

# Rapport de stage

## Conception et Evaluation de la Lumière Naturelle en Bâtiment



Tuteur Nobatek INEF4:  
**Frédéric BETBEDER**



Tuteur ISA BTP:  
**Benoît BECKERS**

# Sommaire

---

<b>Introduction &amp; Remerciements</b>	<i>page 3</i>
<b>Activités</b>	<i>page 4</i>
<b>Point technique : Conception et Evaluation de la lumière naturelle en bâtiment</b>	<i>page 5</i>
<b>Première partie : Etat de l'art</b>	
• Pourquoi ?	<i>page 6</i>
• Qui ?	<i>page 7</i>
• Comment ?	<i>page 8</i>
<b>Deuxième partie : Etude de cas</b>	
• Présentation projet	<i>page 14</i>
• Méthode 1	<i>page 15</i>
• Méthode 2	<i>page 16</i>
• Salles maternelles	<i>page 17</i>
• Salles élémentaires	<i>page 19</i>
<b>Troisième partie : Le lancer de rayons et RADIANCE</b>	
• RADIANCE	<i>page 22</i>
• DAYSIM	<i>page 23</i>
• Rendus RADIANCE dans Bayonne	<i>page 24</i>
• Le paramètre <i>-ab</i>	<i>page 25</i>
<b>Bilan</b>	<i>page 26</i>
<b>Glossaire</b>	<i>page 27</i>
<b>Table des annexes</b>	<i>page 27</i>
<b>Références &amp; Sources</b>	<i>page 28</i>

# Introduction & Remerciements

---

En début d'année 2016, au sein du bureau de maîtrise d'oeuvre **Soliha**, j'ai travaillé sur un projet de développement nommé **FENICS** (Filière Économique Nouvelle pour l'Innovation dans la Construction et le Social) avec comme collaborateur l'entreprise **Nobatek INEF4**. Intéressé par leurs travaux je me suis renseigné sur leur rôle dans le BTP en tant que centre de ressources technologiques (CRT) et institut pour la transition énergétique (ITE). Cela m'a permis de commencer à m'ouvrir à des problématiques nouvelles dans la construction liées à l'environnement et au confort; ainsi qu'à prendre conscience également des perspectives professionnelles que ces mêmes problématiques pouvaient m'offrir. De plus, les cours que j'ai reçu durant ces deux dernières années à l'**ISA BTP** dans l'option "Habitat & Énergie" rejoignent les sujets que traitent les projets de Nobatek INEF4. Je me suis alors rapproché de **M. Benoit Beckers**, pour connaître les motivations de la nouvelle chaire "Architecture et Physique Urbaine" entre l'école et Nobatek INEF4.

Le but de cette chaire est de développer des nouvelles méthodes de conception pour architectes et ingénieurs. En effet, le coeur des projets de ce laboratoire commun entre ISA BTP et Nobatek INEF4 est ce qui m'a toujours le plus motivé dans mes expériences professionnelles de jeune ingénieur: **la conception**. J'ai donc décidé d'en faire ma priorité pour ces prochaines années.

Durant ma dernière année d'étude, il m'a été proposé de participer à un projet portant sur la simulation de la lumière naturelle. J'ai donc intégré les bureaux de Nobatek INEF4 pour mon stage de fin d'étude sous la tutelle de **M. Frédéric Betbeder** côté Nobatek INEF4 et de **M. Benoit Beckers** côté ISA BTP, avec un objectif divisé en trois parties:

- Etablir un **état de l'art** sur les différents outils de simulation de la lumière naturelle afin de choisir les futurs axes de travail et de recherche.
- Participer à des **projets de maîtrise d'oeuvre** afin de prendre conscience des besoins des concepteurs en ce qui concerne la simulation de la lumière naturelle.
- Utiliser, étudier et comprendre la méthode de lancer de rayon via le moteur de calcul le plus utilisé et le plus reconnu dans le domaine, **RADIANCE**.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage :

Tout d'abord **M. Jacques Tortos**, directeur général et **M. Olivier Scheffer**, directeur général adjoint de m'avoir accueilli au sein de Nobatek INEF4.

**M. Frédéric Betbeder**, directeur du pôle Innovation pour l'Architecture et l'Urbanisme Durables, et **M. Benoit Beckers**, mon futur directeur de thèse et directeur de la chaire Architecture et Physique Urbaine, pour le temps qu'ils m'ont offert, leur expertise qu'ils m'ont fait partager et la confiance qu'ils m'ont donné.

**M. Eduardo Fernández**, mon futur co-directeur de thèse de l'Universidad de la Republica de Uruguay pour les échanges constructifs que j'ai eus avec lui.

**M. Fabian Bertocchi**, chef de projet, **M. Maxime Bossu**, **M. Maxime Comminges**, **M. Guillaume Laval** et **M. Romain Perie**, ingénieurs, pour leur patience et leur aide.

**M. José Aguerre** et **Mlle Elena Garcia**, membres de la nouvelle chaire, pour leurs précieux conseils.

Et enfin tous les collaborateurs de Nobatek INEF4 pour leur sympathie et leur accueil.

*Les documents présentés ci-dessous contiennent des informations sensibles quant à l'activité de Nobatek INEF4 et doivent par conséquent demeurer dans le cadre de la relation exclusive entre Nobatek INEF4 et l'ISABTP.*

# Activités

---

- **Etat de l'art sur les outils de simulation de la lumière naturelle**

Il représente le travail le plus important de mon stage, d'une part car il fait le lien entre la partie "Marché" représentée par les projets portés par Nobatek INEF4 et la partie "Recherche" représentée par la nouvelle chaire, et surtout parce qu'il constitue le point de départ de ma thèse. Ce travail consistait essentiellement à effectuer une grande recherche littéraire sur tout ce qui touchait au domaine. Le but étant d'établir un panorama général des outils de simulation de la lumière naturelle en se focalisant sur leurs algorithmes de calcul, sur leurs évolutions au cours du temps, mais également sur les textes, certifications, et méthodes d'évaluation qui guident notre façon d'utiliser ces outils.

- **Projets de Maîtrise d'Oeuvre**

Au total, j'ai pu participer à 3 projets de maîtrise d'oeuvre: une école à Boulazac, une tour en bois pour résidence universitaire à Paris et le générateur d'activité Arkinova à Anglet. Mes interventions se sont déroulées durant des phases différentes pour chacun de ces 3 projets. Dans l'ordre: Pour l'école, phase Avant-Projet; pour la tour, phase concours; et pour Arkinova, phase de validation de la certification. Quant au sujet d'étude, il était identique pour chaque projet: la lumière naturelle. Ces études étaient, comme pour la grande majorité des projets en France, guidées par la certification HQE et plus précisément par le volet de la cible 10 "confort visuel". Je me suis calqué à l'identique sur la façon de travailler des ingénieurs de Nobatek INEF4, en utilisant les mêmes outils de travail et les mêmes méthodes. Ceci dans le but de connaître ce qui serait possible d'améliorer, de changer ou de remplacer, afin de pouvoir par la suite, rendre les études plus précises et/ou plus rapides.

- **Utilisation et Analyse de RADIANCE**

Lorsque l'on parle de simulation de la lumière et d'autant plus de la lumière naturelle, il est impossible de ne pas évoquer le moteur de calcul **RADIANCE**. Ce moteur de calcul basé sur des méthodes de lancer de rayon, est utilisé par la majorité des logiciels de simulation proposés sur le marché aux architectes et ingénieurs. Cet outil, très performant que ce soit pour le rendu d'image ou pour l'analyse d'éclairage, a été développé à l'origine à la fin des années 90 par Greg Ward Larson et Rob A. Shakespeare [Ward 98] et fait encore aujourd'hui office de référence. Depuis sa date de création jusqu'à maintenant, les méthodes d'analyse et de conception architecturale ont beaucoup évolué. En restant dans la problématique énergétique et confort, on pourrait prendre pour exemple l'apparition des simulations thermiques dynamiques qui ont à présent un rôle clef lors des phases projets. Étant étroitement lié à cette même problématique, la prise en compte et l'évaluation de la lumière naturelle a évolué tant dans sa forme que dans son importance. La question que l'on a voulu se poser lors de ce travail était de savoir si compte tenu de l'évolution des méthodes de conception et également de la progression d'autres méthodes de calcul et technologies jusqu'alors mises de côté, **l'utilisation de ce moteur de calcul était elle toujours cohérente et justifiée.**

Pour cela, j'ai procédé à l'utilisation de RADIANCE en faisant des simulations sous différents cas d'études (Bureaux de Nabil et Mardaljevic [Nabil 2005] et Rue des Tonneliers à Bayonne [Beckers 2017]) pour cerner et mettre en valeur les inconvénients qu'il possède.

# Conception et évaluation de la lumière naturelle en bâtiment

## ÉTUDE DE CAS ET ANALYSE DES MÉTHODES

---

Dans la première partie de ce point technique seront exposés les conclusions qui sont ressorties suite à la réalisation de l'état de l'art sur les outils de simulation de la lumière naturelle.

Une attention particulière sera portée sur les différents indicateurs qui existent et sur leur manière de les calculer. La deuxième partie portera sur une étude de cas confrontant notre façon actuelle d'analyser nos conceptions avec une approche différente et plus moderne. J'ai repris pour cela le projet de l'école de Boulazac afin d'illustrer les arguments déjà mis en avant dans la première partie. La troisième et dernière partie sera consacrée à la présentation du moteur de calcul RADIANCE, d'une de ses adaptations dynamique DAYSIM, et de certaines simulations permettant de mettre en avant ses forces et faiblesses.

Le but général de ce texte étant de découvrir de quelle façon les études sont réalisées actuellement et de s'interroger quant à leur qualité et à leur fiabilité.

### Première partie

#### CONCLUSION DE L'ÉTAT DE L'ART

- Pourquoi ?
- Qui ?
- Comment ?
- Indicateurs
- Logiciels & Algorithmes

### Deuxième partie

#### ETUDE DE CAS

- Présentation du projet
- Méthode 1
- Méthode 2
- Salles maternelle
- Salles élémentaires

### Troisième partie

#### RADIANCE

- RADIANCE
- DAYSIM
- Rendus
- Paramètre *-ab*

# Première Partie

## Conclusion de l'état de l'art

### POURQUOI concevoir en fonction de la lumière naturelle ?

Il est important avant tout de cerner les raisons qui poussent architectes et ingénieurs à obtenir une conception performante en lumière naturelle.

Celles-ci sont doubles: Du fait des propriétés précieuses et uniques de la lumière naturelle. Le premier de ces enjeux consiste à créer une ambiance propice au bien-être et à la santé des occupants. Le deuxième enjeu est de parvenir à un projet évitant le plus possible de faire appel à l'éclairage artificiel afin de minimiser les dépenses en énergie dans un souci économique et environnementale.

### SANTÉ ET BIEN-ÊTRE

Dans *A Literature review of the effects of natural light on Building Occupants* [Edwards 2002] sont comparés les résultats d'un point de vue comportemental et physiologique obtenus lors de rénovations ou de déménagements depuis un bâtiment considéré comme "mal" éclairé vers un autre bâtiment considéré comme "bien" éclairé dans 3 secteurs d'activités différents: Bâtiments de bureaux, bâtiment d'enseignement et commerce. Voici un résumé du bilan des résultats qu'ont permis le changement des locaux.

Bureaux	Enseignement	Commerce
<p><b>Productivité:</b> Amélioration de 5 à 25 % L'entreprise Reno Post Office a vu sa production passée de 400 000 \$/an à 500 000 \$/an permettant d'amortir les travaux de rénovation.</p> <p><b>Absentéisme:</b> Diminution de 15% Pour l'entreprise Lockheed Martin, la diminution de l'absentéisme a permis un gain de 1,5 M€ soit trois fois supérieurs aux économies d'énergie liées au changement des locaux.</p>	<p><b>Santé:</b> Diminution du stress Diminution des problèmes de santé en lien avec la synthèse de la vitamine D</p> <p><b>Absentéisme:</b> Diminution de 3 j/an en moyenne pour les étudiants et les enseignants.</p> <p><b>Réussite:</b> Améliorations des notes d'environ 10% Différence de taux d'apprentissage de 20% à 26% entre les écoles les moins bien éclairées et les mieux éclairées.</p>	<p><b>Amélioration des ventes:</b> Augmentations des ventes de 28%. Ces résultats proviennent d'une comparaison de 11 magasins d'une même chaîne situés dans la même région possédant pour chacun un accès à la lumière naturelle différent. Une autre étude avec cette fois-ci 108 magasins d'un même groupe ont montré des résultats très similaires.</p>

### ECONOMIE D'ÉNERGIE

10%

des consommations annuelles d'électricité en France, soit 49 TWh

Afin de mieux se représenter le potentiel en économie d'énergie qu'une bonne conception pourrait apporter, j'ai voulu montrer ces 2 chiffres donnés par l'ADEME dans leur brochure "énergie et climat" de 2012 [ADEME 2012]. Ce document présente le bilan des consommations d'éclairage intérieur en France, regroupant les bâtiments privés et publics, qu'ils soient résidentiels ou tertiaires. Même si l'éclairage n'est pas le secteur le plus gourmand en énergie, le premier chiffre nous renseigne sur son ampleur non-négligeable dans la consommation d'électricité générale en France. Le deuxième chiffre quant à lui, nous pousse à réfléchir quant à la cohérence de l'architecture des bâtiments dans lesquels nous vivons.

90%

de l'énergie pour l'éclairage est consommée le jour

## QUI définit les critères d'une "bonne" conception?

Depuis qu'il est possible de quantifier et qualifier la conception d'un projet du point de vue de la lumière naturelle grâce aux outils de simulations, des objectifs de résultats sont donnés aux architectes et ingénieurs pour leur permettre d'être aidé dans leurs prises de décisions. Malgré le fait que les réglementations, normes et certifications environnementales aient conscience qu'il s'agisse d'un enjeu fondamental, il n'existe pas vraiment de méthode harmonisée pour mesurer la performance d'un projet. Ces méthodes et critères d'évaluation sont sans cesse en évolution et dépendent bien entendu des avancés scientifique et techniques en simulation de la lumière naturelle.

Ce sont les certifications environnementales qui sont les plus exigeantes et qui définissent avec le plus de précision les cibles à atteindre. Ce sont elles qui impulsent et innovent dans la manière de qualifier une conception. Les derniers à avoir proposé une nouvelle méthode sont les ingénieurs et chercheurs de la certification nord-américaine LEED et de l'Illuminating Engineering Society en 2013 avec la création de 2 indicateurs: le Spatial Daylight Autonomy (sDA, Autonomie spatiale de lumière du jour) et l'Annual Sunlight Exposure (ASE, Exposition annuelle au Soleil). Dans le tableau présent dans la partie précédente, se trouve un regroupement des objectifs et recommandations pour les certifications internationales les plus reconnues HQE, LEED, BREEAM et GreenStar. Les définitions complexes des cibles à atteindre, leurs variétés et différences entre chaque certification rejoignent l'idée qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode cadrée et simple pour parvenir à une conception performante.

Certifications	Critères
HQE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seuil de <b>FLJ</b> minimum sur 80% de la zone de 1er rang pour 80% des locaux.</li> <li>• Traitement qualitatif de l'éblouissement (mise en place de dispositifs architecturaux ou techniques)</li> <li>• Pourcentage minimum de la surface des espaces sensibles ayant accès à des vues sur l'extérieur à respecter</li> <li>• Traitement qualitatif de la maîtrise de l'ambiance visuelle (mise en place de dispositif fonctionnel permettant aux usagers d'agir sur l'éclairage naturel dans les locaux)</li> </ul>
BREEAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Exigences nationales réglementaires</b></li> <li>• Valeur de <b>FLJ</b> moyen à respecter sur 80% de la surface du local</li> <li>• <b>DA</b> annuelle à respecter sur 80% de la surface du local – Le seuil à respecter est de 2650 heures à 200 lux</li> <li>• Valeur d'uniformité (exprimé comme le ratio <b>FLJmin/FLJmoy</b>) minimum à respecter – Le seuil à respecter est 0.4 (0.7 pour les locaux éclairés en zénithal)</li> <li>• Traitement qualitatif – Vue du ciel à partir du plan de travail (0.7 m) ET Dimensionnement du local à respecter selon un ratio comprenant les caractéristiques géométriques de la pièce et de la réflectance de la partie arrière de la pièce.</li> <li>• Traitement qualitatif de l'éblouissement (mise en place de dispositifs architecturaux ou techniques)</li> <li>• Pourcentage minimum de positions au sein des espaces sensibles (« relevant building areas ») étant à moins de 7 mètres d'un mur avec une fenêtre ou une ouverture permanente qui permet une vue convenable vers l'extérieur.</li> </ul>

<b>LEED</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>sDA</b> minimum à respecter.</li> <li>• <b>Niveau d'éclairement</b> calculé minimum à respecter pour deux conditions de ciel. Les deux conditions de ciel sont 9h du matin à l'équinoxe par ciel clair (heure solaire) et 3h de l'après-midi à l'équinoxe par ciel clair.</li> <li>• <b>Niveau d'éclairement</b> mesuré minimum à respecter pour deux conditions de ciel. Le seuil à respecter doit être compris entre 300 et 3000 lux et diffère en fonction de la surface du local où la mesure est effectuée.</li> <li>• Traitement qualitatif de l'éblouissement (mise en place de dispositifs architecturaux ou techniques)</li> <li>• Pourcentage minimum des espaces régulièrement occupés ayant une ligne de vue sur l'extérieur à respecter.</li> </ul>
<b>GreenStar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valeur de <b>FLJ</b> moyen à respecter sur la surface louable nette du local</li> <li>• <b>Niveau d'éclairement</b> naturel minimum à respecter sur la surface louable nette du local</li> <li>• Valeur minimale du temps d'ombrage du plan de travail.</li> <li>• Valeur maximale de la transmission lumineuse des stores ou écrans équipant tous les vitrages.</li> <li>• Traitement qualitatif de l'éblouissement (mise en place de dispositifs architecturaux permettant l'élimination du soleil direct ou de dispositifs techniques comme un système automatique de supervision ou un système de contrôle par les utilisateurs)</li> <li>• Pourcentage minimum de la surface louable nette ayant une vue directe sur l'extérieur à respecter</li> </ul>

Tableau des exigences des certifications environnementales, source: [www.guide-clea.fr](http://www.guide-clea.fr)

## COMMENT les concepteurs analysent et mesurent la qualité d'un projet?

### LES INDICATEURS

Dans le tableau des exigences des différentes certifications environnementales, on remarque la présence de plusieurs indicateurs tel que le Facteur de Lumière du Jour (FLJ) dans la certification HQE ou bien la Daylight Autonomy (DA) dans la certification BREEAM. Ces indicateurs permettent de mesurer les performances d'une scène étudiée d'un point de vue qualitatif ou quantitatif et c'est donc grâce à eux que les concepteurs parviennent à comparer plusieurs configuration entre elles. Les outils de simulation de lumière naturelle dédiés aux architectes et ingénieurs servent essentiellement à calculer ces indicateurs. La liste détaillée est présente ci dessous:

Indicateur	Définition	Type de calcul	Demande
<b>DF</b>	Le Daylight Factor (Facteur de Lumière du Jour, FLJ) est le rapport de l'éclairement intérieur reçu en un point du plan de référence (plan de travail), à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé. Le FLJ s'exprime en pourcentage. Le ciel couvert normalisé CIE doit être utilisé [Moon et Spencer, 1942]. Il est l'indicateur le plus ancien de cette liste, inventé en Angleterre. [Waldram 1909]	<b>Statique</b>	<b>HQE BREEAM GreenStar</b>

<b>Ratio et Indice d'Ouverture</b>	Ratio et pourcentage de surface vitrée par rapport à la façade (1/6 pour la RT2012) ou par rapport à la surface totale du logement (1/6 pour HQE).	<b>Statique</b>	<b>RT2012 HQE</b>
<b>SVF</b>	Le Sky View Factor (facteur de vue du ciel, FVC) correspond à la portion (en %) de ciel observable à partir de la surface considérée. Ce facteur ne dépend ni de la latitude, ni de l'orientation, ni même du moment de l'année, mais seulement de la géométrie de l'espace. Ce facteur permet d'évaluer le niveau du confort visuel et d'éclairage naturel des espaces intérieurs et extérieures. Il est aussi beaucoup utilisé pour d'autres études physiques portant notamment sur le climat urbain. [Beckers 2008]	<b>Statique</b>	-
<b>DA</b>	Le Daylight Autonomy (autonomie lumineuse) est définie comme étant le pourcentage d'heures occupées par ans durant lesquelles un niveau d'éclairage minimum est maintenu grâce à la seule lumière naturelle. [Reinhart 2001]	<b>Dynamique</b>	<b>BREEAM</b>
<b>UDI</b>	Le Useful Daylight Illuminance, (éclairage naturel utile) est la proportion d'éclairage sur le plan de travail, compris dans un intervalle de valeur considéré comme utile par les utilisateurs au cours d'une année. [Nabil 2005]	<b>Dynamique</b>	-
<b>maxDA</b>	Cet indicateur a pour but de déterminer les risques d'éblouissement ou de gains thermiques excessifs. Un facteur d'autonomie lumineuse maximal (maxDA) est défini pour mettre en évidence les sources lumineuses intenses ou la lumière directe du soleil. Une tache est susceptible d'être éblouissante si l'éclairage calculé est strictement supérieur à 10 fois la valeur de l'éclairage moyen fixé.	<b>Dynamique</b>	-
<b>cDA</b>	Le continuons Daylight Autonomy (autonomie en lumière du jour continue) fonctionne comme le DA à la différence près que lors du calcul, si l'objectif (exemple 300lux) n'est pas atteint (exemple 200lux) des points seront tout de même attribué (pour un cDA300, $200\text{lux} / 300\text{lux} = 0,67$ contrairement au calcul de la DA qui n'attribue aucun point dès que la valeur est en dehors de la cible). [Rogers, 2006]	<b>Dynamique</b>	-
<b>DAq</b>	Le DAq (autonomie lumineuse inverse) est définie en fonction d'un seuil. Les valeurs d'éclairages intérieurs calculées entre 8h30 et 17h30 sont triées par ordre croissant puis le pourcentage de valeur sous le seuil de 300 lux est déterminé. On obtient le pourcentage d'heures durant lesquelles la lumière naturelle seul ne permet pas de garantir l'éclairage minimum fixé.	<b>Dynamique</b>	-
<b>sDA</b>	Le Spatial Daylight Autonomy (autonomie lumineuse spatial) est le pourcentage de surface de travail où un niveau d'éclairage naturel minimum est atteint pour une fraction donnée des heures d'utilisation du bâtiment pour une année. [IES 2013]	<b>Dynamique</b>	<b>LEED</b>
<b>ASE</b>	L'Annual Solar Exposure est le pourcentage de surface avec un éclairage supérieur à 1000 lux durant au minimum 250 heures de travail. [IES 2013]	<b>Dynamique</b>	<b>LEED</b>

Tableau récapitulatif des indicateurs

Si l'on s'intéresse à ces indicateurs, on observe qu'il est possible de les séparer en **deux familles**: d'un côté les **indicateurs statiques** qui sont le résultat d'une seule simulation sous des conditions de ciel fixe ou encore plus simplement d'un calcul géométrique. L'autre famille, celle des **indicateurs dynamiques**, regroupe ceux qui demandent l'exécution d'une série de nombreuses simulations sous différentes conditions de ciel.

Pour la première famille, le **FLJ** est le plus connu et le plus utilisé d'entre eux. Il est très utilisé pour plusieurs raisons: Du fait qu'il soit le résultat d'une seule simulation sous un ciel normalisé CIE 16 [Moon 1942] son temps de calcul est rapide et c'est un atout important qui fait qu'il est très apprécié par les ingénieurs. L'autre raison c'est qu'il est le seul à comparer, comme le fait naturellement notre œil, l'éclairage intérieur avec l'éclairage extérieur pour juger de la qualité de l'éclairage d'une pièce. Mis à part ces deux points, le FLJ possède de nombreuses limites. Cet indicateur oublie beaucoup de facteurs qui auront un impact prépondérant sur la qualité d'une conception. Le premier facteur non-pris en compte est l'orientation. Le modèle de ciel que nécessite le calcul du FLJ est uniforme, c'est à dire que pour une façade donnée quelque soit son orientation, elle recevra toujours la lumière à l'identique. Le deuxième facteur oublié est la localisation géographique. Le même bâtiment situé dans un climat méditerranéen très ensoleillé sera évalué de la même manière que s'il était localisé dans une région exposé à des conditions météo souvent pluvieuses comme en Grande-Bretagne. Le FLJ oublie également la prise en compte des niveaux trop élevés de lumière, en effet, le concepteur est poussé à agrandir au maximum les sources de lumière naturelle oubliant les problèmes d'éblouissement ou de surchauffe que cela pourrait entraîner.

Pour la deuxième famille, celle des indicateurs dynamiques, on compte parmi les plus connus la **DA** et l'**UDI**. Les avantages principaux des mesures dynamiques de la lumière du jour par rapport aux mesures statiques sont qu'elles considèrent les heures d'utilisation du bâtiment et les variations quotidiennes et saisonnières de la lumière dans sa forme et sa quantité. Pour ce type d'étude, la modélisation du ciel est primordiale car elle doit représenter le caractère irrégulier de l'ensoleillement selon la localisation. Les modèles se calquent donc sur des bases de données de mesures réelles. Aujourd'hui la majorité des logiciels de lumière naturelle sont capables de calculer le FLJ mais seulement quelques-uns permettent de procéder à des calculs dynamiques. Le fait que ces études dynamiques soient chronophages représente le plus gros frein à l'utilisation de cette méthode. C'est certainement une des raisons pour laquelle les études dynamiques ne sont pas fréquentes dans les études des maîtres d'œuvre et même parfois absentes des critères d'évaluation des certifications. Pour ordre d'idée, le calcul du DA pour un bâtiment rectangulaire le plus simple possible type « boîte à chaussure » demande environ 20 minutes avec un processeur courant [Reinhart 2006] contre 1 minute à peine pour une simulation statique avec les mêmes paramètres. Evidemment, le temps de calcul croît au fur et à mesure que la complexité et la taille du projet s'alourdissent. Malgré le fait que les calculs dynamiques soit beaucoup plus gourmands en temps, il demeure néanmoins que c'est un outil puissant pour l'analyse.

A noter que les indicateurs liés à l'éblouissement comme le DGP [Mardaljevic 1998] ne sont pas référencés ici. Il est encore aujourd'hui peu courant, malgré les recherches faites dans ce domaine [Wienold 2005], de prendre en compte ce phénomène car il dépend de nombreux facteurs difficiles à prévoir liés au comportement et à l'activité des occupants. L'éblouissement rentre tout de même en compte dans deux des indicateurs cités dans le tableau, l'UDI et le maxDA. Ces deux indicateurs donnent une limite d'éclairement à ne pas dépasser, limite à partir de laquelle l'éclairage est considéré inconfortable pour l'œil humain.

## LOGICIELS

---

Pour les utilisateurs, on a pu s'apercevoir qu'une grande intention était portée sur 3 points clés :

- **l'ergonomie,**
- **la rapidité,**
- **la qualité du rendu.**

Ces 3 points sont importants pour les ingénieurs et les architectes qui seraient amenés à étudier cette problématique de lumière naturelle. Certainement à cause d'un manque de connaissance dans le domaine de la simulation d'illumination globale, la fiabilité des données de sortie ne représente pas un aspect critique pour les concepteurs dans le choix d'un outil. Un point précis, qui touche à la fois à la rapidité et à l'ergonomie du logiciel, est la gestion des données géométrique du projet. La géométrie 3D étant une donnée d'entrée essentielle pour une étude de lumière, ce point préoccupe énormément les utilisateurs. [Panitz 2013]

Aux vues de tous ces logiciels, beaucoup fonctionnent de la même façon en proposant des données de sortie sous des formats très similaires et avec un temps de calcul quasi identique entre chaque logiciel. On peut également remarquer que rares sont ceux qui sont conçus dans une optique d'outils d'aide à la décision dans les premières phases de conception d'un projet, phases durant lesquels il est évidemment bien plus stratégique d'agir afin d'obtenir facilement un bon niveau de performance.

## DEUX METHODES: Radiosité et Lancer de Rayons

---

Maintenant, si l'on s'intéresse plus en détail aux méthodes de calcul qu'utilisent ces logiciels, on peut s'apercevoir qu'il n'y a pas une grande variété et qu'aux contraires ces logiciels fonctionnent dans l'ensemble de la même façon. Il existe deux approches: La méthode par **radiosité** et la méthode de **lancer de rayons**.

### Rappel du contexte

Depuis les années 70, le rendu d'objet 3D s'est énormément développé en parallèle et grâce au développement des technologies informatiques. L'aspect le plus délicat du rendu est lié à la lumière et c'est pourquoi le domaine de la simulation de la lumière a également connu une grande avancée. Pour les modéliser, des méthodes de résolution dites « locales » ont été développées:

- Flat shading, selon la loi de Lambert
- Gouraud shading, Henri Gouraud en 1971
- Phong shading, Bui Tuong Phong en 1973
- Texture mapping, Lambert en 1974
- Bump mapping, Jim Blinn en 1978

Et d'autres « globales » :

- La **radiosité**, [Modest 1982], [Cohen 1984]
- Le **lancer de rayons**, [Whitted 1979], [Arvo 1986]

Ces dernières nous intéressent tout particulièrement car elles permettent l'étude d'un environnement semblable à l'étude d'un bâtiment. Elles ont donc été adaptées par la suite pour les architectes et ingénieurs du bâtiment. Cela explique pourquoi certains logiciels sont spécialisés dans le domaine du rendu 3D en plus de permettre des analyse d'éclairage (exemple : 3DS Max Design).

## Lancer de rayons

Cette méthode était à l'origine développée pour la création d'images de synthèse. Le lancer de rayon se base le calcul des trajectoires d'un nombre important de rayons lumineux projetés dans une scène. Chaque rayon interagit avec les surfaces du volume étudié soit par réflexion ou par transmission. Il existe deux approches: le « lancer de rayons direct » (qui suit le rayon depuis la source lumineuse tel que pourrait le faire un rayon lumineux quelconque) et le « lancer de rayons inverse » ou « lancer de rayons visuel » (Le chemin est cette fois-ci parcouru à contre-sens : depuis l'œil de l'observateur vers la source lumineuse).

**Inconvénients:** La précision des résultats et le temps de calcul de cette méthode est étroitement liée au nombre de réflexions des rayons pris en compte dans les calculs. De ce fait, cette méthode est moins performante lorsque les sources lumineuses sont masquées ou lointaines en d'autres termes lorsque les rayons rentrent de nombreuses fois en contact avec les parois pour parvenir de la source lumineuse jusqu'au point en question. On pourrait imaginer le cas d'une fenêtre donnant sur un patio central étroit, ou ramener à une échelle plus grande, cette même fenêtre donnant sur un environnement urbain dense.

**Avantages:** Cette méthode prend en compte tous les types de surface (spéculaire, semi-spéculaire et diffus), les effets de réfraction, et elle ne nécessite pas de maillage. Elle est aussi très efficace pour les études d'ombrage ou d'ensoleillement direct, en effet, ceux sont des cas d'étude où le problème lié au nombre de réflexions n'existe pas.

Le moteur de calcul qui fait référence dans la communauté, RADIANCE, fait appel à cette méthode. Il s'agit d'une série d'algorithmes que la grande majorité des logiciels de calcul de lumière naturelle se sont appropriés. Quelques développeurs ont programmé leur propre moteur de calcul.

## Radiosité

Les méthodes de calcul de radiosité ont été à la base développées dans les années 1950 pour des applications dans le domaine de l'ingénierie pour les échanges thermiques. Elles ont ensuite été adaptées pour le rendu en infographie par des chercheurs de l'université de Cornell en 1984 [Cohen 1984]. C'est une méthode par éléments finis qui consiste à discrétiser par un maillage, plus ou moins grossier selon la précision souhaitée, toutes les surfaces du volume étudié. Basée sur la loi de la conservation d'énergie, un bilan du flux de rayonnement émis et reçu est effectué pour chaque facette. L'éclairement de chaque point du maillage est ensuite calculé en additionnant les flux lumineux reçus par toutes les surfaces environnantes et la lumière émise par la surface élémentaire.

**Inconvénients:** Cette méthode est pour l'instant majoritairement utilisée par les logiciels de lumière artificielle dans des scènes intérieures car le calcul devient de plus en plus conséquent à mesure que la géométrie de la scène se complexifie. L'essentiel de cette méthode repose sur le calcul des facteurs de vue, c'est à dire comment chaque facette est vue par les autres et voit les autres. Lorsque des facettes sont masquées l'une par rapport aux autres, ce calcul peut s'avérer lourd. Il existe certaines méthodes pour faciliter et accélérer ce calcul [Aguerre 2016]. Cette méthode impose aux parois de réfléchir la lumière de manière parfaitement diffuse. L'impossibilité de prendre en compte les réflexions spéculaires constitue sa limite la plus contraignante.

**Avantages:** Le principe de calcul est relativement « simple », (matrice à inverser) et nécessite donc une puissance de calcul plus raisonnable. Les résultats lors d'une simulation sont accessibles immédiatement et s'améliorent progressivement en précision. L'essentiel du calcul se fait indépendamment des sources de lumières. Cela représente un atout majeur pour les calculs dynamiques qui nécessitent de simuler la même scène dans de nombreux contextes lumineux.

On retrouve donc ici tous les logiciels destinés à l'éclairage artificiel. En effet, dans la chronologie du développement de ces logiciels, l'éclairage artificiel a été la priorité et l'éclairage naturel est venu dans un second temps. Cependant, à l'heure actuelle, les logiciels qui utilisaient cette méthode se rangent également vers les moteurs de calcul vus précédemment (RADIANCE). Malgré ses qualités, c'est une méthode qui a été mise à l'écart au dépend du lancer de rayons.

<b>Radiosité</b>	<b>Lancer de rayons</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les réflexions prises en compte sont uniquement des réflexions parfaitement diffuses.</li> <li>• Besoins en mémoire conséquent et calcul du facteur de vue conséquent dans certains cas (facettes cachées entre elles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous les types de réflexion sont pris en compte</li> <li>• Ne nécessite pas de maillage</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul simple demandant une puissance de calcul faible et indépendant des sources de lumière</li> <li>• Résultats d'un calcul disponible instantanément puis gagnent en précision progressivement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le nombre de réflexions maximale pris en compte est le paramètre qui aura le plus d'effet sur la précision des résultats mais c'est aussi lui qui a le plus d'impact sur le temps de calcul.</li> </ul>

## RESUME

- L'impact sur le plan du confort et de l'environnement d'une bonne conception en lumière naturelle semble suggérer que l'importance donnée par les certifications et normes à la prise en compte de cette problématique n'aura de cesse d'augmenter ces prochaines années.
- Une méthode d'analyse performante existe grâce à l'arrivée des calculs dynamiques annuels basés sur des mesures météorologiques réelles. Mais tant que son problème majeur lié au temps de calcul bien trop important ne sera pas résolu elle ne pourra devenir une habitude dans la façon de travailler des concepteurs.
- Pour les logiciels et les moteurs de calcul le constat est simple, la grande majorité des outils proposent les mêmes fonctionnalités à partir de la même approche de calcul: le lancer de rayons et dans 80% des cas ils utilisent le moteur de calcul RADIANCE mettant les autres algorithmes de calcul de côté.

## Deuxième Partie

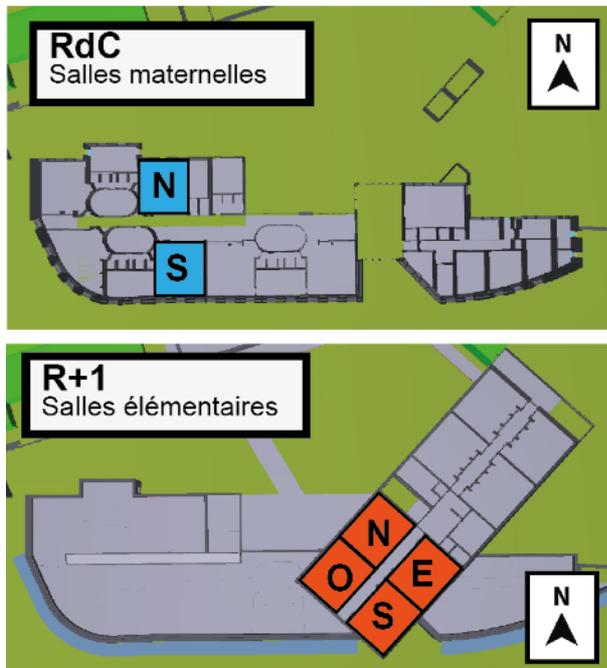
# Etude de cas: Conception d'une école



Dans cette partie, nous nous attardons sur les **méthodes d'analyse** évoquées avant. Le but étant de mettre en avant les arguments donnés en faveur des nouveaux indicateurs dynamiques et de cibler les limites auxquelles nous exposent notre façon actuelle de travailler. Pour cela je me suis appuyé sur une étude que j'ai effectué durant mon stage pour le compte d'une certification HQE. J'ai étudié une nouvelle fois le projet d'origine et les modifications apportées en utilisant cette fois-ci une méthode différente basée sur les calculs dynamiques.

### Présentation du projet

Mon intervention dans cette étude s'est déroulée en phase avant-projet. Avec l'aide et les conseils de Romain Perie, ingénieur à Nobatek INEF4, nous avons dû effectuer les simulations en lumière naturelle afin de valider la conception proposée par l'architecte. Le cheminement pour parvenir à la version finale s'est fait par tâtonnement: l'architecte nous envoie son modèle, nous donnons à l'architecte les modifications à apporter sur le projet selon les résultats obtenus avec les simulations, l'architecte nous renvoie un nouveau modèle et ainsi de suite jusqu'à parvenir à la conception finale. Pour diminuer la quantité des simulations, nous avons sélectionné stratégiquement des pièces "types" et d'autres qui nous paraissaient être les plus pénalisantes pour l'évaluation. Dans ce rapport, nous allons nous attarder sur l'étude de 6 salles de classe:



Ces salles de classe sont repérées sur les deux vues en plan à droite. Elles disposent chacune de surfaces possédant les caractéristiques suivantes:

**Coefficients de réflexion (100% diffus):**

Sol:	15%
Mur:	50%
Plafond:	70%

**Coefficients de transmission:**

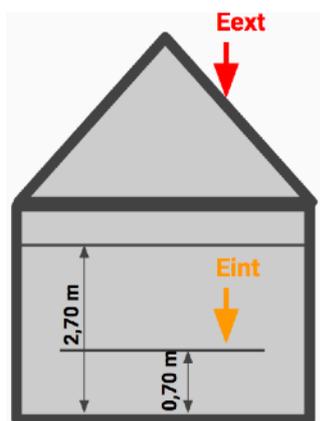
Vitrage:	70%
Casquette PV:	20%

## Méthode n°1: STATIQUE

Il s'agit de la méthode utilisée par les ingénieurs de Nobatek INEF4 et que j'ai utilisé pour la rédaction du rapport valant pour la certification HQE. Ce sont les résultats donnés par ces études qui ont été le motif de toutes les modifications du projet.

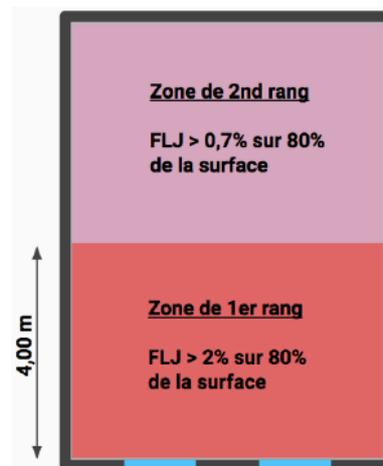
### CRITERES: HQE

Les critères d'évaluations étaient donc dictée par la cible 10 "confort visuel" de la certification HQE:



- $FLJ = E_{int} / E_{ext}$
- Zone de 1er rang:  $(2,70 - 0,70) \times 2 = 4,00 \text{ m}$

Le but dans notre cas était de parvenir à un niveaux de FLJ de 1,5% dans au moins 80% de la zone de premier rang et dans 80% des locaux (cible diminuée de 0,5% dans certaines situations, ici la diminution est dû à la zone géographique).



### OUTIL DE CALCUL

Pour le calcul du FLJ, j'ai utilisé le logiciel Archiwizard (développé en France). Il s'agit du logiciel que les ingénieurs de Nobatek utilisent pour toutes leurs études en lumière naturelle.

## Méthode n°2: DYNAMIQUE

Cette méthode que je présente ici n'est pas basée sur des critères établis par une certification. Elle servira uniquement à cibler des anomalies ou des atouts de la conception que la première méthode n'a pas su révéler.

### CRITERES

L'indicateur pour cette méthode est l'UDI (Useful Daylight Illuminance ou lumière du jour utile) [Nabil 2005]. Cet indicateur dynamique utilise un fichier de données météo type (ici fichier météo .epw de Bordeaux fournie par EnergyPlus). Grâce à ce fichier, heure par heure et durant toute une année, un ciel est modélisé à partir des données de localisation et de l'irradiance diffuse et directe selon le modèle de Perez [Perez 1993]. Le but étant de mesurer sur chaque point étudié l'éclairement reçu durant les heures d'occupation. Le pourcentage suivant est calculé point par point:

$$UDI = \text{Heures d'occupation avec un éclairement satisfaisant les critères} / \text{Heures totales d'occupation}$$

Les critères sont composée de deux limites d'éclairement: une minimum et une maximum, l'UDI est alors composé de trois parties:

- *UDI entre 100 et 2000 lux*: donne des informations sur la localisation et sur la quantité pour laquelle la zone étudié reçoit un éclairement satisfaisant compris entre 100 et 2000 lux.
- *UDI<sub>< 100 lux</sub>*, renseigne sur la localisation et sur la quantité pour laquelle la zone étudiée ne reçoit pas un éclairement supérieur à 100 lux, limite minimum à partir de laquelle l'éclairement est déclaré comme insuffisant pour l'utilisation de l'espace. Plus cet portion est petite, meilleur est l'éclairement reçu dans la zone.
- *UDI<sub>> 2000 lux</sub>*, sera lui, à l'inverse de l'UDI<sub>< 100</sub>, la limite maximale. Là aussi, le but est de minimiser ce chiffre. Cette limite est censée définir la valeur à partir de laquelle la quantité de lumière peut devenir inconfortable pour l'oeil humain et également devenir une source de rayonnement trop important qui occasionnerait un inconfort en été.

Les valeurs de ces deux limites sont souvent discutées par les spécialistes. Chacun a la possibilité de modifier ces valeurs, par exemple certains décident d'augmenter la limite minimale afin de se rapprocher des critères classiques d'éclairement sur les plans de travail donnés par les textes normatifs, d'autres discutent aussi de la valeur de la limite maximale. J'ai choisi de mettre de côté cette problématique et de garder les valeurs d'origine données par Nabil et Mardaljevic. Nous considérerons ici qu'un UDI moyen de 65% est considéré comme satisfaisant.

### OUTIL DE CALCUL

J'ai effectué ces simulations directement depuis le moteur de calcul dynamique DAYSIM [Reinhart 2001] lui même basé sur RADIANCE [Ward 1998]. Les méthodes de calcul de ces deux moteurs sont expliquées dans la dernière partie du point technique.

## Salles de classe Maternelles

On commence par l'étude des deux salles de classe maternelle au rez-de-chaussée, les deux sont identiques dans leur taille, fonction et configuration. Cependant, l'une reçoit la lumière exclusivement depuis le Nord et l'autre depuis le Sud. Cette différence majeure a poussé l'architecte à opter pour la mise en place d'une casquette au-dessus des ouvertures des salles de classe Sud afin de palier aux problèmes d'inconfort liés à la surchauffe que peut rencontrer une pièce orientée ainsi. Voici ci-dessous un premier bilan des résultats donnés par les deux méthodes sur la configuration d'origine.

### PROJET D'ORIGINE

cartes d'éclairage:

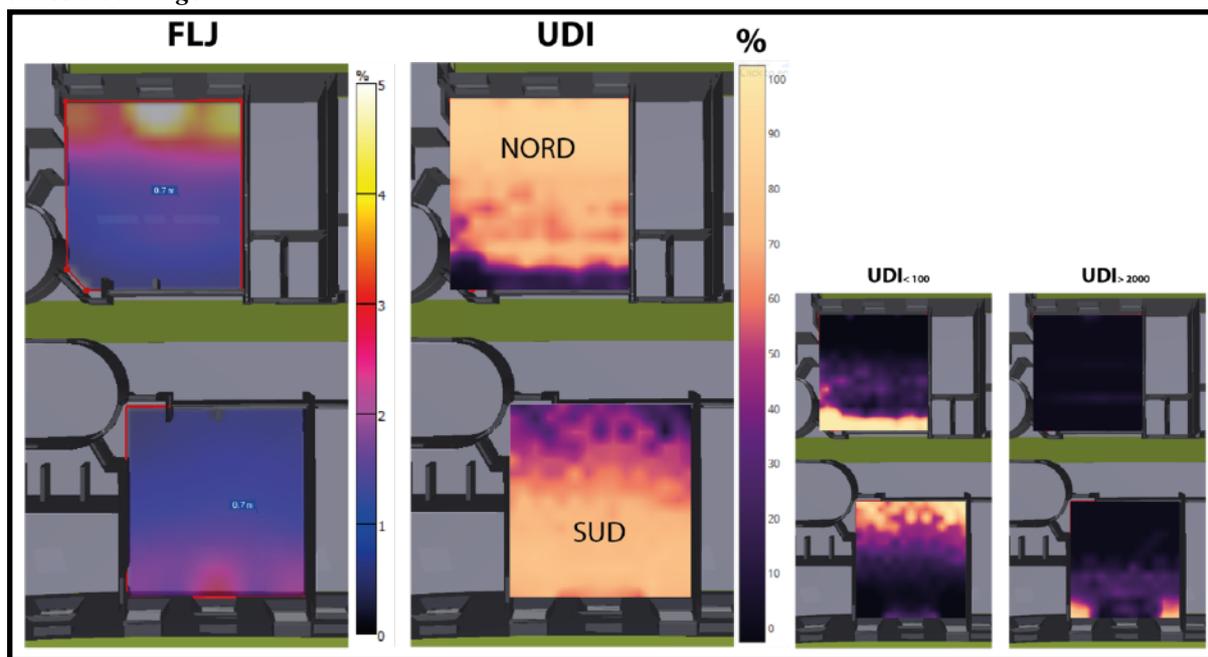


tableau des résultats:

	critères méthode 1		critères méthode 2	
<b>Salle Nord</b>	<b>FLJ</b>	<b>81%</b>	<b>UDI:</b>	<b>64 %</b>
			UDI < 100:	35 %
			UDI > 2000:	1 %
<b>Salle Sud</b>	<b>FLJ</b>	<b>58%</b>	<b>UDI:</b>	<b>60 %</b>
			UDI < 100:	38 %
			UDI > 2000:	2 %

Au vue de ces résultats, on peut tout d'abord dire que l'écart entre les deux configurations pour la seconde méthode est bien plus petit que celui donné par la première méthode.

**Écart entre Nord et Sud selon l'UDI: 4%**

**Écart entre Nord et Sud selon le FLJ: 23%.**

Cette différence de 23% obtenu avec la première méthode entre les deux salles n'est pas le résultat de l'orientation du bâtiment car le calcul du FLJ n'en tient pas compte de part le modèle de ciel uniforme qu'il utilise [Moon 1942]. Cette différence est uniquement due à la présence de la casquette au-dessus des ouvertures

de la salle de classe Sud. Si l'on s'en tenait uniquement au FLJ, la réduction de la taille de la casquette permettrait de parvenir aux objectifs sans qu'aucun indice nous permette de se rendre compte des problèmes que cela causerait. Cette différence est beaucoup plus faible en regardant les résultats donnés par les calculs d'UDI (différence entre Sud et Nord: 4%). Certes, la présence de la casquette limite l'accès à la lumière comme nous le fait remarquer la différence en FLJ mais avec l'exposition Sud, la lumière reçue est souvent bien plus puissante d'où une différence entre les deux salles plus petite avec l'UDI. Toujours grâce à la seconde méthode, on peut également déduire que la casquette joue parfaitement son rôle de protection dans la salle de classe Sud en limitant la valeur de l'UDI<sub>>2000</sub> à 2% tout en conservant une valeur d'UDI similaire à la salle de classe Nord. Avec cette orientation, cette valeur aurait pu être bien plus importante sans cette protection. Selon la seconde méthode, avec dans chaque salle une valeur d'UDI à 60% environ, aucune modification n'est à envisager, contrairement aux critères de la première méthode qui préconise des modifications dans la salle de classe Sud.

Méthode 1	Méthode 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>Grosse différence entre les deux salles de classe: 23% en FLJ</li> <li>Seule la salle maternelle Nord est validée</li> <li>Maternelle Sud nécessite des modifications: casquette, ouvertures...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Différence mineure entre les deux salles: 4% en UDI</li> <li>Efficacité de la casquette validée: UDI<sub>&gt;2000</sub> = 2%</li> <li>Il ne manque que 5% à la salle Sud pour être conforme</li> </ul>

## PROJET MODIFIE

Les modifications envisagées et testées avec l'architecte ont été nombreuses pour ce cas-là: Diminution de l'épaisseur du mur extérieur, amélioration des coefficients de réflexion pour les parois intérieures (sol et plafond) ... Au final, comme dans l'immense majorité des cas lorsque l'on se fie au FLJ, ce sont uniquement les dimensions des ouvertures qui ont été augmentées: de 1,45l x 1,45h à 1,50l x 1,70h.

### tableau des résultats:

	critères méthode 1			critères méthode 2		
Salle Nord	FLJ	81%	89%	UDI:	64%	67%
				UDI <sub>&lt;100</sub> :	35%	30%
				UDI <sub>&gt;2000</sub> :	4%	4%
Salle Sud	FLJ	58%	80%	UDI:	60%	60%
				UDI <sub>&lt;100</sub> :	38%	31%
				UDI <sub>&gt;2000</sub> :	2%	9%

Selon la méthode 1

Origine	→ Modifications	→ Résultats
FLJ 81% UDI 64%		FLJ +8% UDI +3%
FLJ 58% UDI 60%		FLJ +22% UDI +0%

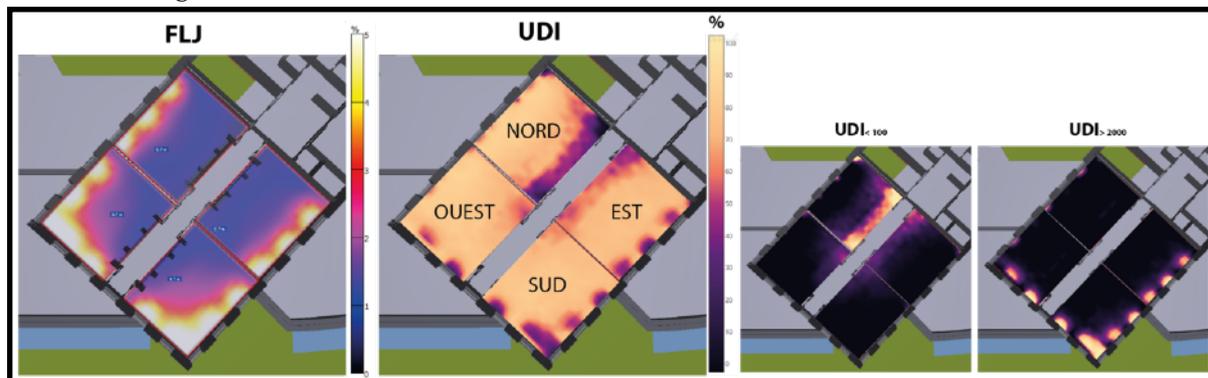
Après modification, le FLJ est validé dans les deux salles avec un gain de 22% pour la salle Sud permettant de satisfaire les critères de la méthode 1 dans les deux salles.

En revanche, dans la salle Sud, on n'observe aucune progression dans les résultats du calcul de l'UDI. L'agrandissement des ouvertures a eu pour conséquence une augmentation nette de l'UDI<sub>>2000</sub>, indiquant que la salle dans sa nouvelle configuration est exposée de manière plus importante à des rayonnements pouvant causer l'inconfort visuel et thermique des occupants.

# Salles de classe Élémentaires

## PROJET D'ORIGINE

### cartes d'éclairage:



### tableau des résultats:

	critères méthode 1	critères méthode 2
Salle Nord	<b>FLJ: 70%</b>	<b>UDI: 64%</b> UDI< 100: 35% UDI> 2000: 1%
Salle Est	<b>FLJ: 70%</b>	<b>UDI: 70%</b> UDI< 100: 24% UDI> 2000: 6%
Salle Sud	<b>FLJ: 81%</b>	<b>UDI: 69%</b> UDI< 100: 19% UDI> 2000: 12%
Salle Ouest	<b>FLJ: 81%</b>	<b>UDI: 75%</b> UDI< 100: 19% UDI> 2000: 6%

Avec la méthode 1, on obtient les mêmes résultats entre les salles Est et Nord et entre les salles Sud et Ouest. Cependant, ces couples de salles reçoivent la lumière depuis des orientations très différentes, mais avec le calcul du FLJ, aucune différence ne ressort. En se basant sur ces résultats, la solution pour parvenir à atteindre la cible est simple: Augmenter la dimension de chaque ouverture.

Avec la méthode 2, les résultats donnés par le calcul de l'UDI sont différents pour chaque salle et font donc ressortir l'influence de l'orientation. Voici le classement en partant de la salle obtenant le meilleur score d'UDI jusqu'à la plus mauvaise:

1. *Salle Ouest*: Elle reçoit la lumière depuis 2 faces: Sud-Ouest et Nord-Ouest, cela en fait la salle la mieux éclairée avec un UDI de 75%
2. *Salle Est*: C'est la deuxième salle la mieux notée avec un UDI de 70% alors qu'elle ne possède qu'une seule façade d'ouverture.

3. *Salle Sud*: Comme la salle Ouest, elle possède deux façades avec des ouvertures Sud-Ouest et Sud-Est et pourtant elle n'est que la troisième mieux éclairée avec un UDI de 69% derrière la salle Est qui possède une seule façade d'ouverture. En s'intéressant aux indicateurs UDI<sub>> 2000</sub> et UDI<sub>< 100</sub> on comprend facilement à quoi est dû la différence avec les salles Ouest et Est. En effet, l'UDI<sub>< 100</sub> est identique pour la salle Ouest (19%) et même meilleur que celui de la salle Est (24%), la différence se joue alors sur l'UDI<sub>< 2000</sub> qui lui est plus élevé pour la salle Sud (UDI<sub>< 2000</sub> Sud = 12% et UDI<sub>< 2000</sub> Ouest et Est = 6%). Une information est alors donnée au concepteur sur le potentiel d'inconfort que peut représenter cette trop forte exposition au Soleil.
4. *Salle Nord*: Avec un UDI de 64 %, c'est la salle la moins bien notée, cela s'explique par le fait qu'elle possède ses ouvertures sur une seule face exposée Nord-Ouest. Son point faible, à l'inverse de la salle Sud, est le manque de lumière dans la zone la plus éloignée des ouvertures. Cet inconvénient dans la configuration est mis en valeur par l'UDI<sub>< 100</sub>  
Avec des valeurs d'UDI<sub>> 2000</sub> déjà élevées dans les trois salles exposées au Sud (Salle Ouest, Sud et Est)

il semble incohérent selon cette méthode d'agrandir les ouvertures de ce côté là. Cependant, pour la façade exposée au Nord-Est, l'agrandissement des fenêtres est justifié pour permettre de diminuer la valeur d'UDI<sub>< 100</sub> dans la salle Nord.

## PROJET MODIFIE

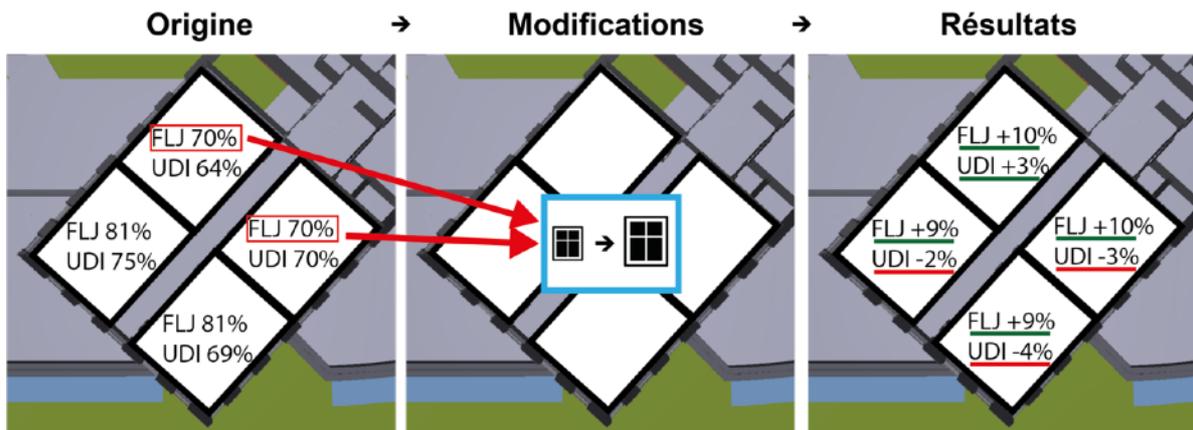
Avec un retard de 10% en FLJ dans les salles Nord et Est, la décision choisie, une fois de plus, a été d'agrandir les dimensions de toutes les ouvertures pour chaque façade passant de 1,40l x 1,40h à 1,40l x 1,60h

	critères méthode 1		critères méthode 2	
Salle Nord	<b>FLJ:</b>	<del>70%</del> <b>82%</b>	<b>UDI:</b> 64%	<b>67%</b>
			UDI <sub>&lt; 100</sub> :	35% 31%
			UDI <sub>&gt; 2000</sub> :	1% 2%
Salle Est	<b>FLJ:</b>	70% <b>82%</b>	<b>UDI:</b> 70%	<b>67%</b>
			UDI <sub>&lt; 100</sub> :	24% 20%
			UDI <sub>&gt; 2000</sub> :	6% 13%
Salle Sud	<b>FLJ:</b>	81% <b>90%</b>	<b>UDI:</b> 69%	<b>65%</b>
			UDI <sub>&lt; 100</sub> :	19% 14%
			UDI <sub>&gt; 2000</sub> :	12% 21%
Salle Ouest	<b>FLJ:</b>	81% <b>90%</b>	<b>UDI:</b> 75%	<b>73%</b>
			UDI <sub>&lt; 100</sub> :	19% 15%
			UDI <sub>&gt; 2000</sub> :	6% 12%

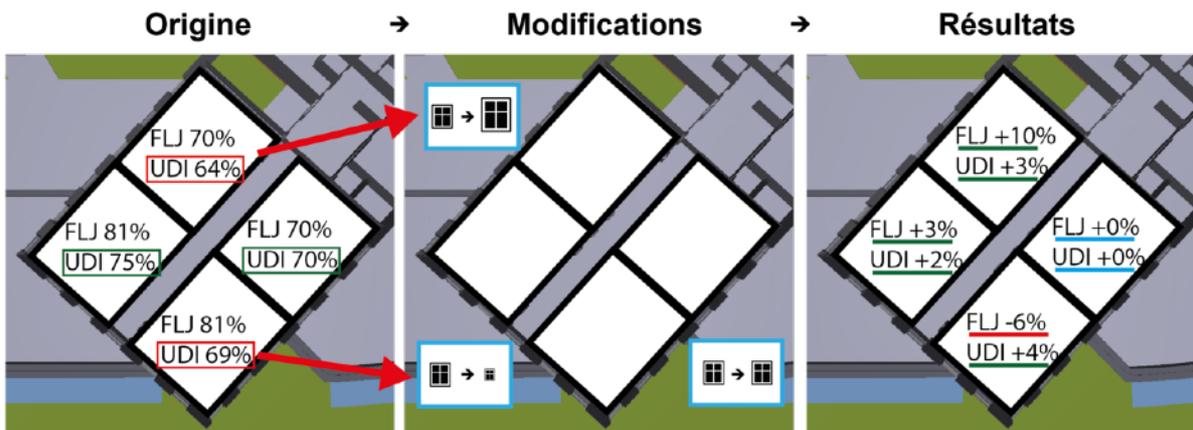
Comme attendu, l'agrandissement des ouvertures a permis aux salles Nord et Est d'atteindre les 80% et a également permis d'obtenir dans toutes les salles un meilleur FLJ. Le bilan des modifications du point de vue de cette méthode est entièrement positif.

Or, si l'on regarde les résultats obtenus avec la méthode 2, une seule salle voit son UDI gonfler, c'est la salle Nord avec un UDI qui passe de 64% à 67%. Sinon toutes les autres salles perçoivent un UDI inférieur à celui de la configuration d'origine (UDI Ouest: - 2%, UDI Est: - 1%, UDI Sud: - 4%) Malgré une baisse de l'UDI<sub>< 100</sub>, l'UDI<sub>< 2000</sub> lui a eu une augmentation plus importante. C'est d'ailleurs ce que laissait sous entendre le score en UDI<sub>< 2000</sub> déjà important pour les salles exposées au Sud lors des premières simulations. Si l'on s'en tient à cette méthode, les modifications apportées par la méthode 1 au projet sont plus que discutables.

Selon la méthode 1



Selon la méthode 2



## RESUME

L'inconvénient majeur du FLJ, qui pousse les concepteurs à donner à leur projet **la plus grande surface vitrée possible** sans tenir compte des conséquences néfastes que cela apporte, est plusieurs fois mis en avant dans cette partie. "Le FLJ est calculé dans le cas le plus défavorable, alors si sa valeur est bonne, l'éclairage dans toute autre condition le sera également" est un argument souvent utilisé pour défendre l'utilisation du FLJ. Certes le ciel CIE 16 [Moon 1942] modélise un ciel offrant de mauvaises conditions d'éclairage, mais il ne représente qu'une partie des conditions que peuvent être produites par le ciel durant une année et même au cours d'une journée. Ne pas tenir compte de la position du Soleil, de l'orientation et des données météo propres à la localisation ne permet pas d'identifier certains points négatifs et positifs d'une conception comme le font les indicateurs dynamiques. Dans l'annexe 1, on peut voir la variation des résultats d'UDI obtenus pour les 4 salles de classe élémentaires dans 3 villes possédant des localisations et des climats différents. Pour le cas des salles maternelles, l'efficacité de la casquette n'a pas pu être dévoilée par le FLJ contrairement à l'UDI. Pareil pour les risques d'inconfort liés aux trop grandes quantités de lumière dans les salles de classe élémentaires exposées au Sud. Depuis les années 2000 de nombreuses recherches et études ont été faites afin de prouver l'utilité des calculs dynamiques [Reinhart 2006] [Mardaljevic 2009]. Même si la certification HQE n'utilise que le FLJ pour l'instant, certaines certifications ont commencé à intégrer ces méthodes de calcul comme le BREEAM avec le DA, et le LEED avec le sDA et l'ASE. Tout laisse alors penser que cette philosophie de calcul tendra à devenir de plus en plus courante ces prochaines années.

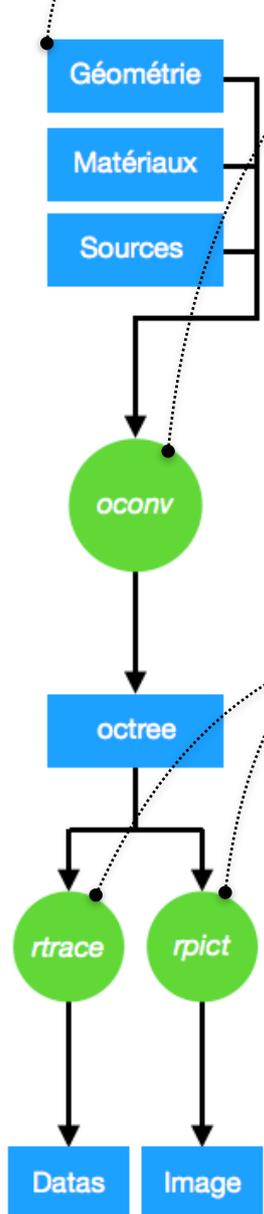
# Troisième Partie

## Analyse de RADIANCE et DAYSIM

### RADIANCE

RADIANCE [Ward 1998] est un groupe de programmes écrits sous format UNIX qui a pour but d'aider les architectes, designers et ingénieurs à prévoir les niveaux d'éclairage et à donner un aperçu réaliste d'un espace avant sa réalisation.

La partie principale de RADIANCE qui présente un intérêt majeur pour les utilisateurs, est le moteur de simulation d'éclairage qui calcule les niveaux de lumière et permet de faire des rendus d'image. Les données d'entrée requises pour ces simulations sont: une description de la géométrie 3D de la scène étudiée, une description des propriétés des matériaux pour chacune des surfaces, une description d'une ou des sources de lumière et les coordonnées des points de mesure. Le rendu d'une image *rpict* nécessite des spécifications supplémentaires définissant les coordonnées du point de vue, la direction et les angles souhaités.



Une fois que la scène a été décrite, elle est compilée dans un "octree". Cet "octree" permet d'organiser les données de manière efficace afin de faciliter et d'accélérer le processus de lancer de rayons. Sans l'utilisation d'octree ou d'autre méthode similaire, les calculs nécessiteraient beaucoup plus de temps.

Le moteur de simulation d'éclairage de RADIANCE utilise une approche hybride Monte Carlo / déterministe de lancer de rayons qui permet d'obtenir un résultat suffisamment précis dans un délai raisonnable. La méthode utilisée trace les rayons depuis un point de mesure *rtrace* (ou un point de vue *rpict*) et suit ces rayons jusqu'aux sources lumineuses, aussi appelé "backward raytracing". Le calcul est divisé en trois parties principales: la composante directe, la composante indirecte spéculaire et la composante indirecte diffuse. [Ward 1988a]

- **La composante directe** est la lumière arrivant directement depuis une source lumineuse ou depuis d'autres surfaces émettant des réflexions parfaitement spéculaires (Lois de Snell-Descartes). Chaque émetteur est trié en fonction de sa contribution potentielle sur l'éclairage du point de mesure afin de minimiser le nombre de rayons requis pour le test de visibilité. Les transferts spéculaires à partir des grandes surfaces planes sont gérés efficacement par l'utilisation de sources lumineuses "virtuelles", qui guident le calcul direct vers les sources d'origine.

- **La composante indirecte spéculaire** consiste en une lumière qui arrive sur une surface depuis d'autres surfaces (et non depuis la source) et qui est réfléchi ou transmise de manière directionnelle (Lois de Snell-Descartes). Les transferts parfaitement spéculaires sont gérés par la simple redirection du rayon dans la direction réfléchi ou transmise appropriée. Lorsque la surface présente une composante de rugosité, la réflexion est modélisé avec un échantillonnage Monte Carlo, alors le rayon réfléchi n'est pas une unique droite mais plusieurs droites contenues dans un cône.

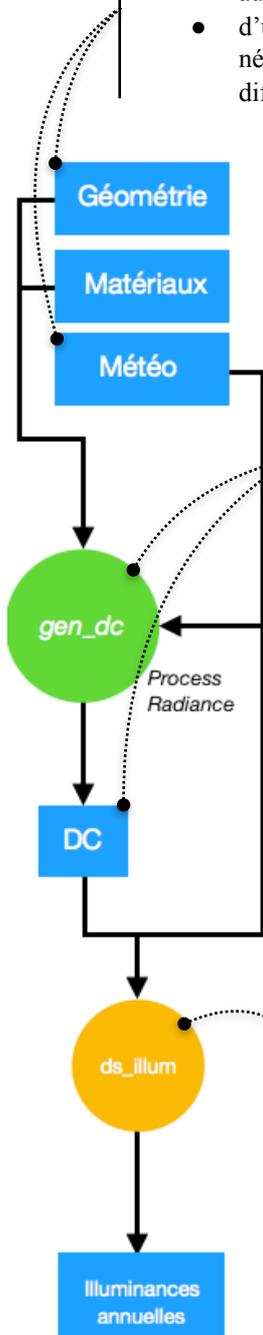
- **La composante indirecte diffuse** [Ward 1988b] consiste en une lumière qui arrive sur une surface et qui est réfléchi ou transmise sans préférence directionnelle (modèle Lambertien). La nature de cette composante exige que des centaines de directions soient examinées afin que l'estimation Monte Carlo donne des résultats d'une précision raisonnable. Heureusement, la composante indirecte diffuse change lentement sur une même surface, donc quelques valeurs soigneusement calculées à des intervalles correctement espacés peuvent être interpolées sur des points intermédiaires en gardant un résultat final de qualité. Cette méthode est basé sur la même hypothèse que la méthode de radiosité mais elle possède moins de restriction sur les données d'entrée que cette dernière: Surface 100% diffuse et maillage précis de la scène 3D.

## DAYSIM

DAYSIM [Reinhart 2001] est une des adaptations les plus connues du programme RADIANCE. DAYSIM est aussi un ensemble de petits programmes mais contrairement à RADIANCE, il n'est pas destiné à simuler une unique configuration d'éclairage. En effet, tout repose sur la philosophie des calculs dynamiques basées sur des données météo annuelles heure par heure et sur la théorie des "Daylight Coefficients" inventée par Tregenza [Tregenza 1983]. De multiples typologies de ciel se succèdent au cours d'une année et également au cours d'une journée. Pour tenir compte de ce phénomène, le programme doit procéder à une multitude de modélisations et de calculs. Voici le cheminement d'une simulation:

Les données d'entrée sont composées:

- d'une description de la scène comprenant géométrie et matériaux et des points de mesure identiques aux données d'entrée de RADIANCE mais sans source lumineuse.
- d'un fichier météo au format .epw comportant la localisation et les données annuelles d'irradiance nécessaire aux calculs. C'est ce fichier qui remplace la source lumineuse. Les modélisations des différents ciels seront basées sur ces données.



Premièrement, toutes les données, à l'exception des données d'irradiance du fichier météo d'entrée sont envoyées vers le sous-programme *gen\_dc*. Son travail est divisé en deux parties:

- **Diffuse Daylight Coefficients:** Cette partie sert à mesurer l'influence des rayons provenant du ciel et du sol. Cela consiste à la modélisation d'une source de lumière uniforme en une sphère complète divisée en 145 éléments pour l'hémisphère supérieur représentant le ciel, selon le modèle de Tregenza [Tregenza 1987], et en 3 autres éléments circulaires pour l'hémisphère inférieur représentant le sol.

- **Direct Daylight Coefficients:** Cette autre partie sert à mesurer l'influence des rayons provenant directement du Soleil. Le programme modélise environ 60 sources de lumière représentant les possibles positions du Soleil pendant une année entière selon la latitude du projet contenue dans le fichier météo.

Les simulations sont effectuées de la même façon qu'une simulation RADIANCE: Compilation des données en octree puis processus de lancer de rayons. DAYSIM utilise une version modifiée du sous-programme *rtrace* de Radiance: *rtrace\_dc*. Ce sous-programme est identique dans la méthodologie et dans les théories de calcul, sa seule différence se trouve dans le format des données de sortie. Au lieu de renseigner des valeurs d'éclairement comme le fait *rtrace*, il renvoie 145+3+60 "Daylight Coefficients" pour chaque point de mesure. Pour un point de mesure donné, le DC d'un élément de ciel, de sol ou de Soleil représente l'influence de ce dernier sur l'éclairement du point de mesure concerné.

Les données d'irradiance du fichier météo et le fichier contenant les DC sont envoyés vers le sous-programme *ds\_illum*. Le programme *ds\_illum* procède de la manière suivante:

- Pour chaque heure de l'année, il modélise le ciel et le Soleil à partir des données d'irradiance diffuse horizontale et d'irradiance directe verticale correspondant à l'heure en question selon le modèle « All-weather » de Perez [Perez 1993].

- La modélisation du ciel et du Soleil ainsi que les DC sont alors combinés pour obtenir l'éclairement en chaque point de mesure pour l'heure étudié.

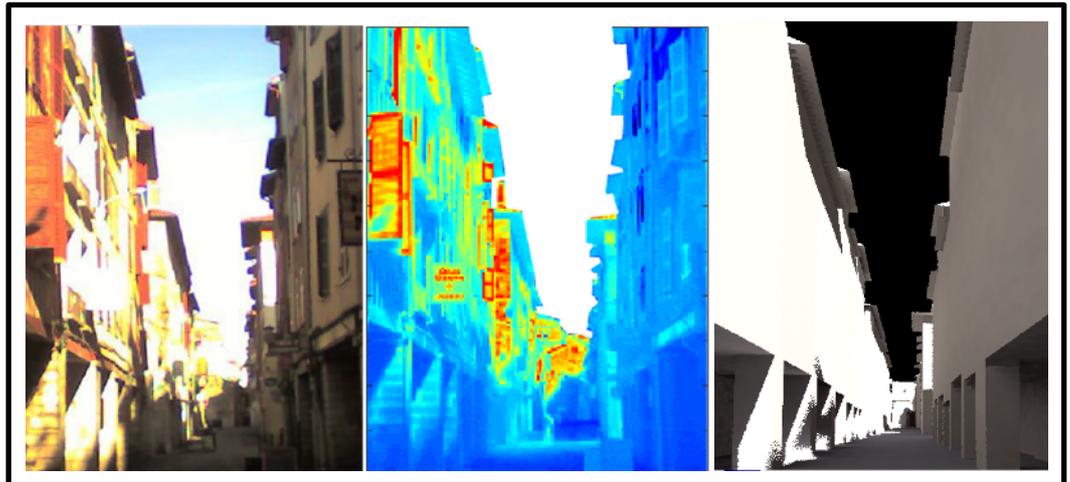
Ce processus est donc effectué pour chaque heure où la lumière est présente, ce qui représente environ un peu plus de 4000 modélisations de ciel. Le fichier de sortie contient l'éclairement reçu heure par heure et point par point, et un post-traitement de ces données est effectué pour obtenir des valeurs d'indicateur dynamique tel que l'UDI.



## Rendus RADIANCE dans Bayonne

A gauche, une série de simulation de rendus RADIANCE de la rue des Tonneliers. Le modèle 3D provient des travaux d'Elena Garcia. Le sous-programme *gensky* de RADIANCE a permis de produire des modélisations précises du ciel. La date, l'heure et la latitude sont prises en compte par *gensky*. Ici, elles correspondent à un ciel ensoleillé de 23 avril à Bayonne. Les heures référencées sont les heures solaires.

En dessous, une photographie, une image thermographique et un rendu RADIANCE de la rue des Tonneliers prises à la même date et à la même heure. [Beckers 2017]



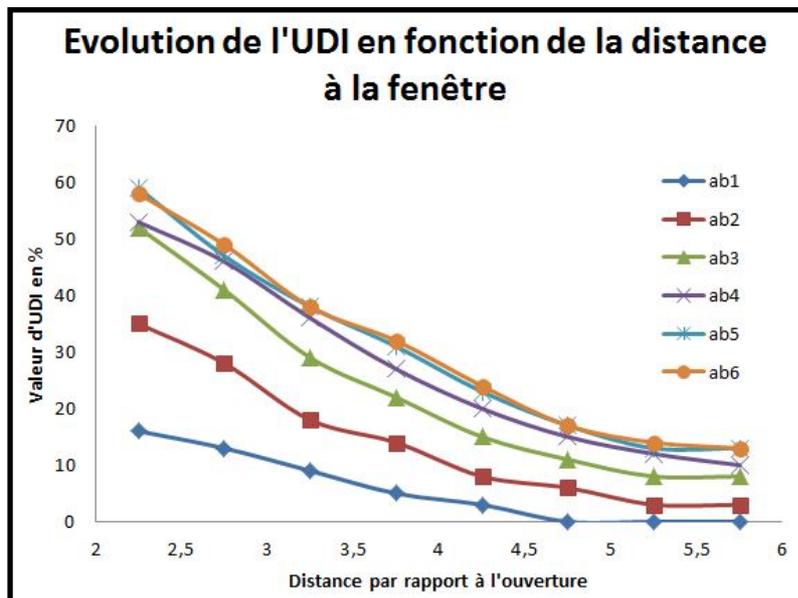
De gauche à droite: photographie, image thermographique, et rendu RADIANCE de la rue des Tonneliers de Bayonne un 23 avril par ciel dégagé. [Beckers 2017]

## Le paramètre *-ab*

Un des paramètres le plus important de la fonction *rtrace* de RADIANCE est le paramètre *-ab*, (pour Ambient Bounces). Il détermine le nombre de réflexions à partir duquel les rayons arrêtent de se propager dans la scène. 5 est la valeur la plus couramment utilisée par les logiciels qui utilisent le moteur de calcul RADIANCE. Rares sont les ingénieurs et architectes qui ont des connaissances suffisantes en simulation de lumière pour pouvoir prendre la décision de changer les paramètres lorsqu'il y en a besoin et les logiciels offrent rarement cette possibilité. Son influence sur les résultats dans différents cas de figure est présentée ici. Pour cela, j'ai repris le modèle de la rue de Bayonne et y ai incorporé le modèle du bureaux de Nabil et Mardaljevic [Nabil 2005] (boite de 6m L x 3m l x 2,8m h, ouverture sur un petit côté avec une allège de 70cm). La rue est dirigée par un axe Est-Ouest, avec par conséquent, une façade orientée vers le Nord et l'autre vers le Sud. Le bureau lui est situé environ à mi-hauteur des bâtiments de la rue (6m de haut) côté Sud. Toutes les parois du modèles possèdent des caractéristiques de réflexion 100% diffuse comme dans l'immense majorité des études.

<b>Coefficients de réflexion (100% diffus)</b>			
<b>intérieur:</b>		<b>extérieur:</b>	
Sol:	20%	Sol:	20%
Mur:	50%	Mur:	30%
Plafond:	70%		
<b>Coefficients de transmission:</b>			
Vitrage:	70%		

Le premier graphique présente l'évolution des valeurs d'UDI dans l'axe de la pièce en fonction de la valeur donnée au paramètre -ab. On perçoit que dans cette configuration les valeurs d'UDI ne commencent à se stabiliser qu'à partir de la valeur 6.

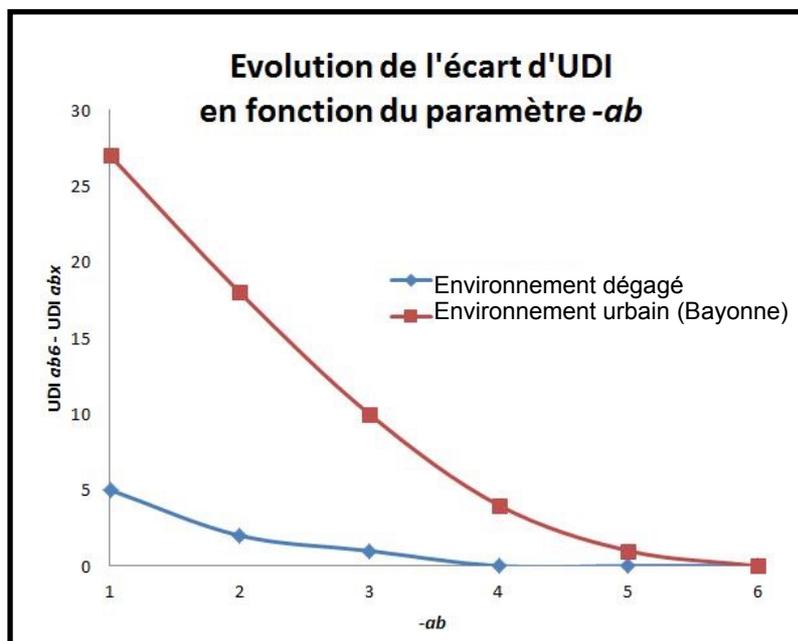


Les résultats ci-contre proviennent de simulations RADIANCE dans un bureaux avec une ouverture orientée Nord dans un environnement urbain (rue des Tonneliers à Bayonne)

**Paramètres RADIANCE:**

- ad 1000
- as 20
- ar 300
- aa 0.1
- lr 6
- st 0.15
- sj 1
- lw 0.004
- dj 0.0
- ds 0.2
- dr 2
- dp 512

Une autre configuration a été modélisée dans un environnement dégagé (c'est à dire ne comprenant aucun bâtiment extérieur) avec la même orientation et les mêmes caractéristiques. Différentes valeurs pour le paramètre -ab ont aussi été testées. Pour le deuxième graphique, nous nous intéressons à un seul point de mesure situé à 3.75m de l'ouverture. Les deux courbes correspondent à l'évolution de la différence absolue de l'UDI calculée entre -ab 6 et la valeur en abscisse pour les deux configurations. Pour la configuration possédant un environnement extérieur vide, la valeur d'UDI se stabilise dès la valeur -ab 3. Dans le contexte urbain défini dans l'autre configuration, la différence de valeur d'UDI pour la valeur -ab 3 est encore de 10. Comme observé dans le premier tableau, ce n'est qu'à partir de la valeur -ab 6 que la différence se stabilise. Ce paramètre -ab agit uniquement dans la partie « Indirecte Diffuse » expliquée plus haut dans la présentation de RADIANCE. Les surfaces constituant l'intérieur et l'extérieur des bâtiments sont en grande majorité composées de surface réfléchissant la lumière de façon diffuse, cette partie et ce paramètre représentent donc les éléments clés dans le processus de simulations. De ce fait, c'est aussi le paramètre qui a le plus d'impact sur le temps de calcul. Cependant dans des environnements urbains denses comme celui de la rue des Tonneliers, on s'aperçoit que les valeurs standards peuvent parfois être insuffisantes.



2 configurations différentes ici: un environnement dégagé et un environnement urbain. On s'intéresse partir de quelle valeur du paramètre -ab il y a stabilisation de la valeur d'UDI dans les deux configurations.

**Paramètres RADIANCE:**

- ad 1000
- as 20
- ar 300
- aa 0.1
- lr 6
- st 0.15
- sj 1
- lw 0.004
- dj 0.0
- ds 0.2
- dr 2
- dp 512

# Bilan

---

Durant ces 5 derniers mois, les conditions de travail idéales dont je disposai à Nobatek INEF4 m'auront permis d'accomplir mes objectifs de stage:

- Acquérir une expérience dans la conception des projets avec les équipes du pôle IAUD afin de cerner les besoins et problèmes rencontrés par les équipes de conception.
- Développer mes connaissances en simulation de la lumière naturelle pour rédiger l'état de l'art et afin de me préparer efficacement à mes prochaines années de travail.
- Utiliser le moteur de calcul référence RADIANCE pour m'initier et comprendre la méthode de simulation la plus utilisée et reconnue.

Mes travaux m'ont permis de comprendre l'intérêt porté à la lumière naturelle et à connaître les moyens pour concevoir les bâtiments en fonction de celle-ci. La prise en compte de la lumière naturelle n'est pas un phénomène nouveau. Elle a depuis toujours fait partie des problématiques auxquels les architectes étaient confrontés. En revanche, l'importance qu'on lui donne connaît depuis les années 1990 / 2000 une croissance majeure. Les raisons de cette évolution sont doubles: exploiter au maximum le potentiel d'économie d'énergie et améliorer confort et santé des occupants. Avec les avancées en informatique et en mesure météo, des nouvelles méthodes dynamiques basées sur des mesures réelles sont apparues ces dernières années. L'exemple comparatif entre une méthode statique et une méthode dynamique présentée dans ce rapport met en évidence les approximations faites par les méthodes actuelles d'analyse basées sur le FLJ et les atouts que possèdent les nouvelles méthodes. Les premiers et principaux acteurs de ces changements sont les certifications environnementales qui incorporent dans leurs critères des nouveaux indicateurs dynamiques. Les développeurs sont donc poussés à modifier leurs algorithmes afin de s'adapter à cette nouvelle demande. Ces algorithmes sont en grande majorité basés sur la même approche de calcul: le lancer de rayon. Cependant dans certains cas, le lancer de rayons révèle quelques unes de ses limites. Par exemple, lorsque les simulations se déroulent dans des environnements urbains denses, il est souvent nécessaire d'avoir recours à une augmentation des paramètres standards de calcul afin de conserver la précision souhaitée augmentant alors significativement les temps de calcul. Même si d'autres approches de calcul ont été mises de côté, des avancées scientifiques en infographie ont été faites depuis et elles peuvent aujourd'hui être une alternative performante et adaptée. La méthode de radiativité en est le parfait exemple comme en témoigne l'article de Ian Ashdown [Ashdown 2017] qui compare les performances d'un nouveau logiciel LICASO (radiativité) avec celles de DAYSIM (lancer de rayons). Adapter et améliorer la méthode de radiativité sera ma thématique principale de travail et de recherche pour ces prochaines années au sein de la chaire Architecture et Physique Urbaine.

# Glossaire

---

<b>BREEAM</b>	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
<b>CRT</b>	Centre de Ressources Technologiques
<b>DA</b>	Daylight Autonomy
<b>DC</b>	Daylight Coefficient
<b>FLJ</b>	Facteur de Lumière Jour
<b>HQE</b>	Haute Qualité Environnementale
<b>ITE</b>	Institut pour la Transition Energétique
<b>LEED</b>	Leadership in Energy and Environmental Design
<b>UDI</b>	Useful Daylight Illuminance

# Table des Annexes

---

Annexe 1: Influence de la localisation et des données météo pour l'UDI

# Références Bibliographiques

---

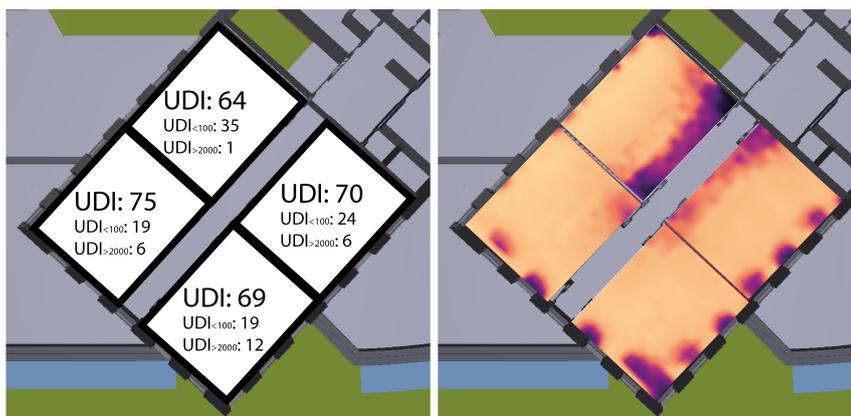
- [ADEME 2012] *Energie et climat*. ADEME édition 2012  
<http://multimedia.ademe.fr/catalogues/chiffres-cles-energie-climat-2012/data/catalogue.pdf>
- [Aguerre 2016] J. AGUERRE, E. FERNANDEZ, G. BESUIEVSKY, B. BECKERS, *Sparse Matrix Solution for Computing Urban Radiation Exchange*, First International Conference on Urban Physics, B. Beckers, T. Pico, S. Jimenez (Eds), Quito – Galápagos, Ecuador (2016)
- [Arvo 1986] ARVO J., *Backward Ray Tracing*. Apollo Computer, Inc (1986)
- [Ashdown 2017] ASHDOWN I., JACKSON C., SPAHN J., SAEMISCH T., *LICASO and DAYSIM* (2017)  
<http://agi32.com/blog/2017/02/11/licaso-and-daysim/>
- [Beckers 2008] BECKERS B., *Optimization of daylight in architectural and urban projects*, B. Beckers & P. Beckers, 2nd International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, ASMDO, September 2-5, Gijón, Spain. (2008)
- [Beckers 2017] BECKERS B., AGUERRE J., BESUIEVSKY G., FERNANDEZ E., GARCIA NEVADO E., LABORDERIE C., NAHON R. *Visualizing the infrared response of an urban canyon throughout a sunny day*. Med Green Forum (2017)
- [Cohen 1984] COHEN F., GREENBERG D., IMMEL D., BROCK P. An Efficient Radiosity Approach for Realistic Image Synthesis. Cornell University (1984)
- [Edwards 2002] EDWARDS L., TORCELLINI P. *A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants* Technical Report, National Renewable Energy Laboratory (2002)
- [IES 2013] ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. *Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE) (2013)*
- [Mardaljevic 2009] MARDALJEVIC J., HESCHONG L., LEE E. *Daylight metrics and energy savings*. Lighting Research and Technology, 41(3):261–283, (2009)
- [Modest 1982] MODEST M. *A General Model for the Calculation of Daylighting in Interior Spaces*, Energy and Buildings, Vol. 5 (1982)
- [Moon 1942] MOON P., SPENCER D. *Illumination from a non-uniform sky*. Illum. Eng. (N.Y.) 37:707-726. (1942)
- [Nabil 2005] NABIL A., MARDALJEVIC J. *Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings*. Lighting Research & Technology, 37(1) 41-59 (2005)
- [Panitz 2013] PANITZ K., GARCIA-HANSEN V. *Daylighting Design and Simulation: Ease of use analysis of digital tools for architects* (2013)
- [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)
- [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)
- [Tregenza 1983] TREGENZA P., WATERS I.M. *Daylight coefficients*. Lighting Research and Technology 15 (2) pages 65–71 (1983).
- [Tregenza 1987] TREGENZA P., *Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements*, *Lighting Research and Technology* Lighting Research and Technology 19 pages 13-14 (1987)
- [Waldram 1909] WALDRAM P.J. *A Standard of Daylight Illumination of Interiors*. Illum. Eng. 2:469 (1909)
- [Ward 1988a] WARD G. J., RUBINSTEIN F. M., *A new technique for computer simulation of illuminated spaces*. Journal of the Illuminating Engineering Society (1988)
- [Ward 1988b] WARD G. J., RUBINSTEIN F. M., CLEAR R. D. *A ray tracing solution for diffuse interreflection*. Computer Graphics, Vol. 2 n°4, (1988)
- [Ward 1998] WARD G. J., SHAKESPEARE R. *Rendering with RADIANCE. The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufmann, Los Altos CA (1998)
- [Whitted 1979] WHITTED T. *An Improved Illumination Model For Shaded Display*. Bell Laboratories (1979)

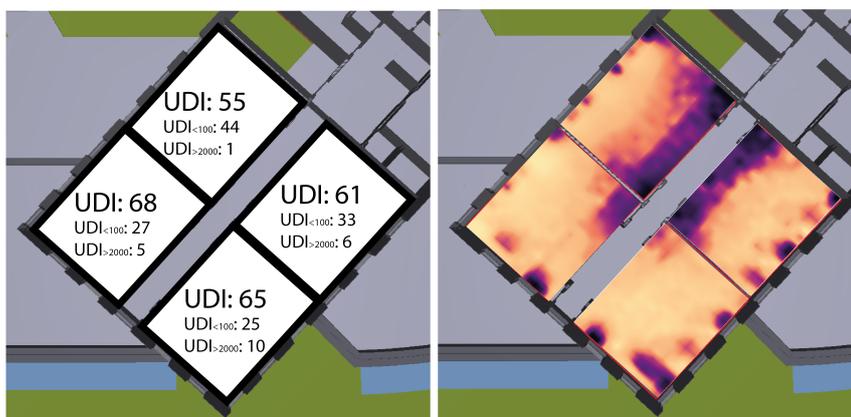
## ANNEXE 1 : Influence de la localisation et des données météo pour l'UDI

Dans ce document sont présentés les résultats d'UDI obtenus dans les salles de classe élémentaires de l'école de Boulazac lors de simulation DAYSIM dans plusieurs lieux. Trois villes avec des latitudes et des climats différents ont été choisies: Stockholm, Bordeaux, Bangkok. Voici les valeurs obtenues ville par ville:

### Bordeaux Latitude: 44°50'25" N



### Stockholm Latitude: 59°19'57" N



### Bangkok Latitude: 13°45'14" N

