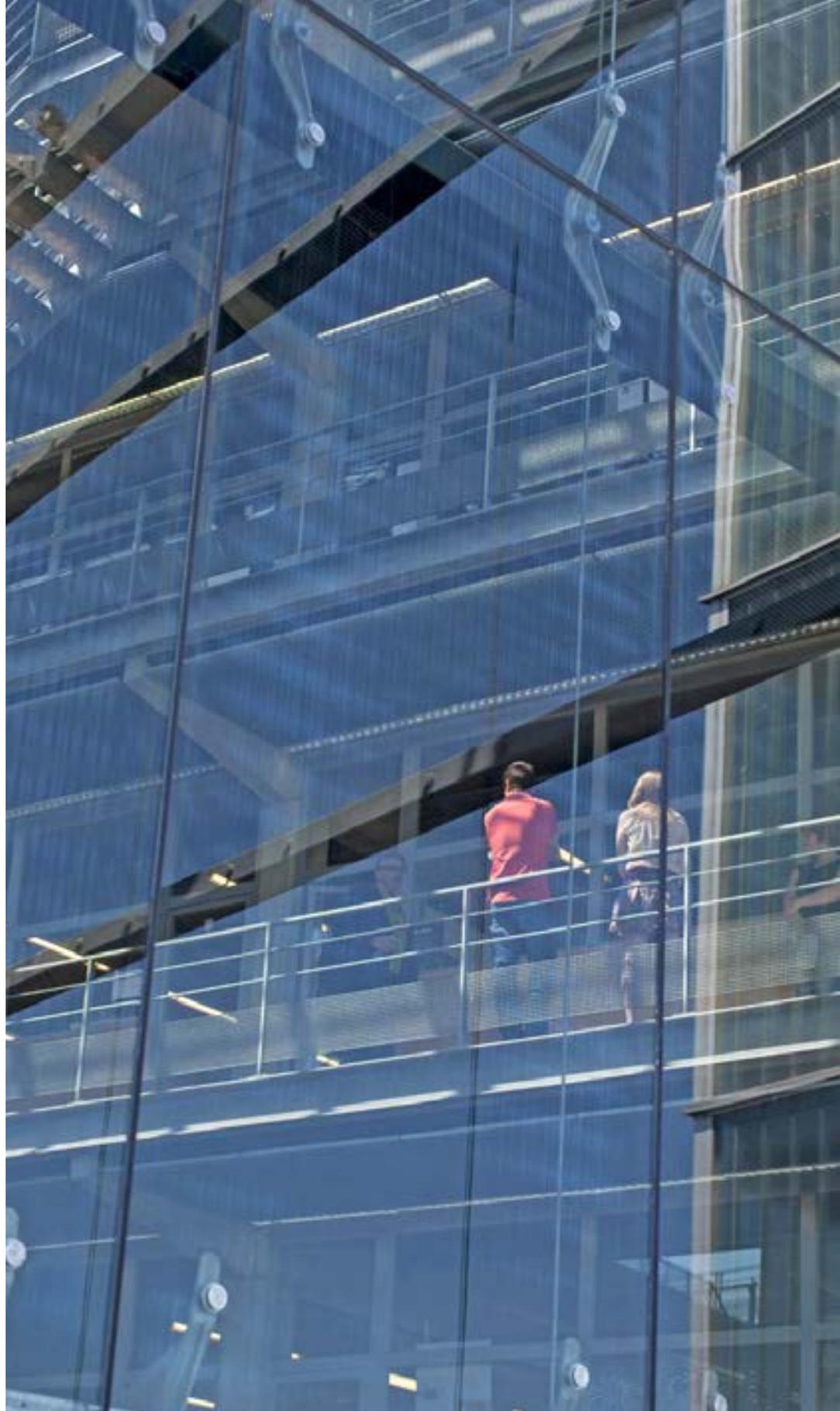


**Cahiers du DPEA**  
**architecture post-carbone**  
**2016 – 2017**

**Confort et énergies**  
**L'école d'architecture comme outil**  
**pour l'enseignement de la transition**  
**écologique**

**Coralie Coutellec**  
**Marion Gardier**  
**Joan Gaudin**  
**Pamela Ibañez**

**École d'architecture**  
**de la ville & des territoires**  
**à Marne-la-Vallée**





# Confort et énergie

## L'école d'architecture comme outil pour l'enseignement de la transition écologique

### **Commanditaire de l'étude**

Amina Sellali, directrice de l'École  
d'architecture, de la ville et des territoires  
à Marne-la-Vallée

### **Étudiants**

Coralie Coutellec  
Marion Gardier  
Joan Gaudin  
Pamela Ibanez

### **Partenariat**

avec l'ESIEE  
Mathieu Bourdeau

**Cahiers du DPEA  
architecture post-carbone  
2016 – 2017**

**École d'architecture  
de la ville & des territoires  
à Marne-la-Vallée**



**Quelques prérequis**

Page 4

**Préambule**

Une commande à problématiser  
page 12

**A Une analyse par les comportements**

**Un tout constitué d'entités**

page 17

**B Des solutions concrètes**

**Trois temporalités**

page 75

**C De l'Eav&t au réseau ENSA-ECO :**

**Réflexions sur une méthodologie**

page 147

**Annexes**

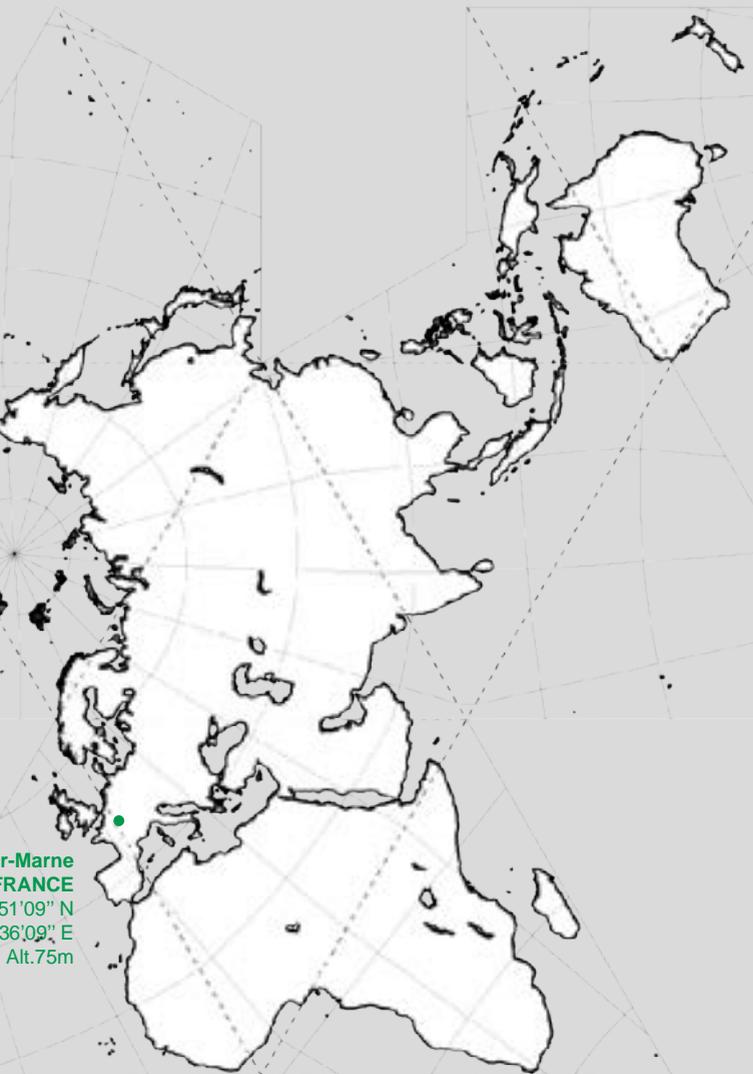
page 161

**Bibliographie**

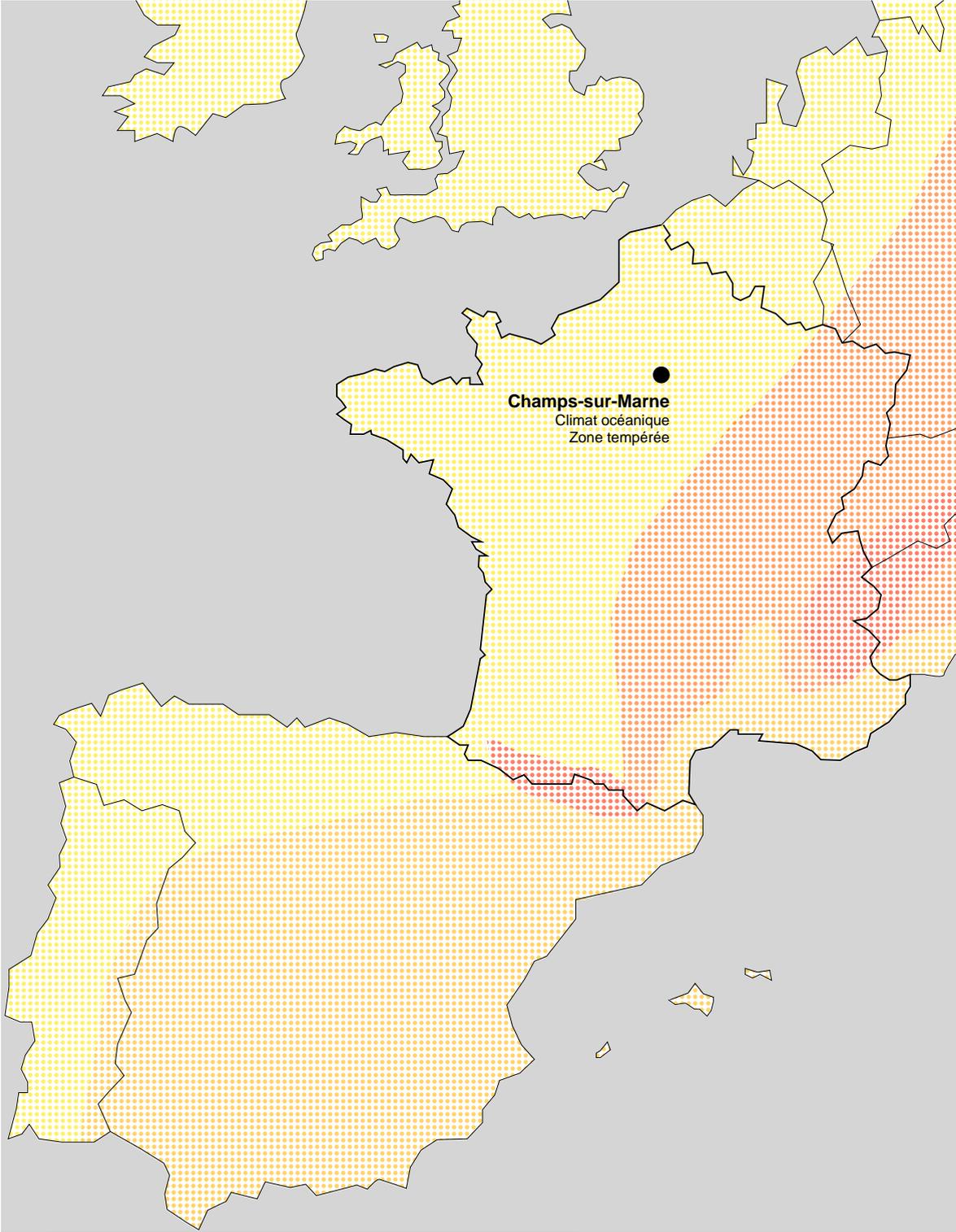
page 178

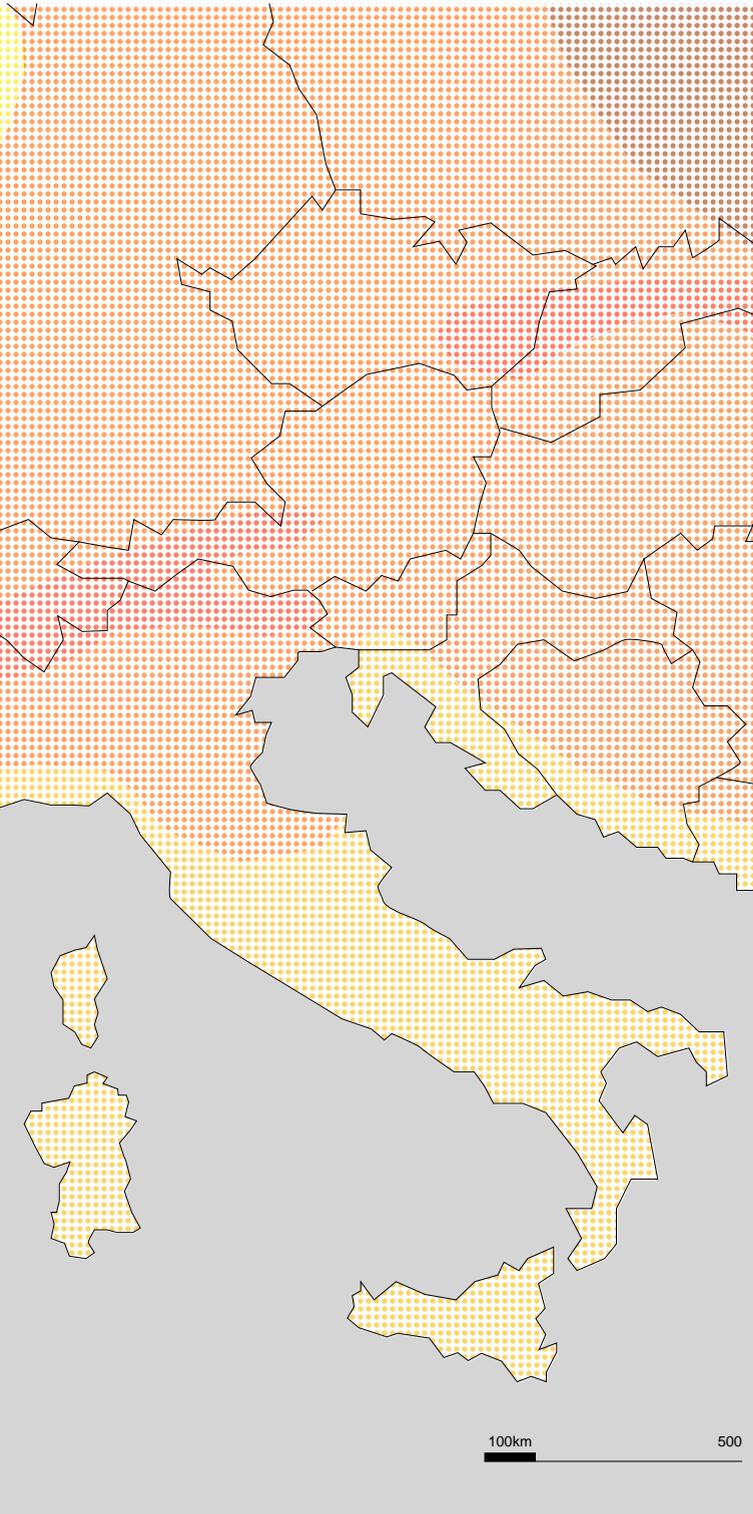
# Localisation de la région Île-de-France sur le globe





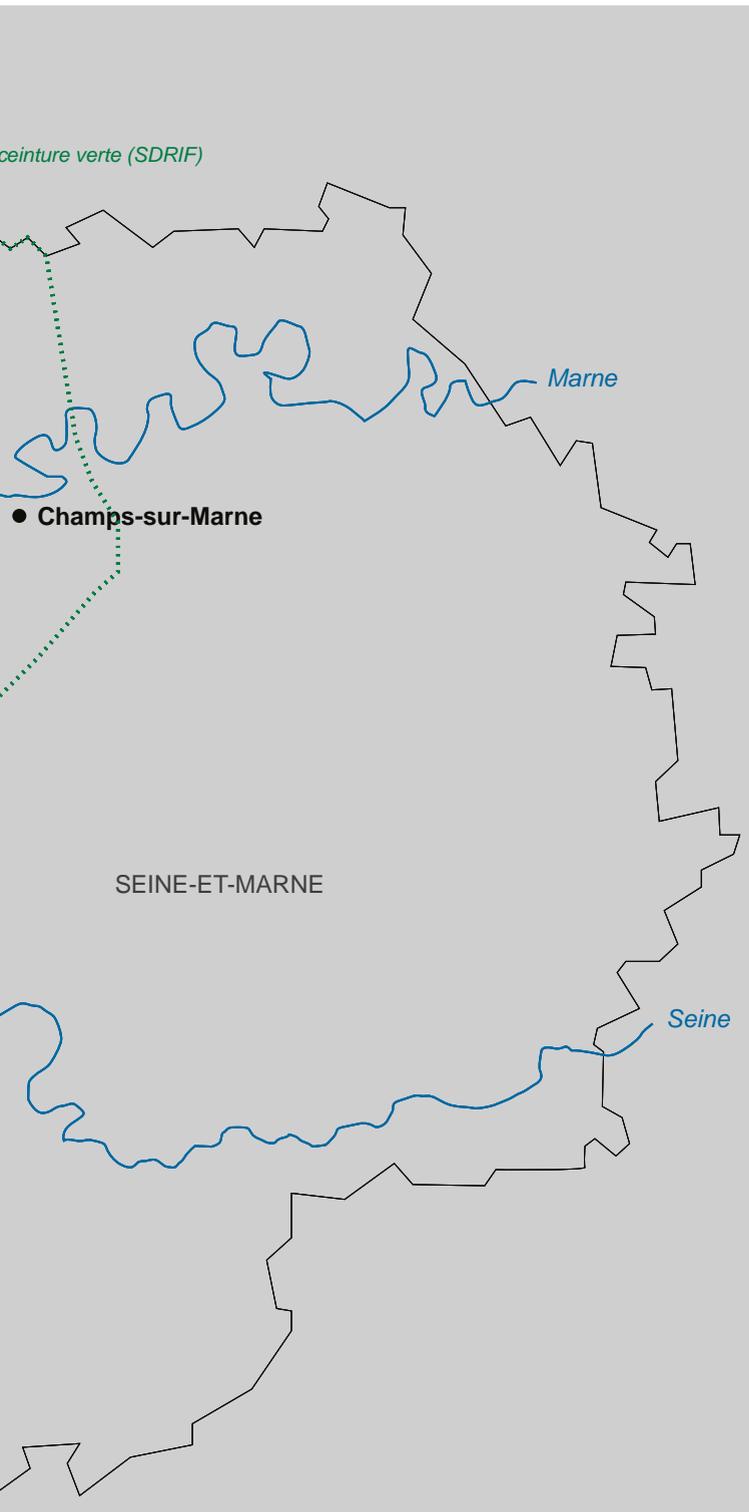
# Un contexte climatique océanique





# Un territoire engagé dans la croissance verte





L'Île-de-France s'est engagée dans un plan territorial pour la croissance verte des territoires à énergie positive. Elle a pris les engagements suivants : réduction des consommations d'énergies, couverture de ses besoins de chaleur par des énergies renouvelables et de récupération, développement des mobilités bas-carbone et réduction des émissions de GES. Ces engagements ont été transmis le 5 novembre 2014 par le ministère de l'environnement et de la mer.





# Vingt ans plus tard

*« La grande majorité de l'humanité passe une partie importante de son temps à l'intérieur de bâtiments. Dans les pays industrialisés, cette proportion dépasse les 90%, répartis entre l'habitation, le lieu de travail ou l'école. La qualité de l'environnement à l'intérieur d'un bâtiment a donc une importance primordiale et elle doit viser la plus grande satisfaction des occupants. En fait, un bâtiment doit être conçu, construit et exploité pour protéger ses habitants des rigueurs du climat, et leur assurer un environnement intérieur sain et confortable, que ce soit pour le logement, le travail ou les loisirs.»<sup>1</sup>*

L'école d'architecture de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée a été construite par l'architecte Bernard Tschumi à une époque où les considérations d'ordre énergétique étaient en marge du débat public. En effet, depuis la révolution industrielle, l'énergie bon marché et le développement de systèmes techniques complexes ont entraîné une artificialisation du climat intérieur des bâtiments.

En plus de ce contexte, la réalisation d'un lieu d'enseignement s'avère un exercice tout-à-fait particulier. La conception d'une école architecture est sans nul doute un projet aussi stimulant que périlleux pour l'architecte. Il s'agit de faire la démonstration de ses compétences, en bâtissant un édifice dont les utilisateurs seront les premiers critiques. Bernard Tschumi, fidèle à sa démarche, construit un bâtiment signature en mettant en avant un concept architectural fort mais néanmoins déconnecté de son contexte climatique.

Presque vingt ans plus tard, l'école d'architecture de Marne-la-Vallée possède nombre des caractéristiques du patrimoine du xx<sup>e</sup> siècle, notamment celui d'être énergivore. Loin du laisser-faire de l'époque, les enjeux environnementaux d'aujourd'hui imposent de reconsidérer ce patrimoine en l'inscrivant dans un projet de transition énergétique.

1 Roulet, Claude-Alain, *Eco-confort, pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*, Ed. PPUR, 2012



# Une commande à trois entrées

En 2015, l'administration de l'École d'architecture de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée, sous l'impulsion de sa directrice Mme Amina Sellali, fait appel au DPEA Architecture post-carbone afin de trouver des réponses à la problématique suivante : comment repenser l'école afin qu'elle puisse accueillir plus d'étudiants, tout en réduisant sa facture énergétique, et cela à courte échéance ?

Le constat relève d'une évidence : très généreuse spatialement, l'école est nettement sous-exploitée. Ses espaces ne sont pas rentabilisés et sont parfois même détournés de leurs fonctions initiales. Pourtant, ces désordres ne sont que les témoins de dysfonctionnements à plus grande échelle. L'enveloppe du bâtiment est une peau fragile qu'un ensemble de systèmes techniques tente difficilement de compenser. L'entropie accumulée à plusieurs échelles donne lieu à des factures énergétiques de plus en plus lourdes à digérer.

Depuis 2012, soucieuse de réduire la facture énergétique, l'administration engage différentes actions afin de palier à ces désordres. La première s'est attardée sur les défauts de l'enveloppe et des systèmes techniques. Un audit énergétique a été réalisé par GDF Suez et a débouché sur une série de recommandations techniques ambitieuses. Cependant, un retour sur investissement à trop longue échéance en a empêché la mise en œuvre. De plus, la technicité et le format du cahier des charges en a compliqué la lecture et la diffusion au sein même de l'administration.

Suite à cet audit, l'école a fait appel à un programmiste, M. Yves Dessuant, afin d'imaginer une reprogrammation des espaces. Cette initiative entendait répondre à une partie de la problématique initiale, celle de l'augmentation de la capacité d'accueil de l'établissement. Cette étude est encore en cours, cependant les propositions de réaménagement semblent très éloignées des questions d'usages et de pratique de l'école.

Ces deux approches répondent logiquement à des enjeux différents et sont le fruit d'une démarche classique de réhabilitation, énergétique ou programmatique. Cependant, ces études réalisées autour de l'école séparent les différents enjeux, sans les traiter conjointement, et se concentrent sur un seul aspect des dysfonctionnements de l'école. Même le plus savant des audits énergétiques ne proposera jamais de solutions à la question de l'utilisation des espaces dans le bâtiment. Il est tout aussi logique qu'une étude programmatique se désintéresse de la question énergétique. Pourtant, il semble aujourd'hui urgent que ces questions se croisent et se nourrissent l'une de l'autre. La vision d'ensemble et les capacités de synthèse des architectes font alors de lui un acteur incontournable. C'est pourquoi un partenariat est initié en 2015 avec le DPEA Architecture post-carbone.



# Acteurs, témoins, utilisateurs

Ayant eu la chance d'être à la fois acteurs, témoins et utilisateurs du bâtiment, nous avons focalisé notre attention sur le thème du confort. Mot-valise pour certains, le confort est pourtant l'objectif que doit se fixer tout architecte lorsqu'il construit. Force est de constater que les conditions de confort dans l'école ne sont pas satisfaisantes et que l'ambition d'y accueillir plus d'étudiants apparaît compliquée. C'est face à ce constat que nous avons fait le choix de reformuler la problématique initiale :

Comment réduire les consommations énergétiques de l'école  
tout en améliorant les conditions de confort de ses utilisateurs ?

En réponse à cette problématique, l'analyse s'est organisée tel un système de poupées russes. Le comportement de l'enveloppe dans son contexte climatique engendre des pathologies qui donnent lieu à l'installation de systèmes techniques, dont les utilisateurs subissent le comportement, engendrant d'eux-même, inconsciemment, de nouvelles pathologies en tentant de palier à celles de ces systèmes. À la suite de cette analyse, des propositions de transformation concrète sont apportées. Dans le but de répondre à la dernière demande de la direction, ces solutions sont séquencées en trois temps : certaines pourront être mises en place à court terme (pour l'hiver prochain), d'autres à moyen terme (dans les deux ans à venir) tandis qu'une dernière proposition plus ambitieuse répond à la problématique sur le long terme (pour le plan quinquennal). Finalement, une réflexion est proposée à l'échelle du campus et plus globalement pour les différentes ENSA de France.

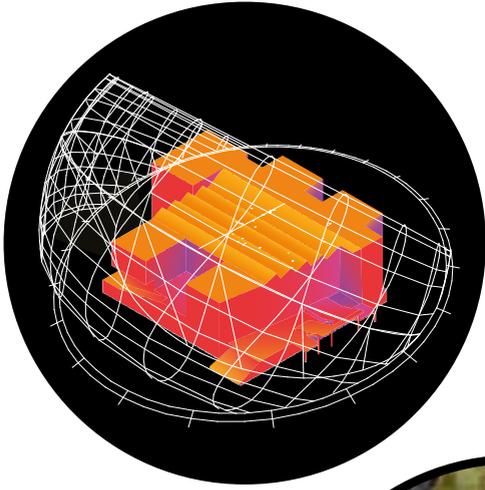
Enfin, notre participation aux premières rencontres du réseau ENSA-ECO le 7 juillet 2017 nous a permis de porter ce projet au-delà des frontières de notre campus.



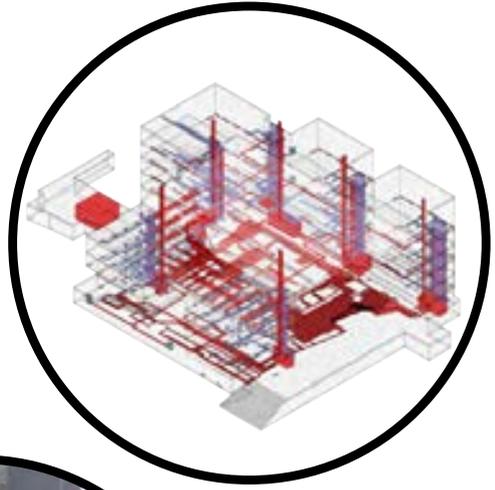
# A

## **L'analyse par les comportements** Un tout constitué d'entités

- 1 L'enveloppe passive**
- 2 Des systèmes actifs**
- 3 Des utilisateurs,  
leurs comportements  
et leurs usages de l'espace**



Enveloppe



Systemes



Utilisateurs

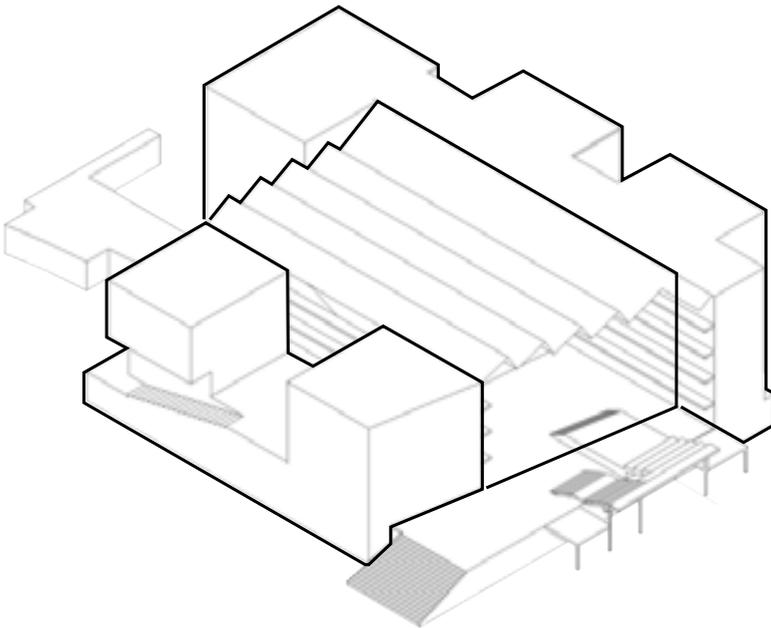
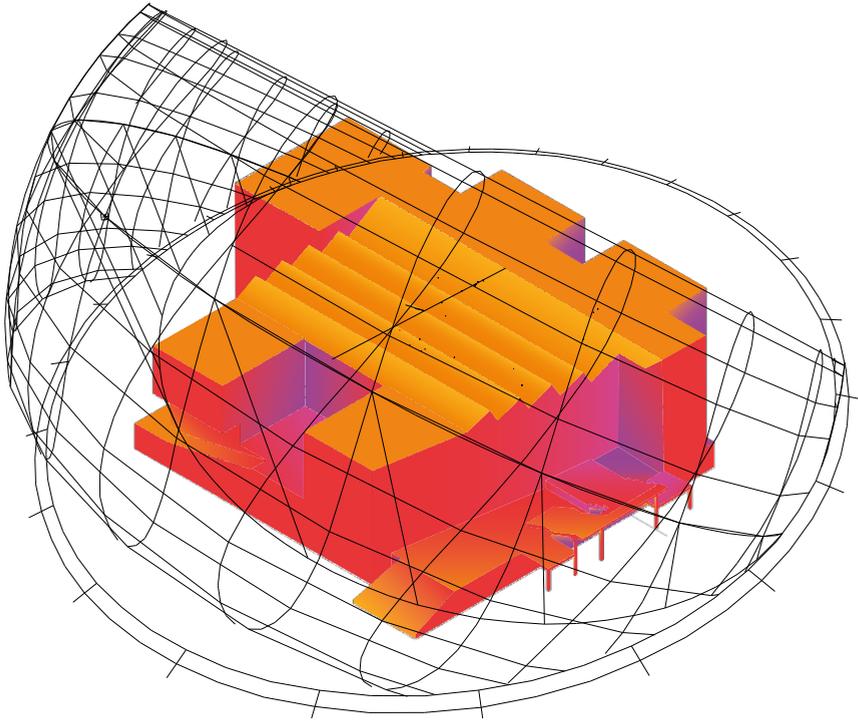
## **Un tout constitué d'entités**

Notre immersion au sein de l'école pendant cette année nous a permis de comprendre combien le fonctionnement énergétique d'un bâtiment est lié à trois entités ayant leur fonctionnement propre et entretenant des rapports de dépendance et de relation les unes aux autres.

La première est l'enveloppe qui protège, composée de matière inerte, réagissant de manière passive à l'évolution des conditions climatiques. La seconde entité est composée des systèmes actifs qui prennent le relais de l'enveloppe et pallient à ses imperfections en terme de confort. Enfin, la troisième entité se compose des utilisateurs qui évoluent et s'adaptent dans cet environnement intérieur, influençant par leur comportement les deux premières entités.



# 1 L'enveloppe passive



En bas, les trois grandes zones constitutives de l'enveloppe de l'école.

En haut, diagramme stéréographique de la course du soleil autour de l'école.

## Comportement d'une enveloppe confrontée à des conditions climatiques

*« N'utilisez plus le mot "façade", mais "peau" ; ce terme est employé depuis les années 90, il est donc propre à l'architecture contemporaine.*

*L'enveloppe du bâtiment représente un enjeu majeur pour l'architecte et son commanditaire. C'est une icône qui permet de s'inscrire dans son époque, de se démarquer ou de s'intégrer au cadre environnemental.*

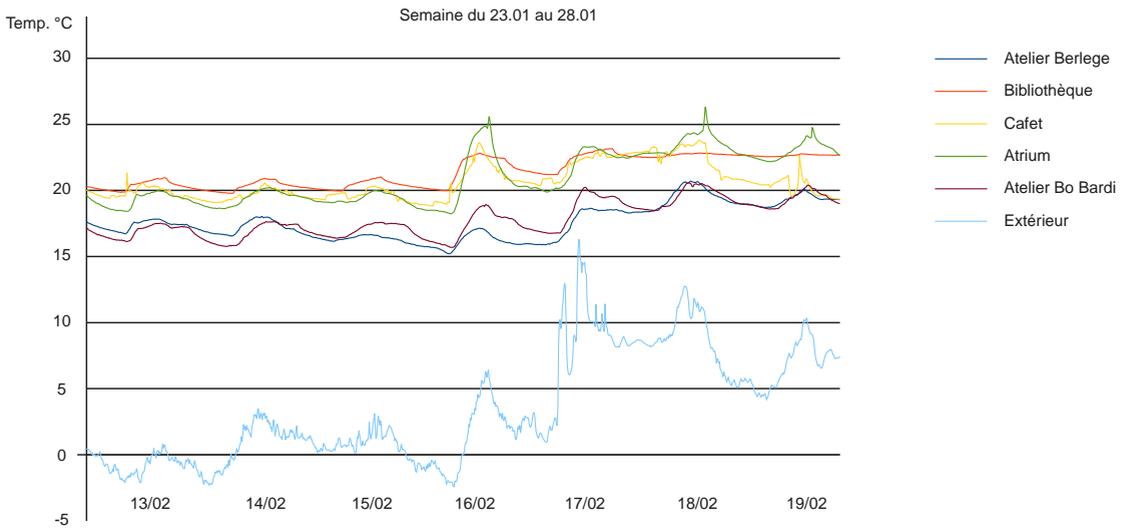
*Qu'imagine-t-on à l'énoncé du mot peau ? Quelque chose de fin, de recouvrant, un continuum entre murs, sol et plafond. C'est ce qui "habille" le bâtiment, ce qui nous permet de l'identifier. »<sup>1</sup>*

Au-delà d'un geste esthétique, une peau, ou une enveloppe, est un revêtement protecteur jouant un rôle d'interface entre l'intérieur et l'extérieur. Le bâtiment de l'école d'architecture de Marne-la-vallée est un exemple parmi d'autres de ces enveloppes fragiles édifiées au xx<sup>e</sup> siècle. Résultat d'une recherche conceptuelle, elles sont souvent définies de manière presque charnelle, transparentes et délicates. Le travail de Bernard Tschumi s'inscrit dans ce mouvement tout en s'en détachant. En effet, sa volonté de « transprogrammer »<sup>2</sup> le pousse à privilégier les usages à l'intérieur du bâtiment par rapport à son contexte environnant. Pour l'école d'architecture, il souhaite faire du grand atrium central un lieu de vie comparable à une place de village qui se mettrait en mouvement suivant les interactions entre les utilisateurs et l'espace qu'ils pratiquent. Cette intention programmatique le pousse à créer un atrium de 14 000 m<sup>3</sup>, transparent et traversant. Ce dernier est encerclé de coursives et la moitié de ses façades est en contact avec l'extérieur. Cet atrium central est entouré de blocs programmatiques, qui rendent l'enveloppe de l'école complexe, multipliant les échanges avec l'extérieur.

Afin de comprendre le comportement de l'enveloppe, il faut s'intéresser à la quantité d'apports solaires qu'elle reçoit. Ainsi, le diagramme stéréographique ci-contre nous renseigne sur la quantité de ces apports moyens annuels. La différence entre ces valeurs, remarquable d'une façade à l'autre, met en avant la complexité de cette peau. L'observation de ce diagramme révèle une composition de l'école en trois blocs distincts : l'atrium central, les blocs sud et les blocs nord. À ce stade, il est important de rappeler que la toiture est la façade la plus exposée aux radiations solaires et qu'elle fait le lien entre ces trois blocs.

1 Ingrid Cretin, *La peau en architecture*, traac.info

2 Terme utilisé par Bernard Tschumi pour parler de son architecture, et par lequel il exprime « une ode à l'événement architectural » (Lucas Merlini, *L'archipel Tschumi : cinq îles*, Ed. B2, 2014.



En haut : courbes de température d'une semaine type. La courbe de l'atrium montre une forte corrélation avec la température extérieure, alors que les ateliers eux ont un déphasage plus lent. La bibliothèque, dans les blocs sud qui sont isolés, présente elle aussi un déphasage lent, mais ses températures sont plus élevées.

En bas, l'instrumentation de l'école réalisée grâce à des capteurs

L'enveloppe de l'atrium se compose de parois verticales en verre sur toute sa hauteur - un simple-vitrage - ainsi que d'une toiture en sheds vitrés, orientés nord. Le résultat de ce geste architectural est un confort lumineux indéniable mais fortement contraignant sur le plan hygrothermique.

Les blocs qui jouxtent cet atrium au sud comprennent la bibliothèque et des salles de travail individuel. De nombreux bureaux y jouissent d'un confort thermique assez favorable. En effet, cette zone est la seule à avoir été conçue avec une isolation et des murs à forte inertie. Les espaces intérieurs qu'elle abrite sont considérés comme confortables la majeure partie de l'année. En revanche, à partir du mois de mai, lorsque les apports solaires augmentent, les risques de surchauffe se multiplient.

Les blocs nord, quant à eux, ne reçoivent aucun apport direct mais bénéficient d'apports indirects conséquents. Ce choix délibéré d'y installer les ateliers d'étude garantit donc une lumière indirecte constante et homogène, idéale pour le travail manuel. Malheureusement, c'est à nouveau un choix architectural qui entraîne des inconvénients majeurs : la forte conductivité thermique des parois vitrées au nord entraîne beaucoup de déperdition et procure une sensation d'inconfort induit par le rayonnement des parois froides. De plus, la transition au numérique a donné lieu à des changements d'usage importants. Les étudiants travaillent dès la deuxième année sur des ordinateurs portables dont les écrans réagissent assez mal à cette luminosité, rendant inadéquate l'organisation des ateliers.

Ce qu'il faut retenir de ces trois grandes zones thermiques est que l'enveloppe du bâtiment de l'école induit des niveaux d'inconfort disparates. Il s'agit du premier degré d'entropie révélé par notre analyse.

### **Des précisions apportées par l'instrumentation.**

Afin de vérifier scientifiquement le comportement de cette enveloppe face aux conditions climatiques énoncées, nous nous sommes associés à l'ESIEE<sup>3</sup>. Grâce à cette collaboration, nous avons pu installer des capteurs dans les zones stratégiques à étudier. Ces derniers ont permis de mesurer tout au long de l'année l'évolution de la température ambiante, de la température de contact, des concentrations en CO<sub>2</sub> et de l'humidité relative.

Ces capteurs ont enregistré toutes les dix minutes pendant les trois mois d'hiver un ensemble de données relatives à chaque espace. Le résultat est un fichier de quelques milliers de mesures. S'est alors posée la question suivante : comment interpréter ces données et comment les retranscrire de manière à ce qu'elles soient compréhensibles par tous ? Dans un premier temps,

Les données des capteurs nous ont aussi permis de comprendre le comportement climatique de l'enveloppe de l'école, retranscrit ici par cette coupe climatique.



nous avons réalisé des graphiques (exemple ci-contre) auxquels nous avons finalement préféré une coupe thermique (page ci-contre). Cette inscription dans l'espace de l'école améliore la lisibilité tout en offrant un potentiel de communication avec les autres utilisateurs de l'école.

Solstice d'hiver

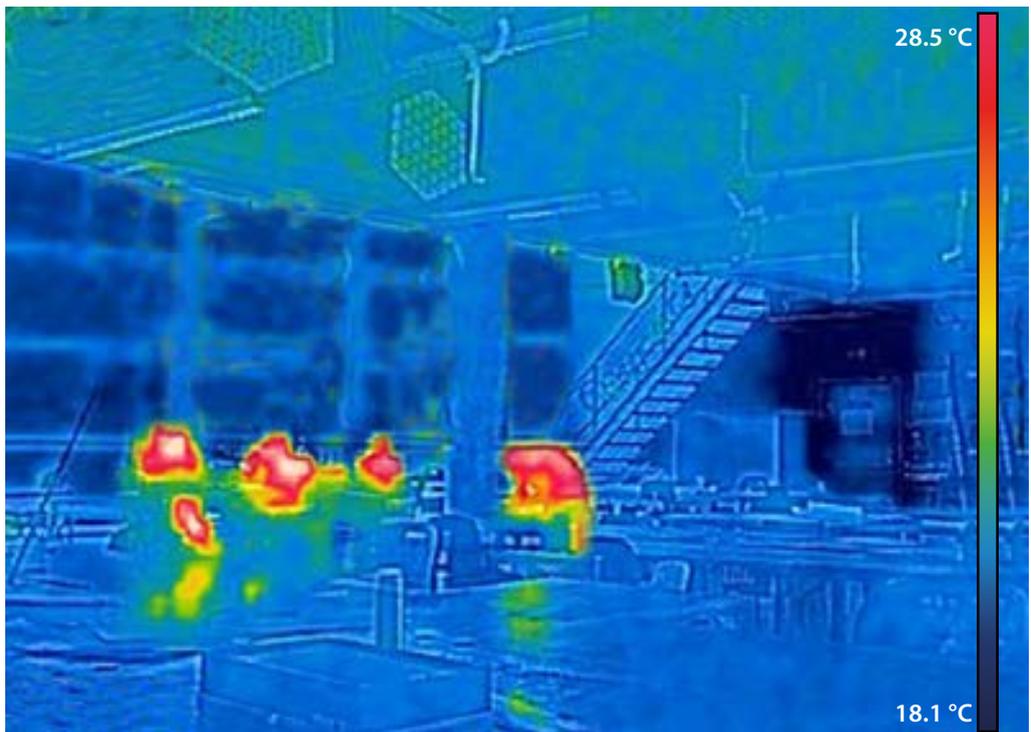


0 1 5m

15 février 2017, 17h30

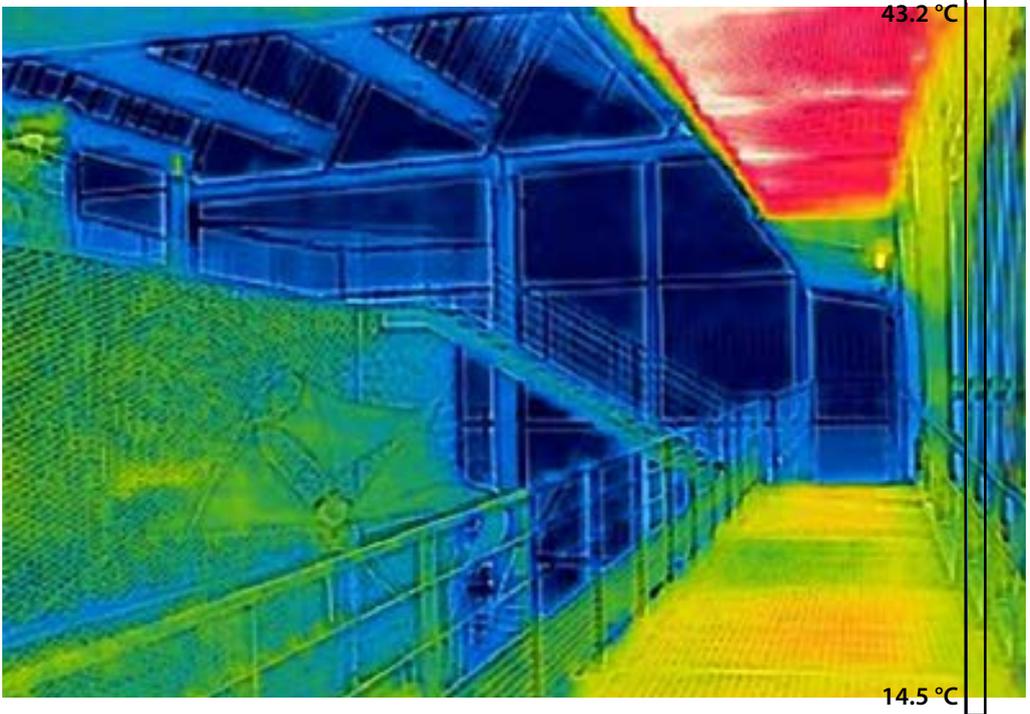
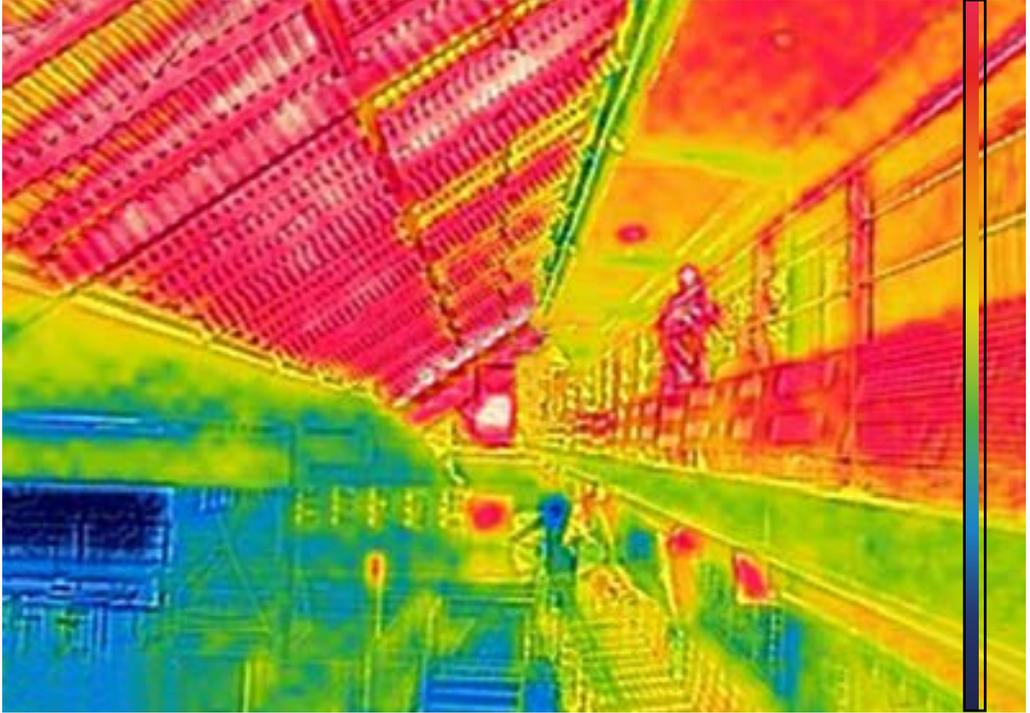


Au nord, les ateliers sont complètement vitrés. Ces façades généreuses apportent une lumière homogène et ouvrent la vue sur les alentours, mais sont cependant très déperditives.





L'atrium, très lumineux est l'un des enjeux majeurs pour la réduction de la facture énergétique.



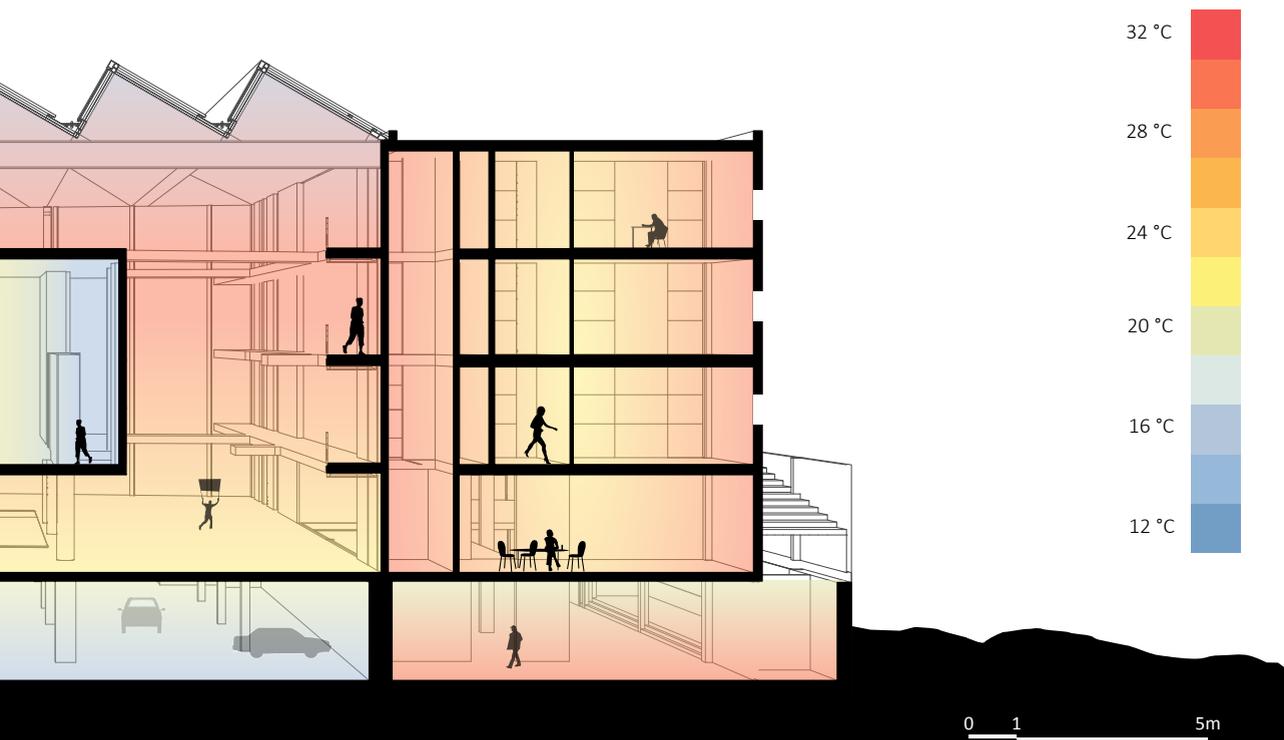


La zone sud : un soubassement abritant la bibliothèque et des bureaux destinés à l'administration dans les étages supérieurs.



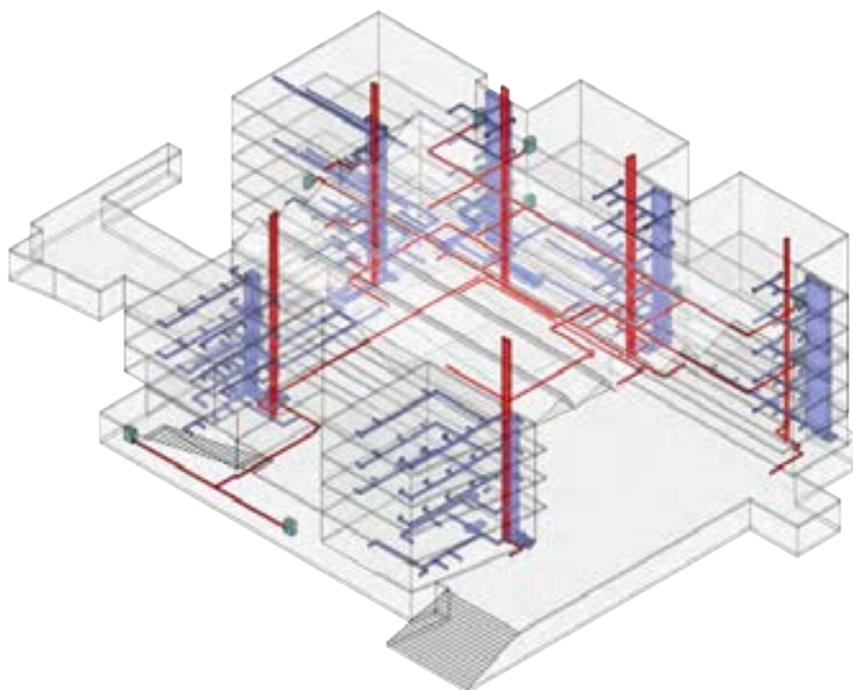
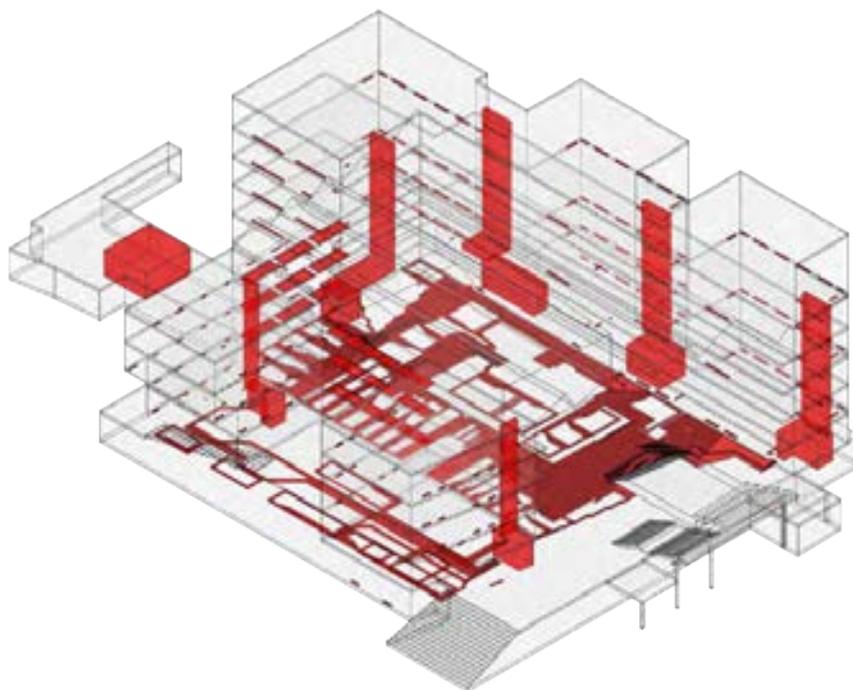


Coupe thermique au 15 février 2017 : les espaces les plus chauds ne correspondent pas aux usages ayant lieux à l'intérieur de l'enveloppe, la répartition des températures est en inadéquation avec le programme.





# **2 Des systèmes actifs**



En haut :  
en rouge le système de la chaufferie, en bleu celui de la  
ventilation.

En bas : le local chaufferie, et ses deux cuves (brûleurs  
gaz)

## **Des systèmes techniques pour palier aux défaillances de l'enveloppe : une chaufferie mal utilisée.**

Nous l'avons vu, l'école d'architecture est un bâtiment iconique dont l'enveloppe présente de nombreux défauts. Il s'appuie alors sur des dispositifs techniques compensatoires afin de ré-équilibrer son climat intérieur et offrir à ses utilisateurs des conditions de confort optimales. Dans le cadre de cette analyse, nous nous sommes donc concentrés sur deux grands systèmes techniques : le chauffage et la ventilation. La climatisation étant réservée à l'amphithéâtre et à la salle des réseaux, nous ne l'avons pas définie comme un objet d'étude incontournable pour la bonne compréhension des comportements énergétiques<sup>1</sup>.

Comme nous pouvons le voir sur l'axonométrie ci-contre, le local principal de la chaufferie est situé en sous-sol, en amont de six sous-stations desservant chacune une zone précise de l'école<sup>2</sup>. Chacune de ces sous-stations innerve l'ensemble des radiateurs sur l'ensemble d'un bloc de l'école. Plus complexe à décrypter, certaines d'entre elles alimentent également les panneaux rayonnants sous les coursives ainsi que les planchers chauffants du hall et de la bibliothèque.

Après une visite technique en compagnie de l'équipe de maintenance, nous avons pu saisir plus concrètement le fonctionnement de ce système. La chaufferie est équipée de deux brûleurs à gaz d'une puissance de 540 kW chacun, fonctionnant la plupart du temps en relais et exceptionnellement en binôme. Une température de consigne est fixée pour l'ensemble de l'école et lorsque la température extérieure passe en-deçà de cette dernière, une cuve se met en route et brûle le gaz pour chauffer de l'eau, laquelle est ensuite diffusée dans l'ensemble de l'école jusqu'aux radiateurs et planchers chauffants.

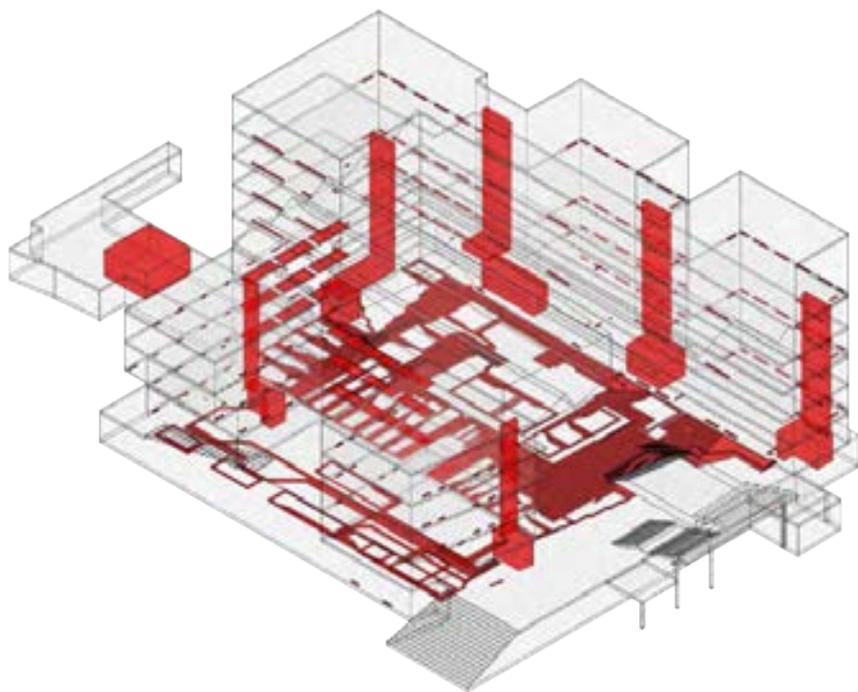
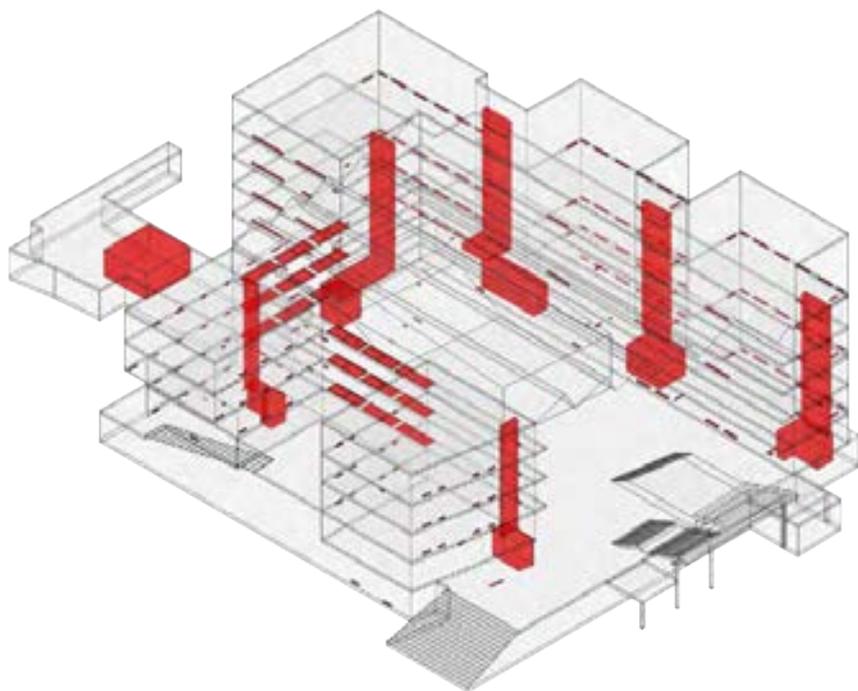
Ce système, présenté de manière simplifiée dans les axonométries de la page qui suit, est un réseau complexe dont il faut gérer les débits, les températures de départ et de sortie, et le phasage (jour/nuit, semaine/week-end). En somme, une programmation est indispensable pour que l'école maintienne une température de confort stable pendant les heures de présence des utilisateurs, et ce tout au long de l'hiver. Cette programmation est sous-traitée à une entreprise extérieure à l'école suivant un principe de gestion technique centralisée (GTC). Cette régulation du climat intérieur ne se fait qu'à partir d'une seule information :

- 1 Pour autant, nous présentons en annexe les données chiffrées des consommations nécessaires à son fonctionnement.
- 2 Cette étude ayant débuté en hiver, nous avons souffert plusieurs jours du froid qui régnait dans l'école à cette période. C'est certainement la raison pour laquelle notre analyse a débuté avec l'étude de la chaufferie.



CHAUDRES  
**Guillot**



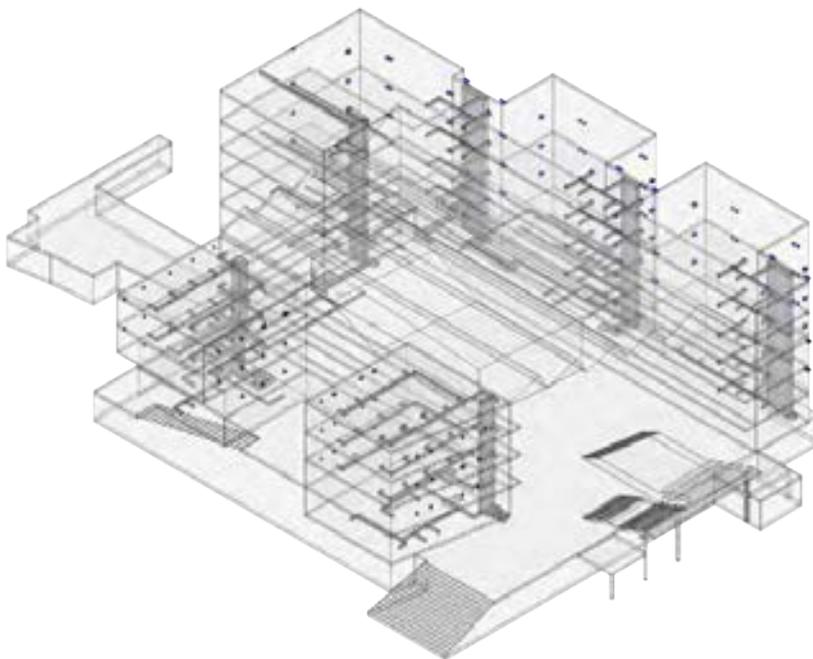


En haut l'axonométrie avec les six-sous-stations et leurs gaines techniques verticales ainsi que les radiateurs à ailettes et les panneaux rayonnants sous coursives.

Planchers chauffants de l'atrium et de la bibliothèque.

la variation de la température extérieure mesurée par une unique sonde située à l'extérieur, au-dessus de la porte du local de chaufferie. Cela ne permet donc pas de rendre compte du comportement thermique au sein de l'école. Plus surprenant encore, nous comprenons qu'un dysfonctionnement de cette sonde entraîne une gestion uniforme par l'entreprise sur l'ensemble du bâtiment, et ce sur demande de la direction ou du service de maintenance. Ainsi, lors du dernier pic de froid au mois de novembre, nous apprenons que la température de sortie a été augmentée par le service technique interne de l'école. Or, cette manipulation est certainement en contradiction avec la programmation externe et nuit au bon fonctionnement du système. De plus, le volume d'air à chauffer est tel qu'il faut compter un minimum de trois jours avant de voir la température interne atteindre la température de consigne, moment où la température extérieure finit par remonter.

Nous pouvons entrevoir ici de nouveaux désordres, venant ainsi s'ajouter à ceux de l'enveloppe au lieu de les atténuer. Nous allons maintenant essayer d'entrer plus en profondeur dans ce dédale de circuits afin d'en proposer une analyse aussi exhaustive que possible.



En haut :  
Les entrées d'air en façade et le réseau d'extraction.

En bas : deux exemples de bouches d'extractions non-entretenues (dans un faux-plafond de l'administration et dans un atelier nord).

## **Des systèmes techniques pour palier aux défaillances de l'enveloppe : une ventilation mécanique non-contrôlée.**

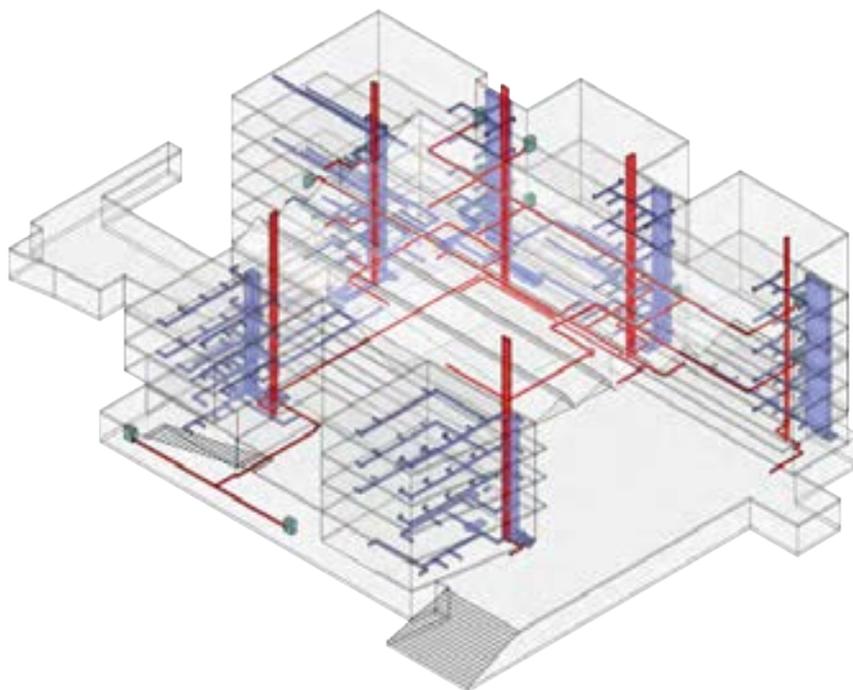
En grande partie responsable de la qualité de l'air intérieur, le système de ventilation joue un rôle prépondérant dans la recherche de conditions de confort aéraulique. Souvent reléguée au deuxième plan derrière le chauffage, la ventilation est pourtant un acteur indispensable de l'équilibre hygrothermique dans un bâtiment. Inchangés depuis l'arrêté du 24 mars 1982, les débits réglementaires pour la ventilation font office de garde-fou en respectant des minimums sanitaires (18 m<sup>3</sup>/h/pers.). Dans de nombreux pays du nord de l'Europe, face à la priorité donnée à l'isolation des constructions, les débits de ventilation réglementaires ont été augmentés, parfois même doublés lors de la dernière décennie.

Dans cette école construite en 1998, les seules entrées d'air neuf prévues depuis l'extérieur provenaient des fuites induites par les défauts d'étanchéité des menuiseries et par les prises d'air des ventilo-convecteurs. Nous l'avons vu précédemment, ces derniers sont inactifs et ne jouent donc pas leur rôle pour le renouvellement d'air. De plus, les bouches d'extractions devant aspirer l'air vicié pour l'extraire en toiture sont dans la majorité des cas bouchées et fonctionnent donc en sous-régime. D'après nos mesures (anémomètre à fil chaud et anémomètre à hélice), la vitesse moyenne de l'air au niveau de ces bouches d'extraction est de 0,1 m/s. Ce résultat, très faible, nous a motivé à faire quelques calculs complémentaires qui nous ont conduit à la conclusion suivante : dans les conditions de renouvellement d'air actuelles, la réglementation ne permet pas d'accueillir plus de 14 étudiants par atelier (voir détail en annexe).

Autre indicateur fort, la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air intérieur a fait l'objet d'une attention toute particulière. Toujours à l'aide de capteurs mais également grâce à un détecteur de CO<sub>2</sub> calibré, nous avons vérifié les concentrations dans chaque local en fonction des périodes et des taux d'occupation. Une fois de plus, les données révèlent de sérieux problèmes concernant la qualité de l'air dans l'école - problème aggravé dans les derniers étages. La coupe page 40 représente les taux de concentration en CO<sub>2</sub> tôt le matin, lorsqu'elle n'a donc pas encore été utilisée.

NB : la concentration en CO<sub>2</sub> est évaluée en parties par million (ppm), elle représente un pourcentage révélateur d'une qualité de l'air plus ou moins bonne. Les autres indicateurs (NO<sub>x</sub>, CO, CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, etc.) n'ont pas pu être évalués faute de capteurs adaptés. Cependant, d'après nos recherches<sup>1</sup>, le CO<sub>2</sub> est l'un des meilleurs indicateurs de la qualité générale de l'air. En effet, si cette concentration est élevée, il est possible d'en déduire que d'autres polluants sont présents dans l'espace (surtout dans les écoles d'architecture où les colles émettent des formaldéhydes).

1 D'après energieplus-lesite.be



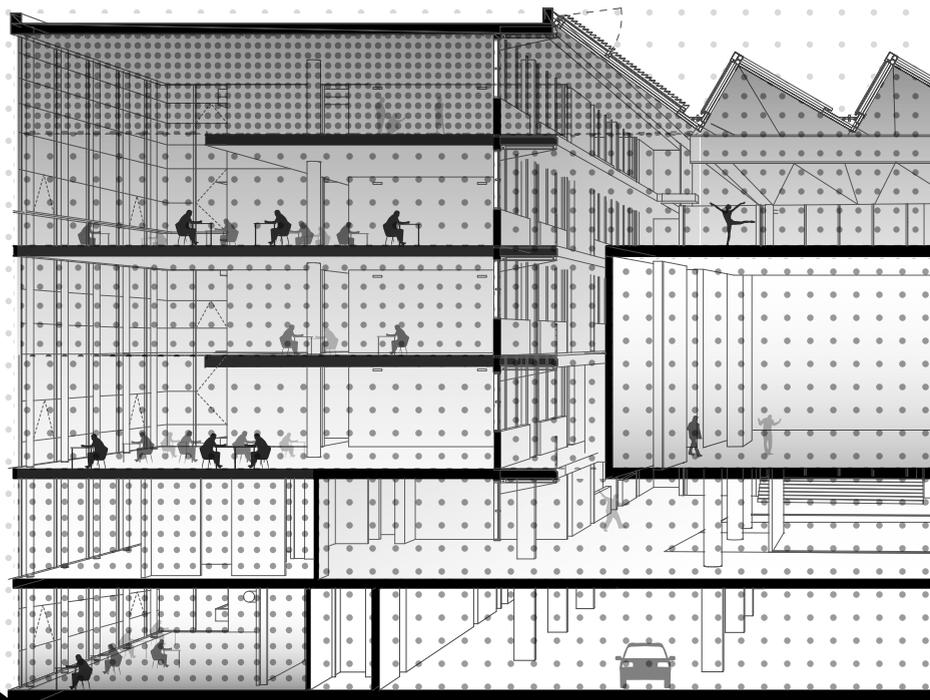
En haut : En rouge, le réseau d'eau chaude alimentant les ventilo-convecteurs. En bleu, le réseau et les bouches d'extraction d'air.

En bas : un exemple de ventilo-convecteur inactif dans un atelier nord.

Un système de ventilo-convecteurs a été installé dans les ateliers nord de l'école. Situés au-dessus des issues de secours (photographie ci-contre), ils puisent l'air neuf à l'extérieur par l'embrasure des portes, le préchauffe grâce à un réseau d'eau chaude avant de le renvoyer dans les ateliers. Théoriquement, cet air préchauffé brasse l'air intérieur et uniformise la température de l'air ambiant. Malheureusement, ces derniers ne fonctionnent plus depuis longtemps. Des réparations sont prévues par l'entreprise SPIE, nouveau gestionnaire de la maintenance de l'école depuis novembre 2016<sup>3</sup>.

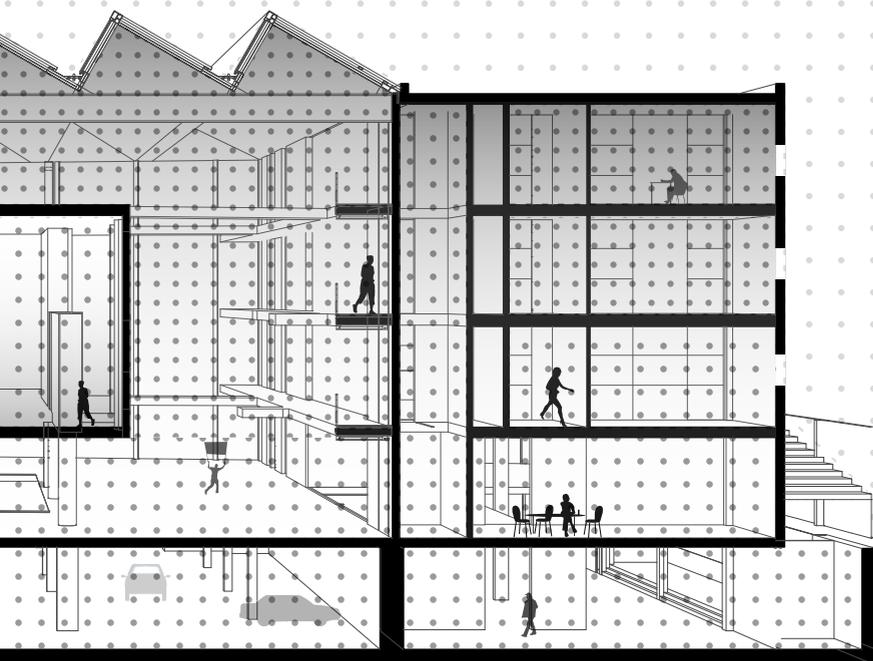
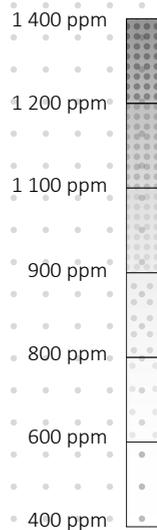
Sur-dimensionné car prévu initialement pour une école deux fois plus grande, le système de chauffage est donc considérablement défaillant. Le sujet le plus étrange reste celui de la programmation : pourquoi une école dotée de six sous-stations de chauffage ne possède-t-elle pas de programmation spécifique pour chacune de ces dernières ? Pourquoi continue-t-on à chauffer de la même manière les petits bureaux orientés au sud et les grands ateliers exposés nord ? Il nous semble urgent de traiter ce sujet, non seulement dans le but de faire des économies mais également dans un souci de cohérence par rapport aux systèmes mis en place initialement. Dans le chapitre suivant, nous verrons quelles solutions peuvent être opérationnelles dès l'hiver prochain.

3 Nous n'avons pas réussi à savoir pourquoi l'ensemble de ces ventilo-convecteurs est aujourd'hui inactif, ni depuis quand.



Conséquences sur la qualité de l'air.

Des espaces non-conformes à la réglementation lorsque l'air extérieur est particulièrement sain (environ 400ppm). Des déséquilibres entre les étages et entre les blocs nord, sud et l'atrium.



0 1 5m



# **3** De l'influence du facteur comportemental



## Comportement des utilisateurs face à l'inconfort

*« La conscience collective, bien que largement convaincue de la nécessité d'inventer de nouveaux comportements en matière d'usage de l'énergie, semble à la fois paralysée et irrésolue. »<sup>1</sup>*

Nous avons donc étudié les comportements de l'enveloppe ainsi que celui des systèmes. Le troisième élément de ce triptyque est le comportement des utilisateurs. Afin de comprendre son influence, nous avons réalisé un reportage photographique qui met en exergue les initiatives prises par les utilisateurs afin de pallier aux dysfonctionnements de l'enveloppe et des systèmes.

1 Extrait de définition du mot énergie, *Dictionnaire de la pensée écologique*, sous la direction de D. Bourg, A. Papaux, Ed PUF, 2015.





En période chaude, pour essayer d'apporter de la fraîcheur dans l'atrium, les étudiants ouvrent les issues de secours.

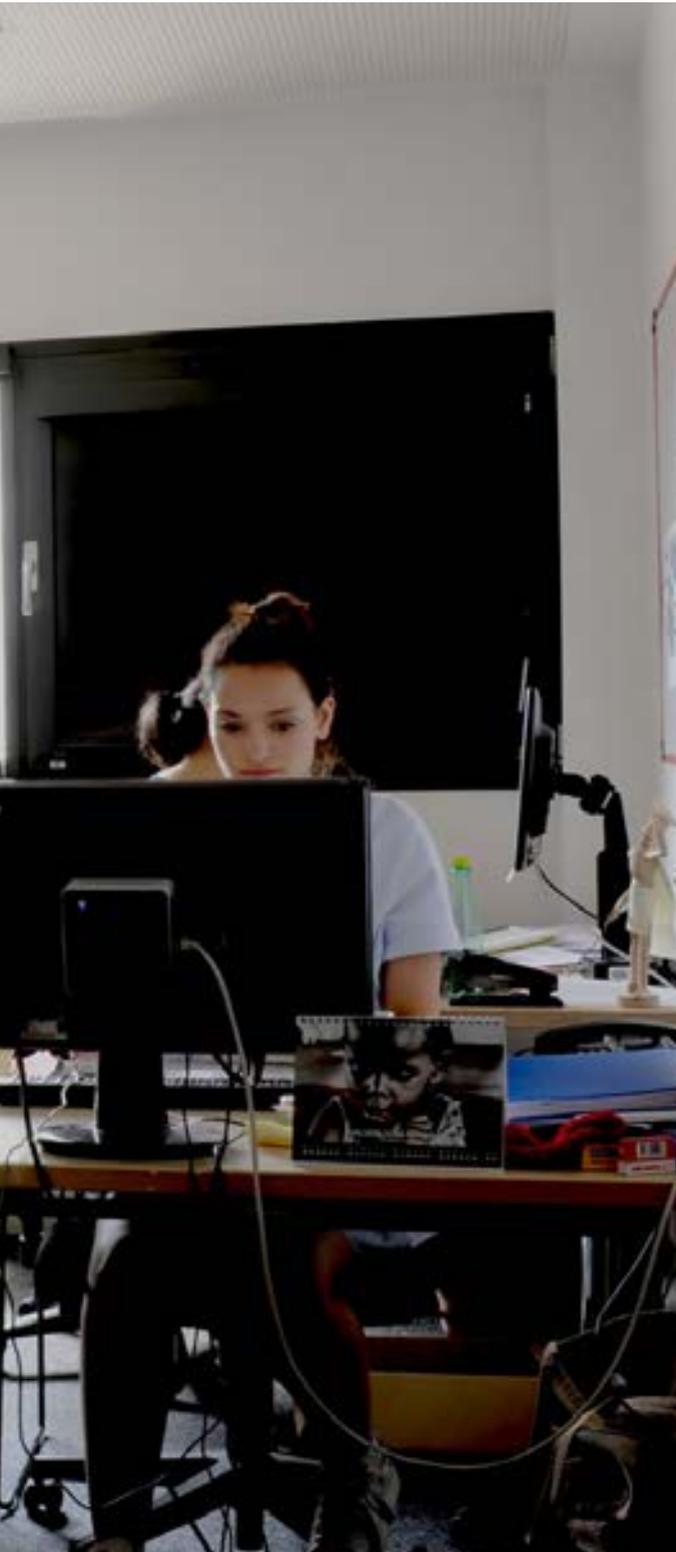




Dans les ateliers, les concentrations en CO<sub>2</sub> peuvent être très élevées. Pour pallier aux pathologies du système de ventilation de l'école, les utilisateurs ouvrent les issues de secours.

Les escaliers de secours sont aussi les seuls espaces extérieurs accessibles depuis les étages et sont donc appropriés par les fumeurs.





Pendant les périodes chaudes, les stores intérieurs, en tissu noir, concentrent les rayonnements solaires et créent une zone de surchauffe entre le vitrage et le store. Les usagers de l'administration utilisent pour s'en protéger des moyens artisanaux, comme des morceaux de carton blanc, et installent des ventilateurs d'appoint afin de créer un maximum de mouvements d'air.





Dans les blocs sud, les surchauffes sont constantes et le personnel utilise, pour tenter d'y palier, des moyens artisanaux.



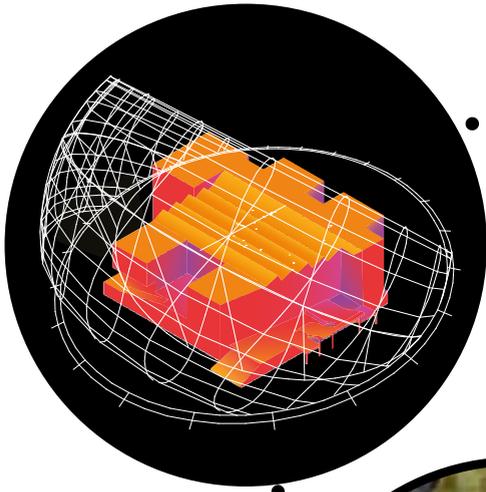


Les ateliers sont des espaces généreux et lumineux. Cependant, il y a des problèmes de cohabitation entre les différents usages, qui en raison d'une mauvaise acoustique, se gênent les uns les autres.

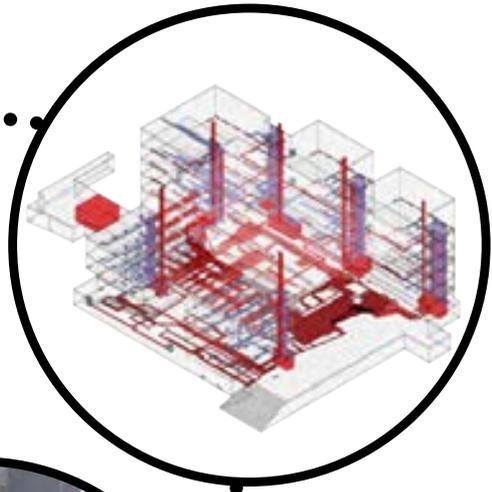




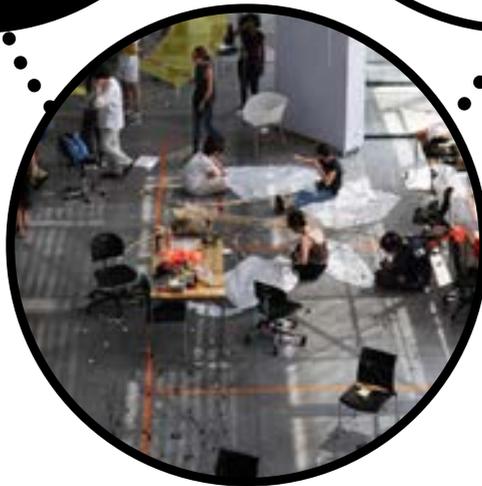
Dans les ateliers de master, les étudiants aménagent leur propre espace de travail individuel afin de pouvoir travailler dans les conditions de confort les plus appropriées. Ils se fabriquent notamment des zones d'affichage individuel, se protègent de la lumière rasante de l'ouest (rideaux) et utilisent l'espace le plus sombre de la salle pour entreposer et stocker l'ensemble de leur matériel à maquette.



**Enveloppe**



**Systemes**



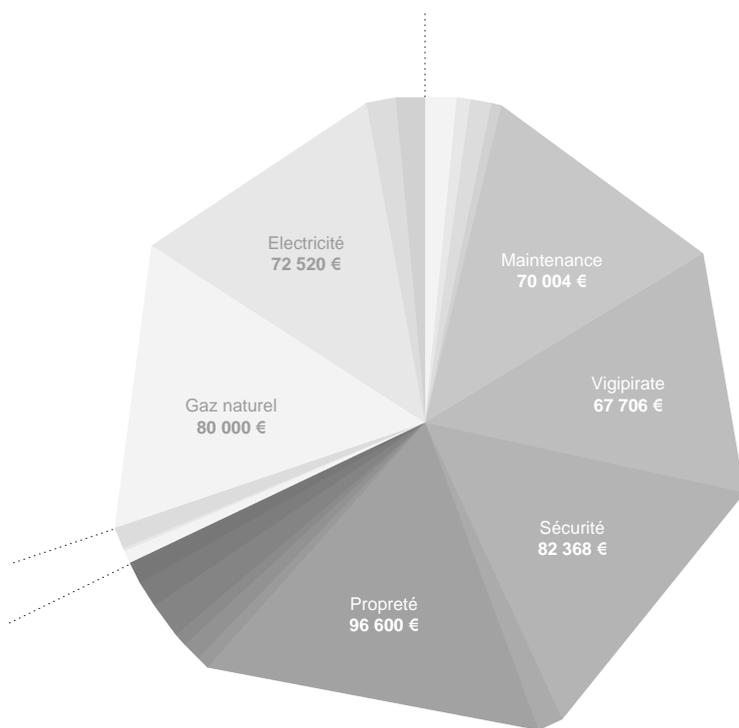
**Utilisateurs**

## **Conclusion de l'analyse et logique d'intervention**

L'analyse nous a montré que les surconsommations de l'école sont en étroite corrélation avec des conditions de confort peu satisfaisantes, et souvent inégales selon les blocs.

Les trois entités que nous avons étudiées possèdent certaines défaillances, d'une part dans leurs réglages et leur fonctionnement, et d'autre part dans les relations qu'elles entretiennent entre elles.

Ce «ménage à trois» n'appelle donc pas à être complexifié, par exemple par l'ajout d'une quatrième entité afin de tenter de résoudre les différentes problématiques soulevées, mais plutôt à être dénoué. Il s'agit ainsi de comprendre les interactions entre les éléments, et de tenter de les rendre le plus efficace possible. Nous proposons donc de travailler sur le rapport des trois entités entre elles.



## Conclusion de l'analyse

Les deux systèmes majeurs de chaufferie et de ventilation sont très défaillants alors même qu'ils sont les garants de la qualité de l'air et de la température intérieure. Loin d'être obsolètes, ils nécessitent simplement d'être analysés, compris et entretenus régulièrement afin qu'ils puissent retrouver leur fonction initiale. Aujourd'hui, dans l'état actuel des installations, les factures d'électricité pour la ventilation et de gaz pour le chauffage sont conséquentes mais aucune action n'est mise en œuvre afin de les réduire.

Les factures de l'ensemble des frais de fonctionnement illustrent très bien la préoccupation de la direction. En effet, 1/3 du budget de l'école est affecté à l'énergie. Au-delà des préoccupations d'ordre économique, cela induit également des conséquences néfastes pour l'environnement à l'orée d'une loi de transition énergétique pour la croissance verte<sup>1</sup>:

### Électricité :

700 000 kWh E<sub>p</sub>/an = 1 806 000 kWh E<sub>p</sub>/an = 162 t CO<sub>2</sub>/an

### Gaz :

1 000 000 kWh E<sub>p</sub>/an = 1 000 000 kWh E<sub>p</sub>/an = 552 t Co<sub>2</sub>/an

Nous avons donc vu que les systèmes techniques censés compenser les défauts de l'enveloppe contribuent surtout à exacerber les déséquilibres dont le coût n'est plus acceptable. Comment les utilisateurs s'organisent-ils pour palier à ce niveau d'inconfort variable et imprévisible ?

1 « La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) publiée au Journal Officiel du 18 août 2015, ainsi que les plans d'action qui l'accompagnent visent à permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et à la préservation de l'environnement, ainsi que de renforcer son indépendance énergétique tout en offrant à ses entreprises et ses citoyens l'accès à l'énergie à un coût compétitif. » Ministère de la transition écologique et solidaire.



Le comportement des utilisateurs a évidemment un rôle indéniable dans le bilan énergétique de l'école. Malgré cela, nous avons réalisé certains calculs (en annexe) qui démontrent que certaines actions entreprises ne sont finalement pas à poursuivre. Par exemple, nous avons remarqué que les spots lumineux dans les grands ateliers restent très souvent allumés la nuit alors que les ateliers sont vides. Après une rapide vérification, l'impact de la consommation électrique pour l'ensemble de l'éclairage des ateliers ne représente que 1.000 €/an ! Comme le résumait assez bien David MacKay dans son brillant ouvrage, *L'énergie durable, pas que du vent* :

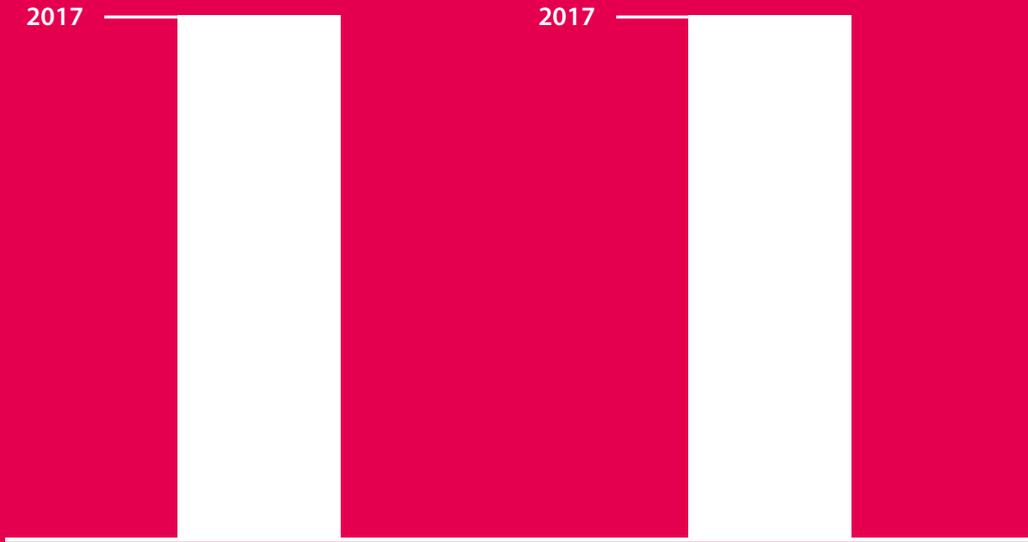
« Ne vous laissez pas distraire par le mythe selon lequel chaque petit geste compte. Si tout le monde fait un peu, nous n'accomplirons qu'un peu. Nous devons faire beaucoup. »

En effet, chaque comportement joue un rôle très différent, à son échelle, dans le bilan énergétique final. L'enveloppe premièrement est la première coupable de ces factures coûteuses. Il serait pourtant inutile voire ridicule de condamner aujourd'hui Bernard Tschumi pour cette conception. Certes, ce bâtiment est déconnecté des problématiques environnementales mais il a le mérite d'être généreux et d'offrir de nombreux avantages aux utilisateurs qui le pratiquent.

En revanche, lorsqu'on s'intéresse de près aux systèmes qui le composent, il y a de quoi s'alarmer. Par exemple, l'entreprise de gestion à distance de la chaufferie se révèle peu scrupuleuse des consommations de l'école. S'il s'agit de passer à 25 °C le plancher d'un atrium de 1 000 m<sup>2</sup> non isolé, aucune alarme n'est sonnée, quel qu'en soit le coût à la fin de l'hiver. Du fait de la méconnaissance technique des systèmes, beaucoup d'entreprises agissent ainsi à l'heure actuelle. Notre démarche essaie donc d'aller à contre-courant de ces habitudes. Plutôt que d'ajouter un degré de désordre supplémentaire en continuant à complexifier le bâtiment, nous décidons de faire marche-arrière. Nous proposons d'ajuster, de régler et finalement d'optimiser ce système afin, nous l'espérons, d'en permettre une utilisation optimale. L'école n'a pas été mal conçue, ses systèmes techniques sont encore en état de fonctionner et les utilisateurs sont les premiers intéressés par ce changement : il est donc temps d'agir !

Pour des questions de réalité économique et de niveau d'urgence, les projets qui suivent sont organisés par ordre chronologique, de l'action à mener à court terme vers celle possible à moyen et long terme.

Bilan des énergies consommées,  
émissions de gaz à effet de serre,  
et capacité d'accueil dans l'école aujourd'hui.



Energie consommée



Emissions de GES





Capacité d'accueil





# B

## **Des solutions concrètes** Trois temporalités

- 1 Des réglages du système  
à court terme**
- 2 Des aménagements intérieurs  
à moyen terme**
- 3 Une modification raisonnée  
de l'enveloppe à long terme**

**Court terme**

**Moyen terme**

**Long terme**



## **Des solutions organisées dans le court, moyen et long terme**

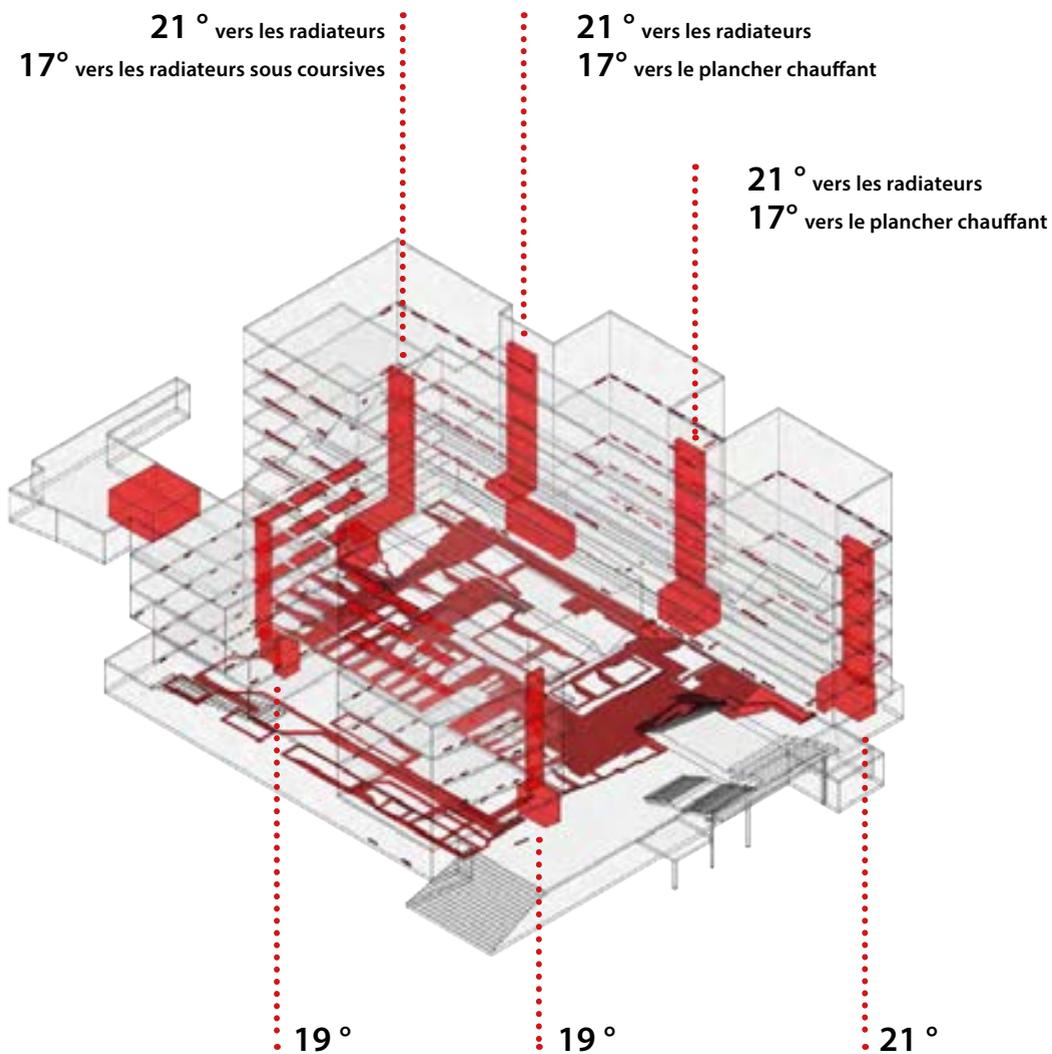
Dans un souci d'action et dans une volonté de permettre une meilleure faisabilité des solutions apportées par notre commanditaire, nous avons organisé le projet de transition énergétique de l'école selon trois temporalités.

Le court terme est composé des actions pouvant être menées presque immédiatement et aboutissant à des améliorations de confort et des économies pour l'hiver prochain. Les actions à moyen terme peuvent être réalisées dans les deux prochaines années pour permettre d'améliorer le confort de travail et la capacité d'accueil de l'école. Et enfin, nous avons placé les modifications de l'enveloppe, nécessitant de faire appel à une maîtrise d'œuvre complète, dans le long terme, à l'échelle du plan quinquennale.

Dans ce sujet complexe qui nous a été donné nous avons axé la synthèse en donnant la priorité à l'action pour agir rapidement sur ce sujet crucial pour l'école aujourd'hui.



# **1** Des réglages du système à court terme



En haut : Des températures spécifiques pour chaque sous station

## Pour un hiver 2018 plus confortable et moins coûteux.

L'analyse du comportement de l'enveloppe l'a démontré : les températures de consigne dans l'atrium, dans les ateliers nord et dans les bureaux au sud ne peuvent pas et ne doivent pas être identiques comme c'est le cas aujourd'hui. Bénéficiant des apports solaires du sud, d'une façade isolée et de volumes compacts, les bureaux de l'administration ont des besoins de chauffage nettement inférieurs à ceux des ateliers au nord. Le climat n'étant bien entendu pas une science exacte, il faut prévoir des écarts de températures exceptionnels à chaque saison. Nous avons considéré que, dans le cas d'un écart d'un ou deux degrés en hiver, les utilisateurs pourraient se servir de la méthode la plus ancestrale qu'il soit : le pull-over !

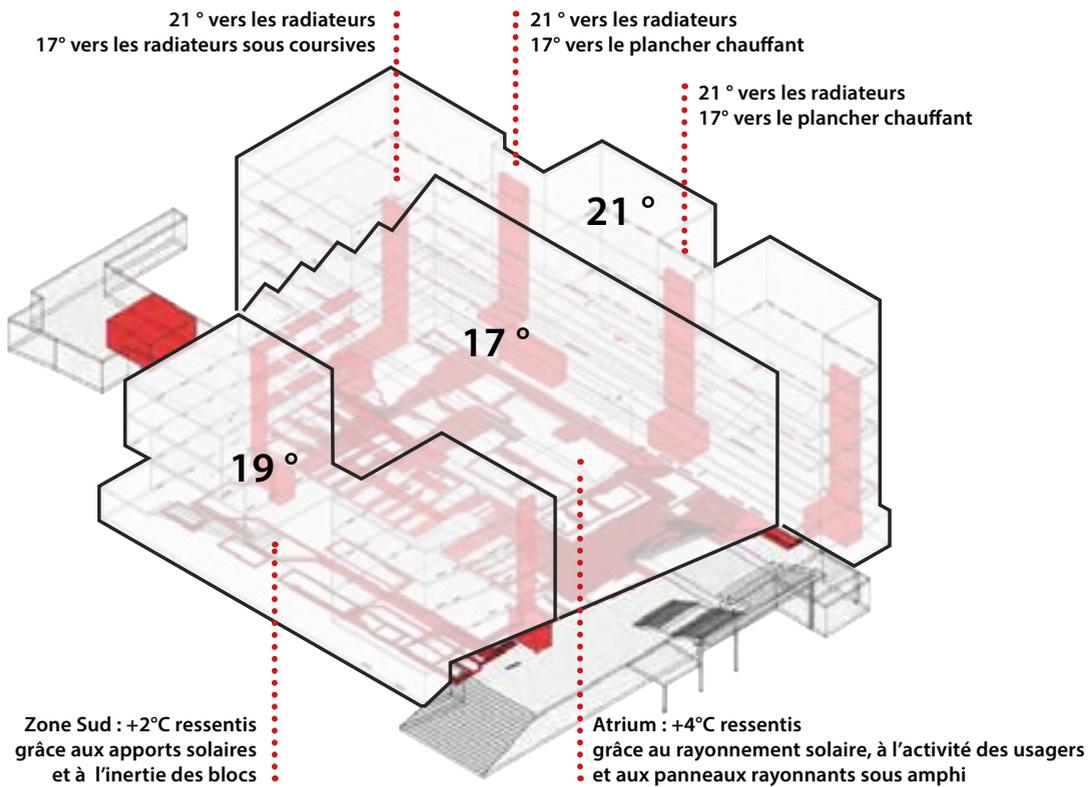
Les températures affichées sur l'axonométrie ci-contre sont des températures de consigne. En aucun cas, elles ne représentent la température opérative de chacun. Cette dernière se calcule en faisant une moyenne de la température de l'air et des températures de rayonnement des parois autour de nous (image ci-contre). Elle dépend également de notre niveau d'activité. En effet, une personne en mouvement brûle des calories et dégage de la chaleur. Cette personne a donc moins besoin d'apports en chauffage qu'une autre personne assise devant un ordinateur par exemple. Les différences culturelles, morphologiques et de sexe jouent également un rôle important dans la perception du confort hygrothermique mais ne feront pas l'objet d'une recherche approfondie dans cette étude. Pour ce qui est du cas bien particulier de l'atrium, soumis à une multitude de facteurs fluctuants, il sera traité à plus long terme dans un véritable projet de transformation de l'enveloppe.

Avec l'aide de Mathieu Bourdeau, ingénieur de l'ESIEE, nous avons réussi à quantifier les baisses de température à réaliser entre les différentes sous-stations, afin d'adapter les températures de consignes à chaque bloc. Pour cela, un modèle précis a été créé, mettant en perspective les températures intérieures (grâce aux capteurs installés) et la température moyenne à l'extérieur. Cet ensemble de données a permis d'établir le rapport suivant :

Il faut 600 kWh de gaz pour compenser 1 DJU.<sup>1</sup>

	T moy test(°C)	T moy réel (°C)	DIJU Test (°C)	DIJU réel (°C)	kWh/DIJU	kWh Gaz	kWh Gaz Réel	Economie
janv.-17	<b>21,1</b>	21,1	<b>275</b>	275	<b>909</b>	<b>249 709</b>	249 709	-
févr.-17	<b>19,4</b>	23,1	<b>346</b>	449	<b>600</b>	<b>207 773</b>	269 280	<b>61 507</b>
mars-17	<b>23,1</b>	18,5	<b>57</b>	57	-	-	-	-

1 Degré jour unifié : quantifie l'écart entre la température extérieure et la température intérieure, ce delta de température est la quantité de degrés à compenser par du chauffage en hiver ou de la climatisation en été.



Sous réserve que les réglages recommandés soient réalisables, que l'installation soit fonctionnelle et qu'une gestion unique des températures de consigne puisse se faire, les résultats ci-contre présentent le bilan énergétique potentiel. D'un intérêt économique certain, nous pouvons également nous réjouir des économies d'énergie et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre possibles.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), fixe les objectifs suivants pour 2030 :

- **réduction de 20 % de la consommation en énergie finale** (-50% en 2050) ;
- réduction de 30 % de la consommation en énergie primaire ;
- **réduction de 40 % des émissions de gaz à effet de serre** (-75% en 2050) ;
- augmentation de 32 % de la part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique (+23 % en 2020).

Actuellement, la consommation moyenne en énergie finale pour le chauffage est de 120 000 kWh / mois<sup>2</sup>. Avec les nouveaux réglages et pour une température extérieure de 10 °C, cette moyenne s'abaisserait à 84 000 kWh / mois, soit une réduction d'environ 30 %. Cette économie d'énergie dépasserait donc les objectifs fixés par la LTECV. Quant aux émissions de GES<sup>3</sup>, elles atteindraient presque les réductions demandées. Avec un objectif à -11,2 tCO<sub>2</sub>, nous nous approchons des 40 % sans les atteindre.

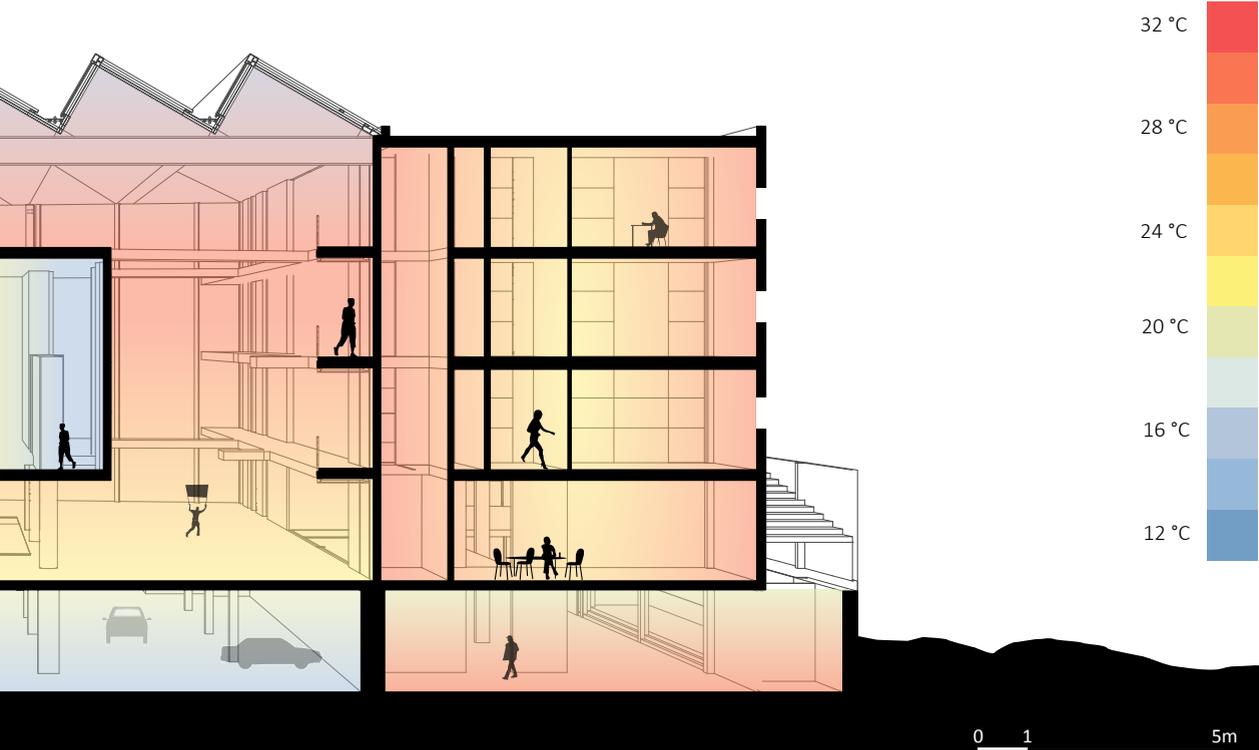
Il est tout de même intéressant de remarquer que les efforts réalisés dans une optique économique parviennent également à réduire l'impact environnemental de l'école. Ces pistes d'amélioration ne dépendant que du système de chauffage, il faut également s'assurer que le système de ventilation sera lui aussi optimisé.

2 Voir détail en annexe page 168.

3 Gaz à effet de serre.



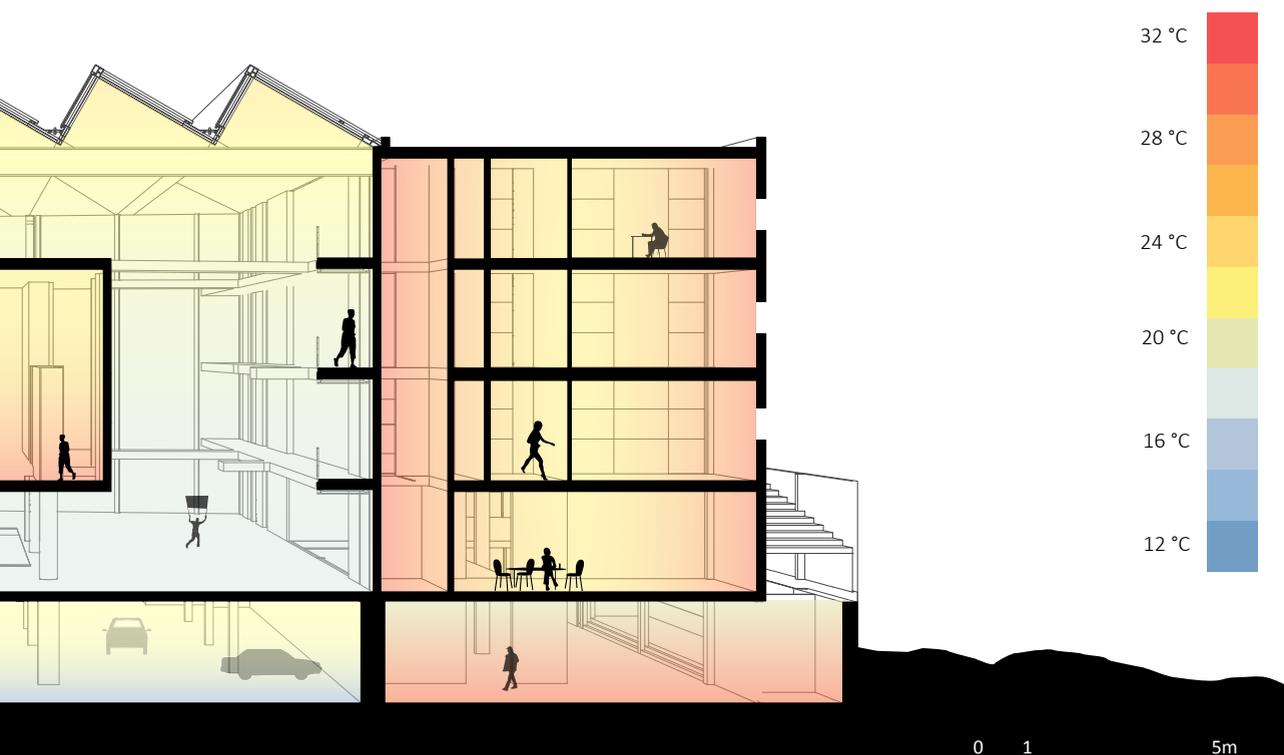
Coupe thermique au 15 février 2017 : les espaces les plus chauds ne correspondent pas aux usages ayant lieu à l'intérieur de l'enveloppe, la répartition des températures est en inadéquation avec le programme.

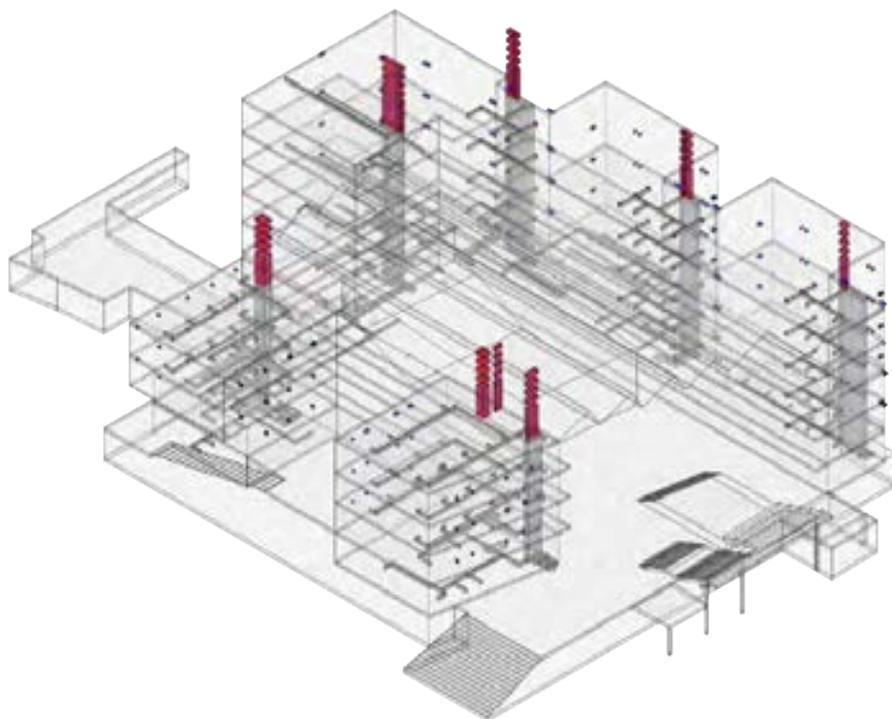




Coupe thermique idéale au 15 février 2018 : les espaces les plus chauds correspondent dorénavant aux espaces d'activité réduite (travail sur ordinateur)

NB : ce projet constitue une étape dans les solutions, l'atrium ne peut pas resté « froid » mais le projet d'aménagement du rez-de-chaussée actif demande plus d'investissement et sera donc étudié plus tardivement.





**0,3 m/s** à assurer

## Pour un air plus sain dans l'ensemble des locaux

Bien que moins influente dans le bilan énergétique de l'école, la ventilation constitue 1/3 du talon de la consommation électrique mensuelle<sup>1</sup>. Au vu du mix énergétique français, même si ce poste ne coûte pas très cher à l'école, la consommation en énergie primaire qu'il induit le rapproche des consommations de gaz<sup>2</sup>. En effet, le ratio entre énergie primaire et énergie finale pour l'électricité est de 2,58 en France, contre 1 pour le gaz. Ainsi, le talon de consommations en électricité que représente la ventilation, soit 98 000 kWh EF, représente près de 100 000 kWh en énergie primaire, soit l'équivalent des consommations moyennes mensuelles de gaz.

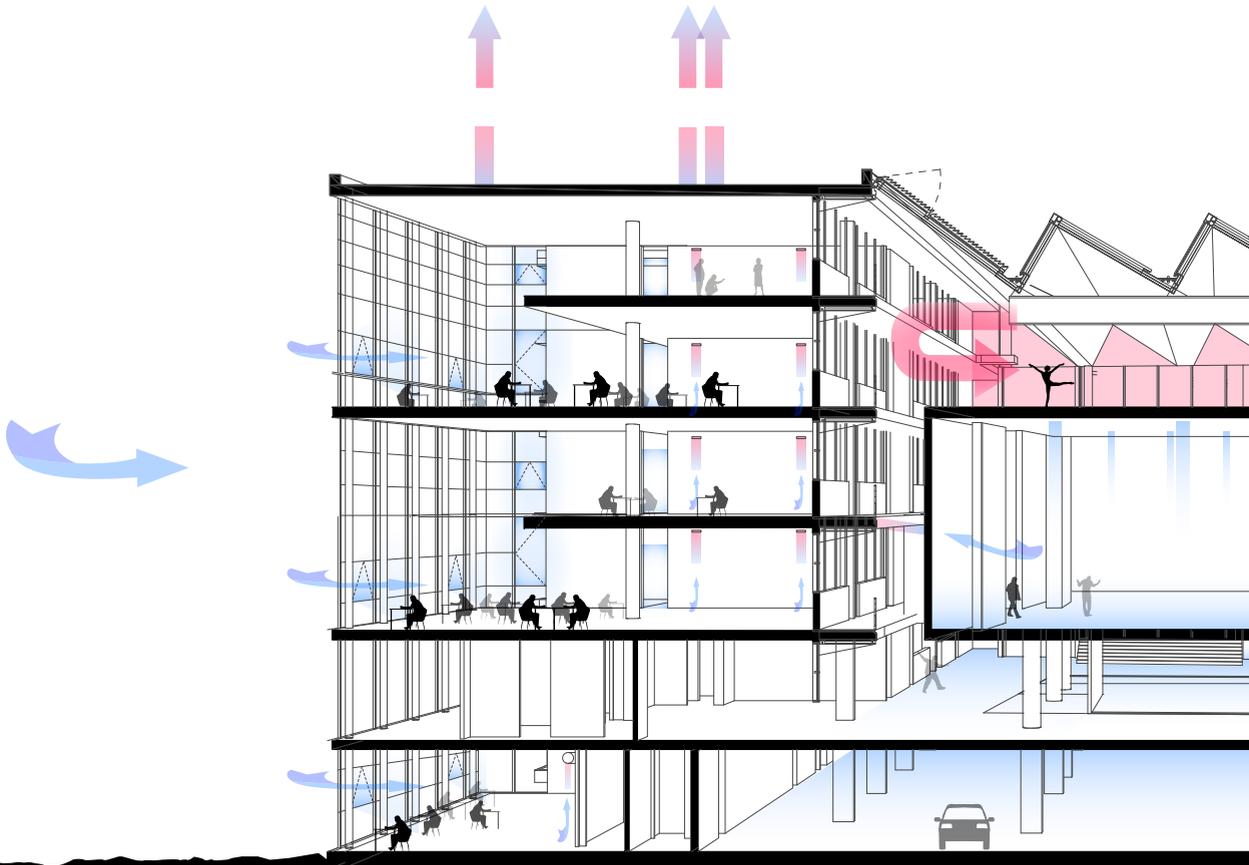
Au delà des aspects économiques, la ventilation contribue grandement au confort et à l'inconfort des usagers. Nous l'avons remarqué avec les ppm (cf page 35) mais également à l'aide d'une rapide étude sociologique. Certains étudiants et professeurs se trouvent dans l'impossibilité de rester dans certaines pièces plus d'une heure, souffrant alors de gênes respiratoires voire d'asthme. Nous l'avons vu avec le diagramme de confort aéraulique, la zone de confort à respecter pour la qualité de l'air est très sensible. La moindre colle en bombe utilisée dans les espaces d'atelier peut nuire à l'ensemble des utilisateurs sur toute une journée (c'est justement pour cela que les portes de secours sont souvent ouvertes). Tant que le système de ventilation ne sera pas révisé, ces problèmes persisteront.

Après avoir vérifié l'ensemble de l'installation, voici les préconisations que nous souhaitons soumettre à l'équipe d'entretien et de maintenance de l'école, à effectuer dans cet ordre :

- En priorité, nettoyage des bouches d'extraction (grilles et tubes) . Un contrôle technique a été effectué par SOCOTEC l'an dernier mais il ne s'intéressait qu'à l'amphithéâtre et à l'atelier maquette (zones dites « à risque »). Il s'agit donc de réaliser ce même contrôle précis sur l'ensemble des locaux. Chaque gaine doit être ouverte afin d'être nettoyée (l'entrée d'air extérieur pour l'amphithéâtre 130 est par exemple encrassée depuis des années).
- Augmentation des débits d'extraction de 0,1 m/s à 0,3 m/s. Une fois ces vérifications effectuées, si les vitesses de renouvellement d'air n'augmentent pas naturellement, il s'agira de les augmenter au niveau des caissons des moteurs (en sous-sol). Nous recommandons d'atteindre à minima les 18 m<sup>3</sup>/h/pers. et si possible les 35 m<sup>3</sup>/h/pers. recommandés aujourd'hui.

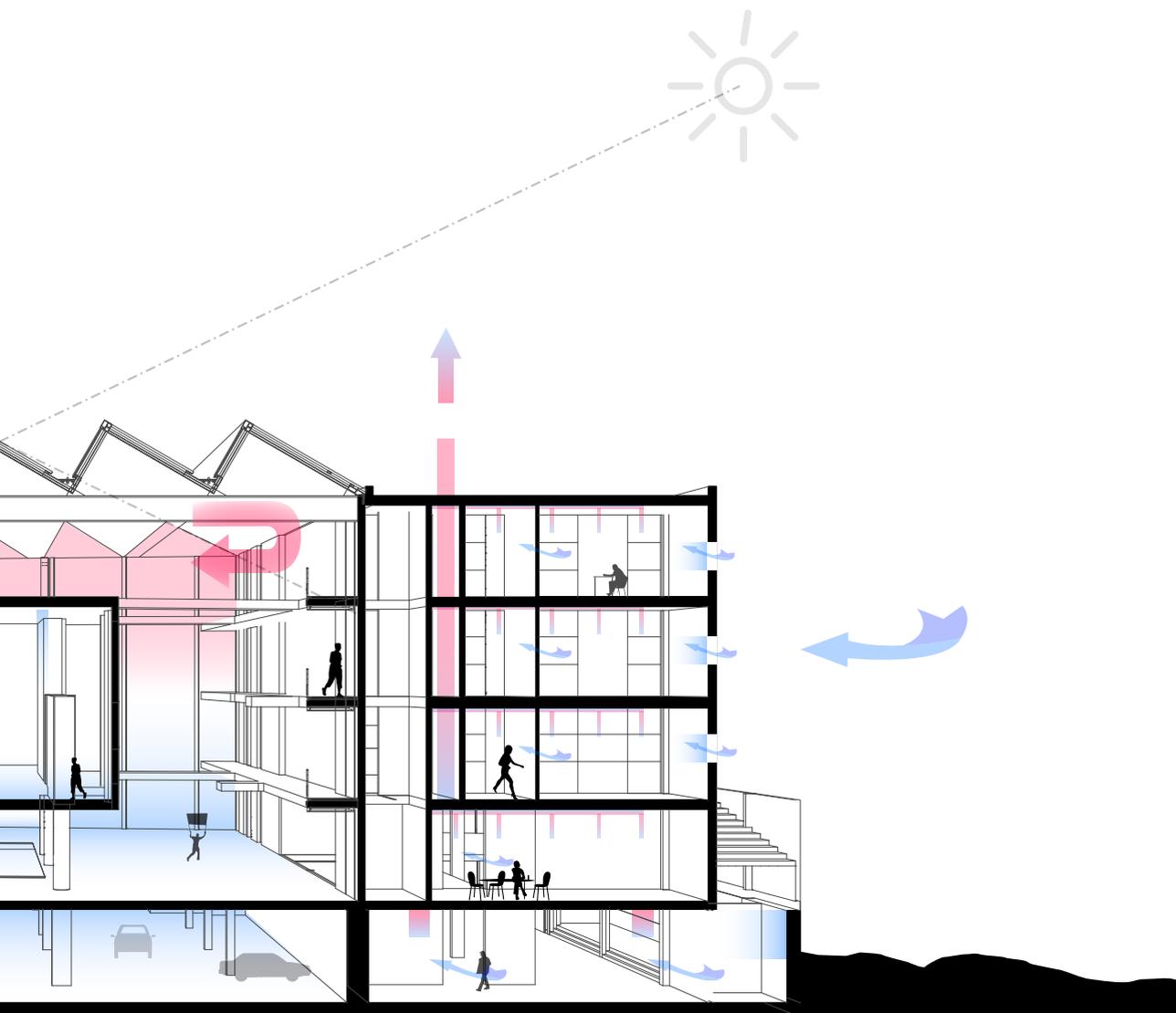
1 Voir détail en annexe page 177

2 Ratio considéré :  $E_p = 2,58 \times E_f$

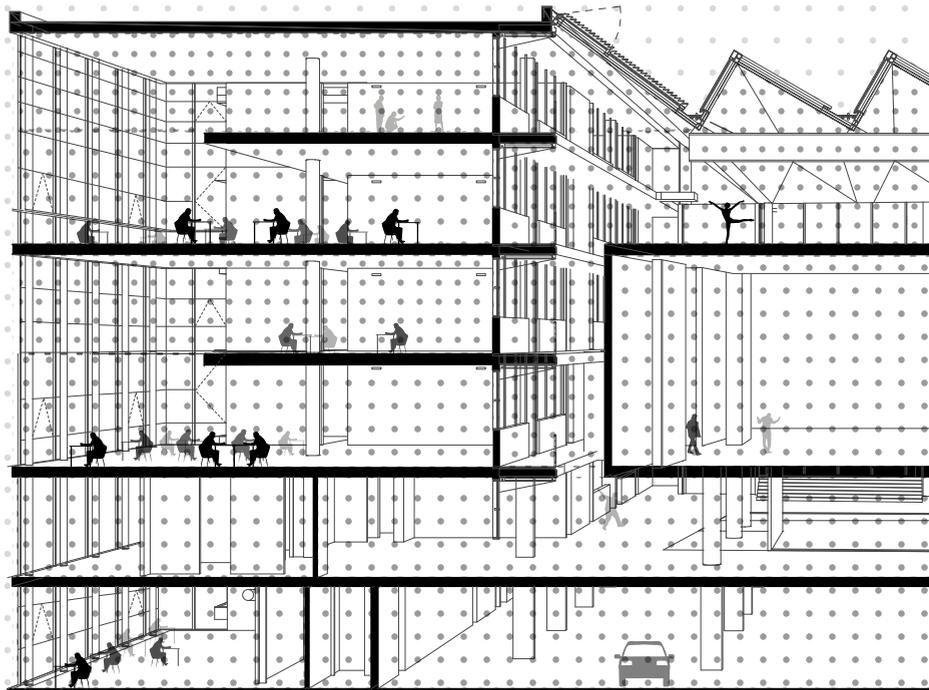


### Une ventilation en sous-régime.

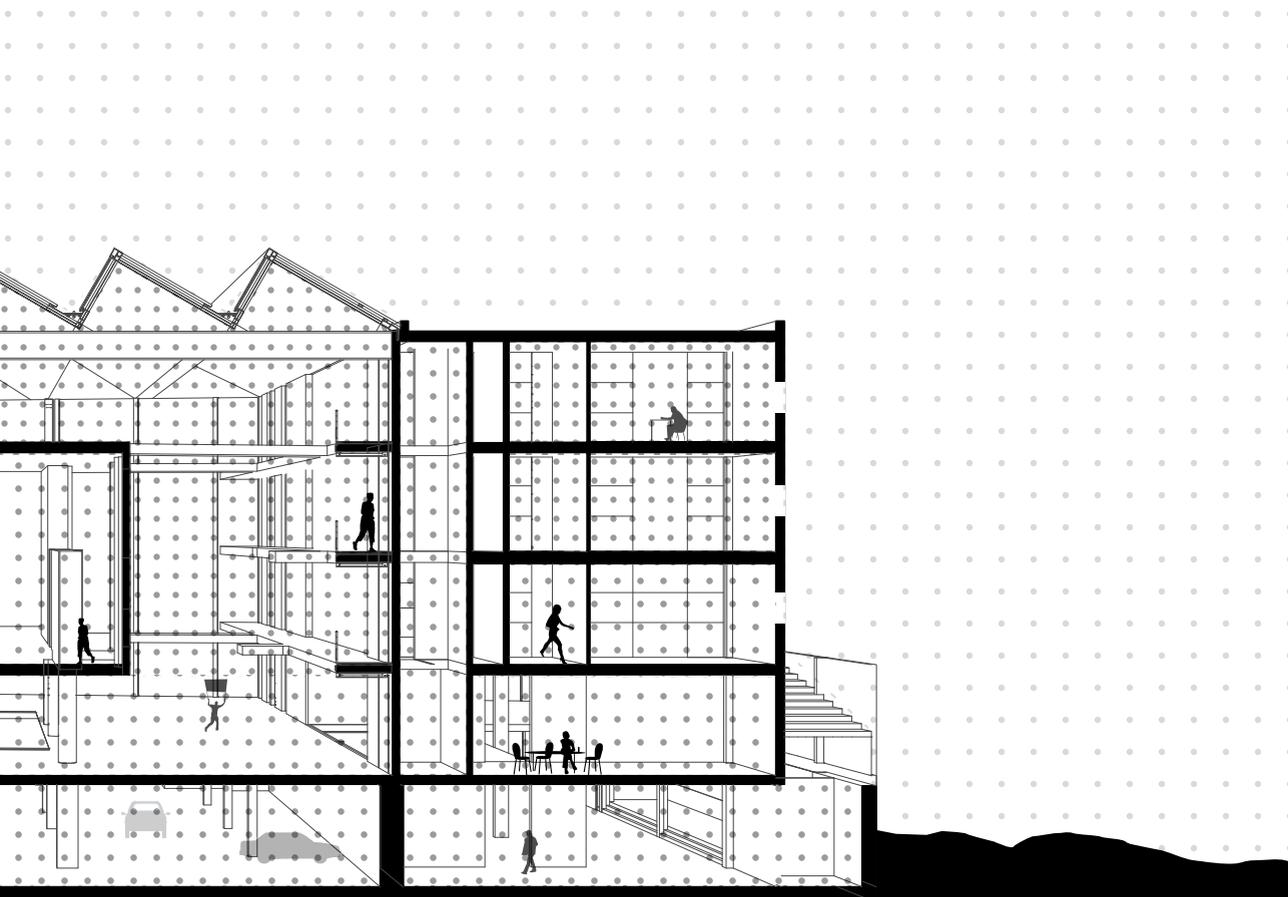
Principe de fonctionnement de la ventilation mécanique contrôlée dans l'école.  
Des conséquences différentes dans chaque espace.

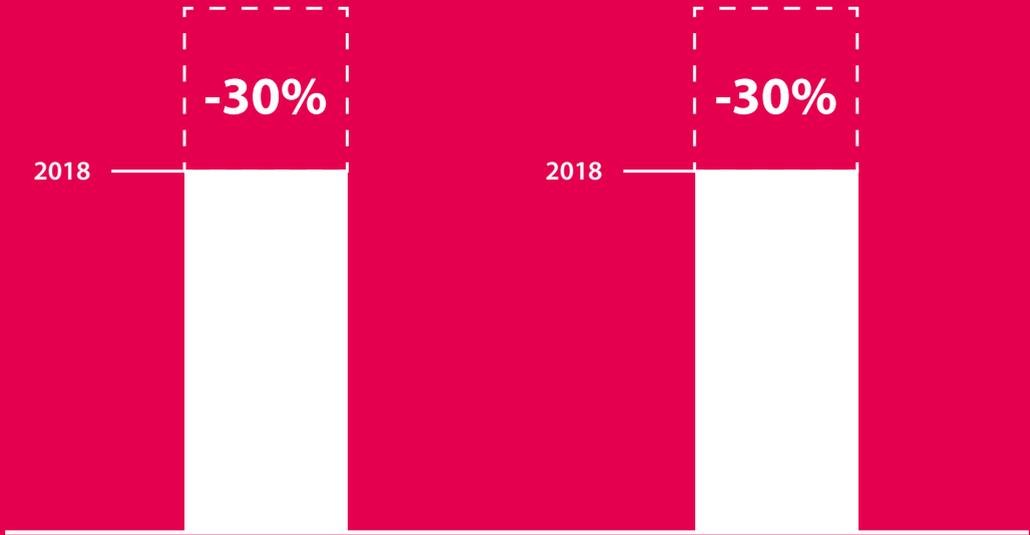


0 1 5m



Coupe potentielle pour le 15 février 2018 : impact des solutions de ventilation sur la concentration en CO<sub>2</sub>.





Energie consommée



Emissions de GES



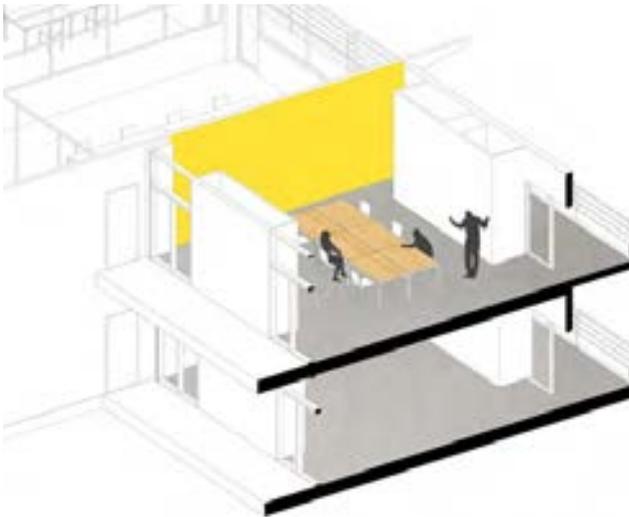
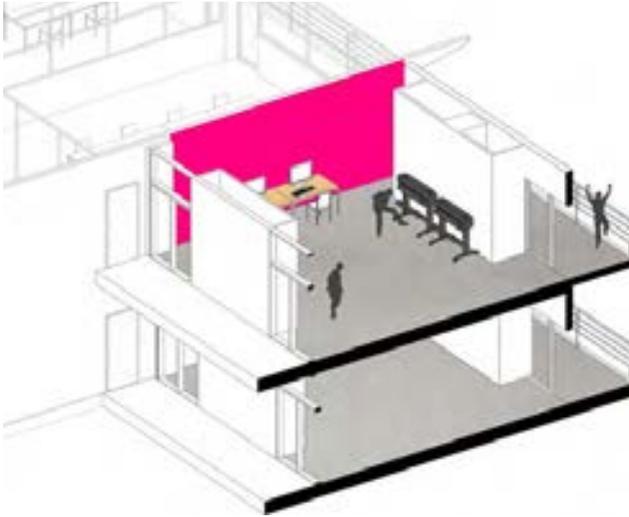
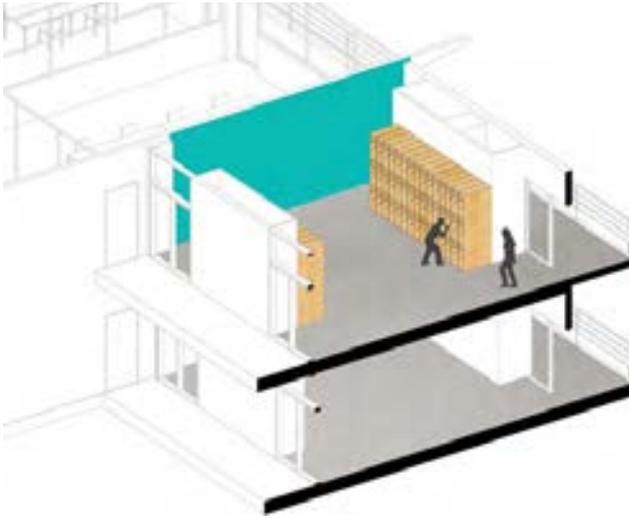


Capacité d'accueil





## **2 Des aménagements intérieurs à moyen terme**



En haut:  
Un nouvel espace pour le rangement: sécurisé  
et propre

Au milieu:  
Une salle de cours ou de travail en petit groupe

En bas :  
Un salle relais pour les impressions et l'accès au  
réseau numérique

## Solutions à moyen terme pour la zone nord, Les salles de critique

Comme nous avons pu le montrer dans le rapport photographique, les salles de critique sont assez peu lumineuses et très peu ouvertes sur l'atrium. Des portions de murs sont peintes en noir, le faux-plafond est sombre et très bas. Ces salles sont donc plutôt inconfortables et ne sont pas utilisées et ne remplissent pas leur fonction initiale, la correction de projets. Elles sont surtout utilisées par des étudiants en quête d'intimité pour leur travail individuel, les ateliers étant souvent trop bruyants.

Cependant, ces salles sont le plus souvent vides (mais pleines de déchets ou matériels entreposés temporairement) tandis que les corrections de projets se font dans les ateliers, mélangeant plusieurs groupes. Il s'agit donc de réinventer ces salles tant dans leur fonction que dans leur apparence.

Dans un premier temps, il nous a semblé important de créer, au même titre que les ateliers, une réelle communication entre les salles de critique et l'atrium. L'objectif est d'offrir un maximum de visibilité et de luminosité. Nous l'avons dit, l'atrium joue un rôle majeur dans le confort des espaces attenants et l'augmentation du clair de vitrage pourrait garantir à ces petites salles abandonnées une bonne luminosité et une meilleure visibilité (voir élévation ci-après).

Dans un second temps, peindre l'ensemble des murs et des faux plafonds en blanc permettrait d'augmenter la luminosité. Améliorer l'albédo<sup>1</sup> des murs et du plafond permet à la lumière naturelle de mieux s'y réfléchir et ainsi augmenter le nombre de lux<sup>2</sup> reçus sur un plan de travail.

Dans dernier temps, il faudrait repenser les usages. De par leur situation dans le bâtiment, ces pièces sont très contraintes : voiles porteurs latéraux, faux plafonds techniques et gaines techniques... Nous proposons donc trois scénarios d'usage, simples mais dont la nécessité n'est plus à prouver. Ces salles pourraient être utilisées comme salle de cours pour des petits groupes (de 10 à 15 élèves), ou comme salle de rangement sécurisé (casiers individuels), libérant les ateliers de cette fonction. Enfin, elles pourraient servir de salle d'impression afin de faire bénéficier certains étages d'imprimantes et d'un accès au réseau numérique.

1 L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente.

2 Le lux est une unité de mesure de l'éclairement lumineux. Il caractérise le flux lumineux reçu par unité de surface. Un lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'un lumen par mètre carré.

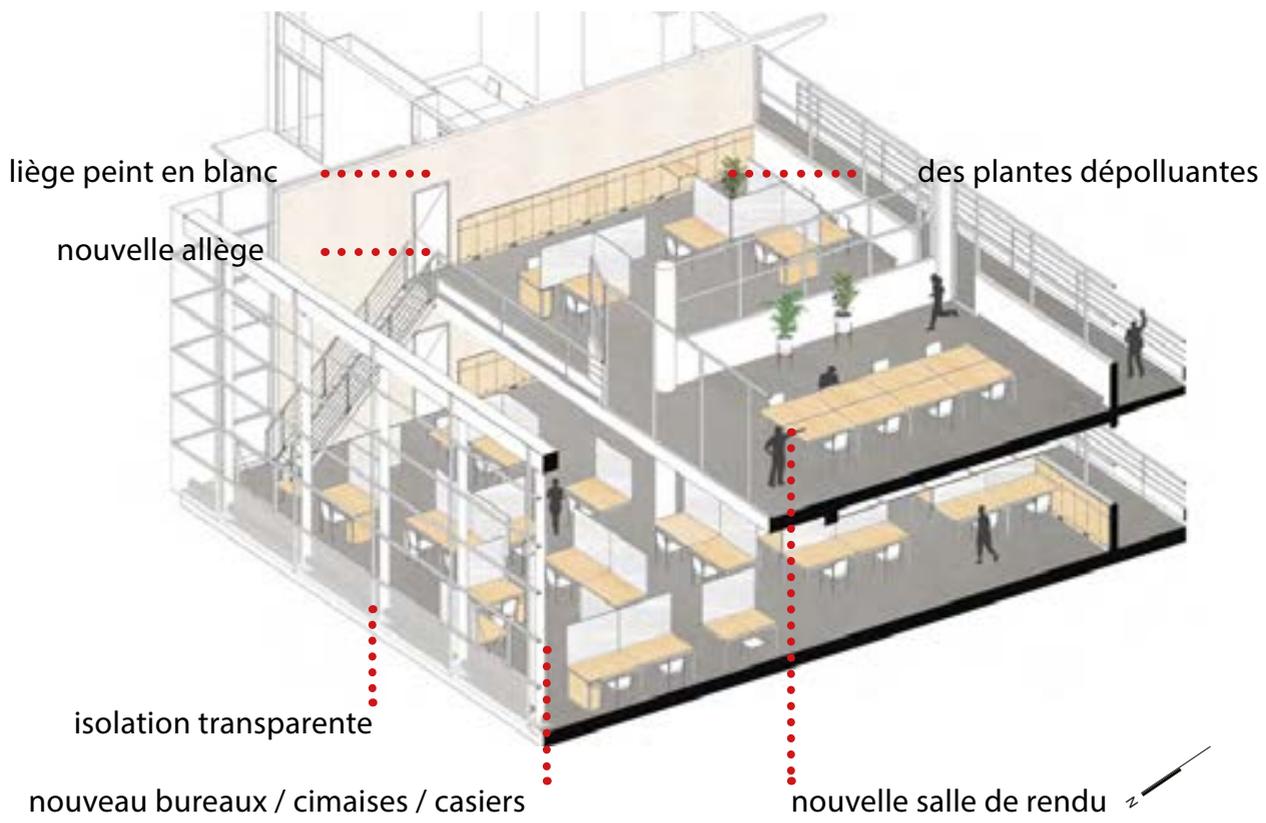








0 1 5m



## **Solutions à moyen terme pour la zone nord.**

### **Les ateliers.**

Les ateliers sont des espaces généreux, très lumineux, qui ont été prévus pour accueillir 75 étudiants. Pourtant, aujourd'hui, ils sont sous-utilisés et très encombrés par les casiers et par du matériel à maquette. De par leur volume important et leur matérialité (essentiellement du béton), les ateliers posent des questions de confort thermique, aéraulique et acoustique. Afin de pouvoir recevoir le nombre d'étudiants qu'ils étaient destinés à accueillir, chaque élément doit être amélioré.

Tout d'abord, une salle de correction est proposée sur la moitié de la surface de la mezzanine, afin de laisser les cours de projet se dérouler sans interférer sur le travail des autres utilisateurs (et inversement). Ces salles réutilisent le vocabulaire architectural des ateliers, en étant entièrement vitrées sur la partie nord. Elles reprennent aussi le vocabulaire des vitrages sur allège donnant sur l'atrium, afin de conserver le dialogue entre l'espace de travail et l'espace de correction. Ces dernières pourront être équipées de plusieurs prises de courant qui font aujourd'hui défauts. Des rideaux à l'intérieur de cette salle seront installés afin de pouvoir rendre cet espace sombre pour les vidéo-projections.

Reste à améliorer dans le reste de l'espace des ateliers le confort acoustique. Actuellement, le plan libre des ateliers atteint des niveaux sonores moyens de 64 décibels. La norme NOR: ENVP9430388A recommande pour les établissements d'enseignement supérieur une moyenne de 42 décibels dans les salles de travail. Nous proposons donc d'installer sur les voiles béton latéraux (déjà tagués, peints et envahis par les résidus de scotch) une couche de liège d'une épaisseur de 8 mm, qui permettra de mieux absorber les sons tout en offrant un nouvel espace d'affichage.

Un autre enjeu pour les ateliers est la déperdition thermique importante de la façade nord ainsi que celle, dans une moindre mesure, des façades est et ouest donnant sur l'extérieur (données précises en annexes page 174). Les performances thermiques des parois seront améliorées par le liège, associé à une allège en bois à hauteur de celle déjà existante, faite de carreaux de plâtre. Les déperditions seront ainsi divisées par deux.

Le cas de la façade nord est plus complexe à traiter. En effet, idéalement et comme préconisé dans l'audit énergétique de Suez, il s'agirait de modifier l'ensemble des menuiseries extérieures. Cette modification, outre son coût exorbitant, n'est pas forcément avantageuse. Nous l'avons vu, les uniques entrées d'air neuf se font actuellement par les défauts d'étanchéité des menuiseries. Si ces dernières venaient à être remplacées par des menuiseries ultra-performantes avec rupteur de ponts thermiques, nous pouvons nous interroger sur la qualité de l'air intérieur qui en résulterait...



Nous proposons donc une solution intermédiaire qui viserait à diminuer au maximum les déperditions vers l'extérieur des chauffages, situés le long du vitrage. En conservant la façade existante, nous conseillons d'installer sur toute la partie basse de la façade (jusqu'à la première menuiserie située à environ 120 cm du sol) un matériau isolant et translucide, par exemple le produit Kapipane de la marque Okalux ou un équivalent (voir image de la page suivante).

Il aurait été possible d'en couvrir l'intégralité de la façade, cependant la vue qu'elle offre est magnifique et il serait dommage de la masquer. Cette perspective vers le bois participe sans nul doute au confort des usagers. Même si elle est difficilement quantifiable, la perception d'un horizon naturel a un effet apaisant et relaxant. Cet atout ne peut pas être négligé au profit d'une meilleure isolation thermique.

À la suite de ces modifications, les déperditions totales au solstice d'hiver diminuent de 26 %.

## **Un mobilier simple et efficace**

Le mobilier est l'un des éléments qui permettent d'améliorer le confort des utilisateurs. Aujourd'hui détourné et/ou détérioré, il est à repenser. Il doit être réinventé pour s'adapter aux différentes manières de travailler : individuelle, en équipe ou en fonction des différents cycles universitaires (licence ou master) et des pédagogies de projets.

Les pièces de mobilier ci-contre ont été réalisées en partenariat avec l'atelier maquette.

En ce qui concerne les casiers, leur taille permet de les glisser sous les bureaux pour le travail individuel mais peuvent aussi être empilés sur différents niveaux pour se concentrer dans un seul espace.

Au sujet des tables de travail, nous avons décidé d'utiliser les bureaux existants dans les ateliers avec l'ajout d'un panneau intégrable et de bacs pour les chemins de câbles électriques. Pour l'allège « multi-fonction », nous concevons une pièce aux rôles multiples. Elle peut être :

- dépliée complètement pour servir de plan de travail individuel ;
- dépliée partiellement pour faire office de support aux maquettes sous les affichages ;
- simplement repliée et offrir des prises électriques toujours manquantes dans les ateliers.

**Ci-contre, une vue des ateliers avec en partie basse du Kapipane. Nous préconisons aussi l'installation de rideaux, afin de limiter les déperditions de la façade en période froide.**



Une allège «multi-fonction)







## Des plantes dépolluantes

L'intégration de plantes est sans doute l'un des moyens les plus abordables économiquement et des plus agréables pour améliorer la qualité de l'air d'un espace. En plus de cela, elles peuvent participer au confort acoustique, les plus petites ondes sonores sont absorbées par le relief des feuilles et permettent de réduire la réverbération des sons.

Au niveau de la qualité de l'air, les plantes sont des purificateurs d'air naturel. 30 plantes sont recommandées par la NASA pour purifier l'air intérieur. Afin d'obtenir un résultat optimal et en continu de jour comme de nuit, il est important de diversifier les variétés. Pour les ateliers, nous en avons choisi trois types :

- l'areca, qui absorbe le formaldéhyde, le xylène et l'ammoniac ;
- le ficus plastica, qui absorbe le trichloréthylène, le benzène et apporte de humidité à l'air ambiant ;
- la sansevière qui absorbe le benzène, le xylène, le toluène, le trichloréthylène et le formaldéhyde.

Ces polluants invisibles se retrouvent à proximité des ordinateurs, de la fumée de tabac, des cartouche d'encre, des adhésifs, de certains tissus et de la peinture. Ils polluent l'air sans que nous puissions le déceler. En effet, jusqu'à une certaine concentration, nous ne sommes pas capables physiologiquement de sentir ces nuisances dans l'air. En revanche, dès qu'elles atteignent de stades irraisonnables nous ne pouvons plus les supporter et nous tentons d'aérer immédiatement l'espace envahi.



TRÄCK

PLI GNESDA

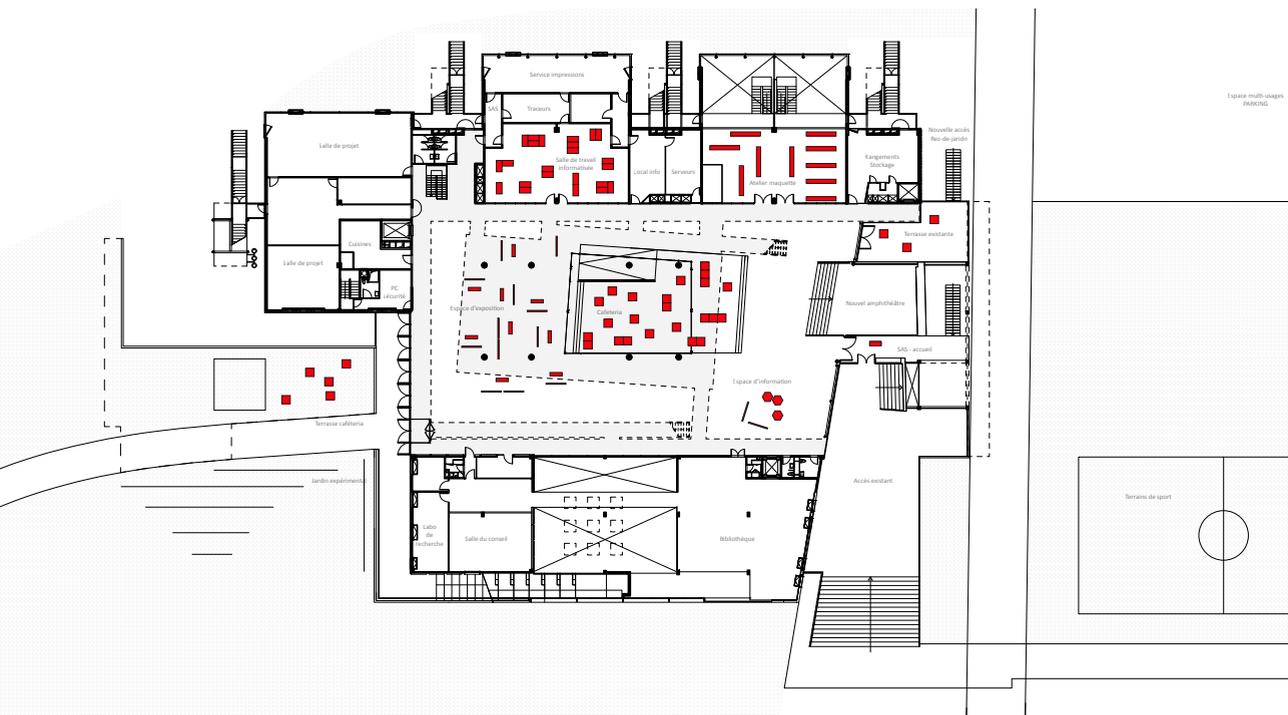
ÖHER

LEO  
LAF









Équipés de panneaux rayonnants sous l'amphithéâtre, l'espace de restauration est «transféré» au cœur même du forum, là où naturellement les étudiants se retrouvent. Le sol recouvert de parquet et équipé de prises de courant en fait un lieu idéal pour se restaurer et travailler en même temps. Les autres fonctions sont simplement clarifiées par une signalétique claire et du mobilier adapté. L'entrée par la façade est expliquée dans le chapitre qui va suivre.

## Une transition entre le moyen et le long terme pour l'atrium, Vers un « rez-d'atrium »

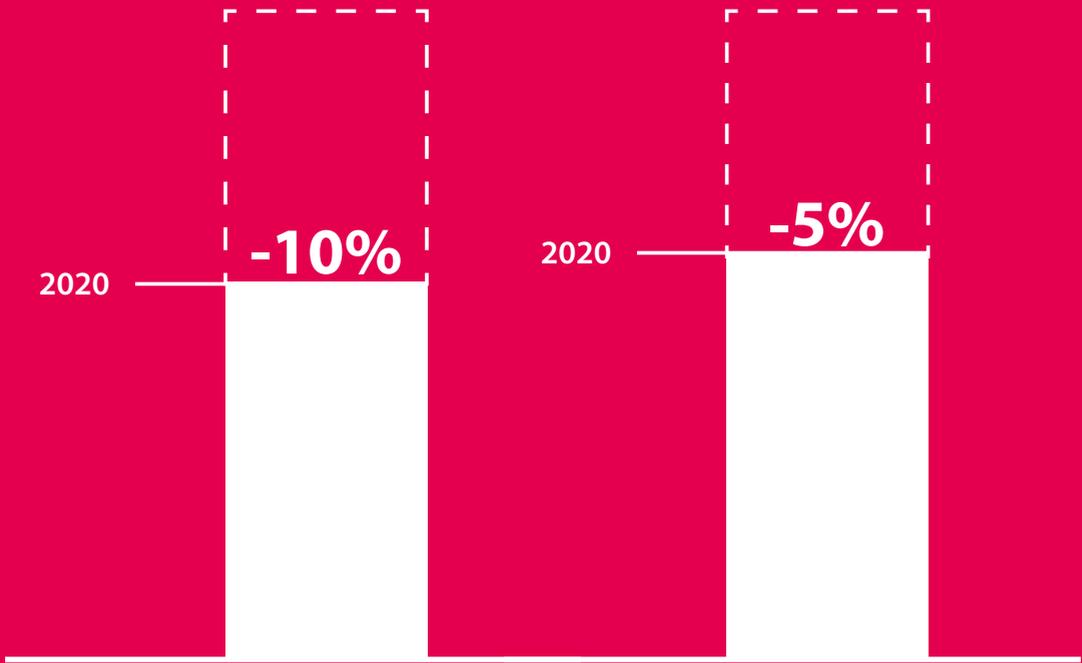
Afin d'exploiter au mieux le vaste espace de l'atrium, il est important d'en saisir l'ensemble des enjeux. Un texte critique de Françoise Fromonot et David Leclerc, intitulé « Bernard Tschumi, pour quoi faire ? »<sup>1</sup> questionne les volontés architecturales de Bernard Tschumi au vu des usages actuels du bâtiment :

*« Le bâtiment est [...] encore orphelin d'une hypothétique deuxième phase, qui porterait sa capacité d'accueil à 1200 élèves, pour quelques 500 seulement à ce jour. [...] L'école se déploie autour d'une halle rectangulaire, couverte d'une verrière en sheds et entourée de quatre niveaux de coursives continues. [...] La surprise ne réside pas dans l'atrium à coursives, assez peu original en soi, mais dans l'objet singulier qui l'habite : une grosse boîte sur pilotis, emballée de métal déployé, qui s'illumine la nuit grâce à des projecteurs dissimulés sous sa peau.*

*[...] "ce qui fait la vie d'une école ne se passe pas dans les ateliers, les salles de cours ou les amphis, mais dans les interstices du cursus", "dans les escaliers, dans les lieux de circulations, où il y a une discussion non programmée, spontanée, qui se fait entre les étudiants". [...] Les coursives auraient pu devenir des lieux privilégiés de rencontre et d'exposition, mais leur dimension interdit tout autre usage que celui qui leur revient de fait : circuler. Il est vrai que la première phase construite ne reflète qu'en partie les dispositions du projet d'ensemble. Dans sa forme finale, le sol de la grande halle doit se transformer en escalier monumental, qui grimpera sur un second amphithéâtre jusqu'aux deux premiers niveaux des coursives. Aura-t-il les dimensions suffisantes et la position adéquate pour devenir " le lieu où l'échange d'idées se fait " ?*

*[...] Ici, le concept de « boîte dans la boîte » n'engendre pas un " entre-deux " [...] mais plutôt deux. Le volume pris sous l'auditorium accueille sur son sol décaissé une galerie d'expositions, entourée de rideaux de fer à grosses mailles – escamotables sur les deux petits côtés, fixes sur les deux grands. Des cimaises auraient été pratiques pour présenter des projets, mais elles auraient obstrué la transparence visuelle au sein de la halle et nui à l'effet de lévitation de la " boîte ". Seul un petit mur oblique, qui sert de garde-corps à la rampe d'accès à la fosse, peut servir pour l'affichage. L'utilisation du reste de l'espace est limitée de fait à des installations suspendues ou ponctuelles. Pour respecter son principe formel, Tschumi réduit donc la galerie d'exposition à une cage – ce qu'elle devient, à l'occasion, puisque ses grilles délimitent un local commode pour stocker du matériel à l'abri des vols ».*

1 Françoise Fromonot et David Leclerc, "Bernard Tschumi, pour quoi faire?", le visiteur, n° 5, printemps 2000, pp. 6-23.



Energie consommée



Emissions de GES



2020

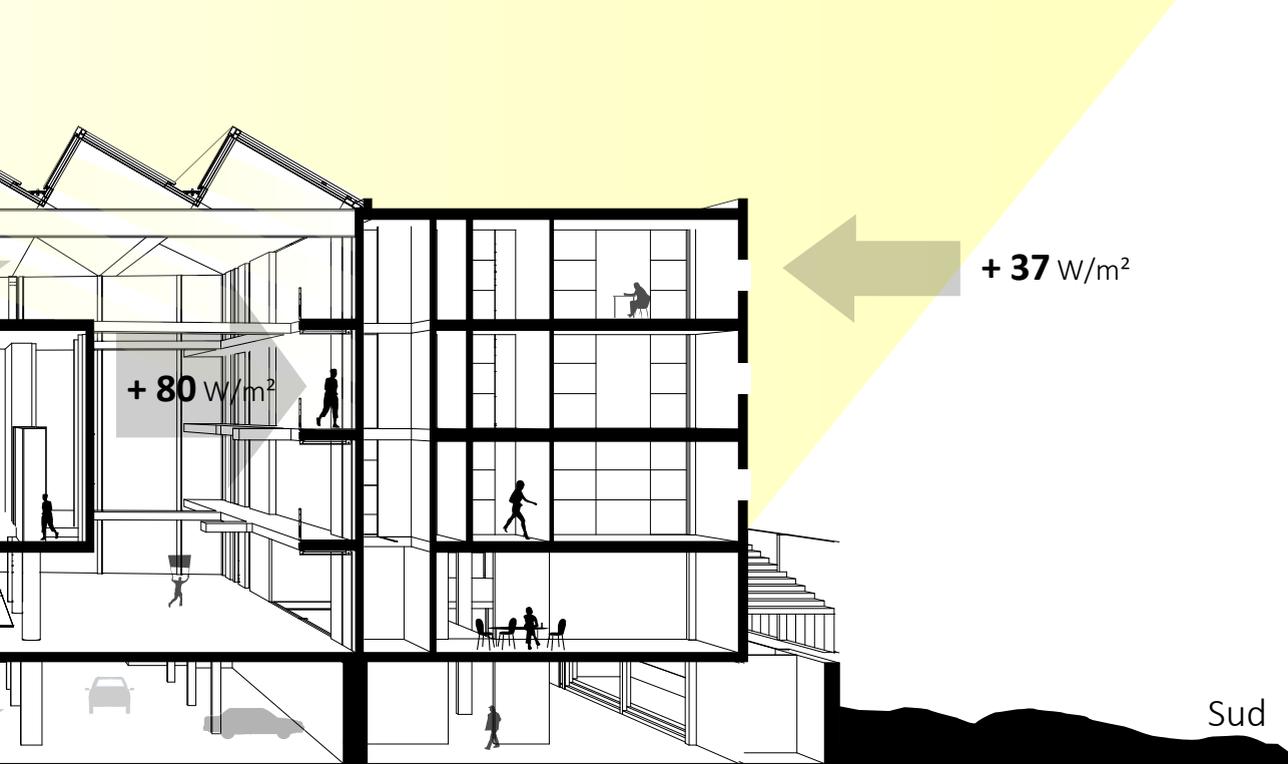
+20%

Capacité d'accueil





# **3** Une transformation raisonnée et à long terme de l'enveloppe



**+ 37 W/m<sup>2</sup>**

**+ 80 W/m<sup>2</sup>**

Sud

0 1 5m



**- 50 W/m<sup>2</sup>**

Sud

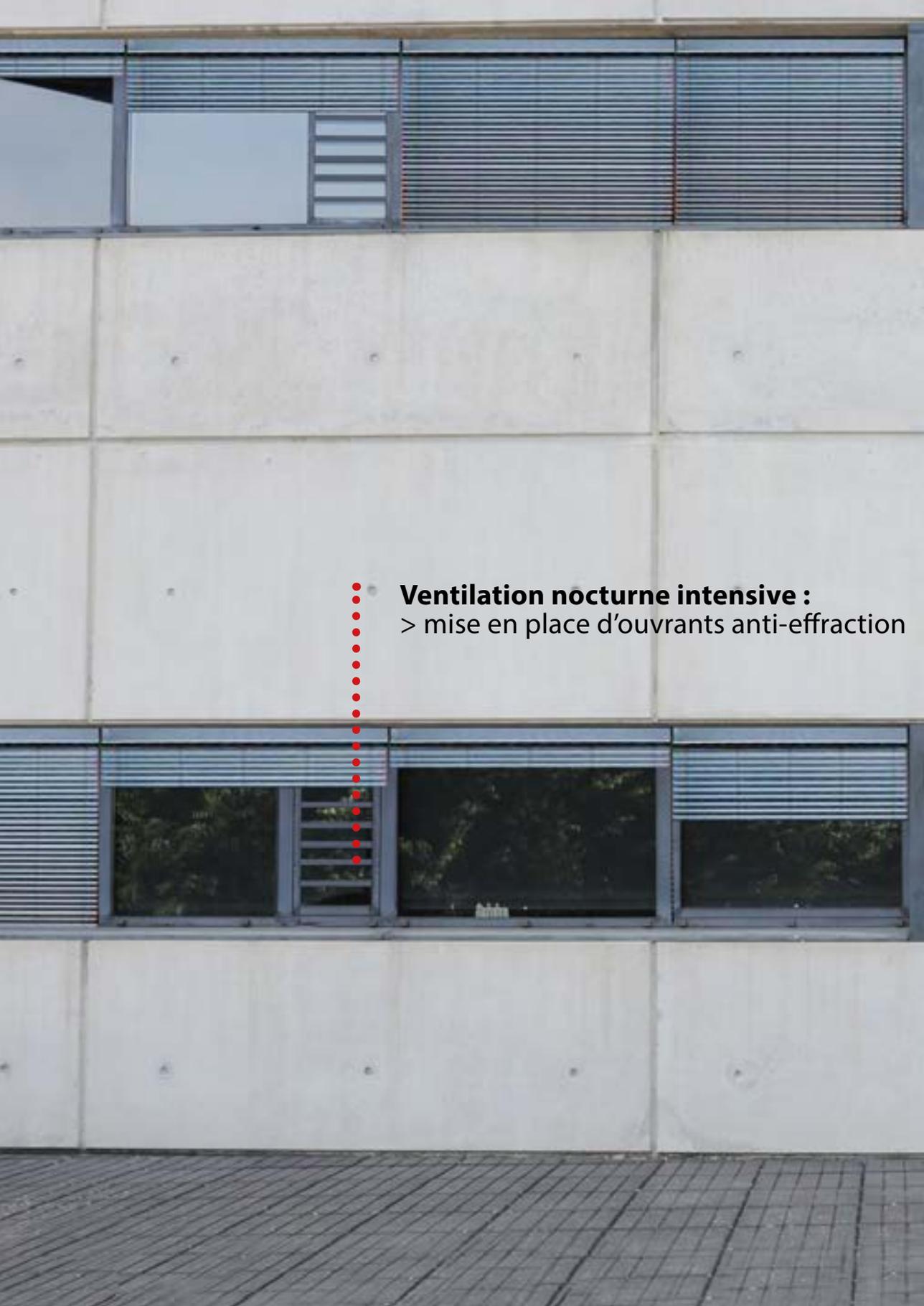
0 1 5m

## **Des propositions à long terme, nécessitant un budget limité. Le cas de la zone sud, des bureaux et de la bibliothèque.**

Grâce aux mesures prises par les capteurs et au retour d'expérience des usagers des locaux administratifs, nous avons compris que l'inconfort dans ces espaces est dû à une surchauffe en été comme en hiver. De la même manière, la bibliothèque en soubassement de ces derniers souffre des mêmes pathologies. Tous ces espaces, orientés au sud et relativement bien isolés, bénéficient donc d'apports solaires importants en plus du système actif de chauffage.

Afin de lutter contre les surchauffes estivales, nous proposons dans un premier temps de changer tous les stores intérieurs par des stores extérieurs à lames horizontales inclinables. Ceux-ci servent de brise-soleil sans pour autant occulter complètement la lumière naturelle, permettant à chacun de choisir le niveau de luminosité convenable et la quantité de chaleur entrant dans les bureaux. Lorsque les fenêtres sont ouvertes, ils permettent aussi de laisser passer l'air et donc d'aérer les bureaux sans recevoir de lumière directe. Ce point est en effet important car bien que les apports solaires soient une grande source d'apports thermiques, la chaleur émise par les ordinateurs et les utilisateurs participent eux aussi à la montée en température des bureaux tout au long de la journée. Une bonne aération permet donc d'améliorer le confort hygrothermique tout en renouvelant l'air.

Dans un second temps, nous proposons d'introduire une ventilation nocturne. Ainsi, le refroidissement des bureaux durant la nuit permettrait à ces espaces inertes d'accumuler du frais tout le nuit pour le retransmettre en journée au moment des surchauffes. Cette ventilation demande un investissement plus conséquent que les stores extérieurs. En effet, il s'agit de remplacer les menuiseries existantes afin d'introduire, dans chaque bureau, deux ouvrants d'au moins 20 cm de largeur, disposés si possible sur des parois non-attendantes. Ces menuiseries innovantes sont composées de traverses horizontales assez resserrées pour ne pas permettre l'effraction. Une seule menuiserie de ce type pourrait être installée par bureau mais nous avons été informés que la majeure partie des occupants ferment à clé leur espace individuel chaque nuit. Dans la pratique, les courants d'air nocturnes ne pourraient donc pas avoir lieu, c'est pourquoi nous préconisons ces deux ouvertures par bureau.



**Ventilation nocturne intensive :**  
> mise en place d'ouvrants anti-effraction

- **Protections solaires :**
- > mise en place de stores extérieurs à
- lames inclinables





## **Solutions à long terme, L'atrium comme «poumon convectif»**

Immense capteur solaire, l'atrium possède trois façades donnant sur l'extérieur : l'est qui préchauffe l'espace le matin, le sud qui prend le relais vers 13 h, puis l'ouest qui vient sur la fin de journée. Lorsque l'on ajoute à cela les apports indirects dus aux sheds en toiture, nous observons des différences de température incroyables entre l'extérieur et l'intérieur ainsi qu'entre le haut et le bas de l'atrium. Par exemple, un des capteurs de température placé sur le poteau central au dessus de l'atrium a enregistré une température de 29 °C le 15 mars 2017, alors qu'il faisait 9 °C à l'extérieur et que les façades ne sont pas isolées ! De plus, il faut rappeler que, pour le moment, le réseau colossal de plancher chauffant de l'atrium est réglé sur une température de consigne de 25°C.

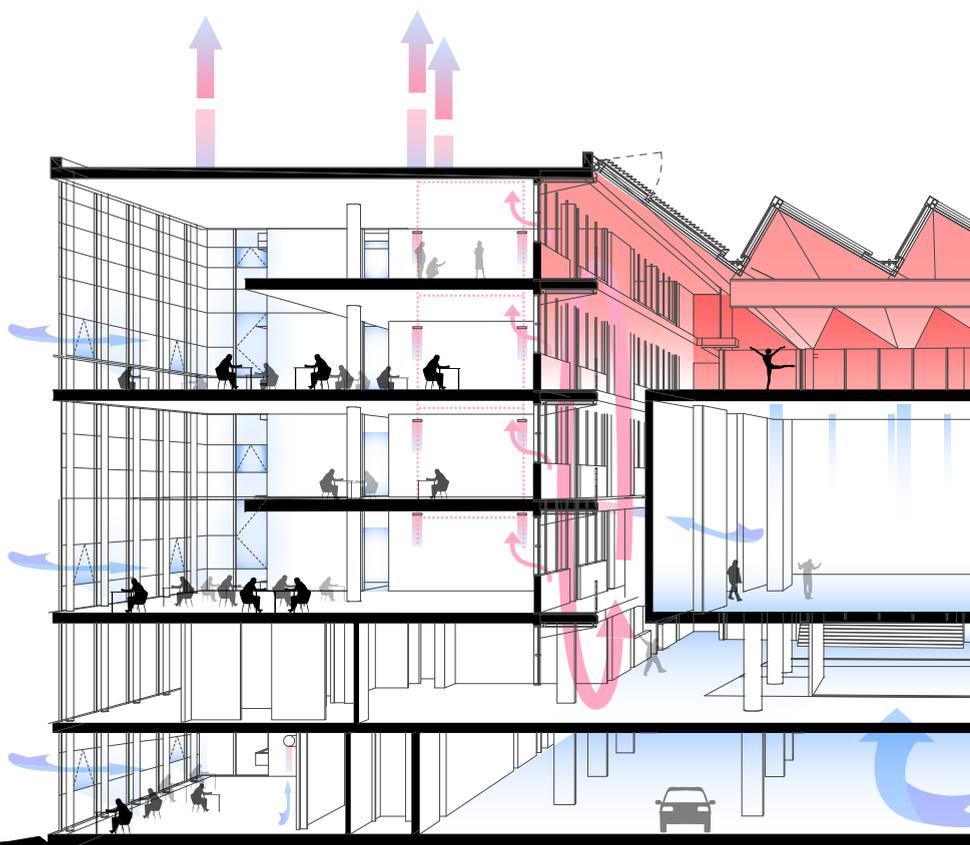
Nous proposons donc, plutôt que subir ces surchauffes, de les utiliser. Nous pourrions mettre en place un système de tubes convectifs afin de réorienter vers le rez-d'atrium l'air chaud accumulé en hauteur. Ces tubes permettent un transfert de chaleur par convection. L'air, est mis en mouvement sous l'effet des différences de masses volumiques résultants des différences de températures. En effet l'air chaud, plus léger que l'air froid, monte naturellement et s'accumule en hauteur là où personne n'en profite - notamment sur le toit de l'amphithéâtre. Le mouvement convectif forcé (car inverse au trajet spontané de l'air chaud) redirige les molécules d'air chaud à l'aide d'un simple ventilateur et assurent directement le transfert de la chaleur vers le milieu le plus froid. Le système proposé ici est actif mais peu consommateur d'énergie. En effet, le ventilateur consomme de l'électricité mais n'a pas besoin de beaucoup d'énergie car il ne transforme pas la chaleur, il ne fait que la rediriger.

Ce système sera utilisé pour les périodes hivernales principalement, afin de contribuer à chauffer le rez-d'atrium et compenser la baisse de la température de consigne sur le chauffage au sol.

Pour les périodes chaudes, nous proposons la mise en place en toiture d'ouvrants mixtes de désenfumage, qui permettraient d'évacuer l'air chaud accumulé en partie haute de l'atrium et de créer un puissant tirage thermique du fait de l'ouverture des façade est et ouest.

Ces deux principes sont expliqués et illustrés dans les pages suivantes mais aucune étude précise des débits d'air n'a été réalisée. Ce travail nécessiterait un approfondissement sur les logiciels DIAL+ ou Pléiades.

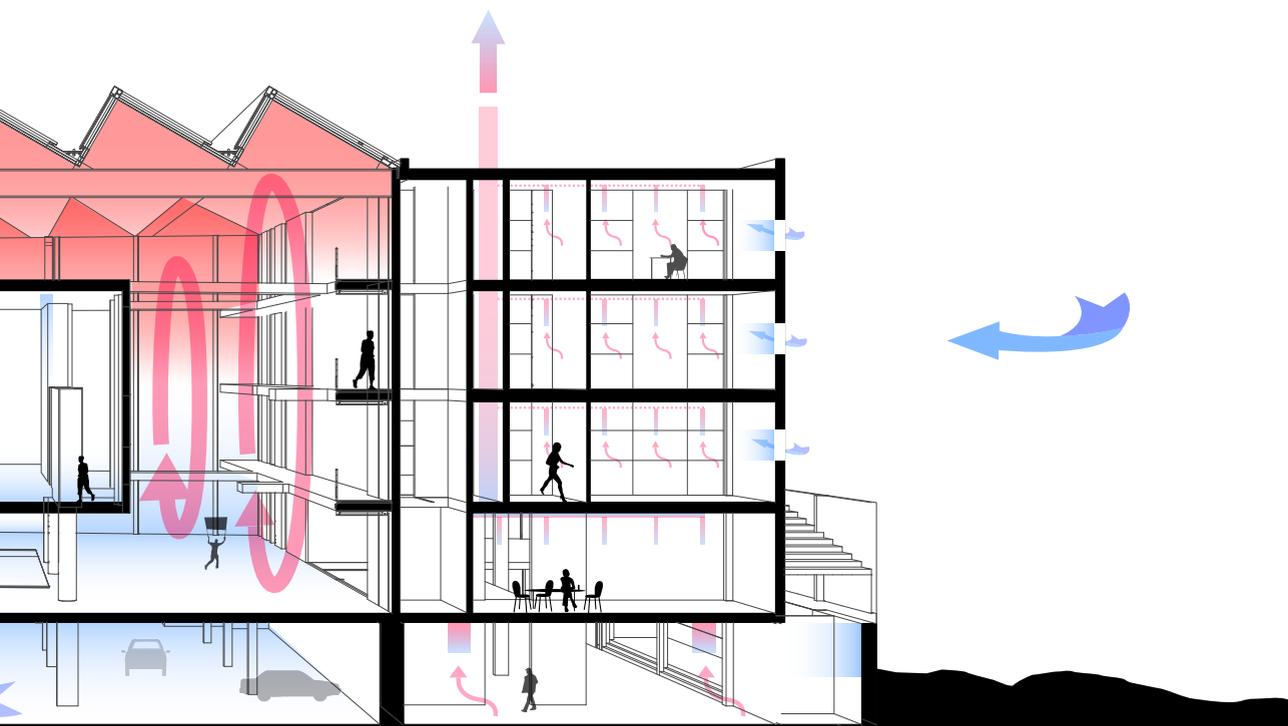
Potentiel de récupération  
de chaleur fatale :  
9 000 kWh / hiver



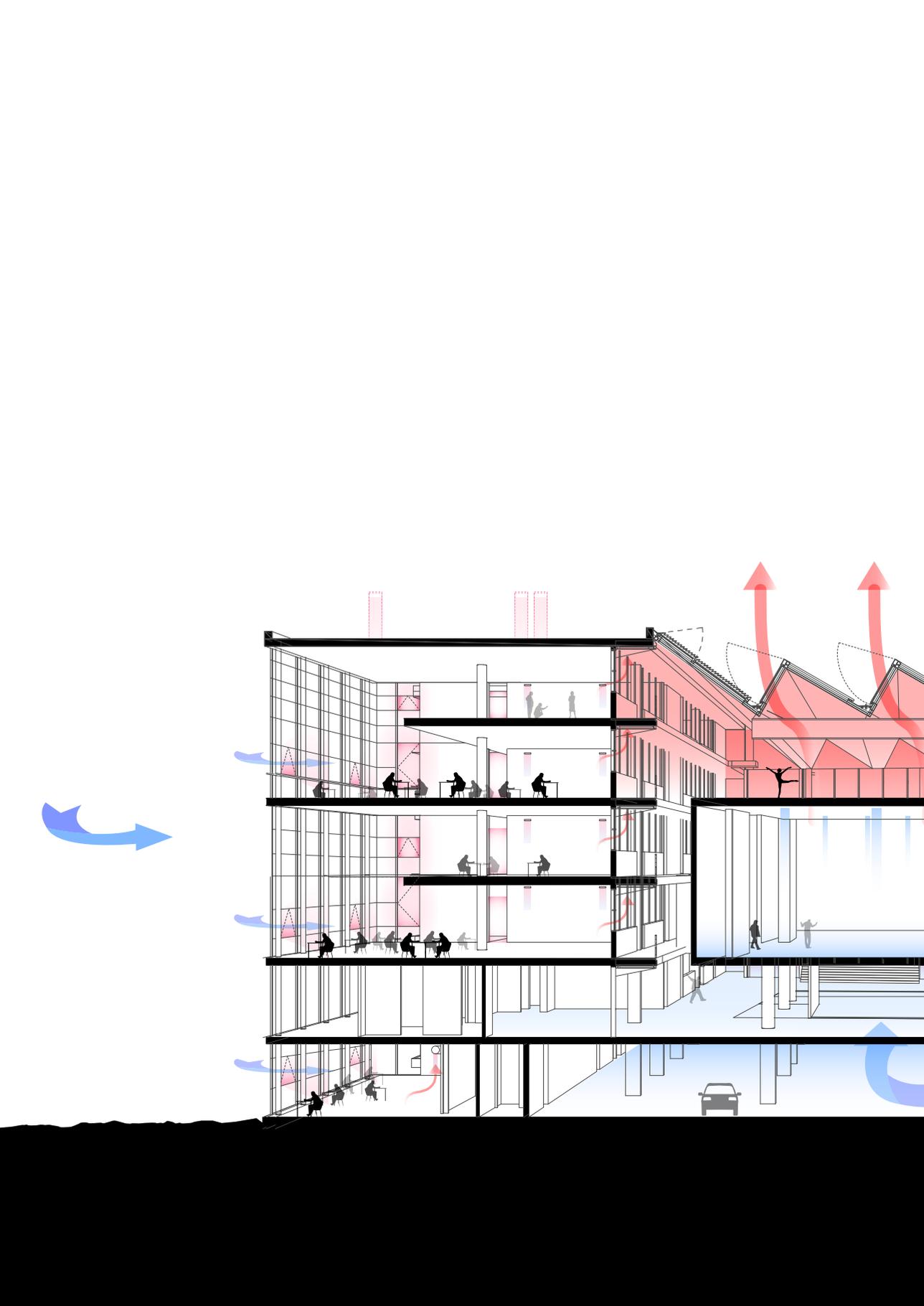
### Fonctionnement hivernal.

La chaleur accumulée au-dessus de l'atrium est redirigée par les *convecting tubes* vers l'espace pratiqué au niveau de l'atrium.

NB : la récupération de la chaleur fatale indiquée en toiture correspond au potentiel des cheminées d'extraction de VMC mais ne font pas l'objet d'un projet en soi.

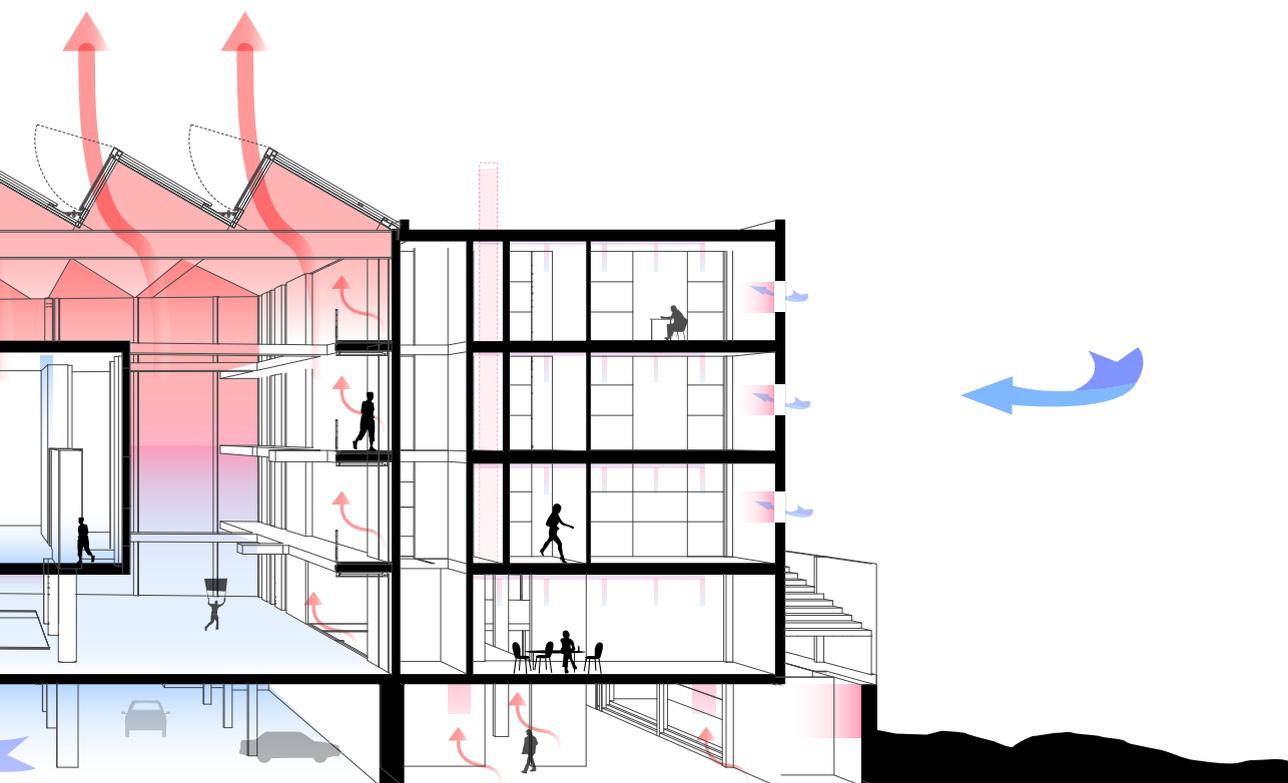


0 1 5m



### Fonctionnement estival.

Le système d'ouverture des sheds de désenfumage situé en toiture est remplacé par des ouvrants mixtes permettant à la fois d'assurer l'évacuation des fumées en cas d'incendie mais également d'actionner manuellement leur ouverture. Une fois ouverts, les appels d'air en partie basse des façades est et ouest créeraient un fort tirage thermique entraînant l'air chaud vers l'extérieur.



0 1 5m



## Solutions à long terme, Une façade dans l'attente d'un dénouement

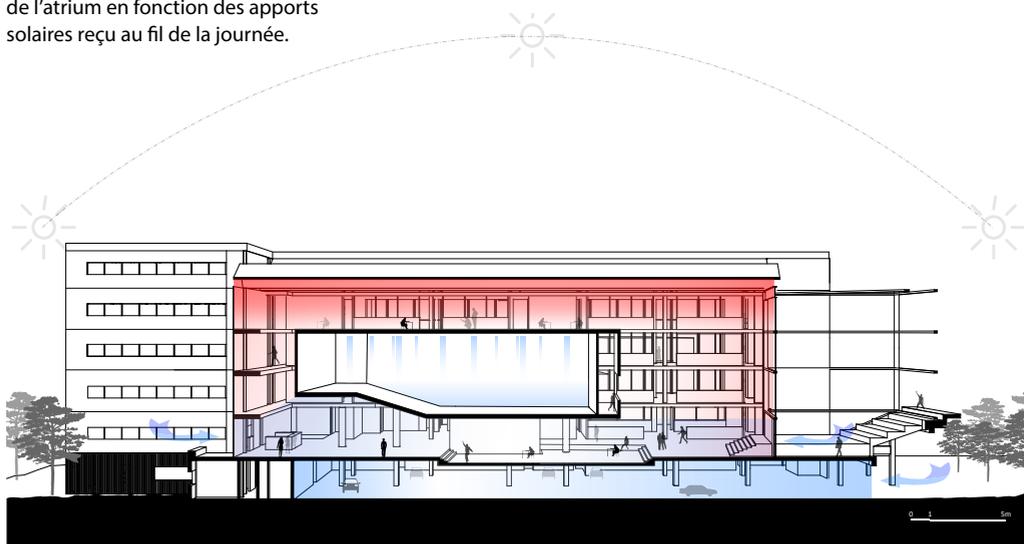
Comme l'explique très bien la citation précédente<sup>1</sup> et comme l'illustre la coupe ci-dessous, le projet initial comprenait une deuxième phase de travaux pour une extension sur la partie est du bâtiment. Non réalisée, cette absence caractérise la façade est depuis 19 ans et laisse une structure provisoire orpheline de son enveloppe. Cette situation engendre aujourd'hui de nombreux déséquilibres.

Nous l'avons vu, l'enveloppe est le premier élément à affecter le comportement énergétique d'un bâtiment. La façade en réglite, véritable « passoire thermique » conçue comme une enveloppe provisoire fait face à un résidu de parcelle dédié au parking. Son coefficient de transmission thermique est encore moins performant que les murs rideaux de la façade nord. Malgré les apports solaires du matin, cette façade tronquée perturbe l'ensemble du comportement thermique de l'école.

Plus formaliste peut-être, le sentiment d'inachevé rend cette façade mélancolique et solitaire. Les escaliers et la structure métallique de ce qui devait être le patio se retrouvent comme flottants sur un soubassement inanimé, soumis aux seuls va-et-vient entre le parking et le bâtiment.

1 Françoise Fromonot et David Leclerc, "Bernard Tschumi, pour quoi faire?", le visiteur, n° 5, printemps 2000, pp. 6-23.

Coupe longitudinale  
du fonctionnement climatique actuel  
de l'atrium en fonction des apports  
solaires reçu au fil de la journée.





En haut : le projet d'aménagement de la parcelle de l'équipe lauréate pour la construction des logements étudiants (BVAU)

En bas : plan de circulation de principe pour l'évolution du campus.

## Réorganiser l'entrée et créer un nouvel amphithéâtre

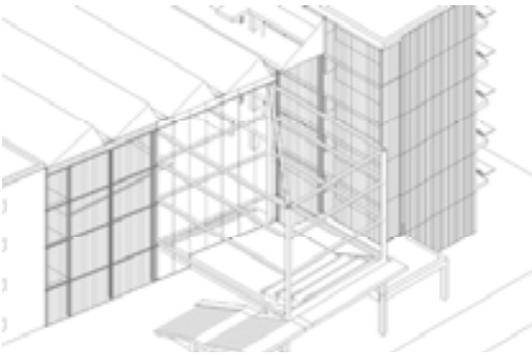
Depuis quelque temps, la raréfaction des terrains à bâtir font des vastes espaces vides autour de l'école une cible de choix pour les projets d'évolution du campus. Vaste et excentré, le fond de parcelle à l'est du bâtiment abrite aujourd'hui un grand parking et un petit bosquet. La décision a donc été prise par l'EPA Marne de vendre une partie de ce terrain afin d'y bâtir un programme jusqu'alors trop absent sur le campus : des logements étudiants. Le projet lauréat, remporté par l'agence BVAU, propose un monolithe composé de 200 chambres étudiantes à l'emplacement du vaillant bosquet actuel. Ce bâtiment s'insère dans la parcelle grâce à deux entrées principales : celle du parking au nord, sur le boulevard Newton, et l'accès piéton depuis l'allée des Marronniers. L'entrée actuelle depuis l'avenue Blaise Pascal est conservée.

En observant les plans ci-contre, il est tentant de faire la supposition suivante : si le campus cherche véritablement à s'étendre et à s'uniformiser, l'axe majeur de circulation se déplacera au nord de l'école. Dans cette situation, comment préservera-t-elle son entrée historique, cette douce promenade qui se poursuit sur une rampe depuis le sud ? Et ce alors même que le plan Vigipirate a déjà obligé l'administration à réorienter vers l'est l'accès au bâtiment.

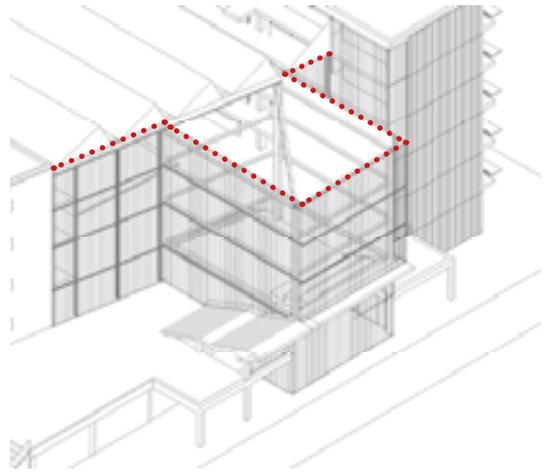
Nous formulons donc l'hypothèse suivante : l'école va devoir basculer vers l'est de la parcelle. Son entrée devra être redessinée. Ce sera l'occasion d'y créer un vrai sas en lieu et place d'une issue de secours aujourd'hui fatiguée. Nous considérons ces évolutions comme une formidable opportunité pour aménager un véritable espace d'entrée, spacieux et cohérent, tout en offrant à la façade est des moyens d'exister.

Nous avons fait le choix de profiter des espaces résiduels historiquement délaissés pour dessiner un projet d'enveloppe pour cette façade. Les marches en béton, la structure en acier noir et les terrasses sont intégrées au projet pour laisser de nouvelles pratiques se développer dans l'école.

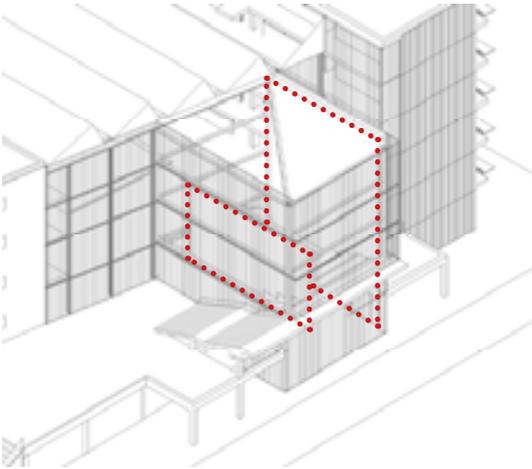
En créant un sas, nous avons étendu notre enveloppe sur la terrasse. Cet espace abritera un nouvel amphithéâtre, nécessaire pour l'accueil de nouveaux étudiants. Il viendra également s'inscrire dans un volume aujourd'hui vide, qui n'aspire qu'à être comblé. En lien direct avec le rez-de-jardin un nouveau local associatif sera accueilli et jouera l'intermédiaire entre les espaces sportifs, les logements étudiants et l'école. Ce nouveau bloc, par sa peau fragile et ses murs intérieurs à forte inertie, joue le rôle de capteur solaire tout en isolant l'atrium des déperditions thermiques de la façade. Il sera conçu dans un souci d'économie de matière et ne demandera pas d'extension du réseau de chauffage et de ventilation existant. Son enveloppe peut être manipulée à souhait par les utilisateurs qui deviennent alors acteurs de leurs propres conditions de confort.



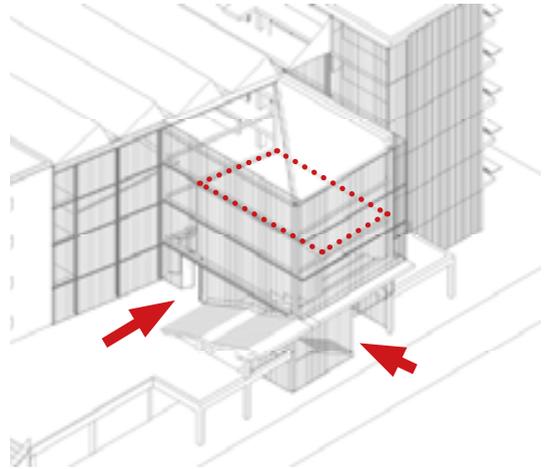
1. État actuel



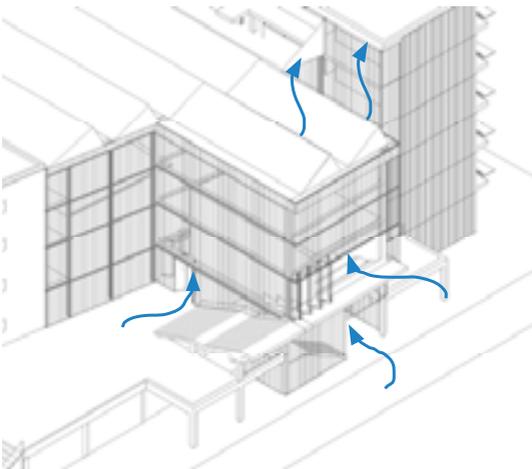
2. Façade prolongée



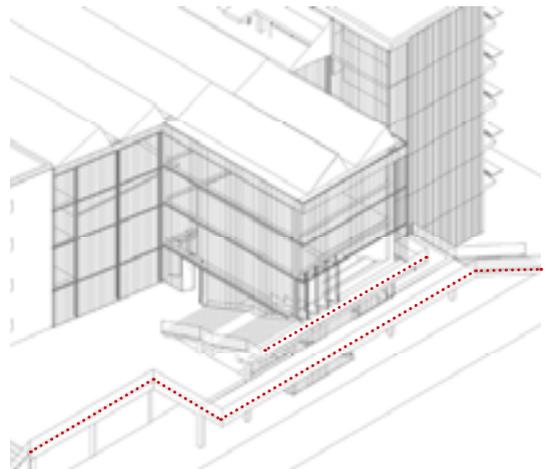
3. Murs à l'intérieur



4. Amphithéâtre et Sas thermique



5. Tirage thermique



6. Soubassement

## **Accompagner l'école dans son extension avec un nouvel amphithéâtre**

Afin de répondre à la commande de l'école quant à l'accueil d'un plus grand nombre d'étudiants, il nous a semblé important de terminer la façade est et d'y créer un second amphithéâtre.

Dans l'état actuel, on observe la présence d'une structure résiduelle, prévue pour accueillir une extension qui n'a jamais été construite. Nous proposons donc d'utiliser cette structure pour porter la nouvelle façade et ainsi créer le nouveau volume.

Dans un premier temps, afin de rénover et d'uniformiser la façade orientée vers l'est, nous le système constructif actuel réalisé en réglite. Cependant, la résistance thermique de ce matériau étant très faible, nous proposons d'équilibrer le bilan des apports et des déperditions thermiques par l'ajout d'un isolant transparent, de type Kapipane.

Dans un second temps, afin de capter les apports solaires du sud et de l'est, nous proposons de construire les murs de l'amphithéâtre dans un matériau à forte inertie, comme par exemple la terre. Entre ces murs se trouverait le nouvel amphithéâtre d'une capacité d'accueil de soixante personnes. La toiture en shed serait quant à elle prolongée pour recouvrir cette extension.

Un sas thermique avec accès haut et accès bas permettrait de mettre un terme aux pertes thermiques dues aux forts mouvements de convection dans l'atrium.

Afin de palier aux risques de surchauffe du sas d'entrée et de l'amphithéâtre, nous avons pensé un système efficace de ventilation naturelle. Pour cela, la nouvelle façade est, l'entrée vers le sas ainsi que les sheds pourront s'ouvrir au maximum et ainsi accentuer les pressions d'air afin de participer au tirage thermique de l'atrium.

Cette extension donnant sur la nouvelle centralité de l'école, nous proposons de créer un nouveau soubassement, fait de coursives et d'escaliers qui serviraient d'accès depuis l'allée des Marronniers. Des promontoires seraient également construits vers le nouvel espace polyvalent de l'école en lien avec les logements étudiants.



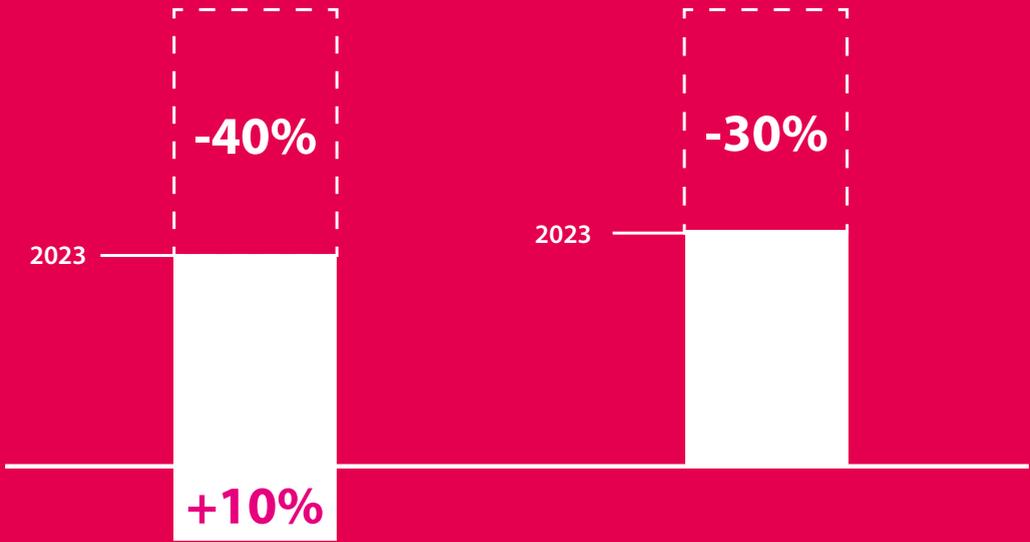












Energie consommée  
+ production potentielle EnR



Emissions de GES





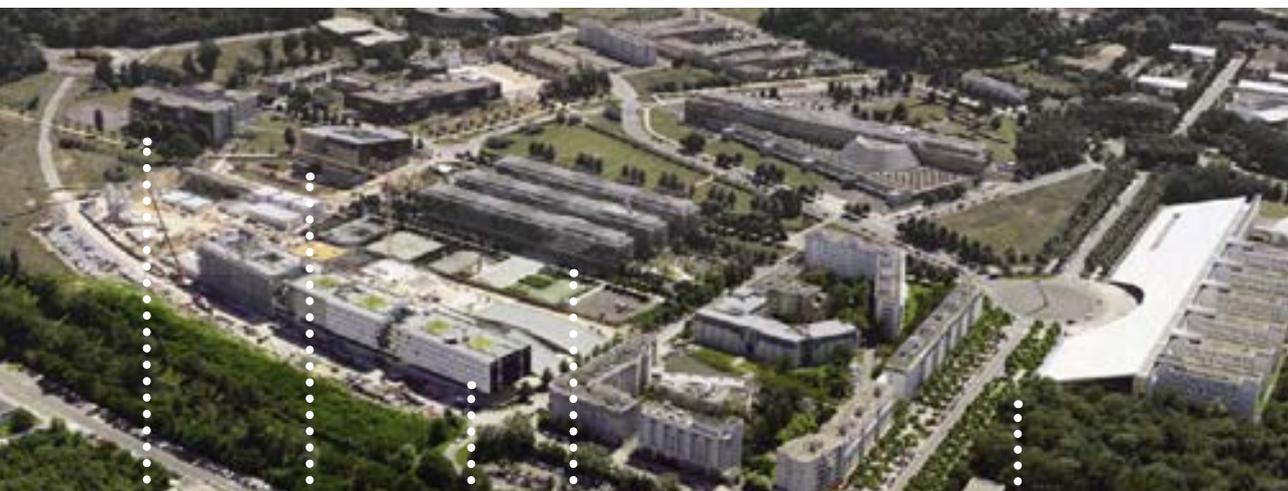
Capacité d'accueil





C

**De l'Eav&t  
au réseau Ensa-Eco**  
Réflexions  
sur une méthodologie



**Eav&t**

**D-School**

**Efficacy**

**École des Ponts - ParisTech**

**ESIEE Paris**

## Un campus en transition

*« Catalyseur d'innovation, la Cité Descartes est le principal site de recherche de l'est parisien équivalent au campus de Berkeley aux États-Unis. Créée en 1983, la Cité Descartes bénéficie d'un rayonnement mondial dans un environnement d'exception, disposant d'équipements de qualité mariant ambiance urbaine et esprit campus. »<sup>1</sup>*

L'école d'architecture s'inscrit dans un contexte urbain attractif et en plein essor, qu'est la cité Descartes. En effet, afin d'être réellement à la hauteur de ses ambitions de "catalyseur d'innovation", la cité Descartes a fait l'objet d'un plan de développement urbain, réalisé par les Ateliers Lion et mis en œuvre lors de la dernière décennie. Le campus tente ainsi d'améliorer son accessibilité, notamment par voie piétonne, ce qui tend à le rendre plus attractif. Dans cet optique, une nouvelle gare du Grand-Paris est également en cours de construction à Noisy-Champs. Ce projet d'envergure nationale est l'opportunité de relever le défi de la transition énergétique à grande échelle, avec comme fil directeur la LETCV<sup>2</sup>.

L'ESIEE Paris, en partenariat avec l'institut Efficacity et le DPEA Architecture post-carbone, a débuté un travail similaire à celui que nous avons mené. Il étudie le comportement énergétique de son bâtiment (le plus à gauche sur la vue aérienne) ainsi que celui du bâtiment Coriolis. Pour l'instant, ces études ne se focalisent que sur le comportement énergétique du bâtiment, la démarche que nous avons exposée (sur le principe des poupées russes) n'est pas intégrée à ces études. Il nous semble dommage d'en exclure les autres comportements. Le bâtiment Coriolis, par exemple, dont l'enveloppe est conçue et réalisée pour être « thermiquement parfaite » souffre de sérieuses pathologies d'usage dues à la domotique complexe qui y est installée. Dans une autre mesure, l'ESIEE Paris est un bâtiment à l'échelle démesurée dont les linéaires de façade doivent jouer un rôle prépondérant dans le comportement thermique...

Comment pourrait-on faire de l'École d'architecture un cas emblématique pour la transition énergétique sur le campus Descartes ? À plus large échelle, comment pourrait-elle devenir un exemple pour les écoles d'architecture de France ?

1 <http://projets.epa-marnelavallee.fr>

2 Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte



1971  
2007

ENSA Saint-Etienne



1970  
2015

ENSA Clermont-Ferrand



ENSA Lyon



1984

ENSA Normandie



1969

ENSA Toulouse



ENSA Marne-la-vallée



1969

ENSA Nancy



1969

ENSA Bordeaux



ENSA Lille



1969  
2003

ENSA Montpellier



1967

ENSA Marseille



ENSA P. la Seine



1987



ENSA Bretagne

1990



ENSA Grenoble

1978



1998

...



ENSA Nantes

2009



ENSA Versailles

1682  
2005



2006



ENSA P.la Villette

1969



ENSA P.Malaquais

1930  
2000

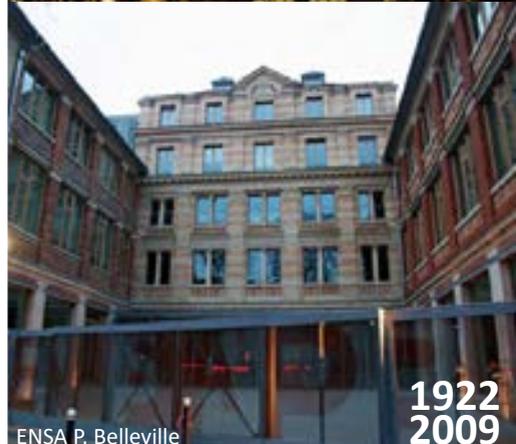


2001



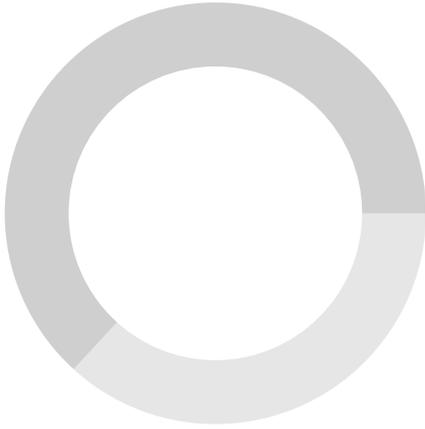
ENSA Strasbourg

2013

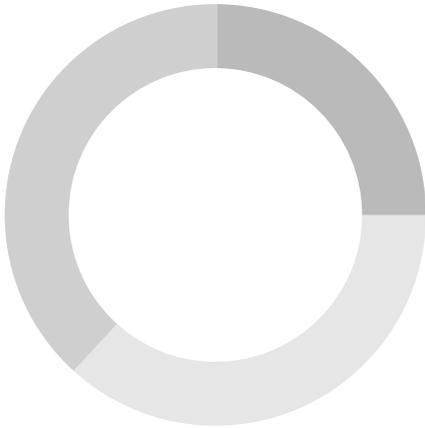


ENSA P. Belleville

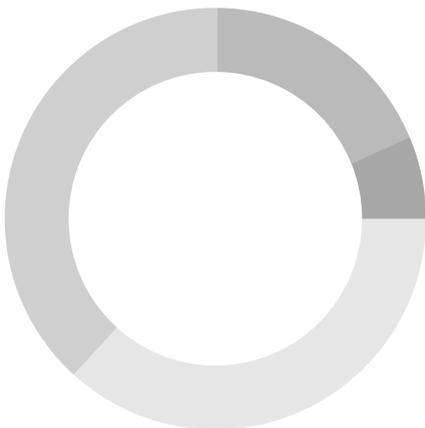
1922  
2009



**14 écoles sur 20**  
ont été construites au XX<sup>e</sup> siècle



**4 écoles sur 20**  
ont déjà été rénovées



**1 école sur 20**  
a été rénovée post RT 2010

## Un bâtiment constitutif du patrimoine du XX<sup>e</sup> siècle

*Patrimoine: n.m. Ce qui est considéré comme l'héritage commun d'un groupe.*<sup>1</sup>

L'École d'architecture de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée est le témoignage d'un état de la société à une époque donnée. Elle fait pour cela partie du patrimoine du xx<sup>e</sup> siècle. Elle est ainsi caractéristique de l'architecture de la fin du siècle, avec ses avantages et ses inconvénients.

Son cas n'est évidemment pas unique : 70 % des écoles d'architecture de France datent aussi de la fin du siècle. La double-page précédente présente toutes les ENSA de France ainsi que leurs années de construction. Les diagrammes ci-contre révèle la part importante des bâtiments construits au xx<sup>e</sup> et ceux qui ont déjà été rénovés. Nous comprenons vite que l'enjeu de la réhabilitation énergétique concerne la grande majorité des Écoles d'architecture de France. L'étude de cas présentée ici se veut donc constitutive d'une démarche pour la transition énergétique, exportable à d'autres bâtiments et appropriable par les étudiants-architectes eux-mêmes.

1 Définition du Larousse





RESEAU ENSAECO

# L'ENSEIGNEMENT DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE DANS LES ENSA

PROGRAMME

6 – 8 JUILLET 2017 – ENSA Lyon

*Quelles pratiques collaboratives pour apprendre  
et entreprendre ?*

INSCRIPTION OBLIGATOIRE : [reseau\\_ensaco@gmail.com](mailto:reseau_ensaco@gmail.com)



## **Un réseau pour l'enseignement de la transition écologique dans les écoles d'architecture :**

### **« Quelles pratiques collaboratives pour apprendre et entreprendre ? »**

Nous avons eu la chance d'être retenus pour les premières rencontres du réseau ENSA-ECO qui a eu lieu à Lyon les 6, 7 et 8 juillet 2017. Cette participation permet d'inscrire dans une réflexion pédagogique globale la transmission du savoir acquis autour du comportement énergétique de l'École d'architecture de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée. Participer aux journées de rencontre de l'enseignement de la transition écologique dans les ENSA prend un sens nouveau pour cette étude. En effet, la question de la transition, qu'elle soit énergétique, pédagogique ou encore culturelle, se pose de plus en plus dans l'enseignement des écoles d'architecture. Elle pose aussi la question de la représentation, primordiale pour une bonne transmission des savoirs, essentielle pour sensibiliser les étudiants et enseignants aux comportements des systèmes socio-énergétiques de l'architecture - enveloppe, dispositifs techniques complexes, usages et comportement.

# Conclusion

Travailler en partenariat avec une école d'ingénieur nous aura permis de mieux saisir et interpréter les enjeux scientifiques relatifs au comportement énergétique de notre école d'architecture. Cette collaboration nous aura apporté les connaissances nécessaires pour une meilleure compréhension des phénomènes physiques à l'œuvre dans le bâtiment. Cette approche s'est enrichie de nos compétences d'architecte, associant à une analyse quantitative une étude des usages et des espaces. Nous avons également accordé une place toute particulière aux analyses du confort, placé au centre de nos préoccupations. Cette approche a nécessité la mise en place d'une méthode singulière dont ce livret constitue le manifeste.

L'École d'architecture de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée est un bâtiment remarquable du patrimoine architectural de la fin du xx<sup>e</sup> siècle. Elle est le témoignage d'un état de la société à une époque donnée, une architecture caractéristique de la fin d'un siècle. Cette étude se veut être un guide pour la rénovation énergétique de ce patrimoine si riche et fragile.

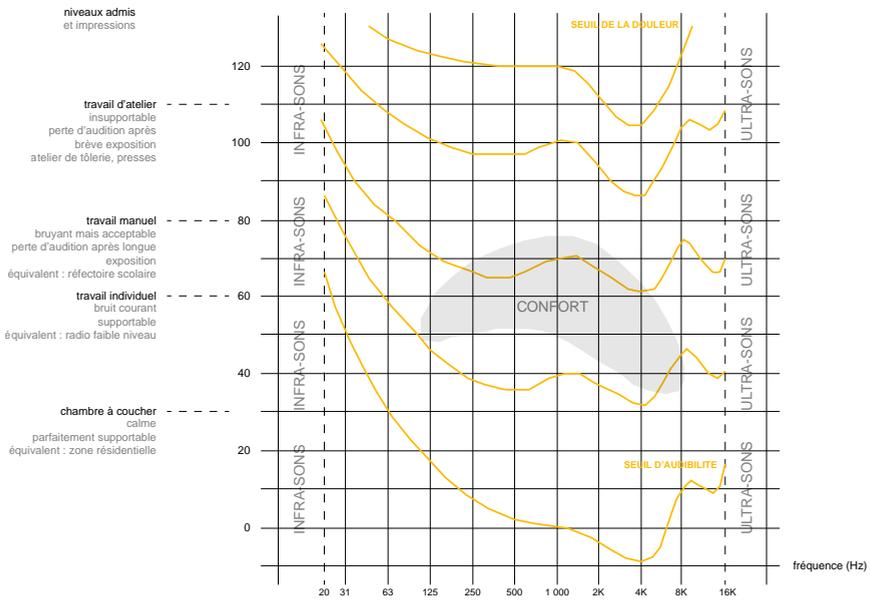
Située dans la cité Descartes, l'école n'est d'ailleurs pas le seul bâtiment constitutif datant de cette période et nécessitant une rénovation. En effet, la majorité des édifices du campus datent de la fin du xx<sup>e</sup> siècle et présentent les mêmes pathologies que l'école d'architecture (factures énergétiques élevées, surchauffes estivales, froid hivernal, etc). C'est pourquoi une étude similaire à la notre a été entamée par l'ESIEE et l'institut de recherche Efficacity sur trois bâtiments témoins. Le campus entre donc lui aussi dans une transition écologique. Parallèlement, un projet de l'EPAMarne a récemment été initié pour faire du campus un « pôle d'excellence du Grand Paris dédié à la ville durable ». Leur ambition est de faire de la cité Descartes un modèle de « métropole du développement durable », territoire attractif pour les investisseurs. Une série d'actions commence donc à agiter le campus et l'école d'architecture y joue un rôle tout particulier.

Cette étude se veut être l'expérimentation pour une nouvelle méthodologie d'enseignement de la transition énergétique : une pédagogie inversée, où les étudiants deviennent acteurs aux côtés des enseignants.

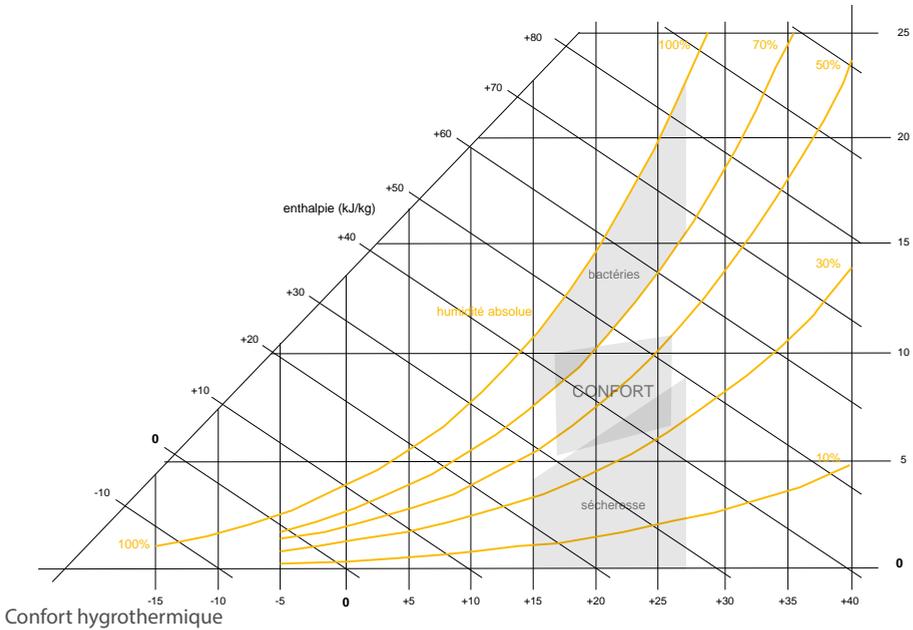
La transition écologique est sans nul une occasion unique pour revoir nos manières d'enseigner et d'agir. Rare moment de cohésion, les considérations d'ordre écologique rapprochent les Hommes et tissent le lien social. Le rôle de l'architecte, grâce à sa capacité de lecture des espaces, sera d'aider à dénouer les problématiques complexes pour chaque bâtiment ou ensemble de bâtiments. En utilisant une méthode simple mais à ré-inventer régulièrement et modestement, il est le ciment pour une transition écologique intelligente et résiliente.



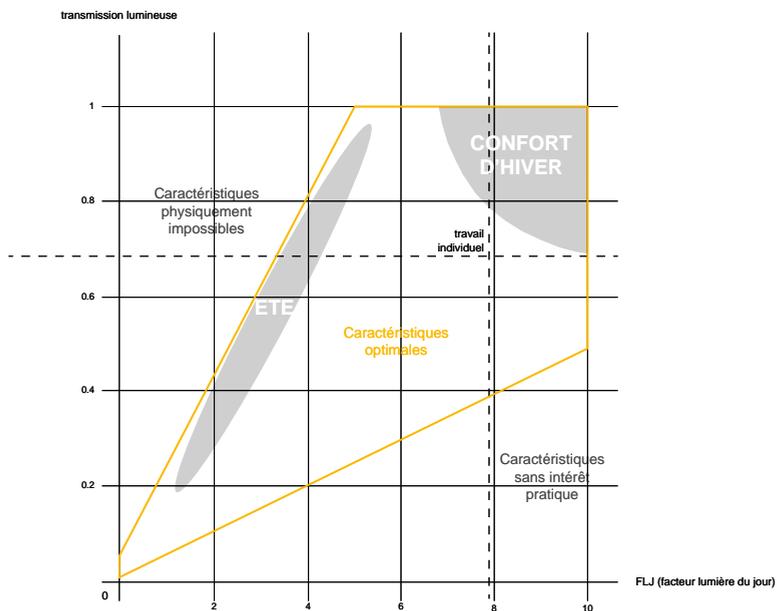
# Annexes



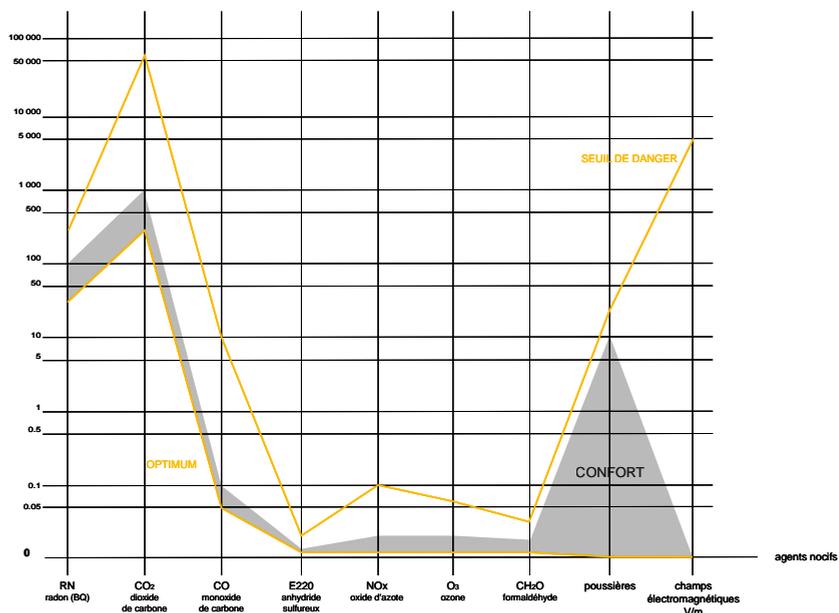
Confort acoustique



# Diagrammes de confort



Confort lumineux



Confort aéraulique

## **Rappel des objectifs loi LTECV :**

### **Objectifs pour 2020 :**

+ 23 % de production grâce à des EnR

### **Objectifs pour 2025 :**

- 50 % de déchets mis en décharge

### **Objectifs pour 2030 :**

- 40 % d'émissions de gaz à effet-de-serre (GES)

- 20 % de consommation en énergie finale

- 30 % de consommation en énergie primaire

+ 32 % de production grâce à des EnR

### **Objectifs pour**

### **2050 :**

- 50 % de consommation en énergie finale

diviser par 4 les émissions de GES

## **Liste des contrats de sous-traitants de l'école :**

- achats de papier ramettes : IANAPA
- eau potable : VEOLIA Eau
- découpe laser (maintenance) : TROTEC
- achats papier traceur : TRACEURDIRECT
- ascenseurs : THYSSENGRUP
- maintenance jusqu'en novembre 2016 : SNEF
- maintenance actuelle : SPIE
- évacuation des eaux pluviales en sous-sol : SANITRA
- impressions (reprographie, encre et maintenance) : RICOH
- impressions (photocopieur) : UGAP
- surveillance : SBTG
- gardiennage : CORPORATE
- programmation de la GTC : Johnson Control
- recyclage canettes : CANIBAL

## **Résumé du contenu de l'AUDIT SUEZ 2012 :**

### **Bâtiment :**

- ERP de 2ème catégorie
- chantier livré en 1999
- 745 occupants
- surface totale 10 300 m<sup>2</sup>, chauffée : 6 728 m<sup>2</sup>
- volume total 30 900 m<sup>3</sup>, chauffé : 20 184 m<sup>3</sup>
- plancher bas de l'atrium : non-isolé
- plancher bas du sous-sol : non-isolé
- plancher haut des sheds : isolé (10cm de panneaux sandwich)
- plancher haut béton : non-isolé

### **chauffage :**

- 25 radiateurs acier type A sur robinets simples
- 60 radiateurs acier type B sur robinets thermostatiques
- 87 radiateurs à ailettes sur robinets thermostatiques
- 6 ventilo-convecteur EC sur robinets simples

### **climatisation :**

- groupe convecteur air plus aux normes depuis 2013
- CTA : non accessible

### **ventilation :**

- simple flux
- entrées d'air par défauts d'étanchéité des menuiseries
- 7 sources en fonctionnement permanent
- bouches d'extraction : mal entretenues

### **ECS : non-accessible**

### **Eclairage :**

- 980 tubes fluo
- 46 ampoules à incandescence
- 490 fluo-compact
- 64 lampes sodium à basse-pression
- 17 halogènes

**Pathologies constatées :**

- ponts thermiques en nez-de-dalle, sur les murs de refend béton, au niveau des escaliers béton
- infiltration d'air froid (seuil d'entrée et portes fenêtres sur l'extérieur)
- chaudière trop puissante par rapport à la puissance nécessaire
- besoins ECS : 68 786 kWh/an
- besoins en chauffage : 871 768 kWh/an

**Qualité de l'air :** non-étudié

**Déchets :** non-étudié

**Contrat entretien paysager :** non-étudié

## Calcul du potentiel d'installation d'un puit canadien :

- profondeur cohérente pour rafraîchissement et préchauffage :  $150\text{cm} < p < 250\text{cm}$
  - type de conduits recommandé : polyéthylène strié (plus d'échanges et meilleure étanchéité)
  - diamètre des conduits minimum : 15 cm
  - vitesse de l'air pour le rafraîchissement : 3 m/s
  - vitesse de l'air pour le préchauffage : 1 à 1,5 m/s
  - rapport débit/température pour un diamètre de 15cm :
    - 100 m<sup>3</sup>/h > environ 20°C
    - 200 m<sup>3</sup>/h > de 20°C à 21°C
    - 300 m<sup>3</sup>/h > de 19°C à 22°C
  - 30 à 40 m de canalisation pour 100 m<sup>2</sup> de SDP environ ou 250 m<sup>3</sup> de volume
  - distance entre les conduits : minimum 150 cm
  - profondeur usuelle : 2 m
  - diamètre usuel : 20 cm
  - vitesse usuelle : 1,5 m/s
  - pente usuelle : 2 à 3 %
  - éloigner les entrées d'air neuf des sources polluantes
  - COP : 20 à 30
- > **potentiel pour l'école :**
- **il faudrait 45 conduits de 35m de long chacun pour alimenter l'atrium**
  - **il faudrait 10 conduits de 35m de long chacun pour alimenter les ateliers nord**

## **Calcul du potentiel d'installation de panneaux solaires PV :**

**- rayonnement global reçu : 1 100 kWh/m<sup>2</sup>/an**

**- toiture à équiper : 576 m<sup>2</sup>**

**> 633,6 MWh/an**

**- rendement : 14 %**

**> 88,7 MWh/an**

**> coût d'installation : 576 000 € HT environ**

**OU**

**- parking à équiper : 1 623 m<sup>2</sup>**

**> 1 785 MWh/an**

**- rendement : 14 %**

**> 250 MWh/an**

**> coût d'installation : 1 600 000 € HT environ > amortissement : 20 ans**

## Constats de ventilation :

Atelier Bo Bardi :

- 75 personnes
- 18 m<sup>3</sup> / h / personnes
- > 1 350 m<sup>3</sup>/h

Vitesse observée (anémomètre à fil chaud) au niveau des bouches d'extraction : 0,1 m/s  
(surface : 0,15m<sup>2</sup>)

> 1,2 m<sup>2</sup>/atelier > 432 m<sup>3</sup>/h par ateliers

Vitesse nécessaire pour atteindre 1 350 m<sup>3</sup>/h : 0,38 m/s

Potentiel de chaleur fatale à récupérer en toiture :

- capacité thermique de l'air :  $c = 1,007 \text{ J/kg.K}$

- masse volumique de l'air à 21°C : 1,2 kg/m<sup>3</sup>

- masse volumique de l'air à 35°C : 1,2 kg/m<sup>3</sup>

- densité de l'air à 21°C : 1,20 kg/m<sup>3</sup>

- densité de l'air à 35°C : 1,17 kg/m<sup>3</sup>

- potentiel de récupération de chaleur fatale par les VMC :

11 200 m<sup>3</sup>/h > 3 986 125 J

**soit 1,11 kWh > 800 kWh/mois (0,5 % de la consommation en gaz pour le chauffage)**

- potentiel de récupération de chaleur fatale par la climatisation des serveurs :

1 080 m<sup>3</sup>/h > 385 401 J

**soit 0,1 kWh > 72 kWh/mois**

- potentiel de récupération de chaleur fatale par les cheminées de la chaufferie :

745 kg/h > 375 107 J

**soit 0,1 kWh > 72 kWh/mois**

## Calcul d'un équilibre pour la transmission thermique de l'extension de l'école :

- apports solaires SUD : 166 kWh/j
- apports solaires EST : 55 kWh/j

- pertes par parois en réglite :

$$U = 5,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$S = 225 \text{ m}^2 \text{ au sud, } S = 100 \text{ m}^2 \text{ à l'est}$$

$$\Delta t = 10$$

$$\text{Delta sud} = U \times S = 225 \times 5,8 = 1\,305 \text{ W/K}$$

$$\text{Delta est} = U \times S = 100 \times 5,8 = 580 \text{ W/K}$$

> pertes par la paroi sud pour  $\Delta t = 10$  : 313 kWh/jour

> pertes par la paroi est pour  $\Delta t = 10$  : 140 kWh/jour

- U idéal pour un équilibre gains/pertes : 3 W/m<sup>2</sup>.K



$$U_w = 3,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

Béton + isolant + plaques métalliques  
 $U_{mur} = 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

$$U_{tot} = 14,82 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$



1 m

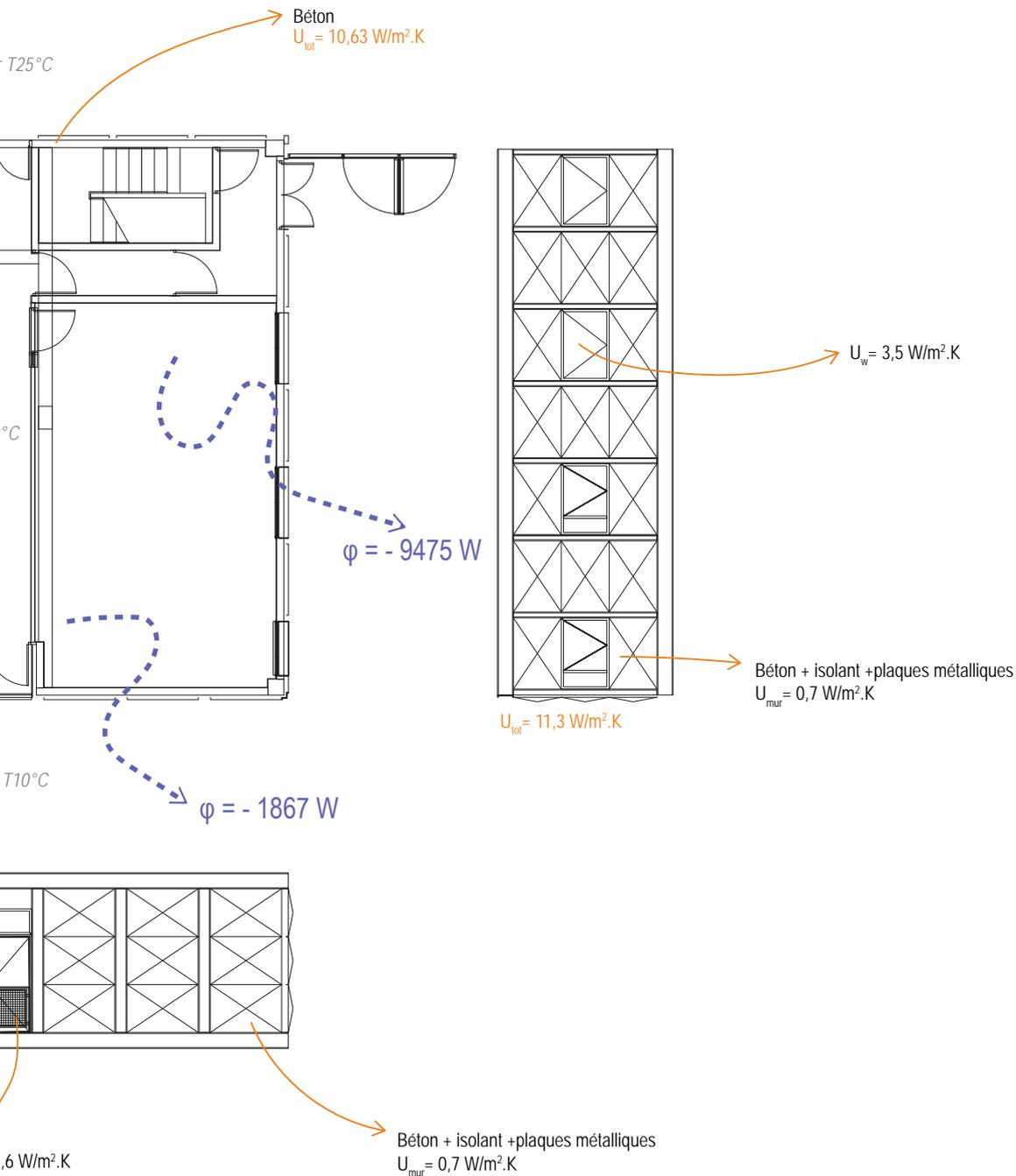
$$\varphi = -5973 \text{ W}$$

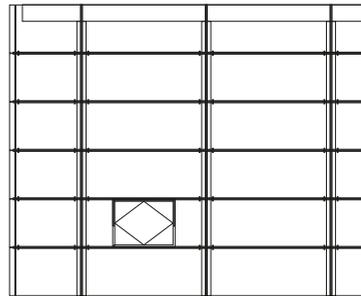
$$U_{\text{plai}} = U_{\text{scl}} = 10,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$U_{tot} = 4,28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$U_w = 3$$

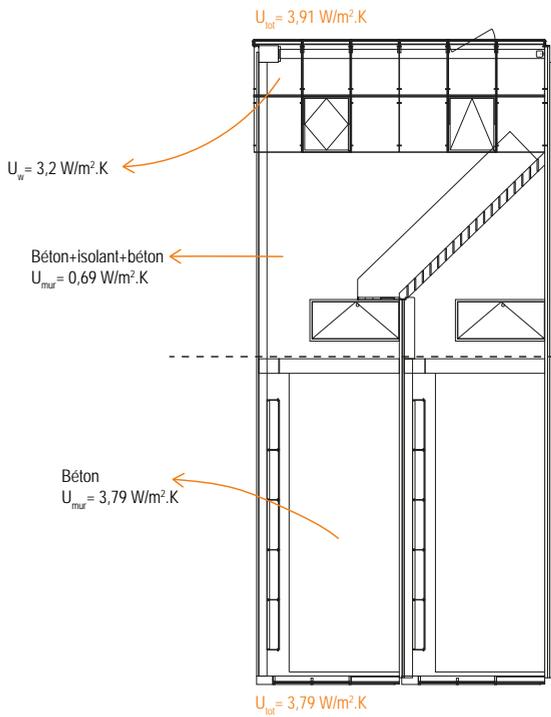
## Blocs sud : conductivité et déperditions thermiques des parois. Exemple d'un étage courant de l'administration.



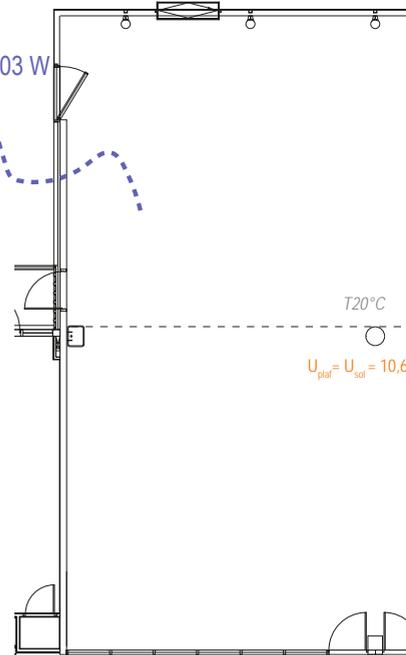


$U_{\text{ext}} = 3,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Extérieur  $T_{10}^{\circ}\text{C}$



$\phi = -703 \text{ W}$



Intérieur  $T_{25}^{\circ}$



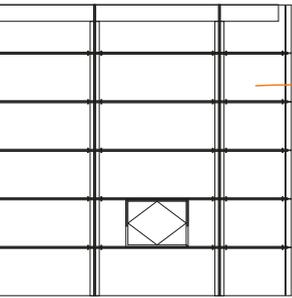
1 m



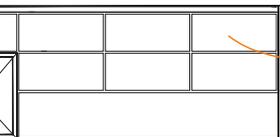
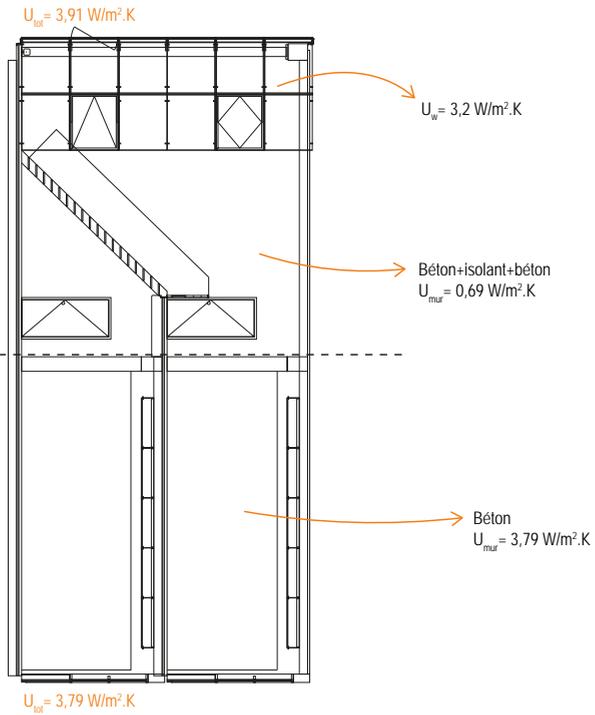
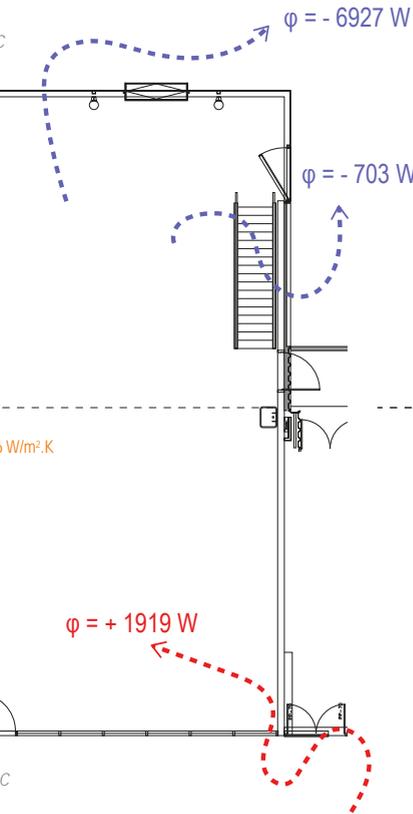
$U_{\text{tot}} = 7,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Plâtre+panneaux acoustique perforés  
 $U_{\text{mur}} = 1,32 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

# Blocs nord : conductivité et déperditions thermiques. Exemple d'un atelier.



$U_w = 3,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$



$U_w = 6,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

## Économies possibles par remplacement des ordinateurs à unité centrale fixes par des ordinateurs portables :

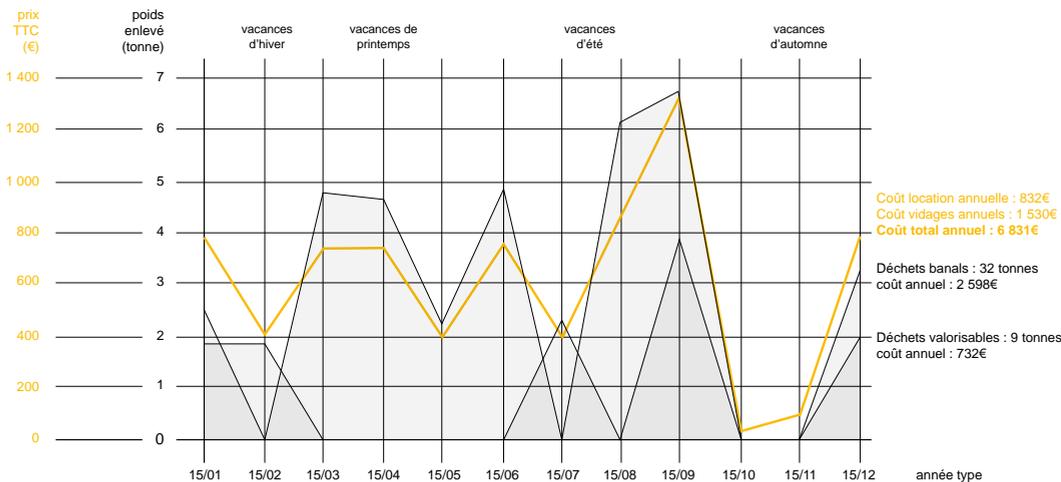
Il y a 114 ordinateurs fixes aujourd'hui :

- puissance écran : 400 W
- puissance unité centrale : 200 W
- temps d'utilisation : 214 j/an et 5h/jour en moyenne  
**> 7 000 kWh/an environ soit ± 9000 €/an**

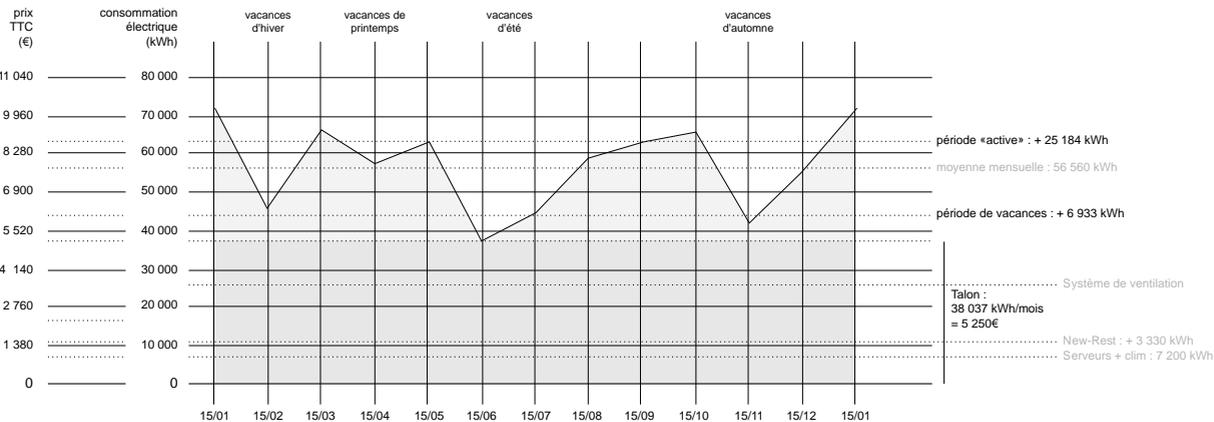
Calcul si des ordinateurs portables étaient utilisés à la place des fixes:

- puissance moyenne : 20 W
- temps d'utilisation : 214 j/an et 8h/jour en moyenne  
**> 34 kWh/an/unité > 2 060 unités possibles contre 114 aujourd'hui pour la même consommation d'électricité**
- > pour un ordinateur portable par usager : 1 030 kWh/an consommés, soit 140€/an.**

### Enlèvement des déchets annuel Ecole complète - année 2016



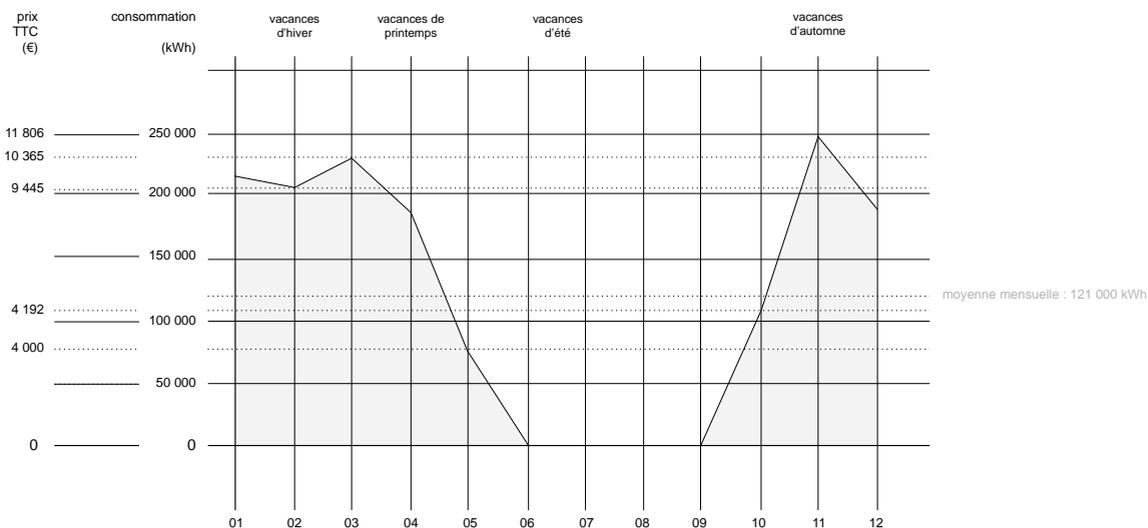
**Consommation électrique annuelle**  
 École complète - année 2016



Puissance souscrite (EdF) : **250 kW**  
 Puissance maximum atteinte en 2016 : **185 kW**

Energie totale consommée sur une année type : **678 710 kWh**  
 Coût annuel avec abonnement : **72 520 €**

**Consommation gaz annuelle**  
 École complète - année 2016



Puissance maximum atteinte en 2016 : **247 kW**

Energie totale consommée sur une année type : **1 459 000 kWh**

# Références bibliographiques

**BACHELARD**, Gaston, *La poétique de l'espace*, Ed. PUF, 2012

**BANHAM**, Reyner, *The architecture of the well tempered environment*, Ed. The university of Chicago Press, 1984

**BIG**, *Hot to cold*, Ed. Taschen, 2015

**BRAUNGART** Michael et **MCDONOUGH** William, *Cradle to cradle*, Ed. Manifestô, 2011

**CASSEGRAIN** Laurence, **LENGERAU** Eric et **KLEIN** Richard, *Architecture des écoles d'architecture*, Ed. d'a, 2006

**COME**, Tony et **POLLET**, Juliette, *L'idée de confort, une anthologie*, Ed. B42, 2016

**DE BOTTON**, Alain, *L'architecture du bonheur*, Ed. LGF livre de poche, 2009

**DREYFUS**, Jacques , *La société du confort*, Ed. L'harmatan, 1990

**ENCORE HEUREUX**, collectif, *Matière grise*, Ed. Pavillon de l'Arsenal, et Ed B2, 2014

**FROMNOT**, Françoise, **LECLERC**, David, "Bernard Tchumi, pour quoi faire?", *le visiteur*, n°5, printemps 2000, p. 6-23

**FOURASTIE**, Jean et Françoise, *Histoire du confort*, Que sais-je?, n° 449, Ed. Presses universitaires de France, 1973

**GIVONI**, Baruch, *L'homme, l'architecture et le climat*, Ed. du Moniteur, 1978

**GOUBERT**, Jean-Pierre, *Du luxe au confort*, Ed. Belin, 1973

**GRAF**, Franz, *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XX<sup>e</sup> siècle*, Ed. PPUR, 2016

**GUERRANS**, Roger-Henri, *Corps et confort dans la ville moderne*, Ed. Recherches, 2010

**HESCHONG**, Lisa, *Architecture et volupté thermique*, Ed. The MIT press, 1979

**LAVOYE**, Frédéric, *Qualité des ambiances dans les bâtiments*, Ed. Presses des Mines, 2015

**MACKAY**, David J.C., *L'énergie durable, pas que du vent*, Ed. De Boeck et Amides, 2012

**MARCHAND**, Bruno, « Retour à la normalité ? », *Revue Matières*, n°12, Ed. PPUR, 2016

**MEADOWS**, Dennis, *Limits to growth*, Ed. Earthscan, 2005

**MOHOLO-NAGY**, *Du matériau à l'architecture*, Ed. de la Villette, 2015

**PEZEU-MASSABUAU**, Jacques, *Eloge de l'inconfort*, Ed. Parenthèses, 2004

**SEZE**, Claudette, *Confort moderne, une nouvelle culture du bien-être*, Ed. Autrement, 1994

**« Webographie » :**

MANICORE, [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

THE SHIFT PROJECT, [www.theshiftproject.org/fr](http://www.theshiftproject.org/fr)

NEGAWATT, [www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)

ENERGIE PLUS, [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)

IPCC, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

**Confort et énergie**  
**L'école d'architecture comme outil pour**  
**l'enseignement de la transition écologique**

**Commanditaire de l'étude**

Amina Sellali, directrice de l'École d'architecture  
de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée

**Étudiants**

Coralie Coutellec  
Marion Gardier  
Joan Gaudin  
Pamela Ibanez

**Partenariat**

avec l'ESIEE  
Mathieu Bourdeau

Cette étude a été menée d'octobre 2016  
à juin 2017 dans le cadre du DPEA architecture  
post-carbone, encadré par Jean-François Blassel,  
Raphaël Ménard et Marc de Fouquet.

**Diplôme propre aux écoles d'architecture**  
**(DPEA) Architecture post-carbone**  
**délivré par le ministère de la Culture**  
**et de la Communication, dirigé**  
**par Jean-François Blassel, architecte ingénieur**

Coordination administrative  
Nathalie Guerros  
tél. +33 (0)1 60 95 84 66  
nathalie.guerros@marnelavallee.archi.fr

École nationale supérieure d'architecture  
de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée  
12 avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne  
77447 Marne-la-Vallée Cedex 2  
www.marnelavallee.archi.fr



**Le DPEA architecture post-carbone est une formation post-master de l'École d'architecture de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée. Il est conduit en partenariat avec l'École des Ponts ParisTech, est destiné à des architectes et s'intéresse à l'impact des bâtiments, des infrastructures et de la ville sur l'environnement: les matériaux et leurs transformations, l'architecture de la structure, des enveloppes, des aménagements territoriaux et leur contenu énergétique. La majeure partie de cette formations est dédiée à la réalisation d'études à caractère prospectif commanditées par des collectivités territoriales,**

**des institutions publiques ou des organismes privés. Au-delà des réponses particulières à des problématiques urbaines et architecturales spécifiques, ces travaux contribuent bien souvent à faire émerger de nouveaux questionnements et à expérimenter de nouvelles approches dont la portée peut être plus générale. Ces cahiers sont ainsi destinées à faire partager le résultat de ces recherches auprès du monde universitaire professionnel et plus largement auprès de tous ceux qui s'intéressent aux questions que posent l'architecture, la ville et les territoires, à la lumière des enjeux énergétiques.**

## **Confort et énergie**

### L'école d'architecture comme outil pour l'enseignement de la transition écologique

L'École d'architecture de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée a été construite par l'architecte Bernard Tschumi à une époque où les considérations d'ordre énergétique étaient en marge du débat public. En effet, depuis la révolution industrielle, l'énergie bon marché et le développement de systèmes techniques complexes ont entraîné une artificialisation du climat intérieur des bâtiments.

De plus, l'architecture des bâtiments d'enseignement est un exercice tout-à-fait particulier. La conception d'une école architecture est sans nul doute un projet aussi stimulant que périlleux pour l'architecte. Il s'agit de faire la démonstration de ses compétences, en bâtissant un édifice dont les utilisateurs seront les premiers détracteurs. Bernard Tschumi, fidèle à sa démarche, construit un bâtiment signature en mettant en avant un concept architectural fort mais néanmoins déconnecté de son contexte climatique.

Presque vingt ans plus tard, l'école d'architecture de Marne-la-Vallée possède nombre des caractéristiques du patrimoine du xx<sup>e</sup> siècle, notamment celui d'être énergivore. Loin du laisser-faire de l'époque, les enjeux environnementaux d'aujourd'hui imposent de reconsidérer ce patrimoine en l'inscrivant dans un projet de transition énergétique. C'est par l'implication des habitants à chacune des échelles que l'étude suggère un futur désirable et appropriable par les membres de cette société en construction.