

Analyse des outils permettant l'évaluation du confort visuel dans les bâtiments

Modèle 3D d'une rue pour une étude thermique urbaine à l'aide des éléments finis

Nicolas DUPORT, 5^{ème} année école d'ingénieur à l'Institut Supérieur Aquitain du Bâtiment et des Travaux Publics

Fabian BERTOCCHI, Service Maîtrise d'œuvre Nobatek INEF4

Benoit BECKERS, Chaire « Architecture et physique urbaine »

Résumé

Partout dans le monde, la croissance accélérée des villes, l'étalement urbain, les questions énergétiques liées au changement climatique, l'épuisement des combustibles fossiles et l'intégration des énergies renouvelables dans des réseaux de plus en plus complexes, ainsi que l'équilibre à trouver entre les différentes utilisations du sol (bâti, cultivé et laissé à la nature) placent les décideurs face à de grandes incertitudes. Il est particulièrement difficile de choisir entre différents scénarios d'évolution de la ville car ce choix aura probablement des impacts sur le très long terme. Afin d'appréhender au mieux ces scénarios, mais aussi pour pouvoir qualifier les phénomènes physiques présents au cœur des sites urbains contemporains, il est nécessaire d'améliorer la qualité des indicateurs de confort couramment utilisés dans les projets de construction. Ce rapport se décompose en deux parties. Dans la première partie, après une brève présentation d'une étude d'éclairage naturel, une discussion est menée afin de qualifier les indicateurs dynamiques, comme l'Autonomie en Lumière du Jour (DA, pour *Daylight Autonomy*). Dans la seconde partie, après avoir passé en revue certains aspects des Simulations Thermiques Dynamiques (STD), une introduction à la Méthode des Elements Finis (FEM, pour *Finite Element Method*) pour l'étude thermique d'une rue est réalisée. En particulier, les éléments préalables à une telle étude, comme l'introduction de la géométrie CAO dans un logiciel d'éléments finis, sont détaillés. Finalement, une vue d'ensemble des éléments permettant de mieux quantifier et qualifier les échanges thermiques d'un site urbain est présentée.

Mots clés : *Eclairage naturel ; Autonomie en lumière du jour ; Simulation Thermique Dynamique ; Méthode des Eléments Finis ; Environnement urbain*

Remerciements

A l'occasion de mon stage de fin d'études, je tiens à remercier en premier lieu, pour m'avoir accueilli au sein de la société Nobatek INEF4 :

- M. Olivier SCHEFFER, Directeur général
- M. Frédéric BETBEDER, responsable du pôle Innovation pour l'Architecture et l'Urbanisme Durable
- M. Fabian BERTOCCHI, chef de projet au sein du service de Maitrise d'œuvre.

Je souhaite particulièrement remercier M. Fabian BERTOCCHI pour m'avoir accueilli au sein de son service. Je voudrais également remercier les ingénieurs M. Maxime BOSSU, M. Guillaume LAVAL, Mme Marie-Annick JAURY et M. Maxime COMMINGES, pour le travail que nous avons fait ensemble mais aussi pour avoir pris le temps de répondre à chacune de mes questions. De plus, je voudrais adresser mes remerciements à tous les collaborateurs de la société de Nobatek INEF4 pour leur accueil et leur sympathie.

Ceux-ci ne sauraient être complets sans remercier M. Benoit BECKERS, professeur à l'ISA BTP et mon futur directeur de thèse, pour m'avoir conseillé et aiguillé tout au long de mon stage. Je souhaite également remercier l'encadrement de l'ISA BTP pour nous offrir la possibilité d'effectuer des stages en entreprise pendant la formation à l'école. En effet, il est bien connu que l'on n'apprend jamais mieux qu'en pratiquant, et ce stage nous permet d'acquérir des compétences utiles à notre prochaine insertion professionnelle, et d'avoir ainsi une meilleure crédibilité auprès de nos futurs collaborateurs.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	4
2	ETUDE DES OUTILS D'ECLAIREMENT NATUREL.....	5
2.1	CAS D'ETUDES 1 : CALCUL DES INDICATEURS D'ECLAIREMENT NATUREL	5
2.2	RESULTATS CAS D'ETUDES 1	9
2.3	DISCUSSION SUR LES METHODES UTILISEES	13
2.4	EXPERIMENTATION : PROJET « ECLAIR ».....	14
2.5	CONCLUSIONS.....	16
3	MODELE 3D D'UNE RUE POUR UNE ETUDE THERMIQUE URBAIN	17
3.1	CAS D'ETUDES 2 : REALISATION D'UNE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE	18
3.2	RESULTATS CAS D'ETUDES 2	19
3.3	DISCUSSION SUR LA METHODE UTILISEE	22
3.4	FEM : EXEMPLE DU DIDAM.....	26
3.5	INTRODUCTION D'UN MODELE CAO D'UNE RUE PREALABLE A SON ETUDE THERMIQUE A L'AIDE DES ELEMENTS FINIS	28
4	CONCLUSION.....	34
5	REFERENCES.....	35
6	ANNEXES.....	37
6.1	RESULTATS D'ETUDES CAS 1	38
6.2	FICHE MATERIELS.....	48
6.3	SCENARIOS STD/COMPOSITION DES PAROIS	49

1 Introduction

Désireux de réaliser une thèse après mon école d'ingénieur, c'est tout naturellement que je me suis rapproché de M. Benoit BECKERS afin d'appréhender les différents thèmes des recherches menées par la chaire « Architecture et Physique Urbaine ». Ce nouveau laboratoire mène des travaux en collaboration avec la société Nobatek INEF4, présente sur le campus Montaury et qui a l'avantage d'être un Centre de Ressources Technologiques (CRT) ainsi qu'un Institut pour la Transition Energétique (ITE). Les cours reçus à l'ISA BTP grâce à l'option « Habitat & Energie », ma motivation de vouloir traiter des sujets liés au confort des habitants ainsi que mon désir d'intégrer une équipe dynamique reposant sur une philosophie non conventionnelle constituent les fondements de ma demande de stage de fin d'études au sein de Nobatek INEF4. Ainsi, la direction de Nobatek INEF4 a répondu favorablement à ma demande et j'ai intégré le service de maîtrise d'œuvre dirigé par M. Fabian Bertocchi. Ce service a pour but d'accompagner les architectes et autres maîtres d'ouvrage dans leur projet en proposant des solutions innovantes et alternatives. Ces solutions répondent aux questions liées au confort des usagers dans le domaine de l'éclairage naturel et du confort thermique et hygrothermique. Ce service met également en application les travaux menés par les autres services de la société qui ont pour objectif d'élaborer de nouvelles méthodes afin d'améliorer et de mieux contrôler tous les aspects liés au développement durable dans le secteur du bâtiment.

Au cours de ces cinq mois de stage, les travaux auxquels j'ai pu participer peuvent être classés en deux catégories. La première repose sur l'étude de la lumière naturelle des bâtiments et la seconde sur l'étude thermique des bâtiments. Ainsi, j'ai pu réaliser des études portant sur des projets concrets de maîtrise d'œuvre afin d'appréhender les besoins et les demandes des usagers. En particulier, j'ai eu la possibilité de mener des études de facteurs de lumière du jour (Daylight Factor), d'autonomie en lumière du jour (Daylight Autonomy) ainsi que de Simulation Thermique Dynamique (STD). En outre, ce stage m'a permis de participer au projet « Eclair » qui lie le service de M. Bertocchi et la chaire de M. Beckers. Ce projet a pour objectif d'améliorer les méthodes permettant d'étudier la lumière naturelle dont les spécificités sont détaillées plus loin dans ce rapport.

Ce document est divisé en deux parties. La première sera consacrée à l'étude de la lumière du jour dans les projets de constructions. Une rapide présentation des outils permettant l'évaluation de l'éclairage naturel sera faite et s'ensuivra une réflexion sur les données d'entrée d'une telle étude ; les travaux du projet « Eclair » ont pour objectifs principaux d'apporter une partie des réponses à cette réflexion. La seconde partie du rapport sera consacrée à la présentation d'une étude thermique à l'échelle d'un bâtiment telle qu'elle est communément réalisée aujourd'hui. Pour finir, une réflexion portée sur les préliminaires d'une étude thermique à l'échelle urbaine sera menée.

2 Etude des outils d'éclairage naturel

Avec l'apparition des nouvelles réglementations thermiques au début du siècle (en France : RT 2000, RT2005, RT2012 et bientôt RT2020), de nouveaux enjeux sont apparus sous la forme de performances environnementales dans le but de limiter les impacts environnementaux des projets de constructions tout en améliorant le confort et la santé des habitants. Les premières démarches environnementales mises en œuvre ont proposé des indicateurs et des niveaux de performances qui ont ensuite été intégrés par les référentiels de certification environnementale (HQE en France, BREEAM au Royaume Uni, LEEDS aux Etats-Unis, ...). Ces démarches favorisent globalement l'utilisation de la lumière naturelle et poussent la conception à garantir des niveaux optimums d'éclairage et d'uniformité en lumière naturelle, à proposer des accès aux vues extérieures ou encore à mettre en place un contrôle solaire optimisé. La conception doit ainsi trouver un compromis entre les critères de confort lumineux et thermique, ainsi que des objectifs énergétiques de plus en plus exigeants. Dans les bâtiments tertiaires, la part de l'éclairage artificiel peut représenter jusqu'à 40 % de l'électricité consommée [ADEME, 2007], [GREENLIGHT, 2002] ; d'où l'importance maîtriser l'éclairage naturel dans la conception bioclimatique. Les effets moins aisément quantifiables de la lumière naturelle sur le bien-être, la santé et la productivité sont également à prendre en considération.

L'étude d'éclairage naturel permet de quantifier l'apport de lumière naturelle dans le bâtiment étudié, à partir d'un modèle 3D de ce bâtiment et de son environnement. Pour quantifier cet apport, les différents logiciels de calcul s'appuient sur :

- La géométrie du bâtiment, des pièces et des ouvertures,
- Les caractéristiques des menuiseries (transmission lumineuse),
- Les caractéristiques des revêtements intérieurs (couleur, aspect),
- Les protections solaires,
- Les masques proches.

Les résultats obtenus après simulation sont de plusieurs natures :

- L'éclairage naturel, en lux, représente le flux lumineux reçu par une surface.
- La luminance, en cd/m^2 , permet de quantifier l'éblouissement.

A partir de ces résultats, il existe plusieurs indicateurs présents dans les différentes certifications qui permettent d'appréhender l'éclairage naturel d'un projet, comme le Daylight Factor ou bien le Daylight Autonomy. Les deux principales méthodes pour pouvoir calculer de tels indicateurs sont le Lancer de Rayon et la Radiosité [Bugeat, 2017].

2.1 *Cas d'études 1 : Calcul des indicateurs d'éclairage naturel*

Dans quasiment tous les projets menés par Nobatek INEF4, les maîtres d'ouvrage exigent d'étudier les différents paramètres que l'on vient de citer. Ces études sont réalisées le plus en amont possible lors de la phase de conception pour pouvoir anticiper d'éventuelles modifications en fonction des résultats des indicateurs.

Ainsi, l'exemple du projet de rénovation du collège Jacques ELLUL en phase d'Avant Projet Sommaire est présenté ci-dessous. Le but de cette étude est d'appréhender les résultats du projet aux différents indicateurs présents dans les certifications. Même si le projet ne vise pas une certification, puisque ces dernières ne sont pas obligatoires, les maîtres d'ouvrage peuvent choisir d'avoir un niveau d'exigence conforme aux certifications pour des raisons de compétitivité du marché ou par motivation de développement durable.



Illustration 1 : Vue 3D du projet de restructuration du collège Jacques ELLUL

Objet de l'étude

Les présentes études ont pour objet d'évaluer les besoins énergétiques, le confort thermique (*voir cas d'étude 2*) puis l'éclairage naturel du projet de restructuration du collège Jacques ELLUL à Bordeaux sur le site Mayaudon.

Aucune certification n'est exigée pour ce projet. Ceci dit, afin de qualifier le niveau de performance énergétique et le confort hygrothermique dans les locaux, nous pouvons nous référer aux niveaux d'exigences définis par :

- Le CRET (cahier de recommandations environnementales et techniques pour la construction et la réhabilitation des collèges du Département de la Gironde),
- La Certification NF HQE™ Bâtiments Tertiaires Neuf.

Pour l'éclairage naturel, l'objectif du CRET est :

- Apporter une quantité de lumière naturelle de 300 lux sur les plans de travail des élèves ou les bureaux sans éblouissement et en limitant le recours à l'éclairage artificiel.
- FLJ moyen > 2,5 dans les salles de classes
- FLJ moyen > 2,5 dans les bureaux

Aussi, le CRET préconise d'atteindre un temps d'utilisation de l'éclairage naturel minimum de 60%, tout en veillant à intégrer les problématiques de surchauffe estivale, pour atteindre un éclairement minimal moyen de 300 lux sur le plan de travail dans l'ensemble des locaux.

Définition des deux indicateurs utilisés

Le facteur de lumière du jour (FLJ) en un point intérieur est le rapport entre l'éclairement naturel reçu en ce point et l'éclairement extérieur sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé, par ciel couvert. Le ciel couvert normalisé CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) est ici utilisé [Moon, 1942].

Ces deux valeurs d'éclairement (intérieur et extérieur) proviennent de la lumière reçue d'un même ciel dont la répartition des luminances est supposée ou connue, la lumière solaire directe étant exclue. Le FLJ s'exprime en % [Waldram 1909]. Sous les conditions de ciel couvert, les valeurs du facteur de lumière du jour sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison et de l'heure. Les valeurs du FLJ d'un local peuvent ainsi être comparées aux valeurs de FLJ minimum de référence. Cependant, le FLJ ne permet pas de voir immédiatement si les niveaux d'éclairement recommandés pour une tâche visuelle sont atteints.

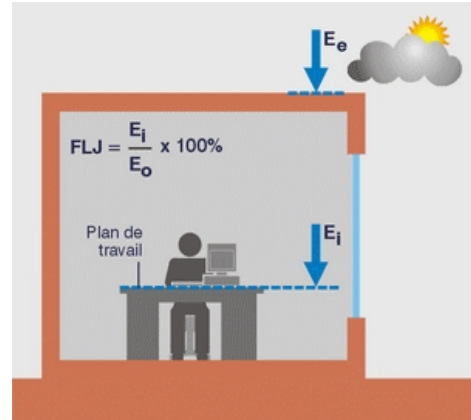


Illustration 2 : Représentation graphique du calcul du FLJ

L'Autonomie en lumière du jour (ALJ) est définie comme étant le pourcentage d'heures occupées par an durant lesquelles un niveau d'éclairement minimum est maintenu grâce à la seule lumière naturelle [Reinhart 2001]. Elle s'obtient grâce aux calculs heures par heures des éclairagements dans un bâtiment, suivant les conditions climatiques extérieures. C'est donc un calcul dynamique qui tient compte des variations du ciel et de la position géographique du lieu, puisqu'il se base sur des données météorologiques annuelles.

$$A_{Emin} = \frac{H_{E > Emin}}{H_{occ}}$$

Avec :

E_{min} : L'éclairement seuil minimum exprimé en lux.

A_{Emin} : L'autonomie lumineuse pour un éclairement seuil E_{min} (lux).

$H_{E > Emin}$: Nombre d'heures occupées durant lesquelles la lumière naturelle seule produit un éclairement supérieur à la valeur seuil E_{min} .

H_{occ} : Nombre total d'heures occupées durant l'année.

Hypothèses de simulation

Les hypothèses de réflexions des matériaux, de transparences des vitrages et des masques solaires pour ce projet sont :

- Coefficient de réflexion des murs : 0.5
- Coefficient de réflexion des plafonds : 0.7
- Coefficient de réflexion des sols : 0.3
- Coefficient de réflexion des masques : 0.5
- Transmission lumineuse des vitrages : 0.56

La simulation a été effectuée sur le logiciel Pléiades Comfie utilisant le moteur de calcul Radiance [Ward, 1998] reposant sur la méthode du lancer de rayons.

Les images ci-dessous représentent le projet modélisé dans le logiciel Pléiades Comfie.

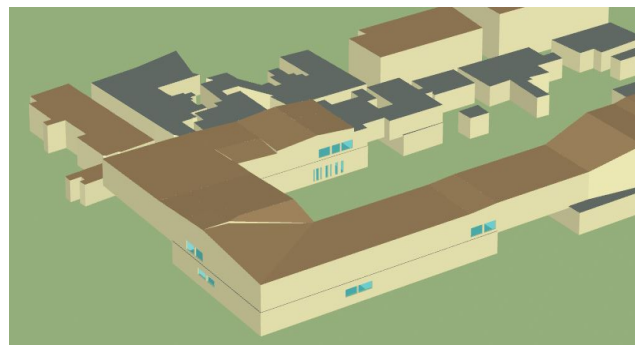
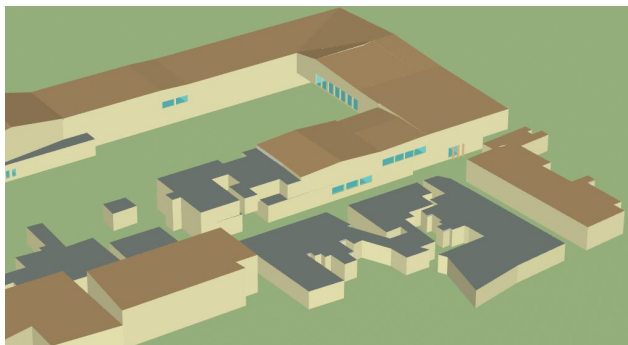


Illustration 3 : Modélisation du projet du collège Jacques ELLUL sur Pléiades Comfie

Les locaux étudiés sont décrits sur les deux illustrations ci-dessous :

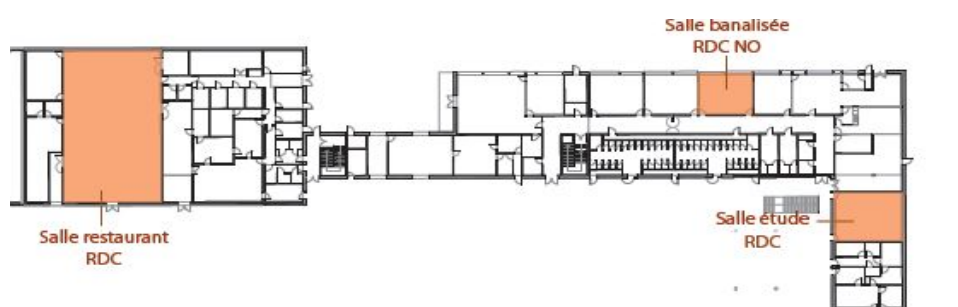


Illustration 4 : Plan des locaux étudiés situés au rez-de-chaussée

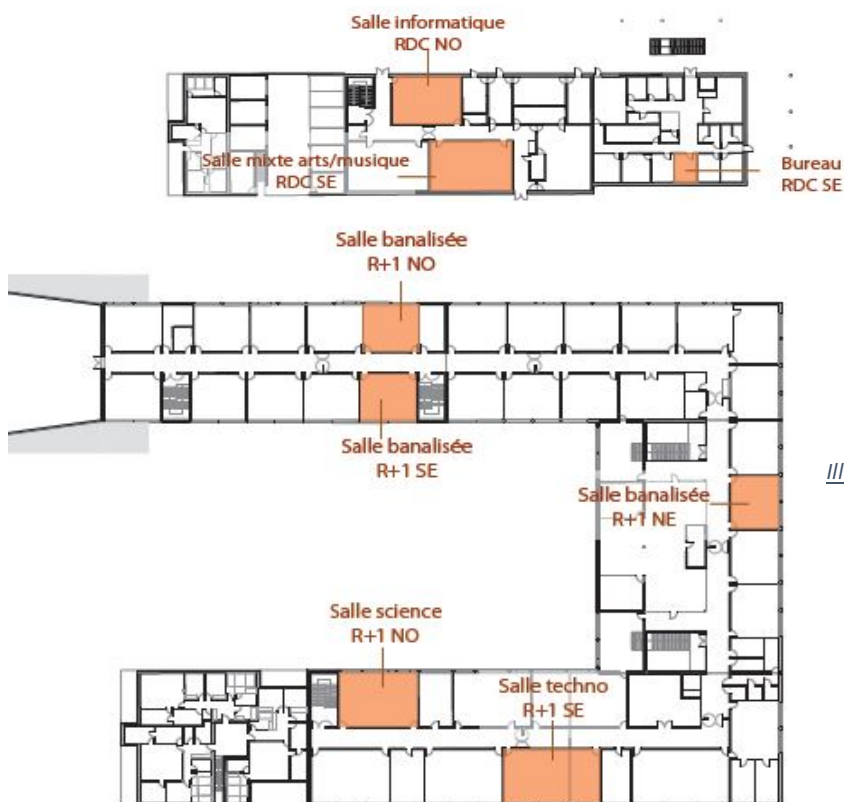


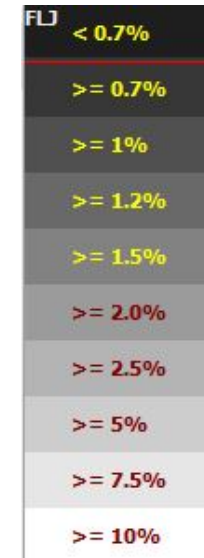
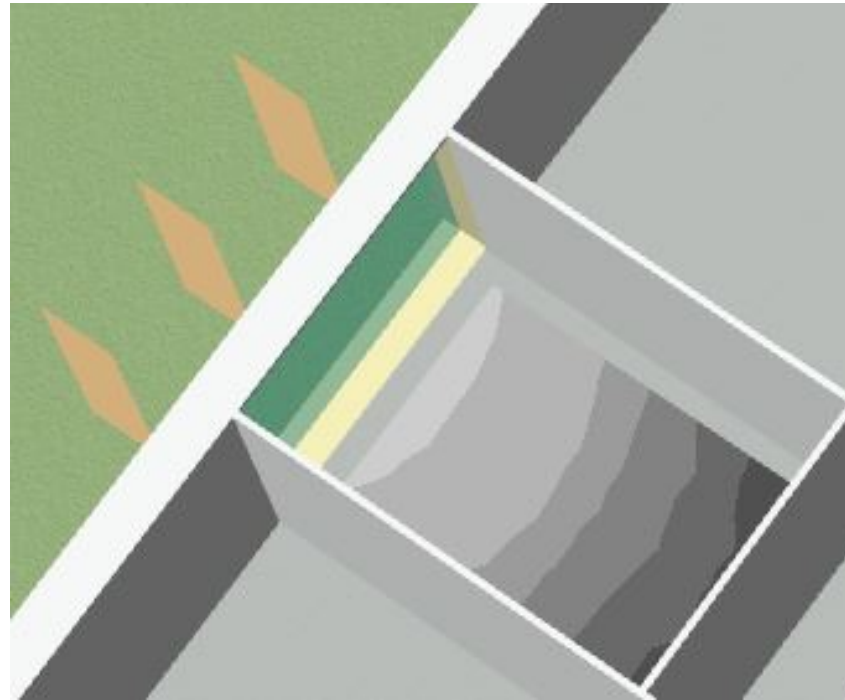
Illustration 5 : Plan des locaux étudiés situés au R+1

2.2 Résultats cas d'études 1

Les résultats de FLJ pour un bureau ainsi que pour une salle de classe sont présentés ci-dessous à titre d'exemple. Les résultats des autres locaux étudiés sont récapitulés en Annexe 1.



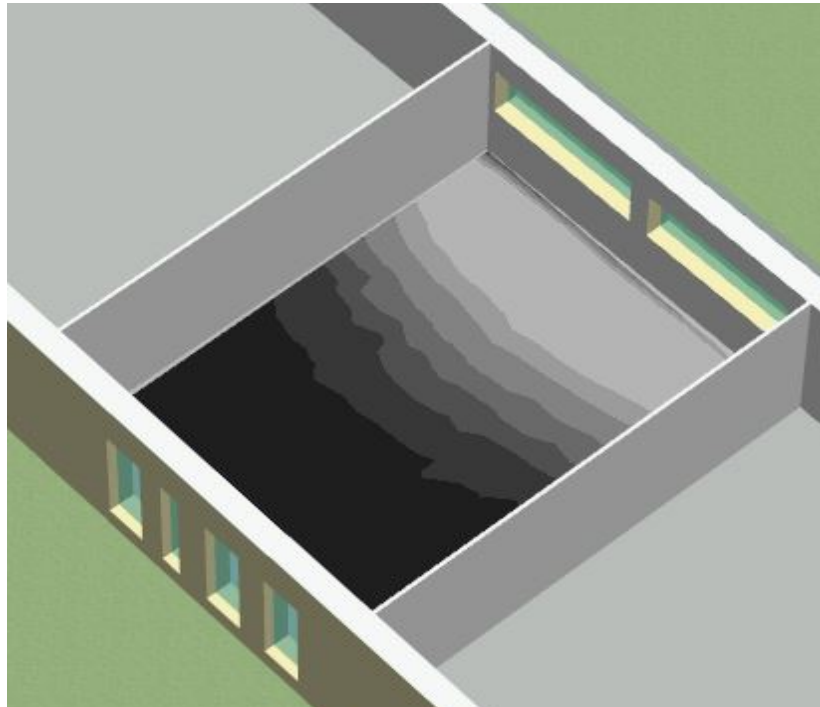
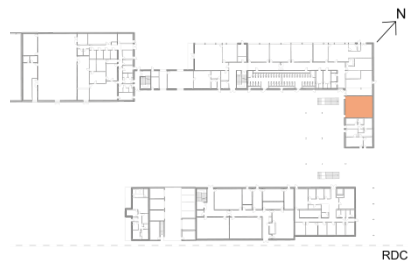
Localisation : Bureau
gestionnaire
Etage : RDC



FLJ moyen : 2.7 %

Remarque : Malgré le masque induit par l'étage supérieur, le niveau d'éclairage naturel de cette pièce peut être considéré comme satisfaisant. Ceci s'explique notamment par la profondeur raisonnable du local et une façade totalement vitrée. Il est cependant conseillé de positionner le mobilier en fonction de la répartition des FLJ (bureau à proximité du vitrage et mobilier de rangement plutôt dans les parties sombres).

NOTA : Ce résultat a été obtenu avec des brise-soleil perpendiculaires par rapport à la façade. Si on considère une orientation à 45°, le FLJ moyen tombe à 2,16%.



FLJ	< 0.7%
	≥ 0.7%
	≥ 1%
	≥ 1.2%
	≥ 1.5%
	≥ 2.0%
	≥ 2.5%
	≥ 5%
	≥ 7.5%
	≥ 10%

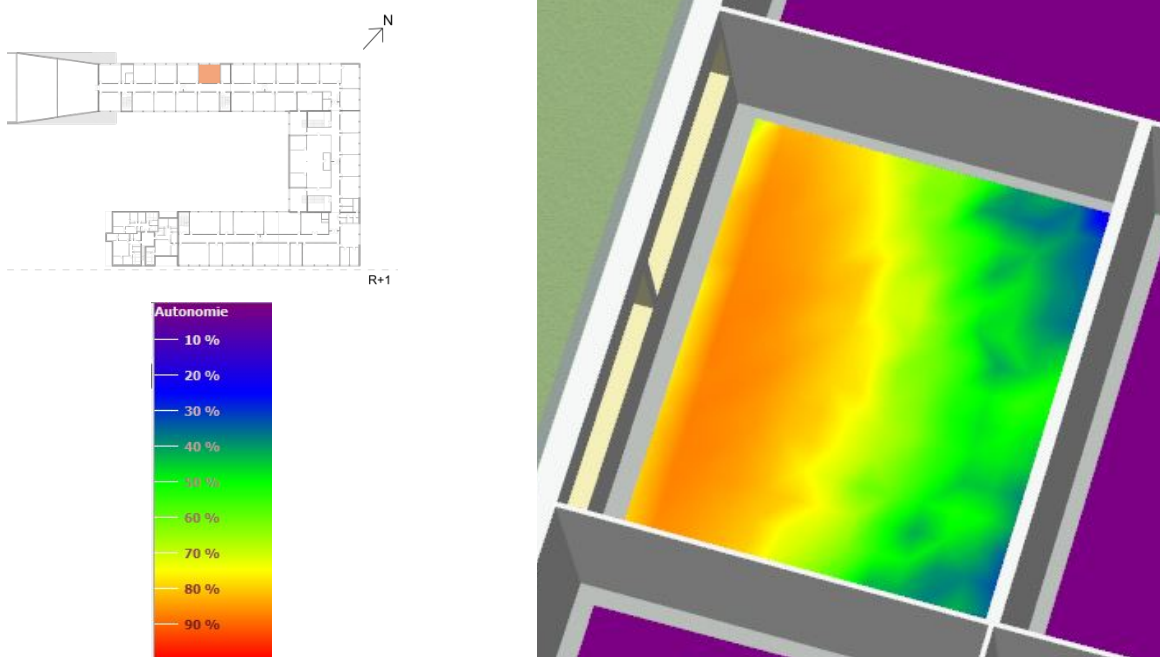
Localisation : Salle étude
Etage : RDC

FLJ moyen : 1.56%

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est faible. Ceci s'explique par la présence d'une faible surface vitrée au regard de la hauteur et de la profondeur du local. Aussi, il est à noter que l'étage fait office de masque aux vitrages donnant sur la cour intérieure du collège.

Cependant, le niveau d'éclairage de cette pièce, permet d'atteindre le niveau Performant de la cible 10 du référentiel HQE qui exige un minimum de 1,5% d'éclairage naturel sur 80% de la surface de premier rang.

Le tableau ci-dessous présente les résultats d'autonomie en lumière du jour pour une salle de classe à titre d'exemple.



Localisation : Salle banalisée NO
Etage : R+1

Ci-dessus, l'exemple de la salle banalisée au nord-ouest, atteignant l'objectif en ayant > 65% d'autonomie lumineuse.

Finalement, nous obtenons des résultats d'éclairage naturel pour les locaux étudiés :

Pièce	Facteur Lumière du Jour (%)	Autonomie en lumière du jour (%)
SB RdC NO	2.84	65.75
Salle étude RdC	1.56	38.16
Bureau RdC	2.7	80.93
Salle mixte	3	79.29
Salle info	1.1	23.29
SB R+1 NO	3.28	64.03
SB R+1 SE	3.22	76.61
SB R+1 NE	3.23	65.43
Salle techno	3.13	77.76
Salle science	2.84	60.21

En ce qui concerne l'éclairage naturel, la majorité de locaux répondent aux exigences FLJmoyen > 2%. Seules la salle d'étude masquée par le débord du CDI à l'étage et la salle informatique dont le bandeau vitré représente une faible surface vitrée ne respectent pas ces enjeux. Il semble cependant important de ne pas modifier le vitrage de la salle informatique pour ne pas engendrer des surchauffes (apports solaires plus apports internes). Partout ailleurs, les exigences sont respectées.

2.3 Discussion sur les méthodes utilisées

L'indicateur statique de Facteur de Lumière du Jour est plus couramment utilisé dans les projets de maîtrise d'œuvre que l'autonomie lumineuse. Son temps de calcul faible et sa nature de quantité d'observation [Beckers, 2011] en font un indicateur très apprécié par les ingénieurs de bureau d'études. Il correspond à la perception immédiate de l'œil humain en comparant directement la luminosité intérieure avec la luminosité extérieure. C'est donc un indicateur facile à mesurer et à interpréter, mais le calcul est en général très simplifié (limitation du nombre de réflexion) au prix d'une perte totale de l'information géométrique. Précisément, [Bugeat, 2017] met en lumière plusieurs limites du FLJ :

- Non prise en compte du rayonnement solaire direct
- Non prise en compte de l'orientation des vitrages
- Non prise en compte de la géographie
- Non prise en compte des niveaux d'éclairement trop élevé

L'indicateur dynamique Autonomie en Lumière du Jour permet de prendre en considération l'occupation du bâtiment ainsi que les variations de lumières extérieures à chaque heure de l'année. Son expansion est fortement due à la disponibilité croissante des données météorologiques ainsi qu'au progrès de l'informatique du début du siècle. Contrairement au précédent indicateur, le calcul de l'ALJ prend en compte la variation temporelle des conditions et, de ce fait, il est difficilement appréciable par l'œil humain. Ce dernier reflète l'irrégularité de l'ensoleillement terrestre en se basant sur des données de mesures *in situ* fournies par des organismes agréés (voir remarque ci-après). La qualité d'une telle étude provient en grande partie de la précision des données météorologiques. Ces données sont disponibles sous forme d'année standard (i.e année typique provenant d'une moyenne d'un certain nombre d'années). De plus, on parle désormais de quantités de conception [Beckers, 2011] pour qualifier ce type d'indicateurs dynamiques. Leurs validités ainsi que leurs précisions proviennent en grande partie de la nécessité de calculer entièrement le champ lumineux. Pour finir, le temps de calcul [Reinhart, 2006] du DA est probablement une des limites à son expansion dans les projets de maîtrise d'œuvre.

Remarque : Il est possible d'obtenir des données météorologiques fournies par deux organisations. La première est Météo France, qui peut fournir des données horaires d'éclairement pour les villes de Biarritz et de Pau. La seconde est la société américaine ASHRAE, qui met à disposition des données dans l'«International Weather for Energy Calculation » (IWEC). Cependant, l'IWEC1 offre la possibilité d'avoir des données pour Bordeaux ou Montpellier gratuitement et l'IWEC2 monnaie les données pour des villes comme Biarritz, Tarbes ou Pau.

ASHRAE. 2001. *International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM*, Atlanta: ASHRAE

ASHRAE. 2012. *International Weather for Energy Calculations, Version 2 (IWEC2 Weather Files) Users Manual and CD-ROM*, Atlanta: ASHRAE

2.4 Expérimentation : Projet « ECLAIR »

Une des tâches expérimentales du projet baptisé « Eclair » mené par la chaire « Architecture et Physique Urbaine » en collaboration avec Nobatek INEF4, a pour objectif de qualifier la validité d'un indicateur comme l'Autonomie en Lumière du Jour mais aussi son utilité dans un projet de conception. Précisément, le but recherché est de tester la méthode de calcul de l'autonomie en lumière du jour en comparant les résultats de plusieurs études dont les données d'entrées proviennent de différentes sources. Pour cela, des luxmètres positionnés à l'intérieur d'une maquette imprimée 3D permettront d'obtenir les valeurs d'éclairement naturel de la scène intérieure pendant une année complète. Le fait de réaliser les mesures à l'intérieur d'une maquette permet de maîtriser l'ambiance intérieure mais également de fixer toutes les conditions qui s'articulent autour de la scène. Les données d'éclairement mesurées seront ensuite comparées aux résultats obtenus par simulation :

- En utilisant un modèle de ciel « standard »
- En utilisant les données mesurées par des pyranomètres SPN1.

Ces pyranomètres permettent grâce à leur conception intrinsèque de mesurer directement l'éclairement diffus mais aussi l'éclairement direct du soleil. Couplés à une station météo (température ambiante, vitesse du vent, humidité relative, etc), il sera possible de recréer le champ physique utile au calcul de l'autonomie en lumière du jour (i.e un nouveau modèle de ciel est obtenu). Avec ce nouveau modèle de ciel, le champ physique entourant la maquette, en se basant sur le modèle de Pérez [Pérez, 1993], pourra être simulé. Ce champ permet finalement de calculer l'éclairement naturel dans la scène en utilisant un logiciel de type Radiance.

En somme, cette expérimentation permettra de fournir un « Guide pour la simulation de la lumière naturelle basée sur les données climatiques dans le Pays Basque ». Il s'agit ici de donner des indications sur la validité de la méthode de calcul de l'ALJ et s'il est plus intéressant de mettre en avant ce type d'indicateur dans les projets de conception ou s'il vaudrait mieux, à l'heure actuelle, continuer de fonctionner avec des indicateurs statiques.

Dispositif expérimental :

La maquette imprimée 3D est composée de quatre « boîtes », chacune d'elles orientées selon les quatre points cardinaux. Ces « boîtes » représentent un bureau standard à l'échelle 1/20^{ème} (Largeur : 2,60m, Profondeur : 4m, Hauteur : 2,80m). Cette maquette sera placée sur le toit du bâtiment de Nobatek INEF4 ; la maintenance et le dégagement visuel permettant une vue du ciel acceptable sont les principales raisons de ce choix d'emplacement.

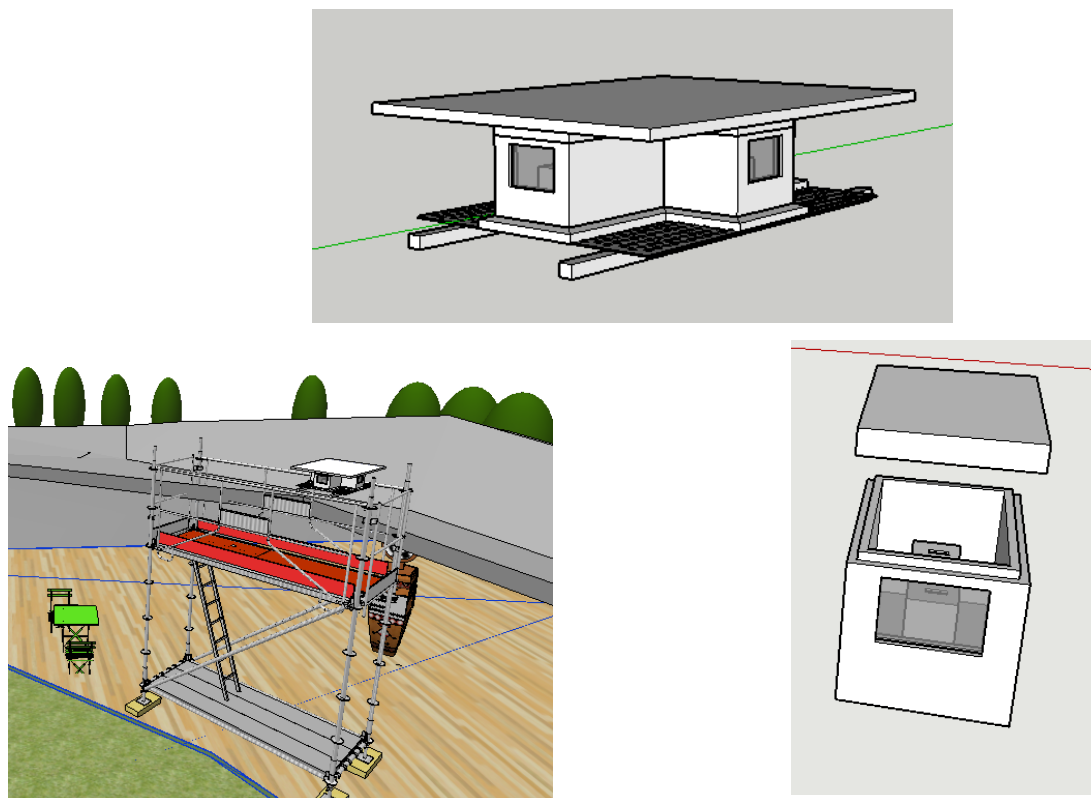


Illustration 6 : Modélisation 3D de la maquette imprimée avec insertion sur le toit de Nobatek INEF4

Dimensions :

	Largeur	Longueur	Hauteur
Boîte	16,6 cm	23,6 cm	17,92 cm
Maquette	77, 8 cm	61,2 cm	20 cm
Dimensions intérieures d'une boîte	13 cm	20 cm	14 cm
Dimensions du vitrage	4 mm	10 cm	7 cm

Le choix des dimensions provient d'un compromis entre la capacité de l'imprimante 3D et un facteur d'échelle qui permet d'avoir un rendu le plus réaliste possible. Trois luxmètres sont positionnés à l'intérieur de chaque boîte. Ils sont incorporés à une « table » représentant le plan de travail d'un bureau standard (hauteur réelle : 80 cm). Ces luxmètres envoient les données mesurées via un réseau filaire à un collecteur de données situé dans une boîte étanche placée sous la maquette. Les données sont ensuite transmises à un ordinateur pour le post traitement, là aussi par voie filaire. Enfin, les pyranomètres sont placés à côté de la station météo déjà présente sur le toit de Nobatek INEF4.

NB : une fiche descriptive de l'ensemble du matériel utilisé est proposée en Annexe 2.

Aussi, cette expérimentation permettra de mesurer l'apport de la technologie d'impression 3D dans la réalisation de projets expérimentaux. Située dans les locaux du générateur d'activités d'Arkinova, l'imprimante utilisée fonctionne avec la méthodologie

appelée « liage de poudre ». Cette technique a été inventée par le MIT en 1993 et est une méthode de fabrication additive fonctionnant par la solidification d'une poudre (composée à partir de gypse) à l'aide d'un liant. L'avantage majeur de cette méthode est que l'imprimante réalise les pièces par couches de 0,1mm d'épaisseur. De ce fait, les projets peuvent s'articuler autour d'une précision aigüe, ce qui a été bénéfique dans notre cas pour le cheminement des câbles par exemple. Enfin, la campagne de mesure se faisant sur une année complète, il est important que la scène intérieure de la maquette reste inchangée pendant la collecte de données. Un vernis imperméabilisant a donc dû être utilisé pour pouvoir rendre étanche les 4 boîtes que composent la maquette.

NB : Lors de la rédaction du présent document, la maquette est en cours d'impression et la campagne de mesure devrait débuter en septembre 2018. Les résultats sont attendus pour l'été 2019 et les premières conclusions pourront ainsi être apportées.

2.5 Conclusions

Les écarts de résultats entre indicateurs statiques et dynamiques pour qualifier l'éclairement naturel dans les bâtiments sont de plus en plus mis en lumière [Bugeat, 2017]. Ainsi, la tendance afin de pouvoir qualifier le phénomène d'ondes courtes passe inévitablement par l'utilisation de calcul dynamique prenant en compte l'ensemble du champ physique et non une simple contribution (même si c'est la plus importante) de ce dernier [Mardaljevic, 2009]. Malgré le temps non négligeable de calcul, ces quantités peuvent se calculer exactement dans les limites de leur modèle pourvu que ces calculs se basent sur des données d'entrées vérifiées et dont la précision n'est plus à remettre en question. Le projet « Eclair » s'insère dans une démarche d'amélioration de ces données d'entrées mais également de validation de la méthode utilisée. Cette démarche pourrait permettre de dire si l'on est capable de prévoir l'autonomie lumineuse réelle en utilisant un scénario de ciel cohérent et plus précis que ceux disponibles dans la littérature actuelle.

3 Modèle 3D d'une rue pour une étude thermique urbaine

Dans la plupart des projets de construction depuis les dix dernières années, les maîtres d'ouvrage exigent d'avoir recours à des Simulations Thermiques Dynamiques (STD) pour étudier le comportement thermique des ouvrages. La Simulation Thermique Dynamique est apparue dans le secteur du bâtiment dans les années 1970-1980 parallèlement à l'application des premières réglementations thermiques. En effet, la première réglementation a été instaurée par Pierre Mesmer suite au premier choc pétrolier de 1973, qui a déclenché une prise de conscience de la nécessité d'économiser l'énergie. Dès 1974, la première RT fut mise en place et s'est enchaînée une succession de réglementations thermiques jusqu'à celle que nous connaissons aujourd'hui : la RT 2012. Le principe de calcul d'une STD par opposition aux méthodes de calcul simplifiées utilisées dans les années 1970, qui ne prenaient pas en compte ou très peu l'aspect dynamique, est de calculer l'évolution temporelle de l'état thermique d'un projet. Elle permet en outre de prendre en compte l'inertie des éléments constituant un bâtiment.

Pour cela, les moteurs de calcul utilisent un modèle numérique approché qui permet d'obtenir, à tous les instants choisis de la simulation, la température en un nombre de points spécifiques des éléments composant le bâtiment, appelés nœuds. Cette température évolue selon les lois régissant les échanges thermiques : Convection [Blocken, 2015], Conduction [Lewis, 2004], Rayonnement [Vollmer et Möllmann, 2010].

La simulation thermique dynamique est un outil au service de la conception qui peut apporter de multiples indications aux concepteurs et aux maîtres d'ouvrage pour affiner la prévision du comportement des bâtiments ou le dimensionnement des équipements. Précisément, ce calcul dynamique permet d'estimer les besoins thermiques (chaud et froid) du bâtiment en prenant en compte l'enveloppe du bâtiment, son inertie, divers apports thermiques (internes et externes) ainsi que l'environnement atmosphérique. Bien que l'inertie du bâtiment soit prise en compte, elle n'apparaît dans le calcul qu'au moyen d'un coefficient et ne tient pas compte de la géométrie. Pourtant, un mur en béton se situant au rez-de-chaussée ou à l'étage, n'apportera pas le même déphasage thermique. L'étude peut être menée sur une année entière ou sur une période définie, au pas de temps horaire ou à un pas de temps inférieur, uniquement sur l'enveloppe du bâtiment ou avec les systèmes techniques afin d'obtenir les consommations réelles d'énergie (énergie finale).

Sur le marché, il existe depuis de nombreuses années des outils permettant d'effectuer des simulations thermiques, qui vont de simples feuilles de calcul à des outils très sophistiqués. La majorité de ces outils a été développée initialement pour calculer les besoins thermiques de chauffage et refroidissement d'un bâtiment, sur la base des caractéristiques de l'enveloppe. Les principaux logiciels qui permettent de réaliser de tels calculs reposent généralement sur des moteurs de calcul utilisant les méthodes nodales : EnergyPlus, développé par le Department of Energy (USA) [U.S Department of Energy, 2018], ou bien TRNSYS - TYPE100 créé par l'université du Wisconsin et développé par un comité international [Fraisie, 2002].

Le tableau ci-dessous présente les logiciels de simulation les plus couramment utilisés ainsi que les moteurs de calcul les régissant :

Logiciels	Moteurs de calcul	Développeurs
Graitec ArchiWizard	EnergyPlus	US Department of Energy
Design Builder	EnergyPlus	US Department of Energy
BBS Slama ClimaWin	Code basé sur la méthode Th-BCE de la RT 2012	BBS Slama
Pléiades Comfie	Comfie	L'école des mines, Paris
TRNSYS 17	TRNSYS-TYPE100	Université du Winsconsin Comité international

Source : « Revue pratique des logiciels de SED », Groupe de travail APOGEE, Juin 2015

3.1 Cas d'études 2 : Réalisation d'une Simulation Thermique Dynamique

Il a été choisi ici de présenter l'étude de STD portant sur le même projet que pour l'étude d'éclairage naturel présentée auparavant. On rappelle : « Même si le projet ne vise pas une certification, puisque ces dernières ne sont pas obligatoires, les maîtres d'ouvrage peuvent choisir d'avoir un niveau d'exigence conforme aux certifications pour des raisons de compétitivité du marché ou par motivation de développement durable ».

Ainsi, pour les performances et le confort thermique du bâtiment, le niveau TRES PERFORMANT de la NF HQE™ est considéré :

- La prise en compte du potentiel climatique du site et la mise à disposition d'éléments architecturaux permet d'optimiser le confort d'hiver et le confort d'été.
- L'identification des espaces ou zones de travail nécessitant une température stable ou plage de température stable. Pour tous ces locaux, il faut maintenir une température résultante des espaces à occupation autre que passagère ne dépassant pas 28° C plus de 2% du temps en période d'occupation.

Le logiciel Pléiades Comfie a également été utilisé pour cette étude.

Hypothèses de simulation :

Le fichier météo utilisé est celui de la ville de Bordeaux (intégré au logiciel de simulation). Il correspond à une « année type », reconstituée à partir de dix années réelles. Le bâtiment est composé de plusieurs espaces, chacun par leurs propres scénarios de fonctionnement :

- Scénario d'occupation : modulé selon un planning de présence, un nombre d'occupant au mètre carré et une quantité de chaleur métabolique dissipée par occupant.
- Scénario de ventilation mécanique : modulé selon le nombre de personne maximal, le planning d'occupation et le type d'espace.
- Scénario de puissance dissipée : Il s'agit de la puissance dissipée par l'éclairage ainsi que le mobilier qui est modulé selon la surface des espaces.
- Scénario de température de chauffage : modulé selon le planning d'occupation et la période annuelle.

Une description détaillée des scénarios est présentée en *Annexe 3*. Cette annexe arbore également la composition des différentes parois.

De plus, chaque pièce fait l'objet d'une zone thermique à part entière, car chacune d'elle possède ses propres scénarios qui dépendent de l'utilisation ainsi que du nombre d'occupants. Les locaux étudiés sont les mêmes que pour l'étude d'éclairage (*voir cartographie Cas 1*).

3.2 Résultats cas d'études 2

Malgré une enveloppe thermique performante et une occupation relativement dense, les besoins de chauffage se situent en moyenne aux alentours de **28,8 kWh/m²**.

Le tableau ci-dessous illustre les besoins chauds par pièces et par an :

Pièces	Besoin chaud (kWh)	Besoin chaud (kWh/m ²)
Restauration	2620	8
SB (salle banalisée) RdC NO	2001	39
Salle étude RdC	1977	25
Bureau RdC	458	30
Salle mixte	3263	34
Salle info	3803	50
SB R+1 NO	1848	37
SB R+1 SE	1559	31
SB R+1 NE	1793	35
CDI	1994	7
Salle techno	2644	26
Salle science	1907	23

Ceci est notamment induit par :

- D'importants volumes à chauffer. Les hauteurs sous dalle sont de 3,6 m au minimum (au RDC) et engendrent des besoins de chauffage conséquents.
- Les pertes par renouvellement d'air. L'utilisation d'une ventilation simple flux provoque un renouvellement d'air venant directement de l'extérieur et décharge ainsi le bâtiment de ces calories. Par exemple, pour la salle banalisée RDC NO : Vol=183m³ et la ventilation règlementaire (18m³/h.pers) est de 558 m³/h. Ce sont donc 3 vol/h qui sont renouvelés dans la pièce.

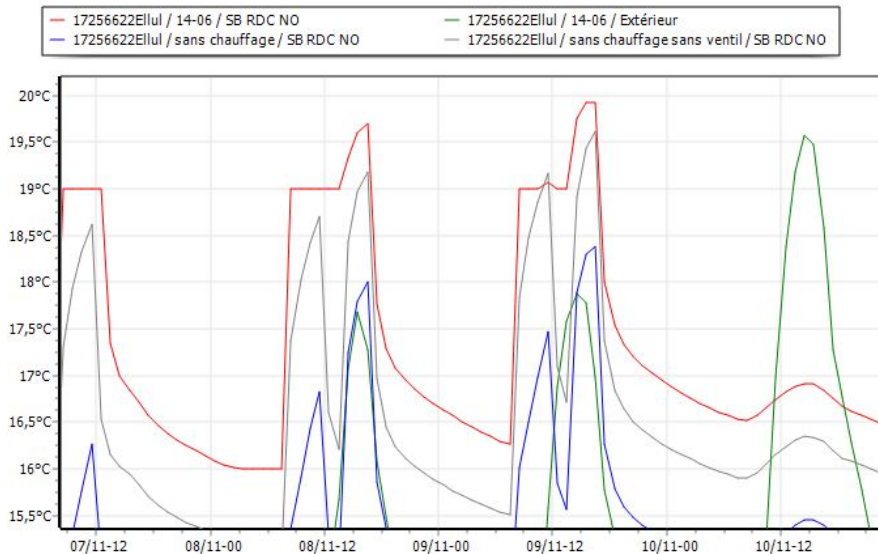


Illustration 7 : Courbe de température intérieure d'une salle de classe sur une semaine avec et sans ventilation

La courbe verte représente la température extérieure, la courbe rouge le bâtiment en conditions réelles (chauffage et ventilation), la courbe bleue le bâtiment sans chauffage mais avec ventilation et la courbe grise le bâtiment « seul » sans chauffage ni ventilation. La ventilation peut ainsi enlever jusqu'à 1°C de température (différence courbe bleue sans ventilation et grise avec ventilation).

La ventilation est cependant un enjeu crucial dans le bâtiment et ne peut pas être négligé. Une ventilation simple flux est prévue, mais l'utilisation d'une ventilation double flux permettrait de diminuer les consommations.

Etude du confort d'été

L'inconfort d'été est représenté par le nombre d'heures pour lesquelles la température intérieure dépasse 28°C. D'après les recommandations du CRETE en zone H2C, le nombre d'heures dont la $T_{\text{intérieure}} > 28^{\circ}\text{C}$ sont :

- Niveau Performant :
 - 42 heures pour les locaux à usages d'enseignement
 - Pas d'exigences pour les locaux de restauration
- Niveau Très Performant :
 - 28 heures pour les locaux à usages d'enseignement
 - 14 heures pour les locaux de restauration

La NF HQE™ exige un taux d'inconfort inférieur à 2% du temps d'utilisation.

Pièce	T° >28 °C (nb heures)	Taux d'inconfort (%)	T° >26 °C (nb heures)	Taux d'inconfort (%)	26°C > T° > 28°C
SB RdC NO	3	0.26	49	4.25	46
Salle étude RdC	24	2.08	80	6.94	56
Bureau RdC	3	0.21	19	1.32	16
Salle mixte	1	0.09	52	4.51	51
Salle info	14	1.22	52	4.51	40
SB R+1 NO	18	1.56	63	5.47	45
SB R+1 SE	19	1.65	70	6.08	51
SB R+1 NE	13	1.13	54	4.69	41
Salle techno	42	3.65	103	8.94	61
Salle science	17	1.48	19	1.65	2

Comme le montre le tableau précédent, la plupart des salles étudiées nous permettraient d'atteindre le niveau très performant des exigences CRET ainsi que de respecter l'exigence de la NF HQE™. La salle technologique est la seule exception. Il s'agit d'une salle exposée Sud/Sud-Est dont les apports solaires sont bien supérieurs aux autres salles étudiées. Elle possède aussi d'importants apports internes liés à son usage (ordinateurs). On remarque également que, pour la majorité des locaux, une grande partie des heures d'inconfort se situent entre 26°C et 28°C, températures relativement acceptables.

Dans tous les cas, l'occultation des menuiseries et la présence d'une surventilation nocturne permettent d'assurer le confort des usagers en été. A elle seule, la surventilation entraîne un gain moyen de 48% d'heures d'inconfort.

NB : Il est à rappeler que ces résultats sont basés sur des hypothèses excluant le comportement des usagers (ouverture des fenêtres, modification de l'occultation...).

Températures maximales pendant la semaine la plus chaude

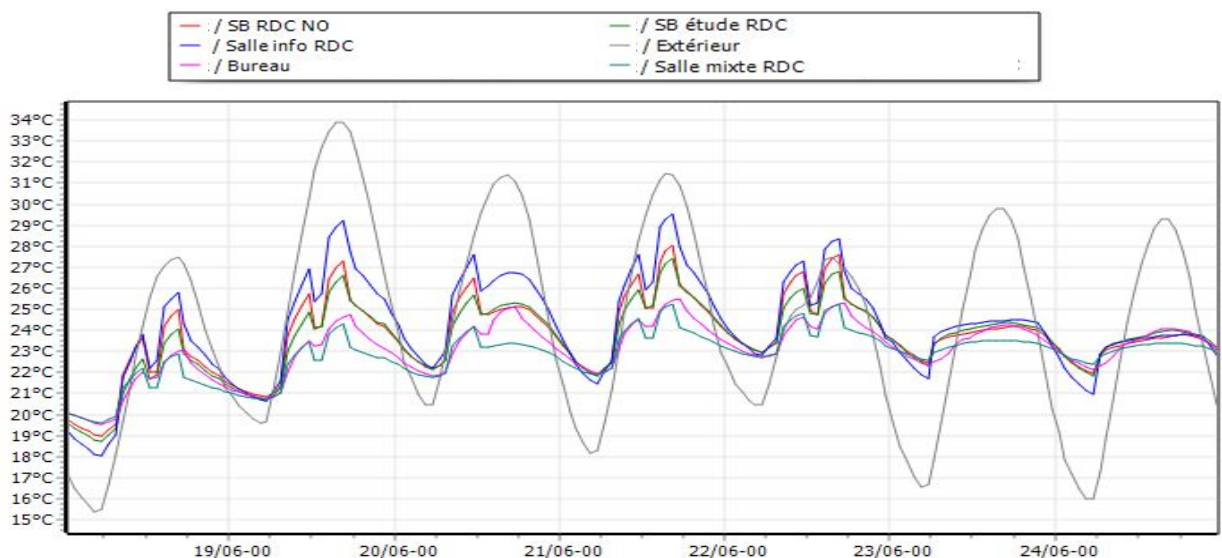


Illustration 8 : Températures du RdC pendant la semaine la plus chaude

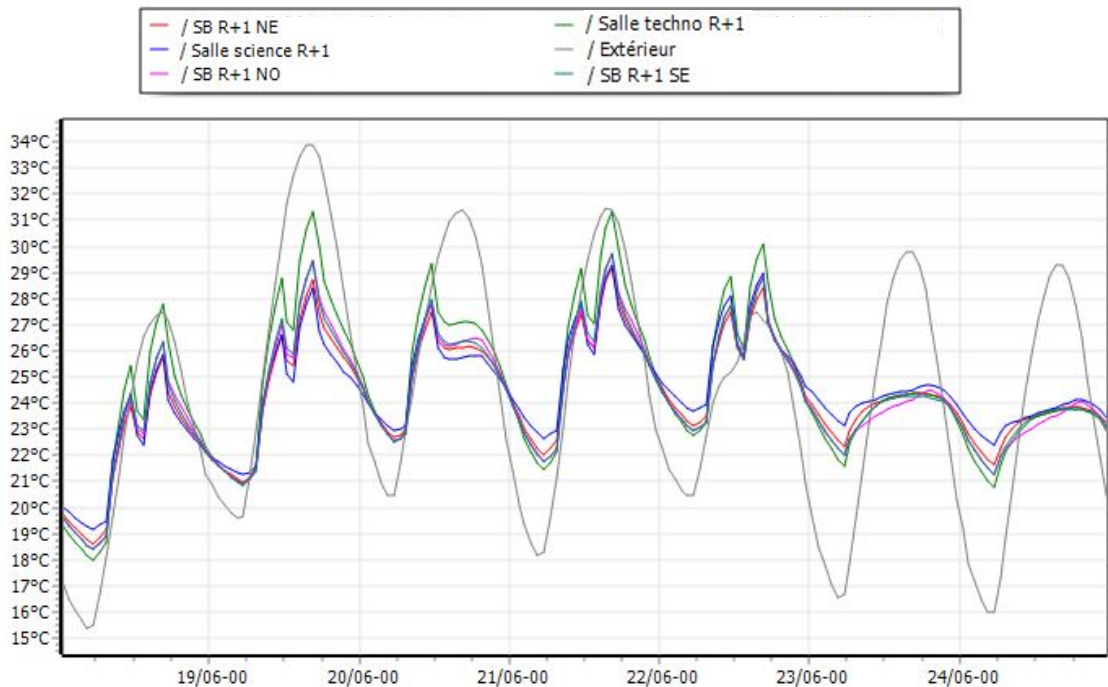


Illustration 9 : Températures du R+1 pendant la semaine la plus chaude

Les variations de température sur les deux illustrations précédentes correspondent à l'entrée et à la sortie des occupants de l'établissement. On note facilement, par exemple, l'inoccupation à midi. Nous pouvons remarquer que les zones atteignant les plus hautes températures sont la salle info au RDC et la salle technologique à l'étage. Concernant la salle technologique, ces particularités engendrant les surchauffes ont été détaillées précédemment. La salle informatique du RDC est également pénalisée par les importantes puissances dissipées liées à son usage spécifique. De plus, la zone possédant la température la plus faible pendant la semaine la plus chaude de l'année est le bureau au RDC. Ceci s'explique par la présence de brise-soleil face au vitrage et par le masque provoqué par l'étage qui diminuent les apports solaires, bien que le bureau soit exposé Sud/Sud-Est. Aussi, les apports internes (occupants et mobiliers) de cette pièce sont bien moindres que pour une salle de classe.

Globalement, lorsque la température extérieure est très élevée (34°C), les locaux intérieurs ne dépassent pas les 29°C (exception à 31°C pour la salle technologique de l'étage). La surventilation nocturne permet de décharger efficacement le bâtiment de ses calories ; on gagne jusqu'à 8°C pour la salle techno entre 18h et 6h du matin en proposant un rafraîchissement passif des locaux d'occupation.

3.3 Discussion sur la méthode utilisée

Comme il a été montré dans l'étude précédente, les STD sont désormais utilisés afin d'obtenir les consommations des bâtiments en fonction de l'enveloppe, mais aussi pour étudier le confort d'été à l'intérieur des locaux. Les maîtres d'ouvrage portent une attention particulière au confort d'été car une bonne conception permet d'éviter d'avoir recours à une climatisation qui serait trop gourmande en énergie. La STD est devenue un outil très apprécié par les ingénieurs en bureau d'études car elle permet de comparer facilement, sur un même projet, plusieurs compositions de parois, plusieurs scénarios ainsi que l'impact d'une ventilation sur le comportement thermique des bâtiments. Cependant, les résultats se basent sur des scénarii conventionnels. L'ignorance de ces scénarii par les occupants provoque des inconforts inévitables dans le bâtiment pendant son occupation.

La modélisation du comportement thermique des bâtiments via une STD nécessite l'utilisation de traitements de données relativement lourds lorsqu'il s'agit de reproduire fidèlement la réalité. Les temps de calcul peuvent parfois durer quelques heures et nécessitent un pré-traitement pouvant parfois s'étaler sur plusieurs jours.

Fondement des STD, les méthodes nodales utilisent l'analogie électrique pour calculer les phénomènes thermiques engagés. Le principe est de dresser un parallèle entre les échanges de chaleur et les courants électriques. Ce modèle communément appelé « RC » pour Résistance thermique et Capacité thermique, permet de développer des modèles précis mais simplifiés dans la mesure où les températures à l'intérieur des murs ne sont pas nécessaires. Le bilan thermique est équivalent à l'équation de conservation du courant électrique au nœud correspondant. L'interface 3D des logiciels sert à l'utilisateur pour vérifier la géométrie, mais le calcul est réduit à une résistance équivalente comme illustré ci-dessous :

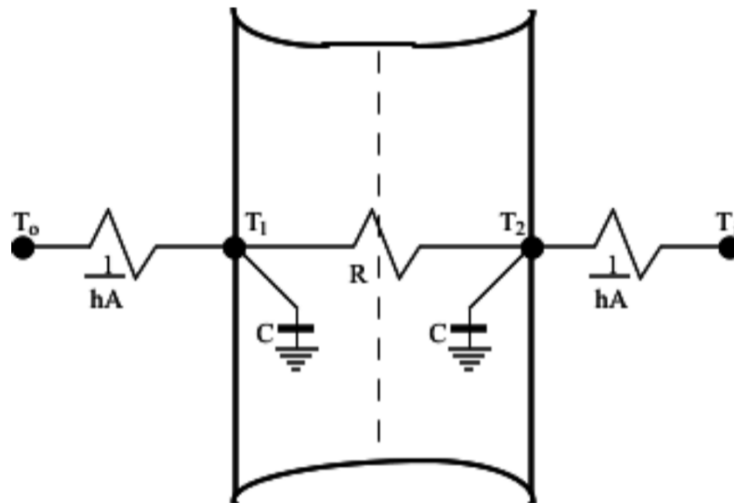


Illustration 10 : Exemple d'échanges entre deux nœuds

Source : *Engineering Reference, U.S Department of energy.*

Avec :

T_x : Température des nœuds

$1/(hA)$: Représente les échanges par convection

C : Représente la capacité (ou l'inertie) du nœud

R : Représente la résistance thermique entre deux nœuds

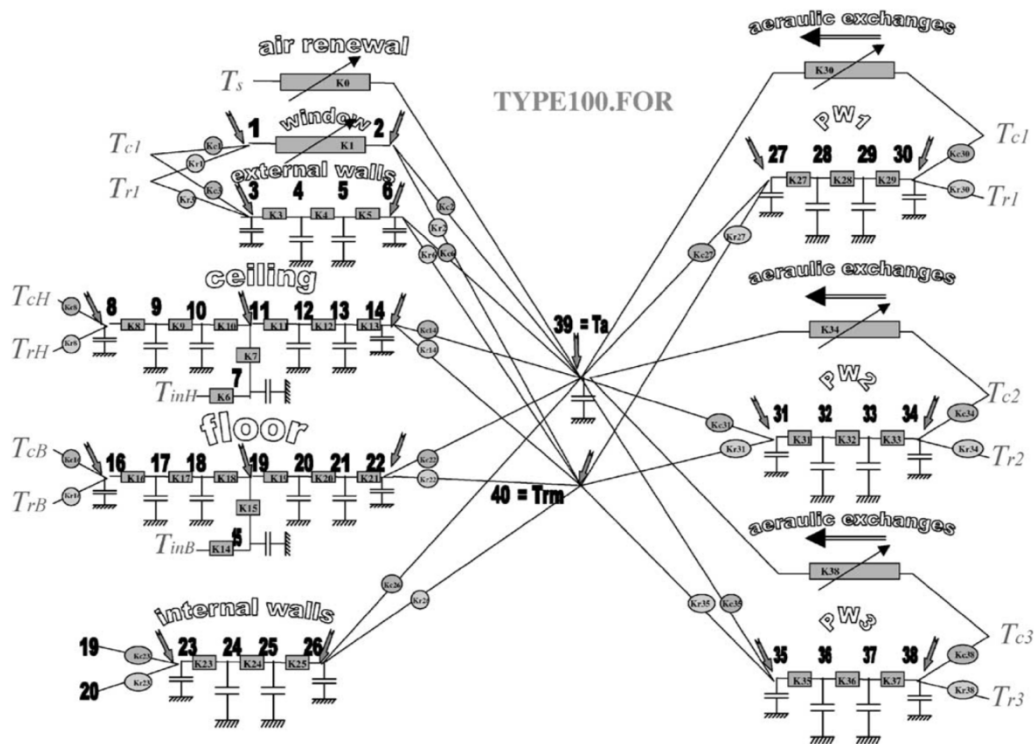


Illustration 11 : Modèle thermique de la scène étudiée

NB : PW1, PW2 et PW3 (i.e Partition Walls) permettent de séparer le bâtiment en plusieurs zones en connectant directement plusieurs modèles TYPE-100 (modèle du code TRNSYS).

L'Illustration 11 représentent une partie des différents circuits à prendre en compte dans les méthodes nodales. A l'intérieur de chacune des branches, il est possible de rajouter autant de résistances que l'on souhaite. C'est un des gros avantages des méthodes nodales : il est possible d'agir directement sur l'équation considérée.

Les différences qui peuvent exister entre les différents codes de calcul des méthodes nodales résident principalement dans les méthodes utilisées pour connaître le nombre et l'emplacement des capacités dans le circuit de résistance équivalent (i.e le C sur le graphique précédent correspond à un condensateur dans un circuit électrique). Aussi, la résolution des équations de transferts de chaleur sont sources de discordances entre différents codes. Par exemple, les fonctions de transferts de chaleur par conduction (Conduction Transfer Functions, CFT) ont fait l'objet de multiples études à la fin du siècle dernier. Le code EnergyPlus utilise la « State Space Method » alors que le code TRNSYS utilise les transformations de Laplace pour résoudre ces fonctions. [Ceylan et Myers, 1980] ont comparé la réponse prévue par la méthode de l'espace d'état à diverses autres techniques de résolution, y compris une solution analytique. Leurs résultats ont montré que pour un nombre adéquat de nœuds, la méthode de l'espace d'état a calculé un flux de chaleur, sur la surface d'une simple dalle de béton, différent de 1% de la solution analytique. Aussi, [Ouyang et Haghighat, 1991] ont fait une comparaison directe entre la méthode spatiale de Laplace et la méthode spatiale d'état. Pour un mur composé d'isolant entre deux couches de béton, ils n'ont trouvé presque aucune différence dans les facteurs de réponse calculés par chaque méthode.

L'expression des résultats reste un frein à l'utilisation de ce type de méthode, car elle ne permet pas d'avoir une description physique complète dans l'espace de la scène. C'est-à-dire,

les échanges par convection, conduction ou rayonnement ne peuvent être quantifiés. Aussi, seules les températures à l'intérieur des locaux étudiés sont connues et il est impossible de connaître la température en surface de parois ou même à l'intérieure de celles-ci à part si l'on agit directement sur le code source du calcul.

Enfin, les discussions qui viennent d'être menées amènent à penser que si l'on veut étudier non pas le bâtiment seul, mais les échanges dus à son intégration dans un site urbain [Pignolet-Tardan, 1997], un recours à une autre méthode doit être fait afin de décrire et de quantifier plus précisément les phénomènes physiques mis en jeu.

Les progrès récents de la simulation numérique offrent la possibilité d'améliorer la compréhension des phénomènes de chaleur. Plus formellement, l'analyse numérique étudie les algorithmes permettant de résoudre les problèmes de mathématiques continues par opposition aux mathématiques discrètes. Ainsi, on peut être amené à rechercher la solution d'une équation aux dérivées partielles (EDP) comme l'équation de la chaleur par exemple. Cette dernière est en effet, une équation aux dérivées partielles parabolique, introduite initialement en 1811 par Fourier pour décrire le phénomène de conduction thermique. Il est très difficile d'obtenir les résultats exacts d'une telle équation, mais des solutions suffisamment approchées permettent de décrire le phénomène physique avec une certaine précision. De nombreuses méthodes de résolutions ont été étudiées dans la littérature comme par exemple la méthode des différences finis [Ozisk and Czik, 1994] ou encore la méthode des volumes finis [Patankar, 1980]. De même, la méthode des éléments finis (FEM, Finite Element Method), arrivant à maturité [Lewis, 2004], a été étudiée pour une compréhension plus précise du comportement thermique d'un site urbain. Dans le domaine des éléments finis [Dhatt and Touzot, 1981], un modèle numérique, pour un problème de transfert de chaleur par exemple, commence par le modèle physique du problème. Comme on peut le voir sur l'*Illustration 12*, une partie de ce modèle traite de la discrétisation du domaine et l'autre de l'approximation discrète des équations aux dérivées partielles. Finalement, la combinaison des deux parties amène à la solution numérique du problème.

Le but recherché dans la Méthode des Eléments Finis (MEF) est de déterminer une fonction qui est une solution de l'équation aux dérivées partielles pour des conditions limites données. L'EDP décrit le phénomène physique du système (i.e loi de Fourier pour la conduction thermique ou lois de l'élasticité pour la résistance des matériaux) et les conditions limites sont les contraintes s'exerçant sur ce système. La MEF permet de résoudre ce problème de manière discrète et approchée ; cette approximation devant être la plus précise possible. Ainsi, la discrétisation par éléments finis (i.e la division de la région en un certain nombre de régions plus petites) réduit le problème continu, qui comporte un nombre infini d'inconnues, à un seul avec un nombre fini d'inconnues à des points précis appelés nœuds. Sur ces régions appelées éléments finis, l'EDP peut être linéarisée par approximation en remplaçant cette équation par un système d'équations linéaires. Chaque élément (*Illustration 13*) est ainsi décrit par un système d'équations regroupées dans une matrice. On obtient, finalement, une matrice par éléments. De plus, les conditions limites sont définies sur les frontières du système global et non pas sur les frontières de chaque élément. Il faut donc résoudre le problème dans son ensemble en réunissant chaque matrice de chaque élément dans une matrice globale. Ainsi, l'EDP est résolue aux nœuds du maillage ce qui nécessite de pouvoir interpoler (i.e déterminer la valeur des nœuds suivant à partir des précédents) en utilisant des fonctions polynomiales ou bien quadratiques. Enfin, la précision du résultat obtenue dépend inévitablement du maillage

utilisé.

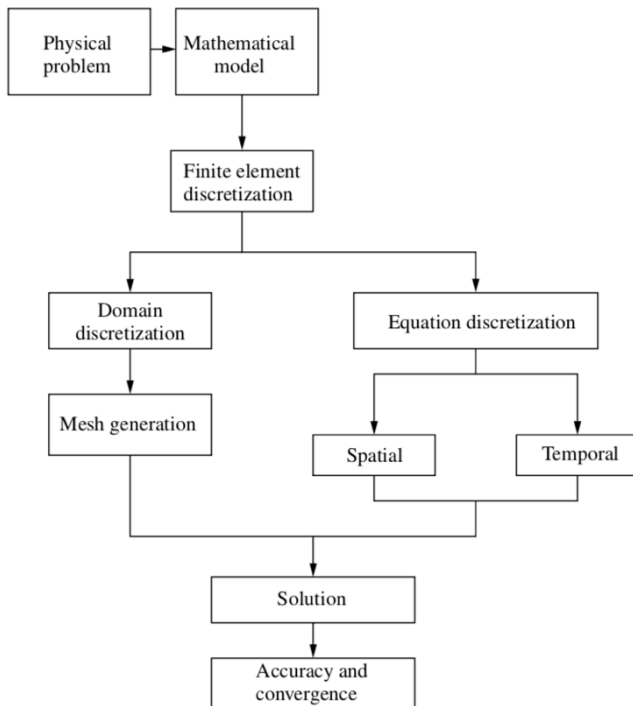


Illustration 12 : Modèle numérique pour MEF

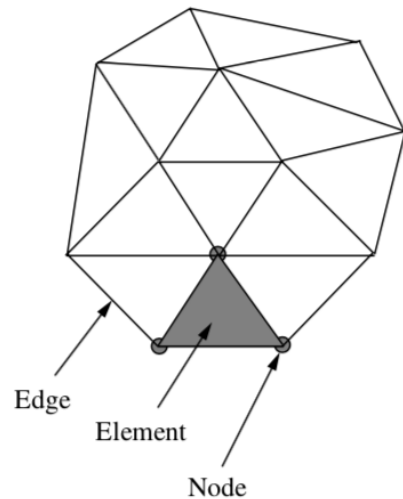


Illustration 13 : Maillage typique MEF

Source : *Fundamentals Of The Finite Element Method For Heat And Fluid Flow* - Lewis, Nithiarasu, Seetharamu, 2004.

3.4 FEM : Exemple du DIDAM

Afin d'illustrer ces propos, il est présenté ci-dessous une étude thermique réalisée sur un projet mené par l'Agglomération Côte Basque Adour (ACBA) portant sur la restructuration du quartier de la gare de Bayonne (64100, France). Précisément, il est question ici de la réhabilitation du DIDAM, qui est un bâtiment historique situé sur les quais de l'Adour et qui abrite des expositions culturelles. Ce projet s'insère dans le cadre du cours dispensé par M. Christian LA BORDERIE intitulé « Introduction aux éléments finis ». Cette étude a été réalisée sur le logiciel Cast3m. Ce dernier est développé depuis les années 1980 par le Département Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat français à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives (CEA). Il utilise le langage Gibiane pour décrire les données et les opérations [Charras et Di Paola, 2011] [Pasquet, 1999].

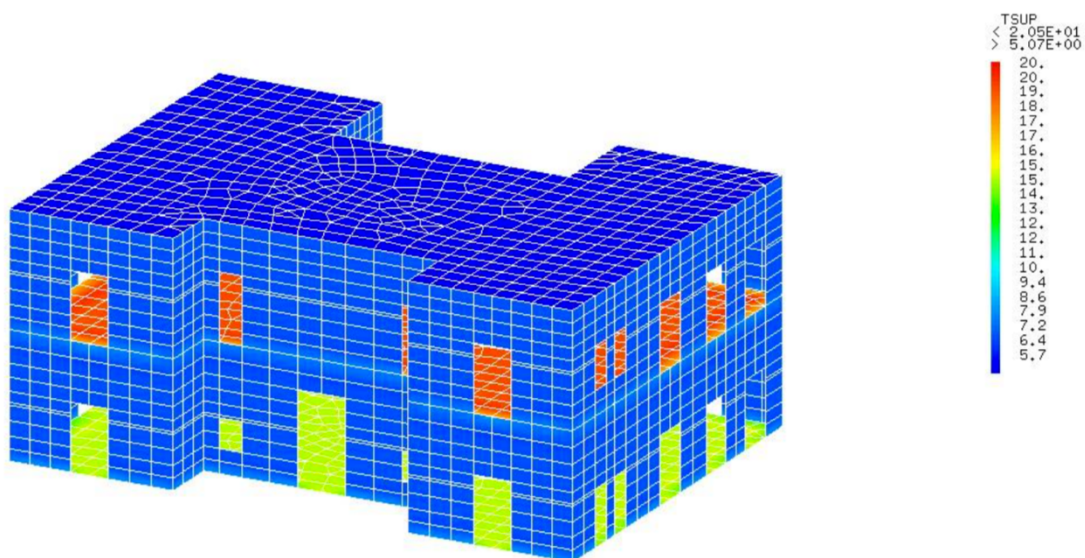


Illustration 12 : Température de la peau extérieure

Flux à travers l'enveloppe

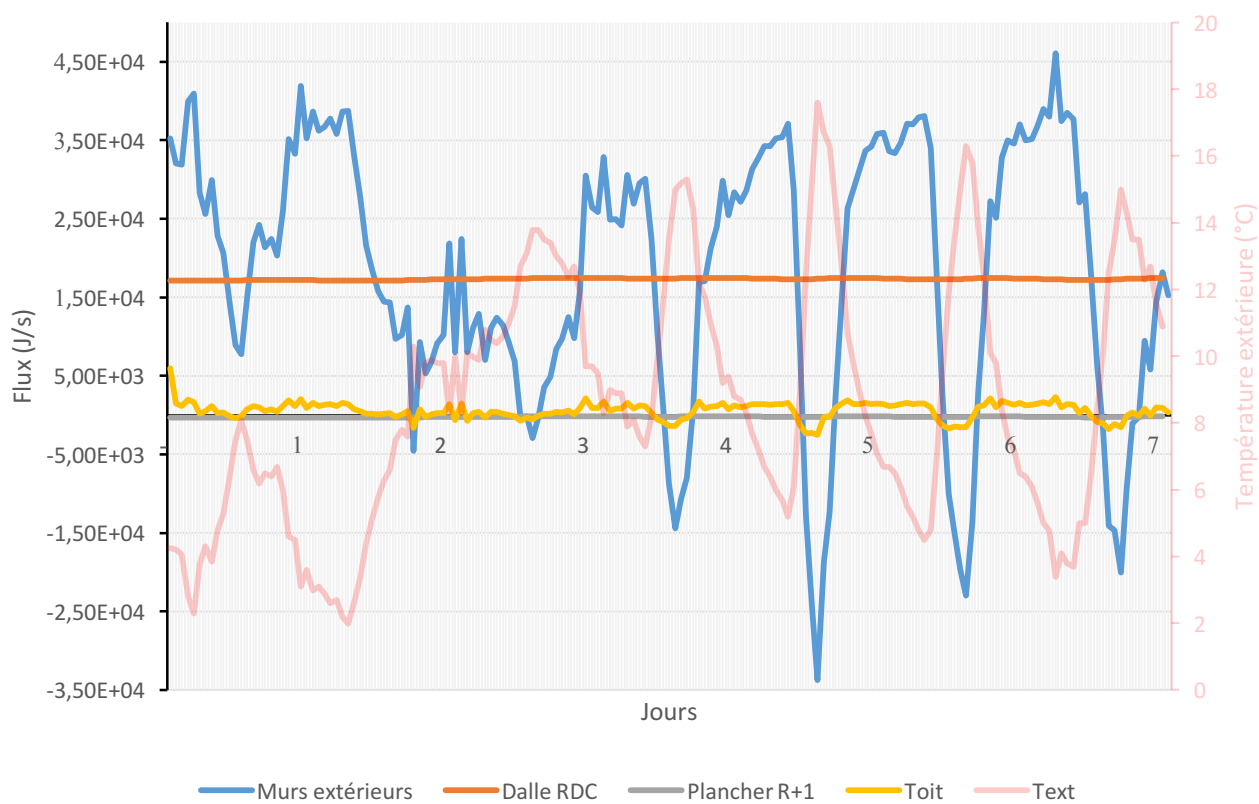


Illustration 13 : Flux traversant l'enveloppe sur les 7 premiers jours de l'année

Le comportement thermique du bâtiment en vue de sa réhabilitation est le principal objectif de cette étude. Ainsi, l'*Illustration 13* permet d'avoir une répartition des pertes thermiques en dissociant chaque parois déperditive de l'enveloppe. On remarque que les pertes les plus conséquentes proviennent des murs extérieurs du fait de l'absence d'isolation de ces derniers. De plus, l'*Illustration 12* représente la température de surface du bâtiment (à chaque nœud du maillage) après une journée de simulation (le calcul intégral étant réalisé heure par heure sur 7 jours dans cette étude). La température intérieure a été fixée et la température extérieure varie en fonction des Degrés Journaliers Unifiés (DJU) pour la période étudiée.

Cet exemple a permis de montrer que la méthode par éléments finis permet d'obtenir des résultats plus visuels que ceux obtenus par méthodes nodales. On peut voir directement ce qu'il se passe thermiquement sur les parois de la scène. De plus, la Méthode des Eléments Finis possède l'avantage de prendre en considération la géométrie réelle du projet ; le calcul prend en compte l'inertie des éléments en fonction de leur répartition spatiale au sein du projet.

3.5 Introduction d'un modèle CAO d'une rue préalable à son étude thermique à l'aide des éléments finis

Afin d'anticiper la thèse que je commencerai à la suite de mon stage de fin d'études au sein de la chaire « Architecture et Physique urbaine », qui aura pour objectif principal de mener « une étude thermique multi-échelle d'un site urbain à l'aide des éléments finis », j'ai profité de ce stage pour appréhender le modèle CAO sur lequel je m'appuierai tout au long de ma thèse. Ce modèle représente les bâtiments encadrant la rue des Tonneliers de Bayonne (64100, France) [Acuña Paz y Miño, 2018]. Il est composé d'une trentaine de bâtiments, une moitié orientée Sud et l'autre moitié orientée Nord. L'avantage principal de ce modèle est que le maillage CAO réalisé sur le logiciel ArchiCAD, sert également de maillage éléments finis. Le maillage CAO a été fabriqué de manière conforme (i.e les côtés adjacents des volumes sont de même longueur). Ainsi, le modèle est entièrement composé d'hexaèdres et de prismes ; ces derniers sont exclusivement présents pour agencer le caractère pentu des toits. Les hexaèdres permettent d'avoir une représentation des résultats plus visuelle et sont moins gourmands en énergie de calcul ; le nombre de nœuds est plus faible qu'avec un maillage tétraédrique par exemple. Aussi, le modèle permet de différencier les matériaux que composent les façades du bâtiment. La sémantique liée à ces matériaux, utile au calcul thermique, pourra donc être directement importée dans le logiciel de calcul par éléments finis, Cast3m.

Dans la présente étude, nous nous intéressons en premier lieu à l'intégration de la géométrie dans Cast3m. Cette intégration constitue la première étape pour mener à bien un calcul tel que souligné précédemment. Le format d'échange *Industry Foundation Classes* (IFC) développé par BuildingSmart a été utilisé pour extraire les données du modèle provenant d'ArchiCAD. L'IFC est un format orienté-objet surtout utilisé par la communauté BIM pour des raisons d'interopérabilité entre différents corps de métier. Ce format d'échange permet de représenter la géométrie des objets, la relation et le lien avec d'autres objets, les propriétés, les métadonnées nécessaires à la gestion de l'information et les informations non-graphiques. En particulier, ils contiennent toute la sémantique des matériaux nécessaires à la réalisation d'une simulation thermique.

En somme, il s'agit ici d'adapter le langage utilisé par les IFC (EXPRESS) en le « transformant » en langage traité par Cast3m, à savoir le langage Gibiane. Pour cela, un fichier script en langage Python permet de construire les éléments de maillage (i.e des volumes) dans Cast3m à partir des informations contenues dans l'IFC.

Le but de cette étude préalable est de pouvoir reproduire la géométrie des bâtiments de la rue, à l'identique. Pour cela, il est nécessaire d'importer les coordonnées des points de chaque élément dans un premier temps, pour ensuite construire l'élément de maillage volumique. Dans notre modèle, chaque élément possède 8 ou 6 points en fonction de leur nature hexaédrique ou prismatique. Ainsi, deux tables permettent de classer les données dans le fichier éléments finis :

- La première contenant tous les points du projet,
- La seconde contenant les éléments (i.e les points constituant chaque élément).

Ensuite, pour pouvoir créer un élément volumique dans Cast3m, les points d'un élément doivent être ordonnés. C'est-à-dire que deux faces opposées d'un volume (ici : un hexaèdre), contenant par conséquent l'ensemble des points du volume (i.e chaque point n'est présent qu'une seule fois), doivent être définis en utilisant le même sens de parcours. La première étape consiste donc à identifier et séparer les points caractérisant ces deux surfaces (1^{er} algorithme de tri). Une fois cette séparation faite, deux listes distinctes de points sont obtenues. Les deux surfaces peuvent donc être décrites par le même sens de parcours en utilisant la première liste de points pour « réarranger » la seconde.

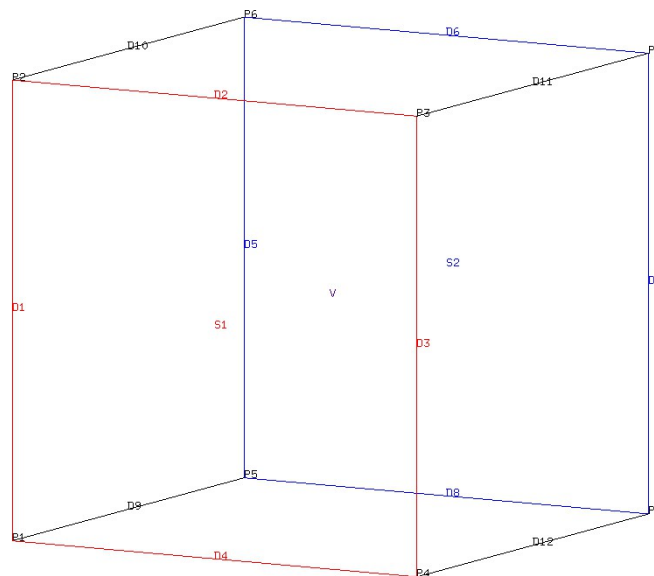


Illustration 14 : Exemple d'un élément hexaédrique

Ainsi, sur l'illustration 16, deux faces S1 (en rouge) et S2 (en bleu) s'opposent et contiennent toutes les deux 4 points, P1, P2, P3, P4 et P5, P8, P7, P6 respectivement. Pour pouvoir construire l'élément dans Cast3m, il faut orienter les points de S2 en fonction de ceux de S1 ; comme énoncé précédemment le sens de parcours de S2 doit être le même que celui de S1. Imaginons que S1 soit décrit comme suit : P1, P2, P3 et P4. Il faut alors que S2 soit décrit dans cet ordre : P5, P6, P7 et P8. Cependant, puisque le fichier IFC ne classe pas les points dans cet ordre, il convient de réaliser ce réagencement via un second algorithme de tri. Ainsi, pour pouvoir ordonner S2, le principe de l'algorithme est de trouver le point Pj de S2 le plus proche du point Pi de S1 ; par exemple P5 correspond à P1, P6 à P2 et ainsi de suite.

Pour cela, considérons la formule du produit scalaire couramment admise entre deux vecteurs non nuls u et v :

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = \|\vec{u}\| \cdot \|\vec{v}\| \cdot \cos(\vec{u}, \vec{v})$$

Si on divise la longueur de chaque vecteur par sa norme, on s'affranchit de la première partie du calcul ; le produit scalaire n'étant plus que le résultat du cosinus de l'angle entre les deux vecteurs. De plus, il est facilement démontrable que, plus le cosinus de l'angle entre deux

vecteurs ayant la même origine est grand, plus les deux points aux extrémités des vecteurs sont proches. Ainsi, pour trouver les deux points les plus proches et appartenant à deux surfaces différentes, il « suffit » de calculer le produit scalaire entre les vecteurs normés qu'ils forment en ayant la même origine. Cela revient à comparer successivement les résultats du produit scalaire entre un vecteur dont le point est sur la première surface et les vecteurs dont les points se situent sur la deuxième surface. Afin de réduire ces vecteurs à la même origine, les coordonnées du barycentre de la première surface sont soustraites aux coordonnées des différents points de l'élément.

Par exemple, sur l'*Illustration 17*, le principe est de comparer les produits scalaires suivants en commençant par le premier point décrivant la surface S1, P1 dans notre cas :

- $\overrightarrow{D13} \cdot \overrightarrow{D14}$
- $\overrightarrow{D13} \cdot \overrightarrow{D15}$
- $\overrightarrow{D13} \cdot \overrightarrow{D16}$
- $\overrightarrow{D13} \cdot \overrightarrow{D17}$

Une fois le produit scalaire le plus grand obtenu, on place le point correspondant, P5 dans notre cas, en première position pour décrire S2. On réalise la même opération avec P2 et ainsi de suite. Finalement, on obtient deux listes de points définissant, dans le même sens de parcours, deux surfaces opposées du volume et il est désormais possible de construire l'élément finis composant le maillage.

NB : Le même algorithme est réalisé pour construire les éléments de type prismatiques, en utilisant les deux surfaces opposées contenant trois points.

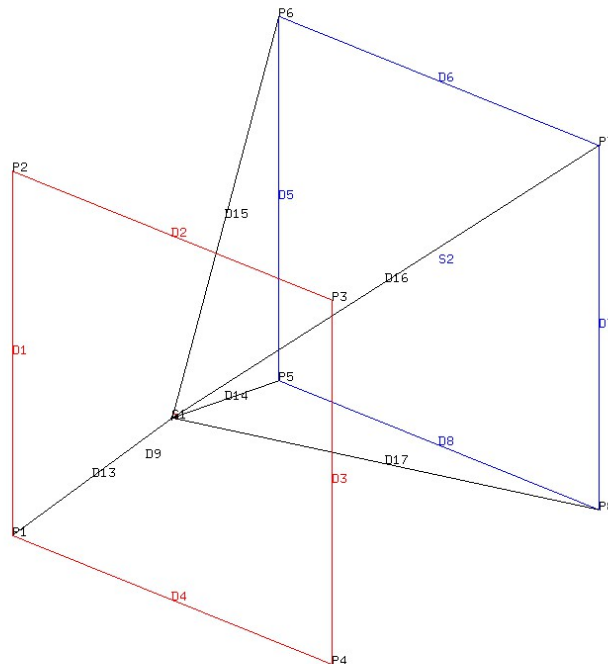


Illustration 15 : Schémas de principe pour le tri des points

Les illustrations ci-dessous montrent la réalisation d'un bâtiment ainsi que la rue des Tonneliers dans son ensemble, d'une part modélisé dans ArchiCAD (CAO) et d'autre part dans Cast3m (éléments finis).

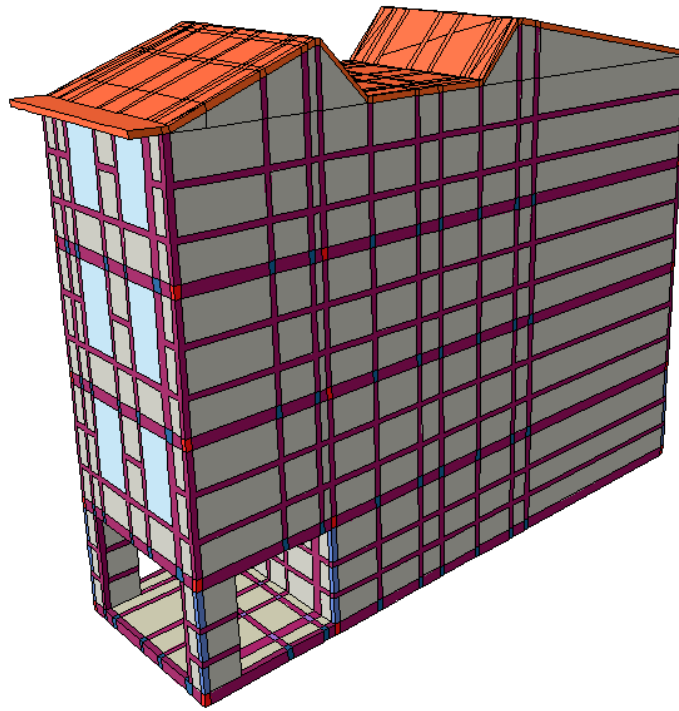


Illustration 16 : Bâtiment de la rue des Tonneliers modélisé sous ArchiCAD

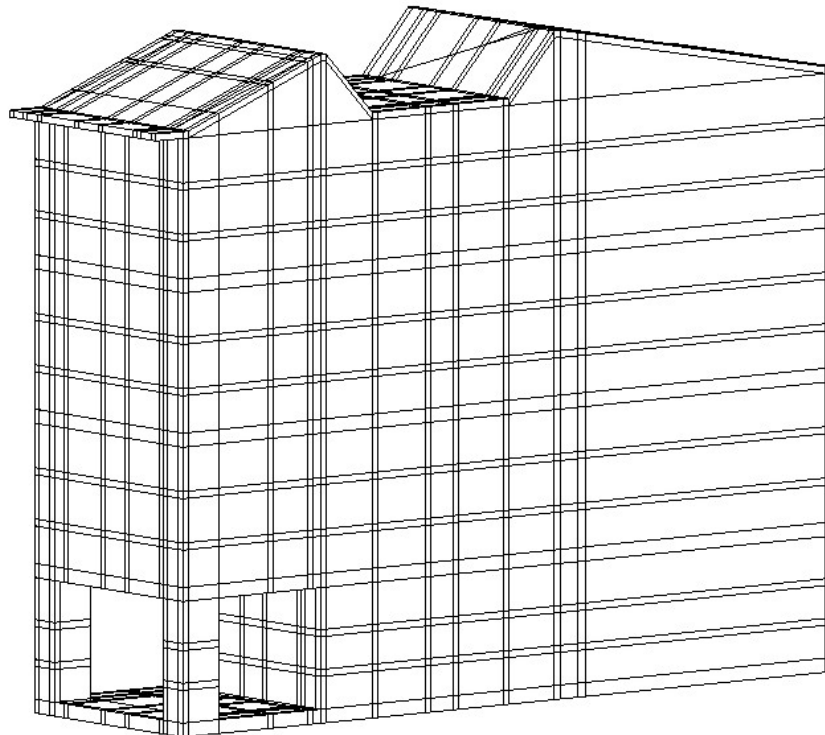


Illustration 17 : Bâtiment de la rue des Tonneliers modélisé sous Cast3m

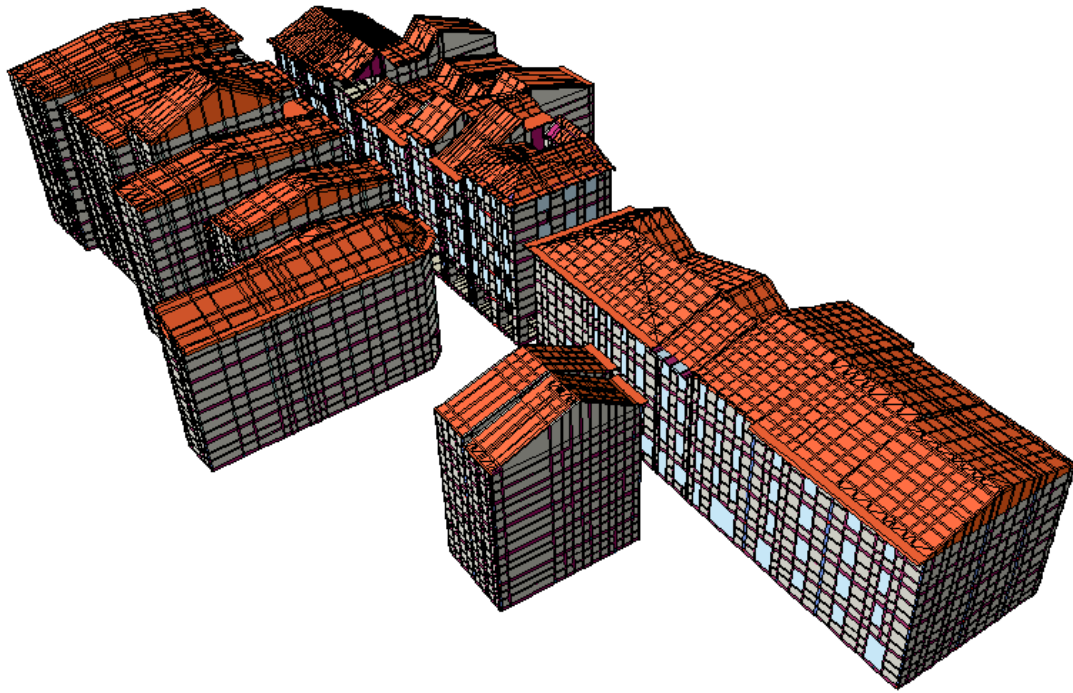


Illustration 18 : Modélisation de la rue des Tonneliers sous ArchiCAD

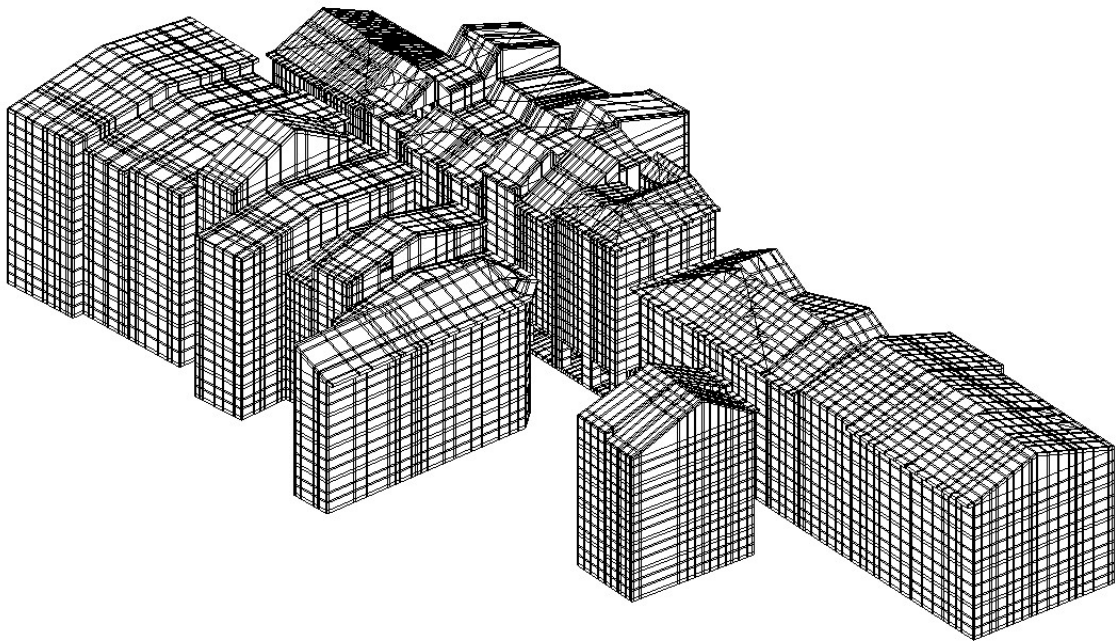


Illustration 19 : Modélisation de la rue des Tonneliers sous Cast3m

La prochaine étape dans le processus menant vers une étude thermique complète de la rue sera de pouvoir manipuler la géométrie dans son ensemble. Il s'agira dans un premier temps, de détecter et décrire la peau du modèle ; repérer automatiquement les cavités (intérieurs), calculer leur volume, ajouter les coefficients de convection de la RT2012 aux parties horizontales, verticales ou obliques des peaux intérieures et extérieures. Ensuite, les coefficients de réflexion des différentes parties de la peau, ainsi que les conductivités et capacités des différents matériaux composant les éléments de volume pourront être ajoutés. Pour ce faire, l'idée d'exporter le modèle en différentes couches depuis le logiciel CAO (par exemple ; une couche par matériau) sera étudiée. Ainsi, la masse des bâtiments pourra être calculée.

Dans un second temps, il conviendra de vérifier que le modèle final comprenne une sémantique complète, que ses différentes composantes sont facilement accessibles (par exemple, pour modifier les coefficients de convection des surfaces extérieures en fonction de la direction et de la force du vent ; pour calculer les facteurs de vue ; pour ajouter le rayonnement en ondes courtes) ; refaire les calculs de masse, de volume, de comptage des éléments dans Cast3m et vérifier que les résultats concordent avec les calculs du préprocesseur.

La trentaine de bâtiments que compose la rue des Tonneliers est modélisé à partir de 130 000 hexaèdres et de 840 prismes. Le nombre d'éléments de maillage est plus faible qu'avec un maillage généré directement dans Cast3m. Le calcul thermique nécessitera donc moins de temps. De plus, grâce à la précision de la géométrie, une comparaison des températures de surfaces peut être faite avec une thermographie du bâtiment. La combinaison des deux technologies, la simulation numérique et la thermographie, pourrait permettre de mieux comprendre les échanges thermiques à l'intérieur d'un site urbain.

Ensuite, en considérant la rue dans sa globalité, un calcul multi-échelle (i.e échelle du bâtiment, échelle de la rue) pourrait fournir des informations sur la façon dont la rue a une influence sur le bâtiment et *vice versa*. Ainsi, un des enjeux majeurs, dans la suite de cette étude, va être de laisser la température intérieure libre. Dans la plupart des simulations thermiques d'aujourd'hui, on fixe la température intérieure des locaux et on fait varier la température extérieure à partir de fichiers météorologiques. Dans notre cas d'étude, on peut tout à fait imaginer de réaliser un calcul sans fixer la température intérieure et d'analyser les variations de celle-ci en fonction des conditions extérieures de la rue. En l'occurrence, la présence des fenêtres dans le modèle permet de visualiser plus précisément cette variation de température. La température intérieure est ainsi modifiée par convection grâce au rayonnement.

Toutefois, en vue d'une simulation thermique plus précise, le modèle géométrique peut être amélioré. Par exemple, à l'heure actuelle, les fenêtres sont modélisées avec une épaisseur égale aux autres éléments du maillage, c'est-à-dire en recouvrant toute l'épaisseur du mur. L'inconvénient de diminuer l'épaisseur des fenêtres pour un rendu plus réaliste, serait de ne pas considérer le pont thermique entre les fenêtres et les murs à leur juste valeur. Cependant, à l'échelle de toute une rue, cette approximation reste acceptable. De plus, les bâtiments sont modélisés avec un seul volume dans l'épaisseur des façades. De ce fait, un mur constitué d'un élément structurel et d'un élément d'isolation ne peut être simulé, pour le moment. Plus généralement, il s'agira de dominer la finesse du maillage, par exemple pour raffiner un seul appartement de l'un des édifices. Enfin, sachant que la principale limitation de Cast3m concerne le nombre de facteurs de vue nécessaires pour le calcul du rayonnement en ondes longues [Beckers P and Beckers B, 2012], il sera nécessaire de contrôler ce nombre en simplifiant ou en regroupant les éléments de surface, de manière à rester en dessous d'un certain nombre.

4 Conclusion

Les différentes activités auxquelles j'ai pu participer tout au long de mon stage de fin d'études au sein du service de maîtrise d'œuvre de Nobatek INEF4, m'ont permis de réaliser des études sur des projets existants. Ces dernières permettent d'appréhender les attentes des maîtres d'ouvrage concernant le confort des usagers. En réalisant des études portées sur l'éclairage naturel et la thermique des bâtiments, j'ai pu acquérir certaines compétences afin de qualifier les différents indicateurs permettant d'estimer le confort des usagers. Outre les études de simulation numérique, l'expérimentation grâce au projet « Eclair », a joué un rôle prépondérant pendant mon stage et m'a permis de découvrir un autre grand aspect de la recherche scientifique.

Durant les prochaines années, mes travaux se concentreront en grande partie sur l'aspect thermique des études de confort. En effet, le bilan énergétique d'un bâtiment, même pris isolément, dépend fortement de la configuration physique du voisinage plus ou moins immédiat. L'ingénierie thermique consiste à estimer les besoins d'énergies à partir de la balance entre des apports gratuits (éclairage naturel, énergies solaires, apports internes dus à l'occupation, etc.) et les déperditions structurelles du bâtiment (pertes de chaleur par l'enveloppe, par la ventilation, etc.). Cette balance n'étant jamais nulle, les dispositifs techniques ont la charge de la combler en produisant, distribuant et diffusant de l'énergie. Lorsqu'il s'agit d'estimer les consommations d'énergie à l'échelle urbaine, le bilan bâtiment par bâtiment devient difficile sinon impossible. Ce bilan, qui dans le champ de la recherche scientifique permet de mesurer le caractère « performantiel » des tissus urbains et dans le champ opératoire de dimensionner les dispositifs de production et de distribution centralisés ou mutualisés, exige d'avoir recours à des indicateurs autres que ceux opérés jusqu'à présent. Les travaux que je mènerai pendant ma thèse s'inscrivent dans cette optique.

Précisément, les trois phénomènes physiques décrivant une étude thermique sont la conduction, à travers les éléments solides, la convection, régie par l'atmosphère ambiante et enfin le rayonnement qui dépend du ciel (ondes courtes) mais aussi de la scène étudiée (ondes longues). Ainsi, pour pouvoir appréhender la première typologie de transfert thermique, les méthodes nodales sont couramment utilisées. Comme suggéré précédemment, le passage aux méthodes par éléments finis pourrait permettre de palier à certaines limites de ces méthodes. Concernant le deuxième mode de transfert, la méthode par Computational Fluid Dynamics (CFD) permet d'appréhender et de qualifier les échanges de chaleur entre un solide et un fluide en mouvement. Enfin, le Lancer de Rayon et la Radiosité sont les deux principales méthodes pour résoudre le phénomène de rayonnement. Selon des études qui sont, au moment de l'élaboration du présent rapport, en cours de développement, la seconde méthode semble être plus adaptée à mesure que l'environnement urbain se densifie. En définitive, la combinaison de ces trois méthodes pourrait permettre de mieux comprendre les échanges physiques qui ont lieu au sein d'un environnement urbain.

5 Références

- [ADEME, 2007] Bureaux, écoles, mieux s'éclairer à coûts maîtrisés, ADEME, Syndicat de l'Éclairage, 2007.
- [Acuña Paz y Miño, 2018] J. Acuña Paz y Miño, V. Lefort, C. Lawrence, B. Beckers. *Maquette Numérique d'une rue du vieux Bayonne pour son étude thermique par éléments finis*. A la pointe du BIM, Ingénierie & architecture, enseignement & recherche (ed. Eyrolles) 103–115, May 15-16 2018, Clermont-Ferrand, France.
- [Beckers, 2011] *Modélisation du rayonnement pour les projets architecturaux et urbains*, B. Beckers, Mémoire HDR, UTC, Compiègne, Décembre 2011.
- [Beckers P and Beckers B, 2012] *Radiative Simulation Method*, B. Beckers, P. Beckers, in: *Solar Energy at Urban Scale*, chapter 10, Ed. B. Beckers, John Wiley and Sons, 2012.
- [Blocken 2015] Blocken B. *Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations*. *Building and Environment* 91, 219–245 (2015).
- [Bugeat, 2017] *Conception et Evaluation de la Lumière Naturelle en Bâtiment*, A. Bugeat, ISA BTP - Nobatek, August 2017.
- [Ceylan and Myers, 1980] Ceylan, H. T., and G. E. Myers. 1980. *Long-time Solutions to Heat Conduction Transients with Time-Dependent Inputs*. *ASME Journal of Heat Transfer*, Volume 102, No. 1, pp. 115-120.
- [Charras et Di Paola, 2011] Charras, T., & Di Paola, F. (2011). *Utiliser Cast3M: la procédure PASAPAS*. Documentation Cast3M.
- [Cohen, 1984] Cohen F., Greenberg D., Immel D., Brock P. *An Efficient Radiosity Approach for Realistic Image Synthesis*. Cornell University (1984).
- [Dhatt and Touzot, 1981] G. Dhatt and G. Touzot. *Une Présentation de la Méthode des Éléments Finis*. Les presses de l'université Laval, Québec, 1981.
- [Fraisie, 2002] Gilles Fraisie, Christelle Viardot, Olivier Lafabrie, Gilbert Achard. *Development of simplified building model*. *Energy and Buildings*, volume 34, p. 1017-1031, 2002.
- [GREENLIGHT, 2002] *Programme Européen Greenlight*, Commission Européenne, 2002.
- [Lewis, 2004] Roland W Lewis, Perumal Nithiarasu, Kankanhally N. Seetharamu. *Fundamentals of the Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons, 2004.
- [Mardaljevic 2009] MARDALJEVIC J., HESCHONG L., LEE E. *Daylight metrics and energy savings*. *Lighting Research and Technology*, 41(3):261–283, 2009.

[Moon 1942] MOON P., SPENCER D. *Illumination from a non-uniform sky*. Illum. Eng. (N.Y.) 37:707-726. (1942).

[Ouyang et Haghghat, 1991] Ouyang, K., and F. Haghghat. 1991. *A Procedure for Calculating Thermal Response Factors of Multi-layered Walls—State Space Method*. Building and Environment, Vol. 26, No. 2, pp. 173-177.

[Ozisik and Czisik, 1994] Ozisik MN and Czisik MN 1994 *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, CRC Press.

[Patankar, 1980] Patankar SV 1980 *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishers.

[Pasquet, 1999] Philippe Pasquet. *Thermique des structures*. Technical report, CEA, 1999.

[Perez, 1993] Perez R., Seals R., Michalsky J., *All-Weather Model for Sky Luminance Distribution Preliminary Configuration and Validation*. Solar Energy 50(3):235-245 (1993).

[Pignolet-Tardan, 1997] F. Pignolet-Tardan, P. Depecker, J-C. Gatina. *Modélisation du comportement thermique d'un espace urbain : Calcul de la réponse en température des structures et de l'air ambiant*. Revue générale de thermique, Volume 36, Issue 7, July-August 1997, Pages 534-546.

[Reinhart 2001] Reinhart C. F., Walkenhorst O. *Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a full-scale test office with outer venetian blinds*. Energy & Buildings, 33:7 pp. 683-697, (2001).

[Reinhart 2006] Reinhart C. F., Mardaljevic J. *Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design*. Leukos vol. 3 n°1 pages 7-31 (2006).

[U.S Department of energy, 2018] *Engineering Reference*. EnergyPlus™ Version 8.9.0 Documentation, 2018.

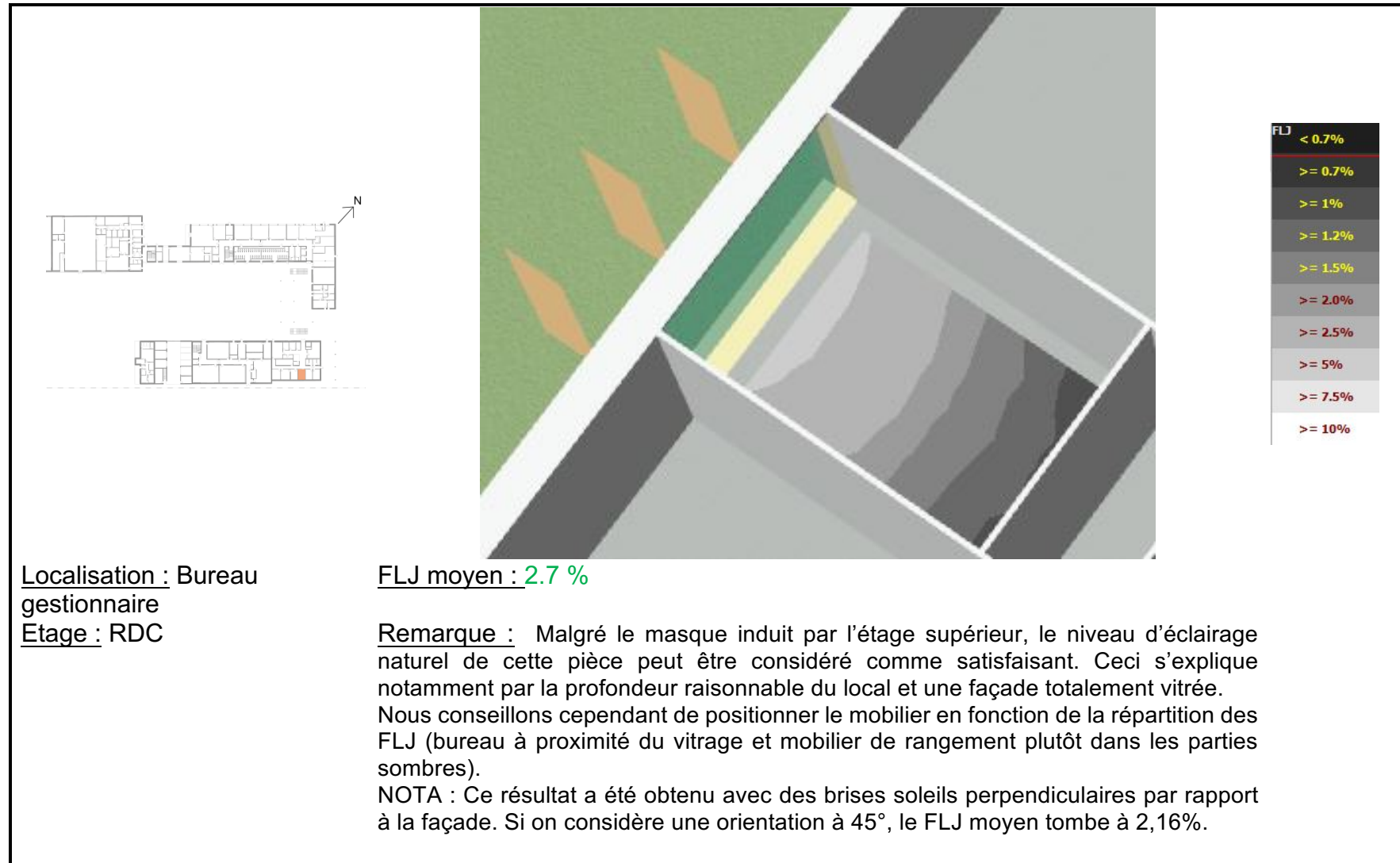
[Vollmer et Möllmann, 2010] M. Vollmer, K.P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 593 p.

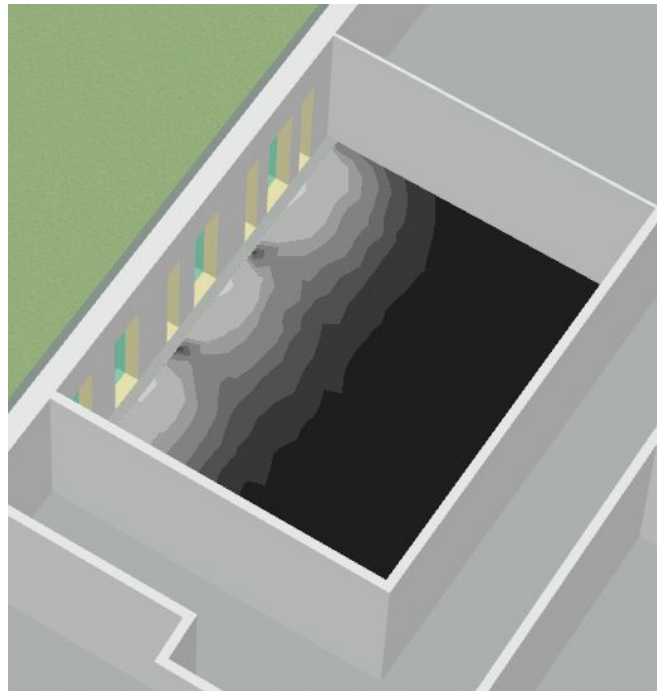
[Waldram, 1909] WALDRAM PJ. *A Standard of Daylight Illumination of Interiors*. Illum. Eng. 2:469 (1909).

[Ward, 1998] Ward G. J., Shakespeare R. *Rendering with RADIANCE. The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufmann, Los Altos CA (1998).

6 Annexes

6.1 Résultats d'études cas 1

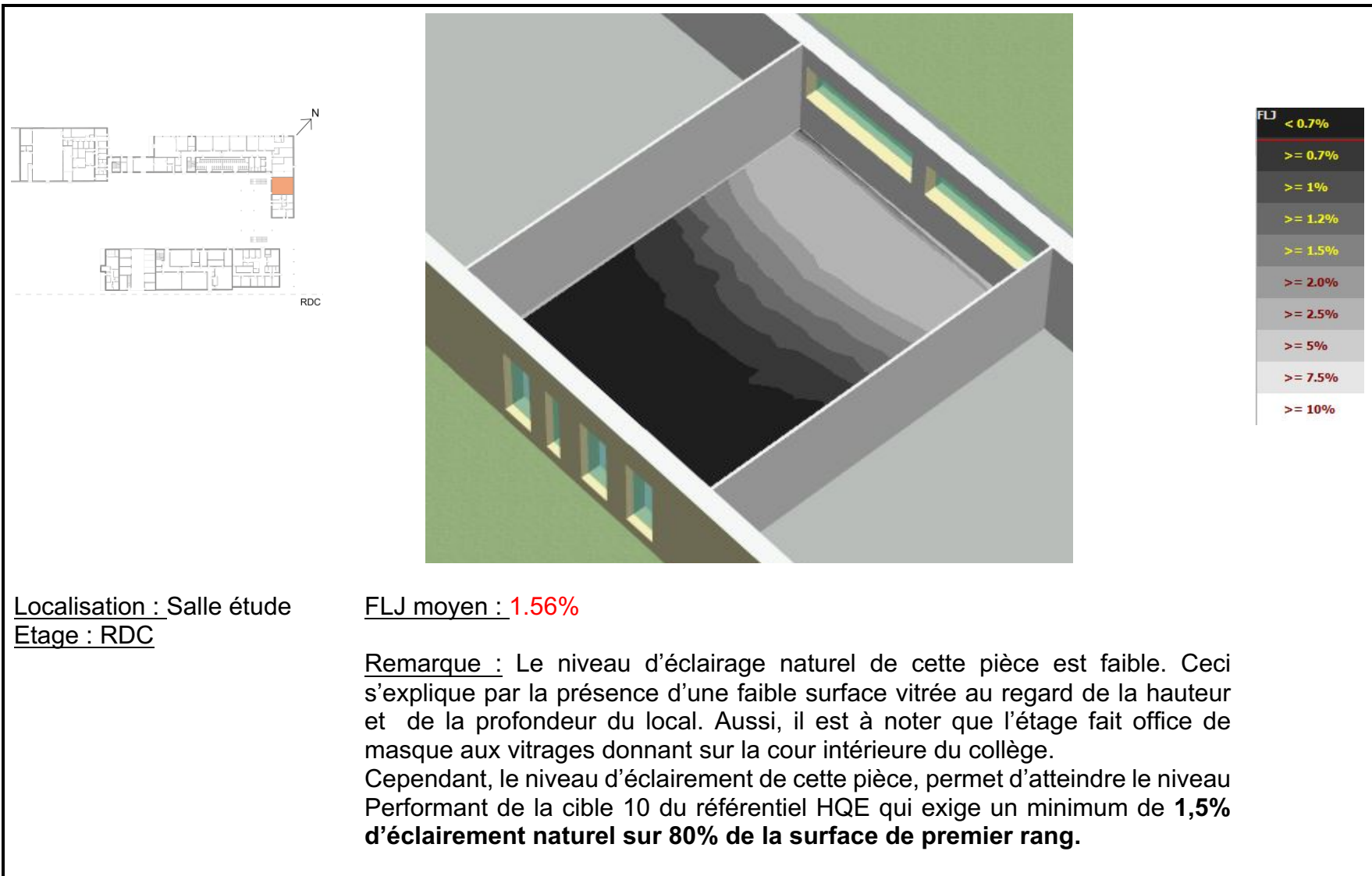


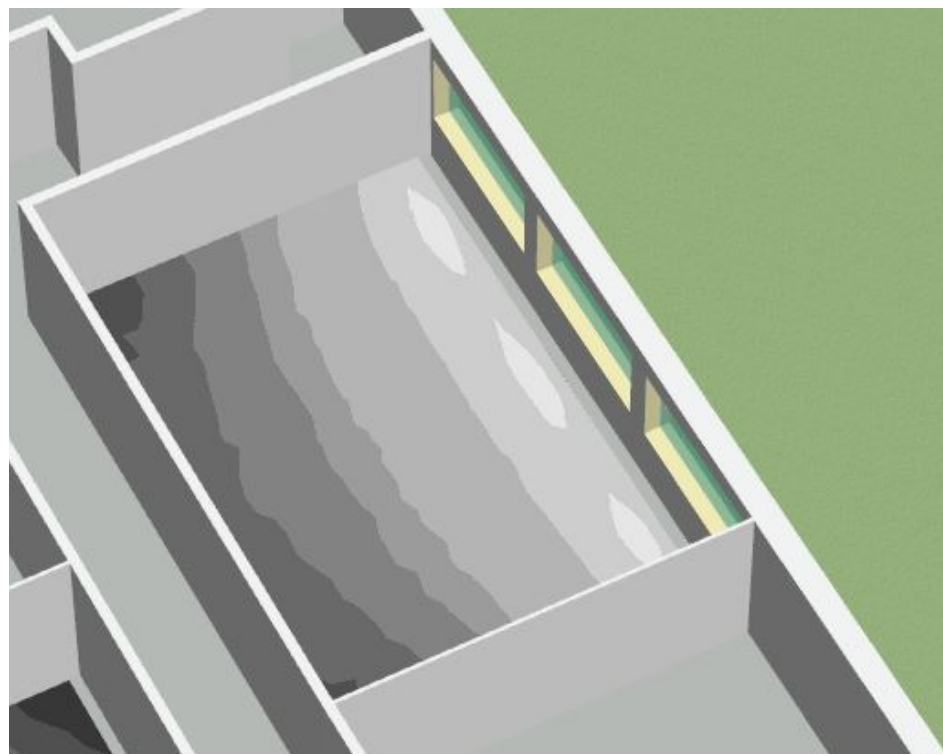


Localisation : Salle info
Etage : RDC

FLJ moyen : 1.1 %

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est faible. Ceci s'explique par la présence d'une faible surface vitrée au regard de la hauteur et de la profondeur du local. Cependant, agrandir la surface vitrée n'est pas primordial pour une salle à usage informatique. De plus, en augmentant la surface vitrée, on augmente les apports solaires et le risque de favoriser l'inconfort en été. Cette salle ayant déjà tendance à connaître plus d'heures de chauffe qu'ailleurs, il n'est pas pertinent de modifier le vitrage.





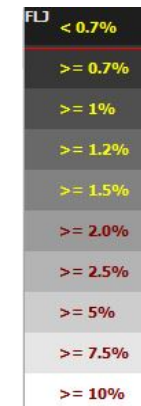
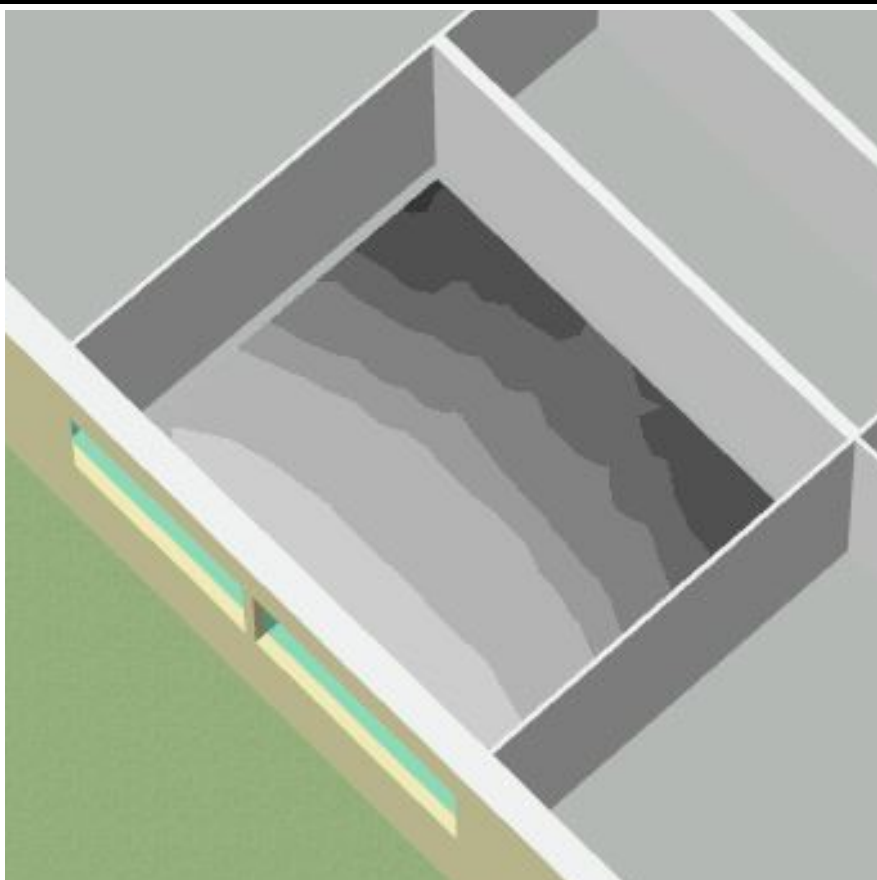
FLJ	< 0.7%
	>= 0.7%
	>= 1%
	>= 1.2%
	>= 1.5%
	>= 2.0%
	>= 2.5%
	>= 5%
	>= 7.5%
	>= 10%

Localisation : Salle mixte

Etage : RDC

FLJ moyen : 3.00 %

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.



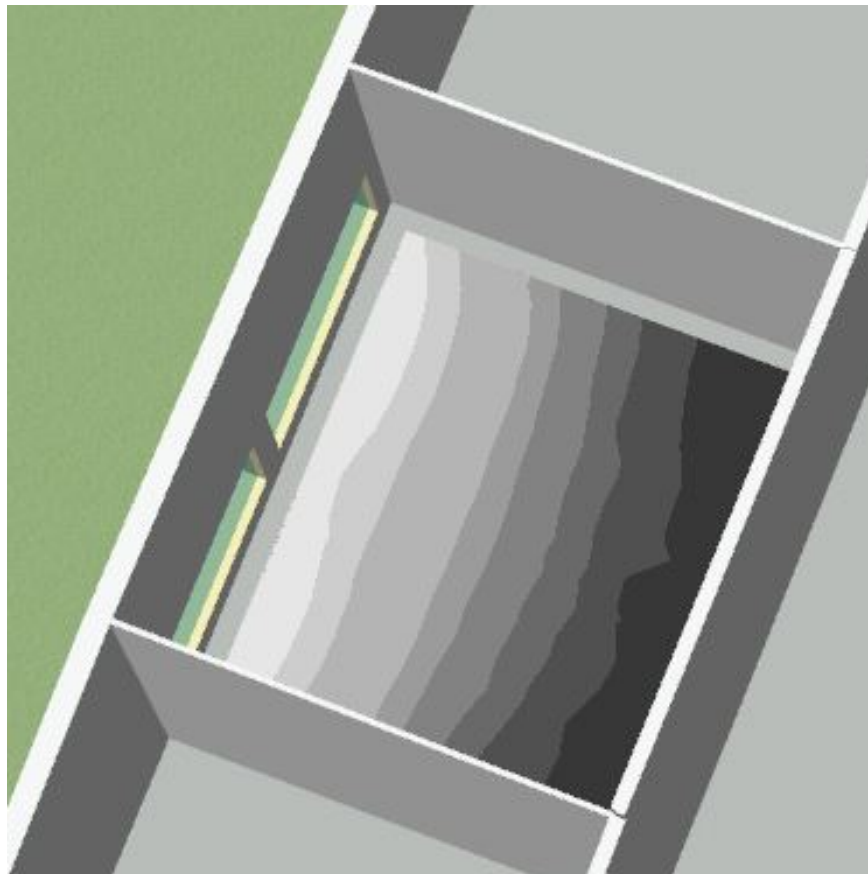
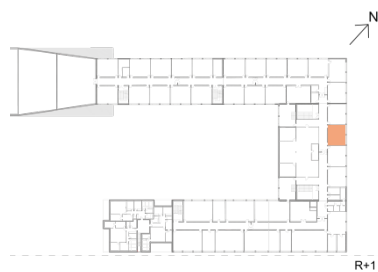
Localisation : Salle banalisée

NO

Etage : RDC

FLJ moyen : 2.84 %

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.

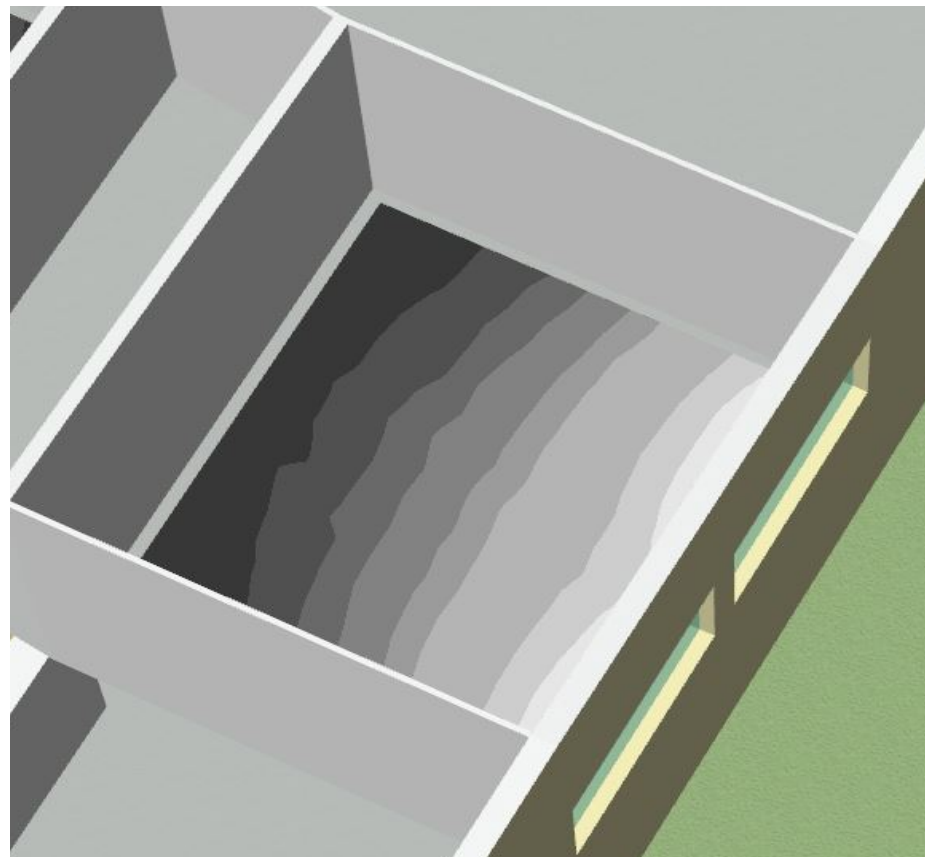
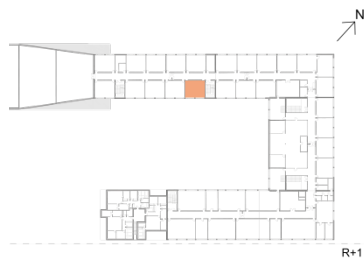


FLJ	< 0.7%
	>= 0.7%
	>= 1%
	>= 1.2%
	>= 1.5%
	>= 2.0%
	>= 2.5%
	>= 5%
	>= 7.5%
	>= 10%

Localisation : Salle banalisée
NE (Parvis)
Etage : R+1

FLJ moyen : 3.23 %

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.

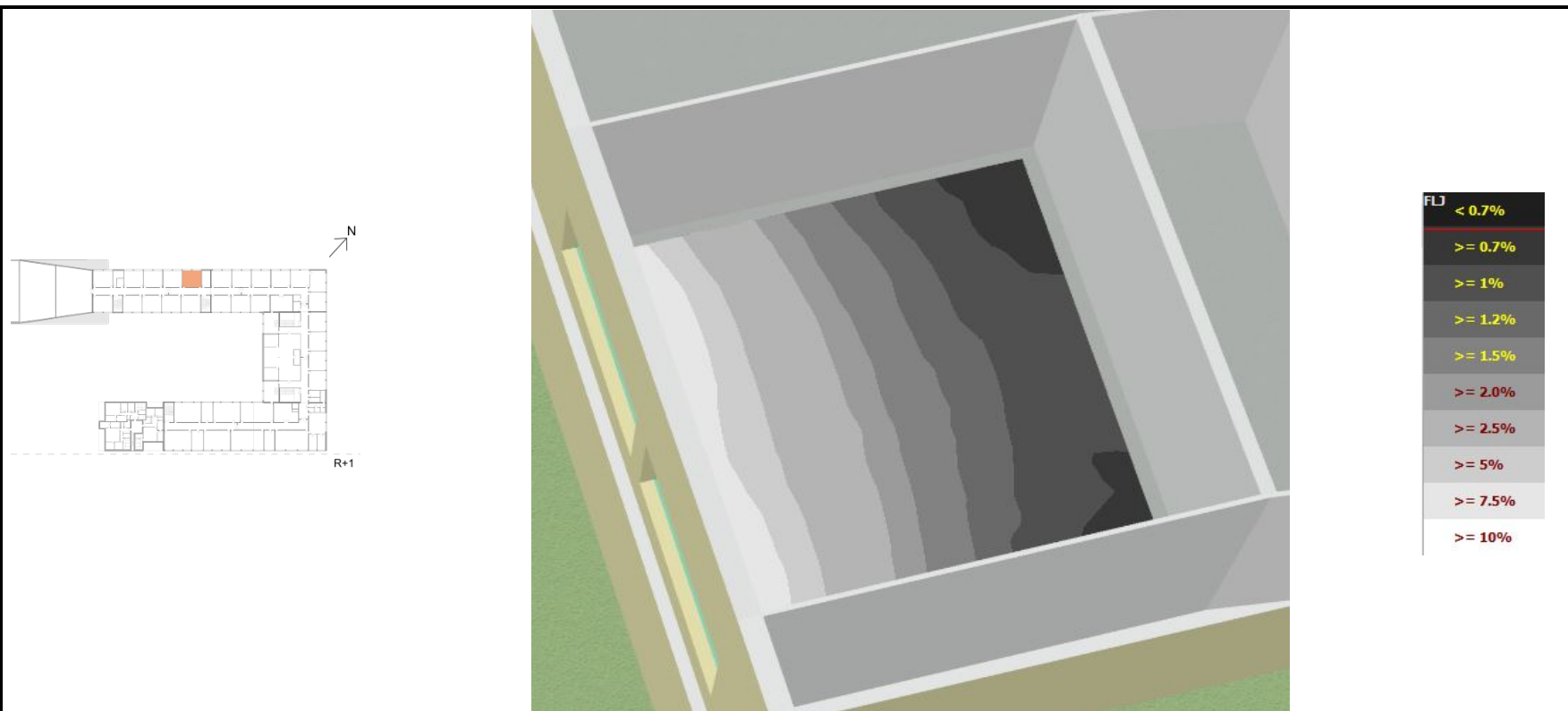


FLJ	< 0.7%
	>= 0.7%
	>= 1%
	>= 1.2%
	>= 1.5%
	>= 2.0%
	>= 2.5%
	>= 5%
	>= 7.5%
	>= 10%

Localisation : Salle banalisée
SE
Etage : R+1

FLJ moyen : 3.22 %

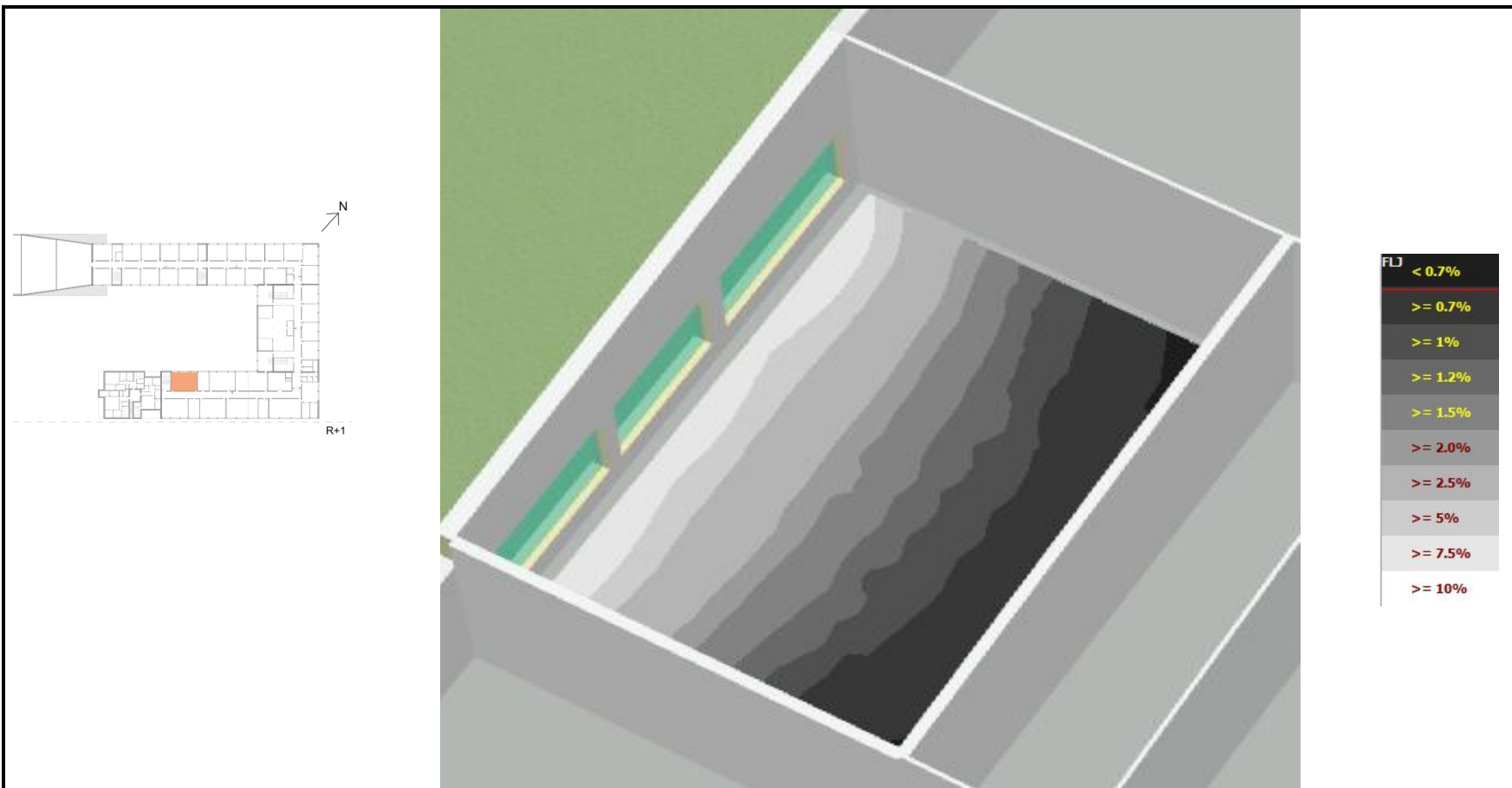
Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.



Localisation : Salle banalisée
NO
Etage : R+1

FLJ moyen : 3.28 %

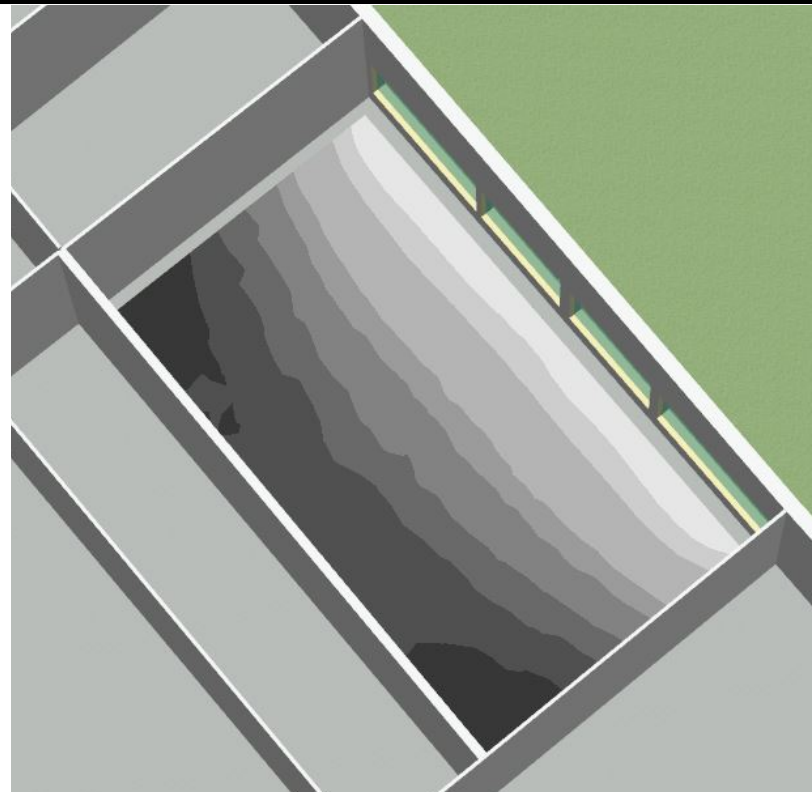
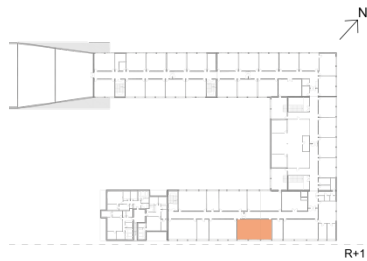
Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.



Localisation : Salle science
Etage : R+1

FLJ moyen : 2.84 %

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.



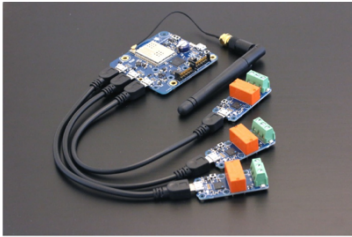
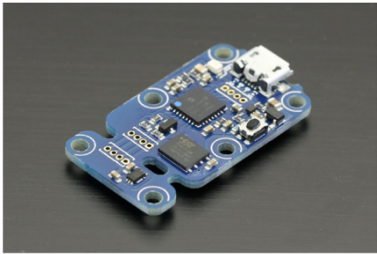
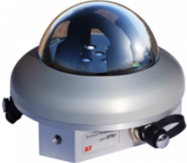
FLJ	< 0.7%
	>= 0.7%
	>= 1%
	>= 1.2%
	>= 1.5%
	>= 2.0%
	>= 2.5%
	>= 5%
	>= 7.5%
	>= 10%

Localisation : Salle techno
Etage : R+1

FLJ moyen : 3.13 %

Remarque : Le niveau d'éclairage naturel de cette pièce est bon. Ceci s'explique par la présence d'une grande surface vitrée et à la profondeur raisonnable du local.

6.2 Fiche matériels

Dénomination	Matériaux	Fournisseurs
Imprimante 3D	Projet CJP 660 Pro	3D systems https://fr.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-660pro
Matériau d'impression	Poudre ColorJet printing CJP VisiJet PXL	3D systems https://fr.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-660pro
Colle, durcisseur	L05	Sureloc Adhesives & Sealants http://surelocadhesives.com/producttypes.php?catid=1&pid=15
Vernis imperméabilisant	Mélange : - Vernis MAT - Durcisseur - Reduseur SLOW	SL DIFFUSIONS
Luxmètres	Yocto-Light V3  	YOCTOPUCE https://www.yoctopuce.com/FR/products/capteurs-environnementaux-usb/yocto-light-v3/
Pyranomètre	SPN1 Sunshine   SPN1 Sunshine Pyranometer Global (Total) and Diffuse irradiance in $W.m^{-2}$ $\pm 8\% \pm 10 W.m^{-2}$ 400 – 2700 nm	AT delta-T Devices www.delta-t.co.uk/product/spn1/

6.3 Scénarios STD/Composition des parois

La composition des parois est détaillée dans le tableau ci-dessous :

Désignation	Composition (intérieur vers extérieur)	Epaisseur (cm)	Résistance thermique éq ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)
Parois extérieures RDC	Voile béton	20	6.93
	Rockfacade (laine de roche)	12	
	Rockfacade	12	
	Panneaux béton	8	
Parois extérieures à l'étage	BA 15	1.5	7.91
	Rail métallique	4.8	
	Ossature bois + Rockfacade	17.5	
	OSB	-	
	Pavatex (laine de bois)	10	
	Tasseaux + voligeage Feuilles de zinc	-	
Parois extérieures restaurants (mur existant)	BA 15	1.5	6.91
	Rockfacade	12	
	Parevapeur	-	
	Rockfacade	12	
	Voile béton	18	
Cloisonnement intérieur légère	BA 13	1.3	-
	Laine minérale	4.5	
	BA 13	1.3	
Plancher intermédiaire	Béton	25	-
Plancher bas extérieur	Béton	25	7.29
	Laine de bois	23	
Plancher bas sur terre-plein	Béton	25	4.65
	Isolant	10	
Toiture	BA 15	1.5	10.36
	Rail + laine de roche	4.8	
	OSB	1.2	
	Ossature + Rockfacade	20	
	OSB	1.2	
	Pavatex	10	
	Tasseaux + voligeage + feuilles de zinc	-	

VITRAGE	Uw (W/m².K)	Facteur solaire	Facteur de transmission lumineuse
	1,4	0,4	0,56

Scénarios de fonctionnement

Les scénarios de fonctionnement s'appuient sur le CRET ou les règles TBCE lorsqu'il n'y a pas indication supplémentaire issue des fiches espaces).

Occupation

Les périodes de vacances scolaires ont été prises sur les bases suivantes :

- Vacances de Toussaint : à partir du 22 octobre pour une période de 15 jours
- Vacances de Noël : à partir du 23 décembre pour une période de 15 jours
- Vacances d'hiver : à partir du 19 février pour une période de 15 jours
- Vacances de printemps : à partir du 16 avril pour une période de 15 jours

- Vacances d'été : à partir du 9 juillet jusqu'au 3 septembre.

janv - fev	mars - avril	mai - juin	juillet - aout	sept - oct	nov - dec
semaine 1	semaine 10	semaine 19	semaine 27	semaine 36	semaine 45
semaine 2	semaine 11	semaine 20	semaine 28	semaine 37	semaine 46
semaine 3	semaine 12	semaine 21	semaine 29	semaine 38	semaine 47
semaine 4	semaine 13	semaine 22	semaine 30	semaine 39	semaine 48
semaine 5	semaine 14	semaine 23	semaine 31	semaine 40	semaine 49
semaine 6	semaine 15	semaine 24	semaine 32	semaine 41	semaine 50
semaine 7	semaine 16	semaine 25	semaine 33	semaine 42	semaine 51
semaine 8	semaine 17	semaine 26	semaine 34	semaine 43	semaine 52
semaine 9	semaine 18		semaine 35	semaine 44	

Ouvert
Fermé

En période d'occupation, nous avons considéré les horaires d'ouvertures suivantes :

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Sam	Dim
Salles de cours	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30 14h-17h30	-	-
Restaurant	11h-14h	11h-14h	11h-14h	11h-14h	11h-14h	-	-
Bureau	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30 14h-17h30	8h-12h30 14h-17h30	-	-
CDI	8h-18h	8h-18h	8h-18h	8h-18h	8h-18h	-	-

Selon les typologies de chaque pièce, lors de ces créneaux les locaux sont occupés à 100% par :

- 27 personnes dans le CDI,
- 23 élèves et 1 professeur dans la salle mixte arts/musique du RDC,
- 46 élèves dans la salle d'étude du RDC,
- 1 occupant dans le bureau du RDC,
- 262 élèves dans le réfectoire,
- 30 élèves + 1 professeur dans les autres salle de cours (banalisées ou spécifique).

En dehors des horaires d'ouvertures, les locaux sont considérés comme inoccupés.

Ventilation

Le tableau ci-dessous comprend les scénarios de ventilation pour chaque zone :

Nom	Débit règlementaire*	Nb de personnes	Débit total
(-)	(m3/h-pers)	(-)	(m3/h)
Restauration	22	262**	5760
SB (salle banalisée) RdC NO	18	31	558
Salle étude RdC	18	46	828
Bureau RdC	25	1	25
Salle mixte	18	23***	1080
Salle info	45	46	2070
SB R+1 NO	18	31	558
SB R+1 SE	18	31	558
SB R+1 NE	18	31	558
CDI	18	27 **	481
Salle techno	45	31	1395
Salle science	18	31	558

**débit réglementaires rappelés dans le CRET*

*** hypothèse selon les règles THBCE*

**** selon la typologie de la salle (plans)*

Afin d'assurer le confort d'été des occupants, nous avons mis en place une surventilation nocturne à 150% du débit total du 30 avril au 21 octobre (semaine 18 à 42), hors vacances d'été inoccupées) soit de la semaine 18 à 42 pour tous les locaux, et ceci de 22h à 6h du matin.

Consignes de température

Nous avons considéré les consignes de température de chauffage suivantes pour l'ensemble des zones :

Occupation	Inoccupation	Vacances
19°C	16°C	7°C

La saison de chauffe est considérée de mi-octobre à mi-avril, et correspond aux créneaux d'occupation des locaux.

Apports internes

Concernant les apports internes, nous avons dissocié les apports de chaleur induits par l'éclairage et le mobilier (matériel informatique, etc) des apports provoqués par les occupants. Selon les hypothèses du CRET, on considère **70 W par occupant**.

Les apports internes sont corrélés au regard de l'activité en période d'occupation et toujours selon le CRET, les valeurs retenues sont les suivantes :

	W/m ²
Salle de cours	5
Restaurant	10
Bureau	10
CDI	10
Salle techno / info	10

Occultations

Le bâtiment est doté de brises soleils (volets à lames orientables et rétractables). Nous avons ainsi simulé le bâtiment en considérant **un scénario d'occultation** à hauteur de **80%** toute la journée en été. Cela signifie que **80% des apports solaires** sont réfléchis de fin avril à mi-octobre (la semaine 18 à 42).

