraîchissent.



LES TYPOLOGIES

Cette adéquation climatique opérée dans le temps et dans l'espace nous offre une panoplie de typologies architecturales d'éléments architectoniques à réinterpréter.

Des études analysent le lien entre la géométrie d'un patio et sa capacité à être frais par exemple.

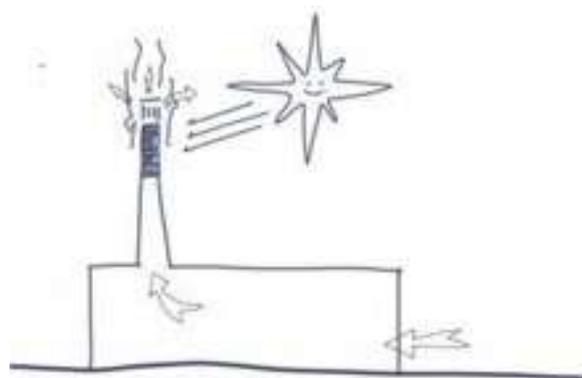
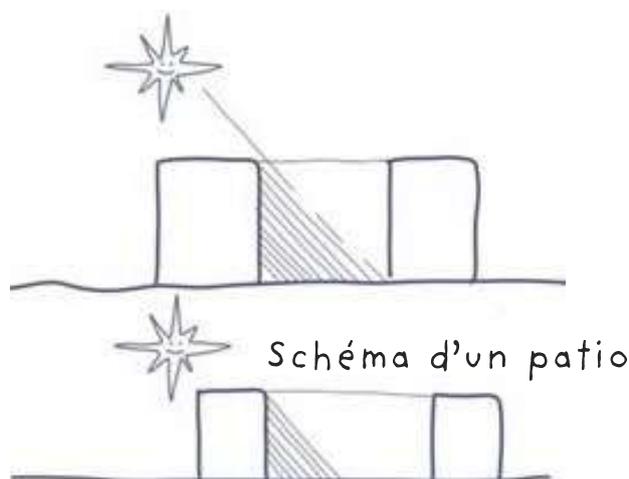


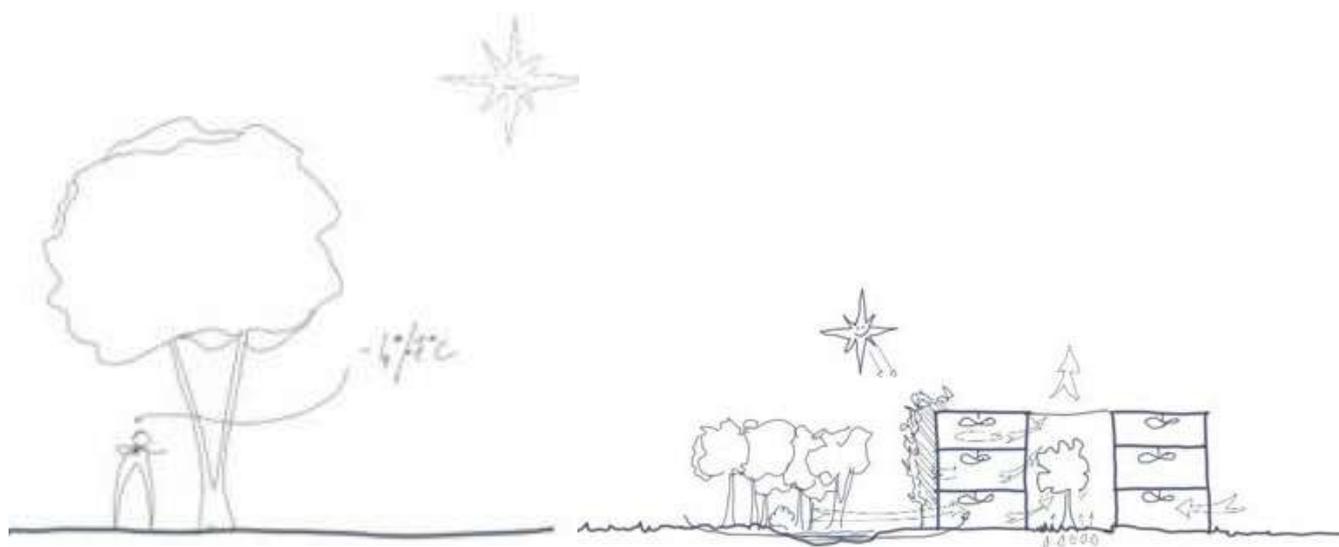
Schéma d'une tour à vent, le soleil accélère le tirage

LES RESSOURCES

L'usage des ressources bio-sourcées et géo-sourcées, permet également d'adapter les bâtiments au climat actuel et à venir : La paille enduite de terre permet de construire des bâtiments performants en hiver et disposant d'une forte inertie en été. Elle favorise un air intérieur sain tout en ayant un impact faible sur les ressources.

LE POTENTIEL CLIMATIQUE

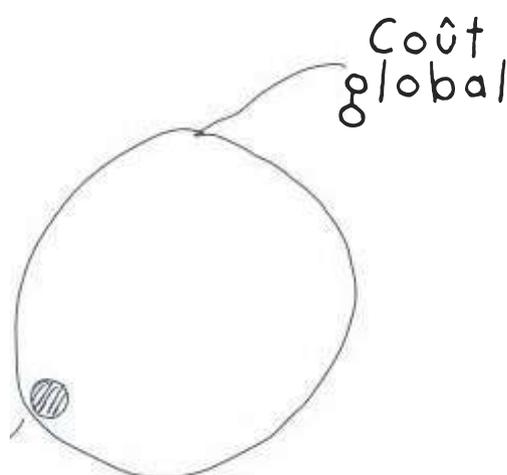
Si le rafraîchissement local nocturne n'est pas suffisant pour rafraîchir le bâtiment en une nuit il nous faudra nous intéresser au potentiel climatique. Mieux comprendre les microclimats, ménager les sites pour les modifier et proposer une température réduite aux abords des bâtiments. Ainsi le choix d'un site, le choix des matériaux, la morphologie urbaine, la présence d'eau ou de végétation permet d'abaisser les températures d'un microclimat au regard du climat général. Par exemple la rénovation thermique d'une école tournée vers l'avenir doit intégrer le traitement de la cour désimperméabilisée, végétalisée, et inclusive (les valeurs estimées de la température de l'air sous les arbres devront être celles que l'on utilise dans les STD).



En outre, s'il est pertinent de planter à proximité des bâtiments pour le confort thermique, cette action nous permet également d'agir sur les sols, la biosphère et la gestion du cycle de l'eau.

Cet exemple montre en quoi un sujet de thermique n'appartient pas au thermicien mais à l'ensemble des acteurs qui peuvent modifier un contexte pour réduire l'impact du réchauffement climatique (et dans certaines conditions lutter contre son aggravation). Construire ce monde que nous ne fréquentons pas, nécessite de se le représenter. De nombreux savoirs et savoir-faire sont nécessaires. La programmation, le choix du site, la conception et la réalisation des bâtiments, font l'objet d'un processus de projet porté par une équipe pluridisciplinaire sachant à la fois lire les sites et les imaginer (micro géologue, thermicien, écologues, maître d'œuvre, fluide, acousticien, sociologie, paysagiste et architecte).

Le coût de cette approche reste faible au regard du prix global d'un bâtiment, sans compter son coût environnemental.



C. Modifier la charte Simulation Thermique Dynamique

L'intérêt est de pouvoir discriminer les projets en fonction du confort d'été sur une base la plus objective possible. Au-delà du choix des solutions techniques (matériaux, traitement d'air ...), c'est la conception, le dessin, qui a une importance capitale sur le confort du bâtiment. La compacité, l'orientation, la circulation de l'air en intérieur et la capacité du bâtiment à se décharger, par exemple, sont des caractéristiques déterminantes pour la notion de confort. La STD permet d'analyser objectivement les projets présentés en phase concours.

Effectuée suffisamment tôt, l'analyse de la STD sert d'outil de conception pour la maîtrise d'œuvre. Elle sert également d'indicateur objectif permettant d'éclairer le choix de la maîtrise d'ouvrage dans les phases concours. Elle permet enfin de valoriser une conception bioclimatique ambitieuse. Afin de pouvoir utiliser la STD comme critère de jugement des offres dans les phases concours, la maîtrise d'ouvrage devra fournir aux candidats un certain nombre d'hypothèses comme le scénario d'occupation et le scénario climatique. Cette prestation supplémentaire demandée aux candidats devra pouvoir être indemnisée et sa production intégrée dans le planning.

La Maîtrise d'ouvrage demandera une Simulation Thermique Dynamique basée sur le scénario climatique du GIEC le plus défavorable.

D. Mettre en œuvre des protections solaires

Les protections solaires sont un outil efficace, d'autant plus lorsqu'elles laissent entrer le soleil d'hiver mais cachent celui de l'été. Plus largement, la conception du bâtiment doit prendre en compte l'orientation et le rayonnement du soleil en fonction des saisons. La conception des protections solaires doit être étudiée finement et adaptée à l'exposition des parois qu'elles protègent. Par ailleurs, elles ne doivent pas uniquement protéger les ouvertures au solstice d'été mais pendant toute la période d'occupation pendant laquelle le bâtiment est susceptible de surchauffer. Le choix et la nature de la protection se retrouve ainsi très dépendant de la nature de la protection qu'elle doit assurer.

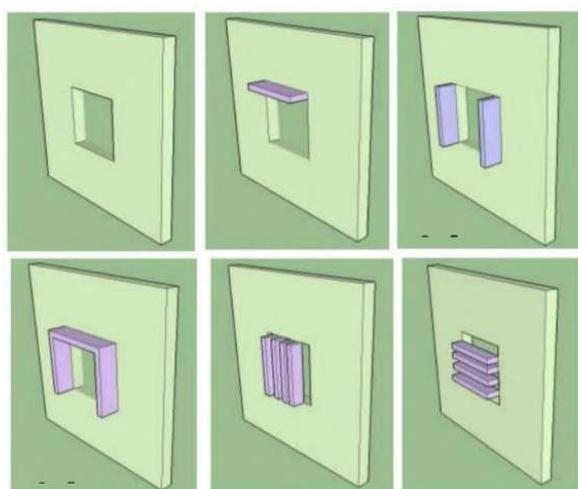


Figure 16 : Représentation schématique des protections solaires fixes [M.K. Cherier & al.]

E. Diminuer les surfaces vitrées

Les larges surfaces vitrées ont longtemps été plébiscitées pour apporter du confort visuel aux occupants. Même si cela reste indéniable, ces surfaces importantes constituent toutefois, non seulement des déperditions importantes de chaleur l'hiver car elles sont faiblement isolantes au regard des parois opaques, mais elles présentent aussi l'inconvénient de constituer des sources de pénétration de chaleur dans les périodes chaudes par transmission thermique naturelle de la paroi mais aussi par transmission directe du rayonnement solaire à l'intérieur des locaux. On constate ainsi que la diminution de ces surfaces et le juste dimensionnement de celles-ci facilitent grandement le travail lié au maintien du confort thermique et à la limitation des consommations énergétiques associées. Par ailleurs, ces parois génèrent, lorsqu'elles sont très chaudes ou très froides, des sensations de parois froides ou de «radiateur naturel» lorsque l'on est positionné à proximité de celles-ci, ce qui contribue lourdement à dégrader le confort ressenti par l'utilisateur.

F. Utiliser la ventilation naturelle pour renouveler l'air quand cela est possible

La ventilation naturelle reste très importante à maintenir et à favoriser car grâce à ce dispositif low-tech et gratuit, son emploi justement maîtrisé permet d'apporter du confort hygiénique et thermique lorsque les conditions sont réunies. Il faut toutefois ne pas négliger la sensibilisation des usagers à ces dispositifs, car l'ouverture des fenêtres à certains moments de la journée peut être pervers et improductif pour la raison suivante : la sensation de courant d'air généré par l'ouverture des fenêtres apporte du confort en été mais lorsque la température augmente et vient dépasser la température intérieure, il est crucial de fermer les fenêtres pour ne pas réchauffer l'air des locaux. Pour ce faire, la mise en place de voyants signalant que les conditions sont favorables (ou défavorables) au maintien du confort intérieur grâce à l'ouverture des baies, constitue un enjeu intéressant pour guider l'utilisateur dans son quotidien (dont le métier n'est pas la gestion thermique des espaces). Nous engageons ces dispositifs dans les écoles et cela fonctionne très bien.

G. Développer les brasseurs d'airs

Ces dispositifs ne consomment que peu d'énergie au regard du confort ressenti qu'ils apportent. Ils permettent clairement de passer des pics de chaleur avec moins de difficulté pour les usagers. Leur investissement est relativement modéré et cela constitue une solution intéressante pour les bâtiments neufs comme pour les anciens.



H. Mettre à profit l'inertie des bâtiments pour atténuer les pics de chaleur

L'inertie optimisée des bâtiments, couplée à une capacité de décharger, permet d'atténuer les pics de chaleur et de conserver un air intérieur plus frais qu'à l'extérieur.

I. Développer les îlots de fraîcheur à l'extérieur des bâtiments

PLAN 100 000 ARBRES :

Le Plan 100 000 arbres, lancé pour améliorer le cadre de vie urbain tout en luttant contre les effets du changement climatique, a déjà permis la plantation de 25 000 nouveaux arbres en 2024. À ce jour, la ville compte 74 174 arbres, et l'objectif, initialement fixé à 2030, sera atteint dès 2026. Ce projet de végétalisation a pour but de réduire les îlots de chaleur, améliorer la qualité de l'air et offrir des espaces de fraîcheur et d'ombre dans chaque quartier. En parallèle, cette initiative contribue au stockage du carbone, à la préservation de la biodiversité et à la gestion durable de l'eau. Les essences sélectionnées sont rigoureusement adaptées aux sols urbains et aux évolutions climatiques futures, garantissant ainsi la pérennité du programme tout en favorisant le bien-être des habitants.

COURS OASIS :

Le programme «Cours Oasis» transforme les cours d'école en véritables espaces de fraîcheur et de bien-être. En végétalisant ces espaces extérieurs, l'objectif est de créer des environnements plus agréables, inspirés des parcs urbains. Depuis 2021, 40 cours ont déjà été aménagées et 70 autres sont prévues d'ici 2026. L'initiative vise à végétaliser plus de 30% des cours de 100 écoles, contribuant ainsi à offrir des espaces ombragés et rafraîchissants pour les élèves. Plus de 10 000 m² de surfaces ont déjà été désimperméabilisés, permettant ainsi une meilleure gestion des eaux pluviales et une réduction des effets des fortes chaleurs. Ces aménagements contribuent à la qualité de vie des enfants, en créant des lieux propices à l'apprentissage et au jeu.

DÉSIMPERMÉABILISATION :

Dans le cadre de sa politique de gestion durable des ressources en eau, la ville a adopté un plan d'action ambitieux visant à favoriser la désimperméabilisation des sols. Cette démarche permet d'améliorer l'infiltration des eaux pluviales et de préserver la ressource en eau. Parmi les projets emblématiques, l'île du Ramier, située au cœur du Grand Parc Garonne, connaît une transformation importante. Depuis 2020, 10 hectares de sols, auparavant occupés par des bâtiments, des voiries et des parkings, sont progressivement désimperméabilisés pour laisser place à des parcs et jardins. Depuis l'été 2021, 3,7 hectares ont déjà été végétalisés, créant un espace naturel et une prairie fleurie. Ces initiatives participent à la régénération des sols urbains tout en offrant aux habitants des espaces verts accessibles et propices à la détente et en contribuant à une gestion plus durable de l'environnement urbain.

J. Optimiser le rafraîchissement : quelles priorités ? A quelles échelles de temps ?

Toutes les solutions sont à envisager.

Aucune solution n'est parfaite pour tous types de bâtiment. Chaque projet est différent même si les contraintes sont similaires. Il est donc nécessaire de prioriser les actions à mener pour guider les décisions du maître d'ouvrage. Une façon de voir cela est d'établir un chemin d'adaptation ou merit-order (préséance économique) du rafraîchissement.

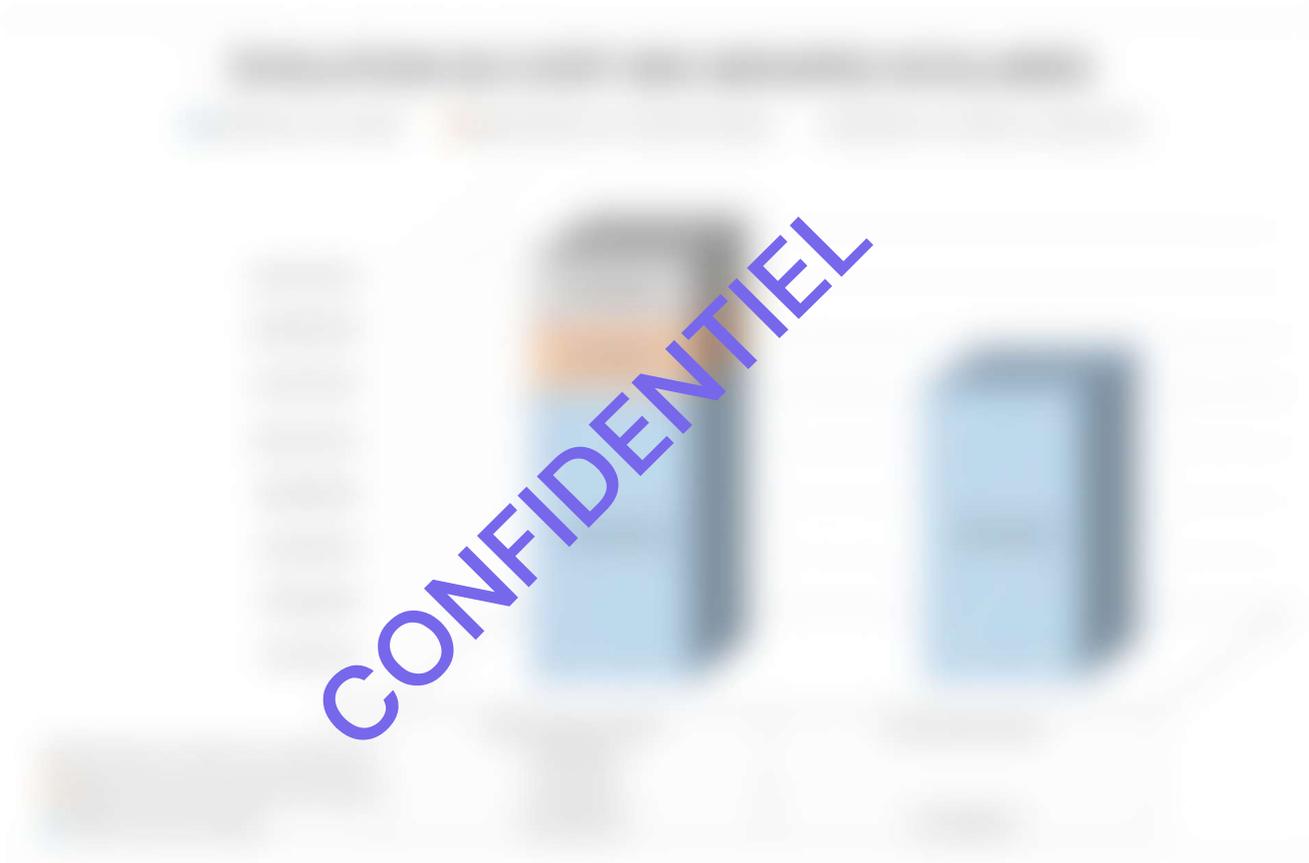
IV. BILAN ÉCONOMIQUE DE L'ADAPTATION DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (voir annexe p50)

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL



A blurred table with multiple rows. The first row is highlighted in green, and subsequent rows alternate between green and white. The text within the cells is illegible due to blurring.



CONFIDENTIEL

[Blurred text block]

[Blurred text block]

CONFIDENTIEL

À retenir – Maîtrise budgétaire et efficience opérationnelle

La **gestion rigoureuse** de la contrainte financière constitue un enjeu majeur pour la Direction de la Construction.

Grâce à une **expertise rigoureuse** et à une meilleure gestion des budgets, nous parvenons à maintenir un équilibre entre ambition qualitative et efficacité financière. L'attention constante portée à la maîtrise des coûts permet de **garantir des résultats** à la fois conformes aux **attentes fonctionnelles et environnementales**, tout en respectant les impératifs budgétaires.

Cette approche proactive assure ainsi la réussite des projets de construction, dans un contexte de plus en plus exigeant de contraintes budgétaires fortes.

Aussi à titre d'exemple, nos groupes scolaires ont un coût moins élevé que la moyenne française (*voir annexe p52*)

V. FOCUS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR (QAI) DES BÂTIMENTS

1. Qualité de l'Air Intérieur mesurée dans les bâtiments

La qualité de l'air que l'on respire est une préoccupation majeure des Français. Elle dépend de l'intensité des émissions polluantes issues des activités humaines et de la nature : la manière dont on se déplace, se nourrit, produit... Ces pollutions impactent directement notre santé et notre environnement.

La surveillance et l'action en faveur d'une meilleure qualité de l'air font l'objet de stratégies et de plans d'action de la part de l'État et des collectivités depuis plusieurs années. Pour chacun, mieux connaître les niveaux et les sources de pollution à l'intérieur comme à l'extérieur est essentiel pour agir sur la qualité de l'air que nous respirons.

Même si la qualité de l'air est définie par l'évaluation de la concentration de nombreux composés organiques volatils (COV) en suspension dans l'air (benzène, formaldéhydes...), le taux de dioxyde de carbone (CO₂) mesuré en parties par million (ppm), est un indicateur essentiel qui permet de qualifier la qualité de l'air d'une pièce.

A noter

L'indice de confinement, contrainte réglementaire, déterminé par la mesure la concentration en CO₂ sur des périodes considérées, impose la mise en place de mesures correctives pour abaisser le taux de CO₂ ambiant. La mesure du taux de CO₂ dans une pièce est instantanée et peut être réalisée via un appareil de mesure fixe (sonde murale) ou portable.

La mesure du taux en formaldéhyde et benzène se réalise par prélèvement suivi de mesures en laboratoire, ce qui rend la mesure plus complexe.

Lorsque l'on respire, on rejette de l'humidité et du CO₂. Si la pièce n'est pas ventilée, le taux de CO₂ augmente très rapidement. Si on arrive à faire baisser le taux de CO₂ dans une salle de cours non ventilée naturellement, cela signifie que l'on a réussi à renouveler l'air de la salle de cours et donc à améliorer la qualité de l'air.

- Le CO₂ est un bon indicateur de la qualité de l'air dans une pièce. En l'absence de renouvellement d'air dans une pièce, le **niveau de CO₂ augmente**.
- La concentration en CO₂ de l'air extérieur est en **moyenne de 400 à 600 ppm** selon l'environnement immédiat. C'est-à-dire qu'il y a entre 400 ou 600 molécules de CO₂ par million de molécules d'air.
- On considère que la ventilation est bonne si la mesure de **CO₂ est inférieure à 800 ppm**.
- Dans une salle de classe en présence de 25 élèves, les mesures augmentent de 2000 ppm en une heure de cours. **La concentration en CO₂ en fin de matinée, sans action sur le renouvellement d'air, peut atteindre jusqu'à 4000 ppm**.

Depuis le 1^{er} janvier 2023, la réglementation sur la surveillance de la QAI (Qualité de l'Air Intérieur) dans certains établissements recevant du public (dont crèches, écoles primaires, accueils de loisirs...) a défini deux seuils de valeurs évaluant de qualité de l'air intérieur :

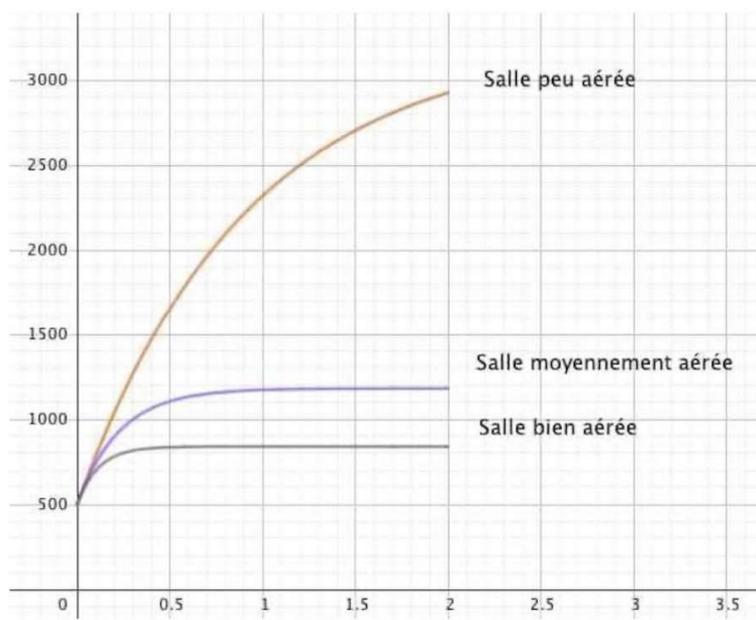
- **800 ppm**, bonne qualité d'air ; aucune action n'est nécessaire
- Entre **800 ppm et 1500 ppm**, aération immédiate de la pièce par ouverture de fenêtres pendant 10 minutes
- **Supérieur à 1500 ppm**, Actions correctives d'urgence à mettre en œuvre avec signalement en préfecture.

Les conséquences d'une mauvaise QAI sont multiples à différentes échelles : baisse de la concentration des élèves en classe, maux de tête, altération des capacités cognitives et peuvent aller jusqu'à provoquer des maladies pour les cas les plus extrêmes.

D'après une études de Satish et al. en 2012 :

- à 1500 ppm les élèves sont moins actifs en cours
- à 2500 ppm les élèves ont peu de prise d'initiative

Les mesures effectuées sur des salles de classe à occupation identique démontrent l'intérêt d'**assurer un renouvellement d'air efficace** pour éviter l'élévation exagérée du taux de CO₂ dans celle-ci. Le graphique suivant met en évidence les concentrations atteintes entre une salle bien ventilée et mal ventilée :



Le renouvellement d'air dans une salle de classe (exemple de référence) constitue des **déperditions de chauffage en saison hivernale**, puisqu'il s'agit d'un volume d'air neuf (air extérieur) qui a été réchauffé par des systèmes techniques (chauffage de la pièce ou système de préchauffe du traitement d'air) que l'on rejette en extérieur et qu'il convient de renouveler par de l'air neuf à réchauffer à nouveau. Ces déperditions s'ajoutent ainsi aux déperditions statiques de chauffage à travers les parois de la pièce.

En fonction de la performance d'isolation d'un bâtiment, **la part des déperditions représentée par le renouvellement d'air varie ainsi sensiblement**. Elle peut représenter de 40% (pour un bâtiment peu performant) à plus de 80% sur des bâtiments très bien isolés. Autrement dit, sur les bâtiments très performants, la majorité des déperditions sont représentées par les **pertes liées au renouvellement d'air**.

Ainsi, l'intérêt de pouvoir **recupérer une part de cette énergie** via des échangeurs de chaleur est à considérer dans la **conception des projets vertueux**.

2. La maîtrise technique pour assurer une bonne QAI

La question du renouvellement d'air dans les bâtiments est un sujet sur lequel toutes les attentions se portent. La réglementation de 2022 (décret n°2022-1689) sur la surveillance de la QAI dans les bâtiments existants accueillant du jeune public a permis de renforcer la prise de conscience des usagers et gestionnaires des établissements d'accueil sur l'intérêt de garantir de bonnes conditions sanitaires pour assurer la réussite et préserver la santé des enfants, de leurs enseignants et du personnel.

Avec la pandémie liée à la Covid, la question a fait l'objet d'une prise de conscience collective renforcée. C'est désormais un sujet crucial, lors de la conception d'un bâtiment, que de garantir un renouvellement d'air satisfaisant.

Par déclinaison, le renouvellement d'air hygiénique et la manière de traiter ce sujet dans les bâtiments influe de manière directe sur de nombreux paramètres et indicateurs associés :

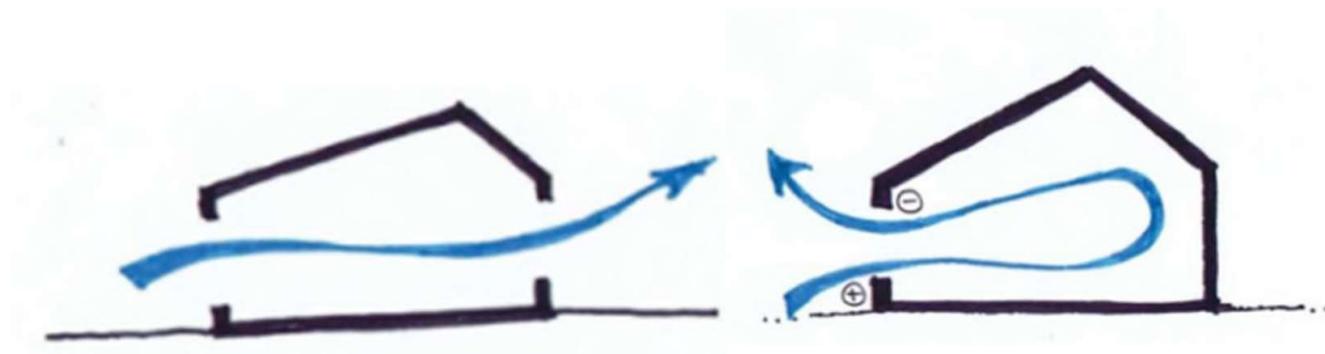
- Le confort thermique d'hiver
- Le confort thermique d'été
- La qualité de filtration de l'air neuf insufflé
- L'isolation acoustique des locaux
- La barrière à l'introduction d'insectes ou parasites et ainsi à la propagation d'infections potentielles associées
- La maîtrise des consommations énergétiques

Les besoins sanitaires ont un impact direct sur les besoins de chauffage et de refroidissement par les systèmes de renouvellement d'air. Ces systèmes peuvent être de plusieurs natures :

- **Naturels**, composés d'ouvrant menuisés dont la manipulation est laissée à l'appréciation des usagers, ou plus techniquement mécanisés et automatisés
- **Mécanisés de type simple-flux** par insufflation ou extraction mécanique. L'air vicié est extrait en aspirant ou soufflant l'air par un unique conduit. L'introduction ou l'extraction de l'air neuf est souvent naturelle par des entrées d'air en façade.
- **Mécanisés de type double flux**. Dans ce cas, l'insufflation et l'extraction sont assurés par des moteurs/conduits qui traitent chaque pièce spécifiquement via les deux réseaux et bouches. Ces systèmes permettent en outre de récupérer l'énergie emmagasinée dans l'air vicié via un échangeur de chaleur qui vient réchauffer l'air neuf.

CARACTÉRISTIQUES DES 3 PRINCIPES DE VENTILATION :

Schéma de principe Ventilation / Aération naturelle

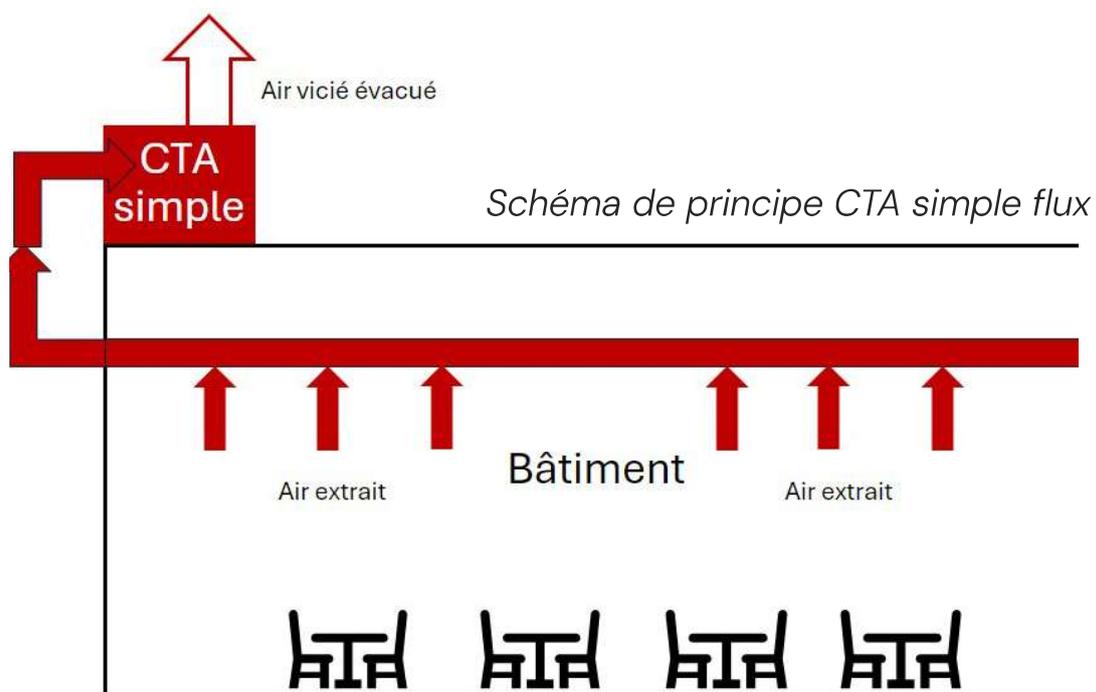


Flux d'air théorique en ventilation naturelle horizontale traversante

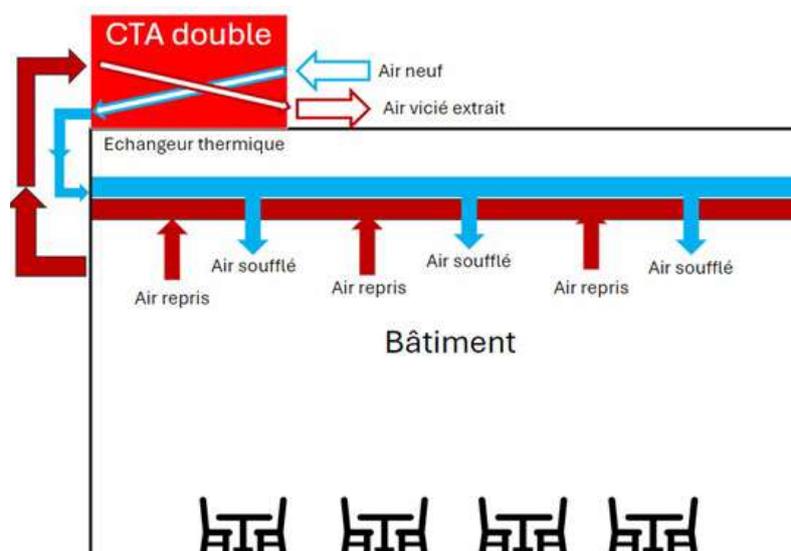
Flux d'air théorique en ventilation naturelle par ouverture des menuiseries

VENTILATION NATURELLE PAR OUVERTURE DES FENÊTRES	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Peu d'investissements.	Châssis menuisés devant s'ouvrir à 100% de leur surface libre : pas toujours réalisable en étage lorsque la partie basse des menuiseries (allège), est inférieure à 1m du sol car risque dans les bâtiments publics de défenestration.
Simplifie la technicité et les passages en plafonds / faux plafonds en limitant les tailles de locaux techniques, pouvant faire gagner quelques dizaines de centimètres sur la hauteur totale du bâtiment.	Contrainte de sécurisation des menuiseries du rez-de-chaussée qui limite les possibilités d'ouverture des fenêtres pour bâtiment soumis à ESSP (Étude Sécurité et Sureté Publique).
	Nuisances sonores à l'ouverture des fenêtres, par transmission des bruits extérieurs venant perturber considérablement l'attention à l'intérieur des pièces.
	Pour les menuiseries ouvrant à la française : le débattement peut gêner considérablement.
	Le risque de pénétration d'objets, de volatiles ou d'insectes est avéré.
	Filtration de l'air non assurée.
	L'introduction directe de l'air extérieur dans les périodes critiques (froid intense ou chaleur estivale) dégrade sensiblement le confort des usagers (ceux proches des fenêtres) générant de fait l'absence d'ouverture.
	Taux de renouvellement d'air non maîtrisé : lorsque les températures extérieures sont proches de la température intérieure, la circulation de l'air ne s'opère pas. À l'inverse, par température extrême, le courant d'air généré est très important et peut être très inconfortable. Le vent est un facteur faisant grandement varier le taux de renouvellement d'air.

VENTILATION NATURELLE PAR OUVERTURE DES FENÊTRES	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
	Le taux de renouvellement d'air est lié à la bonne utilisation du bâtiment par les usagers, ce qui peut impliquer des actions régulières et rapprochées par forcément respectées.
	Les règles de conception du volume des pièces imposent pour chaque pièce une surface minimale d'ouverture possible (exemple...). Une profondeur limitée à deux fois la hauteur sous plafond de celle-ci (pas toujours possible).
	Dès la fermeture des fenêtres après une longue aération, les taux de CO ₂ dépassent les seuils en moins de 20 minutes ce qui demande pendant l'occupation d'entrouvrir en permanence les fenêtres et de gérer des cycles d'ouvertures/fermetures très réguliers.
	En l'absence de récupération d'énergie, la puissance de chauffage installée ainsi que les dispositifs d'émission sont supérieurs à un bâtiment équipé d'une ventilation double flux.



VENTILATION SIMPLE FLUX	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Limite les coûts d'investissement tout en maîtrisant les débits d'air de renouvellement.	N'assure pas un pré-traitement de l'air entrant, une filtration efficace et surtout la récupération d'énergie thermique sur l'air extrait que permet le récupérateur d'une ventilation double flux
	Les élèves proches de la menuiserie en hiver souffrent d'un fort courant d'air froid (les quantités d'air neuf à faire rentrer sont de l'ordre de 500 m ³ /h/ classe, soit 10 à 20 fois une entrée d'air classique type bureau ou pièce de logement).
	En l'absence de récupération d'énergie, la puissance de chauffage installée ainsi que les dispositifs d'émission est supérieure à un bâtiment équipé d'une ventilation double flux



VENTILATION DOUBLE FLUX	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Débits parfaitement maîtrisés et adaptés à l'occupation de chaque pièce en insufflation et extraction, permettant éventuellement aussi de moduler les débits en fonction du juste besoin de renouvellement lié à la densité d'occupation	Génère des consommations électriques supérieures aux autres systèmes, dues à la présence de deux moteurs électriques pour l'entraînement de l'air.
Mutualise plusieurs besoins dans une même solution technique et permet de générer des économies d'énergies intrinsèques à son fonctionnement issues de la récupération d'énergie (gratuite) qui limite les surconsommations d'équipements de production d'énergie chaud ou froid selon la saison et les besoins.	Système parfois bruyant : un dimensionnement et une mise en oeuvre précise sont nécessaires pour assurer les justes débits dans chaque volume traité. Cela implique une maîtrise technique et une mise au point fine afin d'éviter les éventuelles nuisances sonore issues d'une mauvaise réalisation.

VENTILATION DOUBLE FLUX	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Économies conséquentes de fonctionnement et une gestion de la qualité d'air inégalée par les autres principes de ventilation même;	Importance de la gestion des vitesses d'air et du choix des bouches de soufflage (direction, induction) afin de préserver le confort des occupants.
Traitement thermique grâce aux débits importants mis en jeu : ce vecteur d'air permet de pré-traiter l'air insufflé et de distribuer du rafraîchissement nocturne et diurne indispensable à la décharge thermique du bâti et assure un confort thermique indispensable au maintien de températures ambiantes acceptables en période estivale notamment.	Réseaux en plafonds/faux plafonds et locaux techniques imposants : la bonne répartition des locaux techniques CTA dans le bâtiment permet de limiter des tailles de réseaux qui peuvent être considérables
Limite les puissances de chauffages installées par pièce et la production centrale : diminution du coût d'investissement sur ces postes et sur les postes de distribution (pompes, tuyauteries, calorifuges, etc...)	Génère des coûts d'exploitation / maintenance importants liés au changement des filtres notamment.
Permet la filtration de l'air insufflé : trafic routier, pollens, etc.	Génère des coûts certains à l'installation ainsi qu'un poids carbone construction.

VI. CONCLUSION

Les objectifs environnementaux ambitieux fixés par la Mairie de Toulouse ont permis la réalisation de bâtiments publics particulièrement performants, tant en matière d'efficacité énergétique que de réduction de leur empreinte carbone.

En effet, l'ensemble de nos constructions neuves répond à une exigence de performance élevée : elles sont toutes à énergie positive, c'est-à-dire qu'elles produisent plus d'énergie qu'elles n'en consomment.

Ces exigences ont conduit à améliorer le niveau d'isolation et de conception des enveloppes du bâti, cherchant à se protéger des déperditions thermiques tout en assurant un confort hygrothermique satisfaisant. Les projections opérées dans le cadre des études complémentaires réalisées dans ce Livre Blanc démontrent que ces bâtiments seront capables d'offrir un confort similaire en 2080, moyennant quelques menues adaptations, soit sur les principes de fonctionnement, soit par des mutations d'équipements que les bâtis sont prêts à accueillir sans surcoûts notables.

Nous pouvons donc répondre par l'affirmative à la Question I posée en page 4 de l'introduction.

Par ailleurs, des améliorations de confort restent encore possibles, comme l'ajout de brasseurs d'air dans les projets qui n'en sont pas encore équipés ou l'ajout de puissance de rafraîchissement via les équipements de diffusion déjà installés, sous réserve d'un arbitrage budgétaire favorable. Toutefois, et pour rappel, le fichier météo utilisé pour nos analyses compute une moyenne de températures sur 20 ans. Autrement dit, ce fichier a un effet lissant et ne reflète pas nécessairement, par exemple, une canicule à un instant T.

Les études ont démontré que le principe du maintien de l'inertie dans les volumes chauffés (permis par l'isolation du bâti par l'extérieur), les protections solaires optimisées, les surfaces de vitrage maîtrisées ainsi que l'emploi de sources passives de rafraîchissement permettent de limiter les élévations de température intérieure des locaux ce qui permet à nos équipements d'être préservés des effets du réchauffement climatique.

Nous répondons donc par la négative à la Question II posée en page 4 : nos constructions sont déjà adaptées aux conditions climatiques futures. Toutefois, pour conjurer les effets du réchauffement climatique, le bâtiment seul ne devrait pas être l'unique dispositif poursuivant cet objectif. Il devrait être couplé à l'usage, notamment l'adaptation des plages horaires de fonctionnement du bâtiment. Par exemple, pour les écoles, une adaptation des temps d'enseignement vers les matinées pourrait être envisagée.

Enfin, en réponse à la Question III posée en page 4, nous confirmons que les impacts du changement climatique sont intégrés et anticipés dès la phase de programmation et dans les concours de maîtrise d'œuvre depuis 2019. Nous allons renforcer ce dispositif par le jugement en phase esquisse des conceptions bioclimatiques proposées par les candidats ainsi que l'analyse des STD qui seront systématiquement demandées dès cette phase.

En ce qui concerne le parc existant, nous menons bien évidemment des réflexions similaires.

Même si la plupart de ces dispositions, que nous avons pu mettre en œuvre et tester sur des projets neufs, sont reproductibles sur des bâtiments existants, certaines contraintes évidentes seront limitatives. Par exemple, la mise en œuvre de sondes géothermiques ne sera pas toujours possible en raison de l'implantation du bâti ou des végétaux existants (arbres notamment). La compensation des consommations électriques liées au rafraîchissement par de l'énergie photovoltaïque sera plus contrainte. Cependant, tout principe qui sera mis en œuvre conduira à réduire l'inconfort subi dans certains bâtiments, et des solutions de bon sens pourront facilement être appliquées.

Pour la suite, nous allons proposer d'étudier quelques projets représentant les grandes typologies de bâtiments constituant notre patrimoine, dans le but de déterminer un ensemble de solutions techniques et d'efforts à opérer pour assurer un meilleur confort aux usagers. Ces efforts, comme nous l'avons vu, concourront également à la diminution des consommations d'énergie des sites traités et, parallèlement, de l'impact carbone idoine lié aux consommations énergétiques.

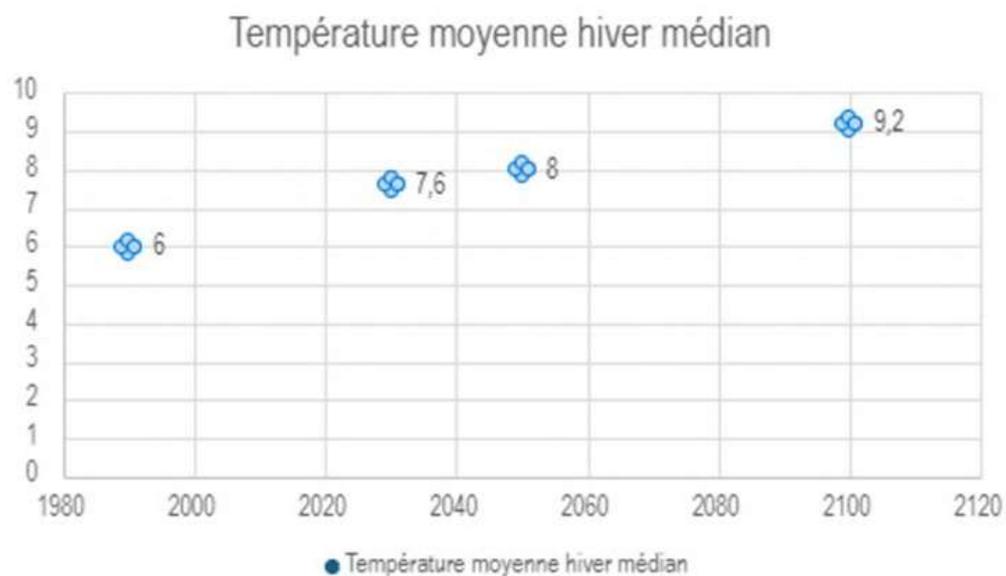
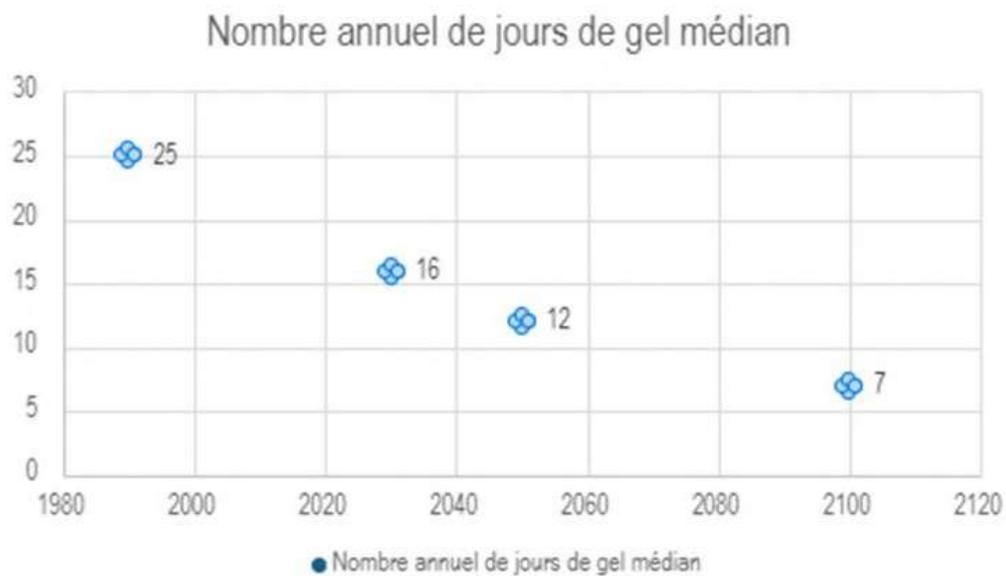
A l'évidence, l'ensemble de ces actions vertueuses devront s'inscrire dans un principe de réalité financière et budgétaire. **L'expertise financière** sur nos projets étant, eu égard à la période, requise de manière prépondérante.

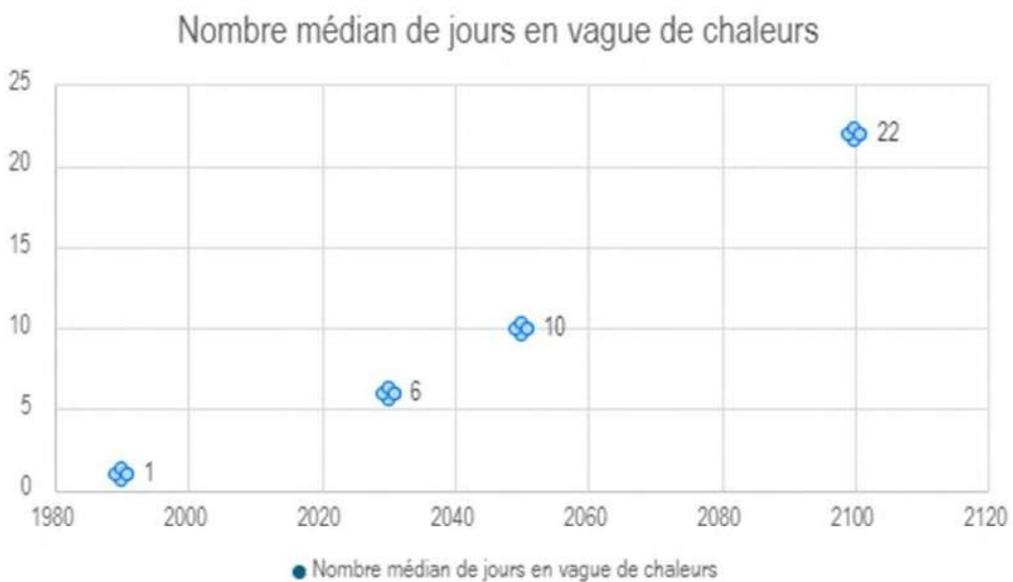
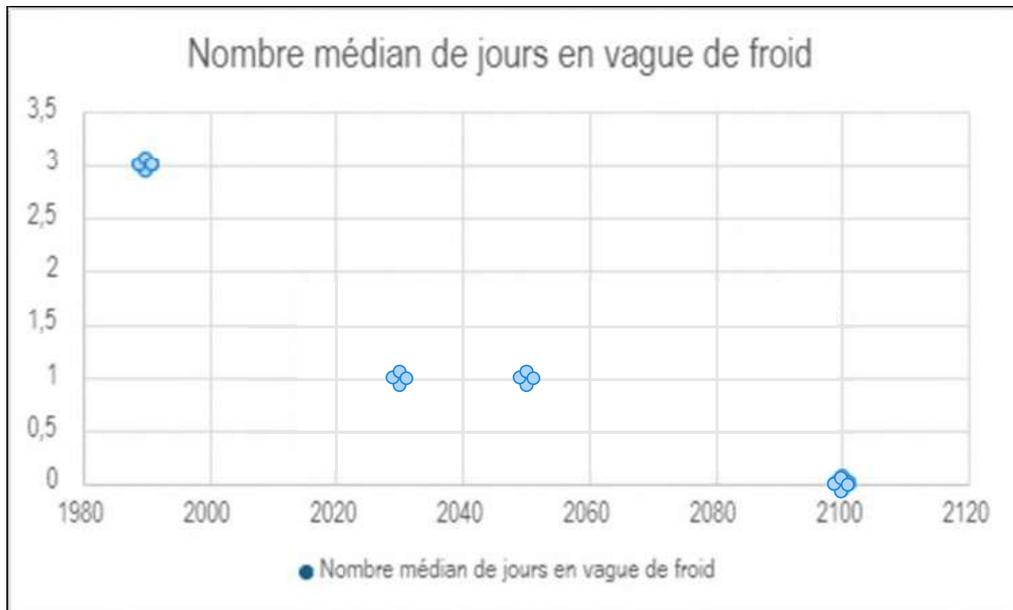
Ce Livre Blanc et la démarche de coopération entre sachants qui l'ont animée, n'a pas pour vocation à répondre à toutes les problématiques et enjeux contemporains de la construction. Restent pendantes les questions suivantes qu'il conviendra d'évaluer et d'objectiver :

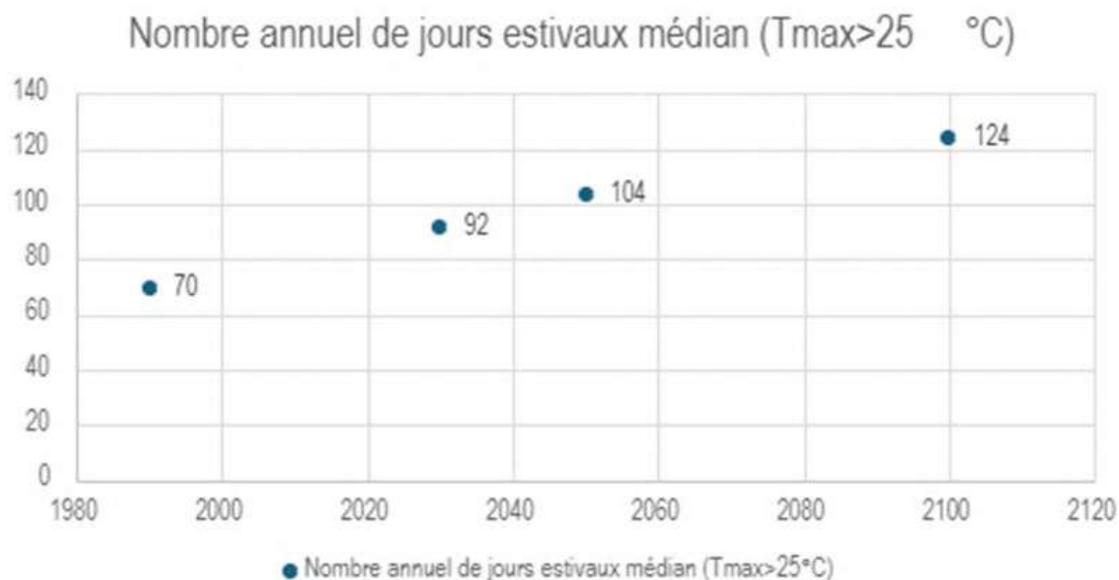
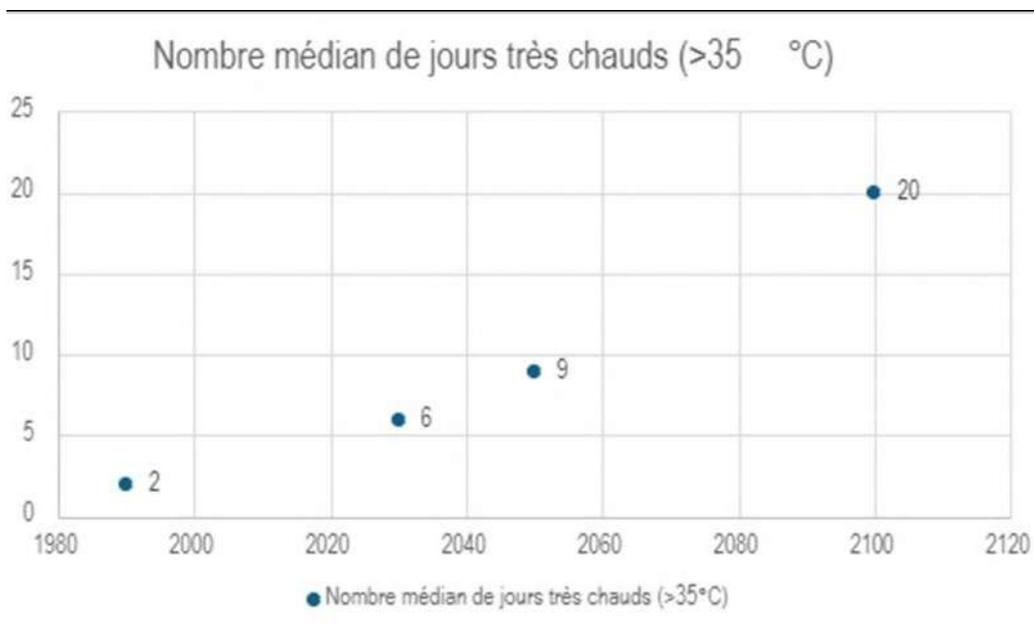
- l'impact carbone des matériaux et de leur quantité si nous augmentons l'inertie de nos projets
- le choix stratégique d'évaluation environnementale entre restructuration ou déconstruction / reconstruction
- l'équilibre entre la performance environnementale et la contrainte financière notamment si le modèle économique de la géothermie n'est plus subventionné.

VII. ANNEXES

Graphes Climadiag pour la ville de Toulouse







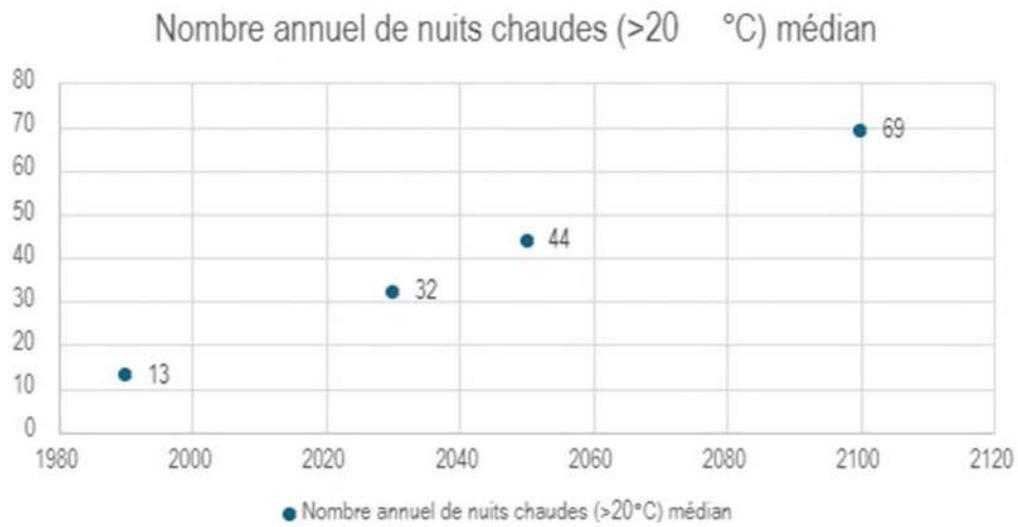


TABLEAU DE SUIVI DES COÛTS DE LA CONSTRUCTION DES GROUPES SCOLAIRES (GS) DEPUIS 2017

CONFIDENTIEL

The image shows a large, blurred table with multiple rows and columns. The text within the table is illegible due to blurring. A large, diagonal watermark reading "CONFIDENTIEL" is overlaid across the center of the table area.

CONFIDENTIEL

PARTICIPANTS :

Mairie de Toulouse

Jean-Pierre DESO-VIDAL, Directeur de la Construction

Olivier CUGULLIERE, Responsable Pôle Stratégies Bâtimentaires

Sandrine CASTET, Responsable Service des Projets de Construction

Didier PARENT, Responsable Service Ingénierie Environnementale

Marc LUQUET, Ingénieur Service Ingénierie Environnementale

Théo CHAUVET, Ingénieur Polytechnicien en mission au Service Ingénierie Environnementale

Emilie TOURRET, BIM manager Économiste

AIOc, Association Ingénierie Occitanie

Marie UNAL DE CAPDENAC, 2AU, Présidente

Yann LEBIGOT, SOCONER

Marie-Pierre ACHARD, OTCE Midi-Pyrénées

Jérémie ALQUIER, SCOP ECOZIMUT

Claire GUYON, SOCONER

Olivier DONES, OTCE Midi-Pyrénées

Guillaume BARBE, ECOVITALIS

Lucy HAAS, Coordinatrice

Conseil Régional de l'Ordre des Architectes Occitanie

Caroline DELAS, Présidente

Caroline DE PERIGNON, Vice-Présidente

Olivier STOKER, Vice-Président

Franck BOYER, Conseiller

Architectes invités

Pierre BONARD, IDP

Pierre-Louis TAILLANDIER, TAA