



**PROGRAMME LA CREATION :
PROCESSUS, ACTEURS, OBJETS,
CONTEXTES**

Tâche 2.1



**DOCUMENT REMIS LE
23 SEPTEMBRE 2011**

Optimisation de l'énergie solaire par approches bio-mimétiques et simulations dynamiques

Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie



Mémoire de recherche

Mathieu LAMOUR

2010 / 2011

Responsables : Gilles DUCHANOIS, Jean-Claude BIGNON

Laboratoire :

MAP-CRAI
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
www.crai.archi.fr
2, rue Bastien-Lepage
BP 40435
54001 Nancy Cedex

Auteur:

Mathieu LAMOUR
lamour.mathieu@gmail.com

Résumé

Cette recherche porte sur l'optimisation du rayonnement solaire, comme source de lumière naturelle et de chaleur passive, dès les premières phases de conception architecturale. Le travail de conception de l'enveloppe et de ses composants permet d'importantes économies constructives d'énergie, dans un secteur du bâtiment très énergivore. Mais les apports naturels sont également sources d'éblouissement et de surchauffe. Il est alors indispensable de pouvoir jauger différents paramètres, à la fois antagonistes et complémentaires, afin d'aboutir à un bon compromis entre énergie(s) et confort, sur une période de temps annuelle. Des outils informatiques performants permettent de modéliser de manière de plus en plus fine et réaliste les phénomènes physiques en jeu et leurs interactions mutuelles. La relation entre les nombreux paramètres et les multiples objectifs n'étant pas linéaire, les solutions classiques ne peuvent pas être appliquées. Les approches évolutionnaires peuvent contribuer à répondre à ce problème complexe.

Nous étudions le couplage entre EnergyPlus et GenOpt, l'expérimentons sur différents modèles, puis proposons un utilitaire facilitant la visualisation des résultats. Les séquences de simulation montrent que la combinaison de paramètres distincts mène à une diversité de solutions, performantes du point de vue énergétique. Aussi, il est possible d'introduire les questions énergétiques dès l'esquisse, avec une précision des calculs et une variété de possibles, et d'intégrer cette problématique bien avant les stades de validation d'un projet.

Mots-clefs : énergie solaire, lumière naturelle, EnergyPlus, simulation thermique dynamique, GenOpt, optimisation, approche évolutionnaire

Abstract

This research focuses on the optimization of solar radiation optimization, as a daylighting and thermal source, that could be integrated in the early stages of a project. The design of the envelope and its components can lead to significant energy savings in an energy-intensive field. But solar radiations can also generate glare and overheating. Thus, it's essential to be able to measure various parameters, both antagonistic and complementary, in order to achieve a good compromise between energy use and comfort, over an annual time period. Computer tools now allow more detailed and realistic modelisation of the physical phenomenas, and their mutual interactions. The relationship between several parameters and multi-objective functions are non-linear, so that classical solutions can not be applied. Evolution-based approaches can help address this kind of complex problems.

We study the coupling of EnergyPlus and GenOpt, then experiment different models with, and then propose a tool for solutions visualization. The sequences of simulations show that the combination of multi- parameters lead to a variety of solutions, energy-efficient. Therefore, energy issues can be thought earlier in an architectural project, with accuracy and a diversity of options.

Keywords : solar energy, daylight, EnergyPlus, dynamic thermal simulation, GenOpt, optimization, evolution-based approach

Remerciements

Cette recherche n'aurait pas eu la même saveur sans l'enthousiasme, l'appui et les qualités multiples de Gilles DUCHANOIS et Jean-Claude BIGNON. A travers eux c'est aussi évidemment l'ensemble du personnel du CRAI, particulièrement son ancien et son nouveau directeur, Jean-Pierre PERRIN et Gilles HALIN, que je remercie chaleureusement pour l'accueil et l'état esprit.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du MAP-ARIA et du CODISANT avec lesquels les échanges ont été riches d'intérêt et d'enseignement.

Enfin, sans les nommer pour ne faire ni de jaloux, ni de jalouses, je tiens à saluer les doctorant-e-s et stagiaires avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à passer ces derniers mois.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Résumé | 3 |
| Abstract | 3 |
| Avant propos..... | 8 |
| 1. Enjeux et état de l'art | 10 |
| 1.1 Problématiques, éléments de contexte(s) et approches | 10 |
| 1.1.1. Contexte énergétique..... | 10 |
| 1.1.2. Le Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie | 15 |
| 1.2 Rayonnement solaire : éléments de physique pour la lumière et la thermique – Etat de l'art des outils de simulation..... | 18 |
| 1.2.1. Spectre solaire | 18 |
| 1.2.2. Eclairage naturel (soleil et voûte céleste) | 19 |
| 1.2.3. Simulations numériques pour la lumière naturelle..... | 24 |
| 1.2.4. Energie et bâtiments | 27 |
| 1.2.5. Outils pour la simulation thermique dynamique | 33 |
| 1.3 Méthodes d'optimisation | 39 |
| 1.3.1. Les approches évolutionnaires (AE) | 40 |
| 1.3.2. AE : tendances contemporaines et apports dans le champ architectural | 43 |
| 1.3.3. Le théorème du « No Free Lunch » | 50 |
| 1.3.4. Panorama des outils d'optimisation énergétique pour le bâtiment..... | 50 |
| 2. Chaleur et lumière : de la modélisation des phénomènes physiques à leur optimisation..... | 52 |
| 2.1. Energie et lumière : EnergyPlus..... | 52 |
| 2.1.1. Présentation générale du logiciel..... | 52 |
| 2.1.2. EnergyPlus : modélisation et méthodes de calcul..... | 54 |
| 2.1.3. <i>Input et output</i> | 68 |
| 2.2. Processus d'optimisation : GenOpt | 71 |
| 2.2.1. Présentation générale du logiciel | 71 |
| 2.2.2. Fonctionnement de GenOpt : couplage AE/logiciel de STD | 77 |
| 2.2.3. Sorties : structure et exploitation..... | 84 |
| 2.3. Couplage et validation de l'environnement logiciel..... | 86 |
| 2.3.1. Interactions entre les différents programmes : chaîne de modélisation..... | 86 |
| 2.3.2. Test comparatif thermique : EnergyPlus vs. Pléiades-Comfie..... | 86 |
| 2.3.3. Un modèle optimisé : taille du vitrage Sud et orientation | 92 |

| | |
|--|------------|
| 3. Expérimentations | 94 |
| 3.1. Méthodologie et invariants des modèles..... | 94 |
| 3.1.1. Méthodologie | 94 |
| 3.1.2. Invariants | 95 |
| 3.1.3. Objectif mesuré (performance)..... | 97 |
| 3.2. Série de tests 1 : dimensions des baies et des protections solaires | 98 |
| 3.2.1. Variante 1 : variation dimensionnelles des baies..... | 98 |
| 3.2.2. Variante 2 : dimensionnement des protections solaires | 102 |
| 3.3. Série de tests 2 : orientation et gabarit..... | 106 |
| 3.3.1. Variante 1 : variation de l'orientation | 106 |
| 3.3.2. Variante 2 : variation du gabarit..... | 109 |
| 3.4. Combinaison de 4 types de variables : exemple de Nancy | 113 |
| 3.4.1. Vue générale des résultats | 113 |
| 3.4.2. Visualisation de quelques résultats..... | 116 |
| 3.5. Série de tests 3 : impact des caractéristiques des matériaux | 119 |
| 3.5.1. Présentation de l'expérimentation – éléments techniques..... | 119 |
| 3.5.2. Résultats : synthèse..... | 121 |
| 3.5.3. Vue globale des consommations..... | 121 |
| 3.5.4. Isolation et masse par face : exemple sur Nancy | 122 |
| 3.5.5. Conclusions pour Nancy | 126 |
| 3.5.6. Conclusions générales sur l'expérimentation sur les matériaux opaques | 126 |
| 3.6. Influence de la position des baies | 127 |
| 1. Présentation du modèle..... | 127 |
| Conclusions | 131 |
| Limites et améliorations de l'outil..... | 131 |
| Enseignements et perspectives..... | 132 |
| Améliorations et perspectives pour Ec-Co-Gen | 132 |
| 4. Annexes | 134 |
| 4.1. Série de tests 1 : dimensions des baies et des protections solaires | 134 |
| 4.1.1. Variante 1 : variation dimensionnelles des baies..... | 134 |
| 4.1.2. Variante 2 : dimensionnement des protections solaires | 142 |
| 4.2. Série de tests 2 : orientation et gabarit..... | 150 |
| 4.2.1. Variante 1 : variation de l'orientation | 150 |
| 4.2.2. Variante 2 : variation du gabarit..... | 158 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.3. | Combinaison de 4 types de variables : exemple de Nancy | 167 |
| 4.3.1. | Vue générale des résultats | 167 |
| 4.3.2. | Visualisation de quelques résultats..... | 170 |
| 4.4. | Série de tests 3 : impact des caractéristiques des matériaux | 172 |
| 4.4.1. | Présentation de l'expérimentation – éléments techniques..... | 172 |
| 4.4.2. | Résultats : synthèse..... | 174 |
| 4.4.3. | Vue globale des consommations..... | 176 |
| 4.4.4. | Isolation et masse par face : exemple sur Nancy | 179 |
| 4.4.5. | Conclusions pour Nancy | 183 |
| 4.4.6. | Conclusions générales sur l'expérimentation sur les matériaux opaques..... | 183 |
| 4.5. | Influence de la position des baies | 184 |
| 1. | Présentation du modèle | 184 |
| 2. | Expérimentations pour Brest | 186 |
| 3. | Expérimentations pour Montpellier..... | 187 |
| 4. | Expérimentations pour Nancy..... | 188 |
| 5. | Visualisation | 189 |
| 5. | Bibliographie | 190 |
| a. | Lumière et thermique | 190 |
| b. | Approches évolutionnaires | 194 |
| c. | Quelques sources Internet utilisées..... | 198 |
| | Table des illustrations | 199 |

Avant propos

« Lions de pierre accouplés dos à dos, dans l'antique Egypte. L'un tourné vers l'Occident, l'autre vers l'Orient, comme pour marquer les bornes de l'écoulement du jour. Hier, demain ; le levant, le couchant. Un rythme immuable ponctue la randonnée du Soleil. Le lion d'Orient et le lion d'Occident en sont les gardiens impénétrables et radieux, symboles du rajeunissement journalier de l'astre solaire, dans la civilisation égyptienne. Mais depuis...

Sa ronde aurait-elle fini par lasser ? On oubliait le soleil, peu à peu. Il revient aujourd'hui, par la petite porte. Il s'est introduit dans le contingent des énergies « nouvelles » comme pour masquer qu'il est connu depuis que le monde est monde. Re-source d'énergie, il resurgit après deux millénaires d'une éclipse énigmatique. »

Pierre Audibert, Les énergies du Soleil, 1978

Le projet Ec-Co-Gen cherche à caractériser les mécanismes de la créativité dans une situation d'assistance générative, à travers laquelle l'outil numérique révèle une part d'autonomie et intègre des contraintes environnementales. Plus précisément, l'enjeu est de concilier et d'appuyer mécanismes créatifs et performances énergétiques, ces dernières étant principalement constituées des gains solaires thermiques, de l'éclairage naturel et des protections qui s'y rapportent.

Le point de vue créatif suggère de caractériser :

- L'antagonisme entre une pensée explicite et une pensée implicite
- L'importance d'une indétermination signifiante
- Le concept de « trans-forme » (Marin, 2010)

La présente recherche a vocation à orienter le choix d'un environnement logiciel pour Ec-Co-Gen, servant de base au futur outil qui sera testé par des élèves architectes. Il se divise en trois composantes, que l'on cherchera à coupler :

- Un modeleur 3D
- Un moteur de calcul environnemental
- Une approche évolutionnaire (AE) formalisée

Les AE sont communément employées dans le champ architectural pour développer la dimension créative et/ou des approches d'optimisation. Les logiciels de simulations dynamiques (thermique et lumière) les plus fiables et puissants à l'heure actuelle sont notamment TRNSYS, EnergyPlus et ESP-r. Ils sont généralement utilisés à des fins de validation par le calcul d'un projet déjà abouti, et interviennent donc en dernier maillon de la chaîne. Pour autant, il est possible d'utiliser ces outils et de les combiner à une AE dans une logique adaptée aux étapes initiales de la conception architecturale. De fait, cela permettrait de faire bénéficier la dimension créative de la performance de calcul de ces moteurs de simulation.

Dans le cadre de cette recherche, nous expérimentons le couplage d'EnergyPlus avec un algorithme mémétique constitué d'un algorithme d'optimisation par essaim de particules hybridé à un algorithme de « recherche locale » (Hooke and Jeeves). Ce couplage est assuré par l'interface GenOpt (Wetter, 1998).

Par ailleurs, nous avons recours à Google Sketchup 8 et au plugin OpenStudioForSketchup pour ce qui concerne la modélisation initiale et la visualisation (finale) d'une population de solutions. Pour cet ultime aspect, un utilitaire (CRAI, 2011) a été développé en Visual Basic, afin de regrouper en un fichier unique un ensemble de solutions présélectionnées, importé dans Sketchup.

En dépit de manques ponctuels d'interfaces de paramétrage (actuellement), cet environnement logiciel constitue une piste intéressante pour Ec-Co-Gen, en tant qu'il assure des résultats réalistes et relativement précis, tout en suscitant la dimension créative recherchée.

Après un état de l'art portant sur les phénomènes physiques à modéliser et les méthodes évolutionnaires les plus adaptées à notre problématique, nous proposons un environnement logiciel répondant aux questions posées, en décrivons le fonctionnement général et détaillé, puis l'expérimentons et évaluons sa pertinence au regard du projet Ec-Co-Gen.

1. Enjeux et état de l'art

1.1 Problématiques, éléments de contexte(s) et approches

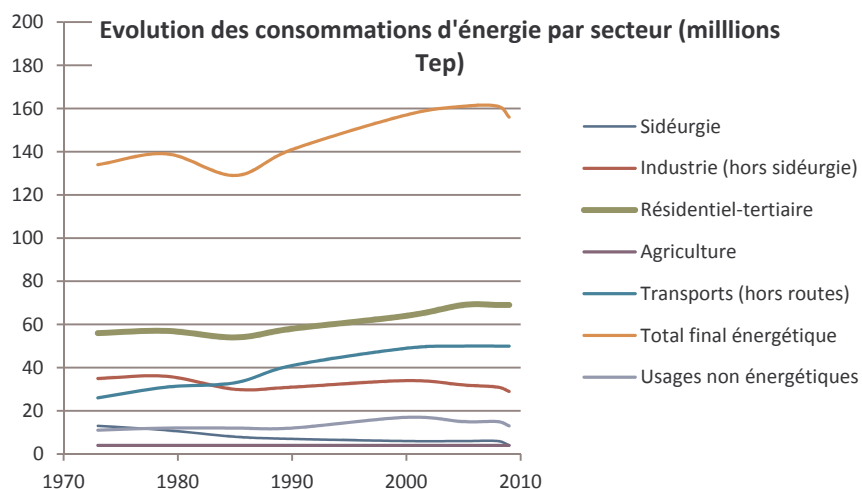
Notre recherche porte sur l'optimisation du rayonnement solaire, comme source de lumière naturelle et de chaleur passive, dès les premières phases de conception architecturale. Le travail de conception de l'enveloppe et de ses composants permet d'importantes économies d'énergie. Les apports naturels sont également sources d'éblouissement et de surchauffe. Il est donc indispensable de pouvoir jauger différents paramètres, à la fois antagonistes et complémentaires, afin d'aboutir à un bon compromis entre énergie(s) et confort, sur une période de temps annuelle.

Après un retour sur les théories physiques qui s'appliquent à cette problématique, nous comparons puis sélectionnons un outil informatique performant permettant de modéliser de manière fine et réaliste les phénomènes physiques en jeu. La relation entre les nombreux paramètres et les multiples objectifs n'étant pas linéaire, les solutions classiques d'optimisation ne peuvent pas être appliquées. Nous nous appuyons sur les approches évolutionnaires, méthodes permettant de répondre à ce problème complexe. Enfin, nous étudions le couplage entre EnergyPlus et GenOpt, l'expérimentons sur différents modèles, puis proposons un utilitaire facilitant la visualisation de certains résultats.

1.1.1. Contexte énergétique

1. Consommations d'énergie et gaz à effet de serre en France

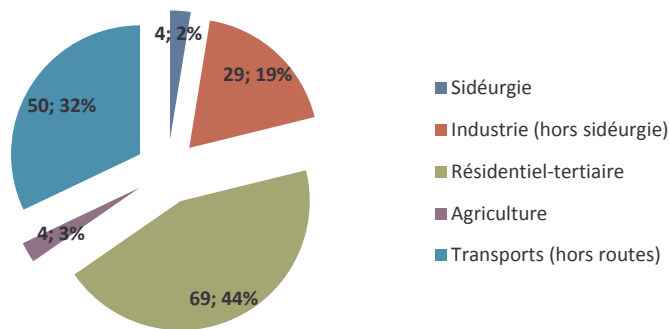
L'évolution des dépenses énergétiques hexagonales ces 20 dernières années est la suivante (en Tep = tonnes équivalent-pétrole) :



Graphique 1 : évolution des consommations énergétiques (France, 2009)

En 2009 (chiffres 2010), la répartition est la suivante :

**Consommations d'énergie par secteur - France, 2009
(millions Tep)**

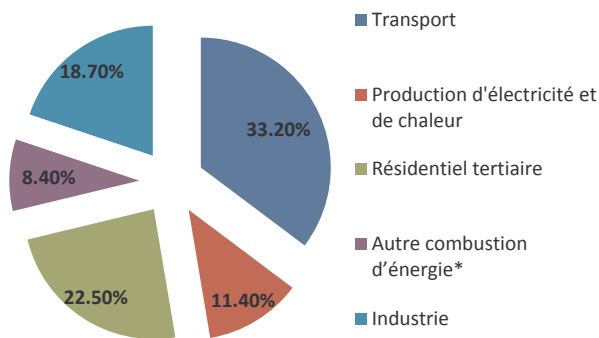


Graphique 2 : Consommations énergétiques par secteur (France, 2009)

Le secteur du bâtiment, avec 69 Mtep, représente 44% des consommations annuelles d'énergie. Les sources d'énergie y sont principalement le gaz et l'électricité, la part du pétrole diminuant régulièrement, celle des EnR progressant. (Commissariat Général au Développement Durable, 2010)

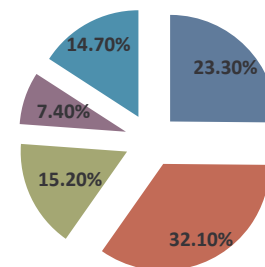
Cette utilisation d'énergie génère des émissions de gaz à effet de serre (GES). La combustion d'énergie constitue la source principale d'émission de CO₂ (93 % en Europe et 94 % en France). En France, le secteur le plus émetteur est celui des transports (33 %), tandis que celui de la production d'électricité et de chaleur contribue dans une moindre mesure aux émissions de GES (11 %), en raison de l'importance de la production nucléaire. En France (DOM inclus), on compte 391 Mt CO₂ hors UTCF (utilisation des terres, leur changement et la forêt), et 4 089 Mt CO₂ hors UTCF dans l'UE, qui se répartissent par secteur comme suit :

émissions de CO₂ (France, 2008)



Graphique 3 : Emissions de CO₂ en Europe

émissions de CO₂ dans l'UE en 2008



Graphique 4 : Emissions de CO₂ en France

*Autres industries de l'énergie (raffinage de pétrole, transformation de combustibles minéraux solides et autres), émissions fugitives et combustion d'énergie du secteur agriculture/sylviculture/pêche.

2. Energie et bâtiment

En France, le secteur du bâtiment, de l'extraction des matières premières à la fin de vie de l'ouvrage, est le plus gros consommateur d'énergie, et le deuxième contributeur en émissions de GES, après les transports et l'industrie.

Comme le rappelle Oïkos, les logements nouveaux construits chaque année représentent 1% du parc, avec 300.000 à 400.000 constructions annuelles. Mais 64% du parc de logements a été construit avant 1975. En 2008, le niveau moyen de consommation dans les logements neufs avoisine 110 kWh/m²/an et celui de l'existant 250 kWh/m²/an. Ces simples chiffres montrent le « gisement » d'économies d'énergie potentiel, dans le neuf et en rénovation.

L'ADEME le rappelle : « 28,35 milliards d'€, la facture énergétique s'envole » ; « La consommation d'énergie du patrimoine communal représente une charge de 36,2 €/hab en 2005 » ...

Qu'il s'agisse de précarité énergétique ou de confort, de poids dans les balances économiques ou de conséquences environnementales, la problématique de l'énergie dans le bâtiment est vaste dans ses implications et dans ses imbrications. Elle ne peut raisonnablement faire l'objet d'un simple traitement secondaire dans les projets de construction, qu'ils soient résidentiels ou tertiaires.

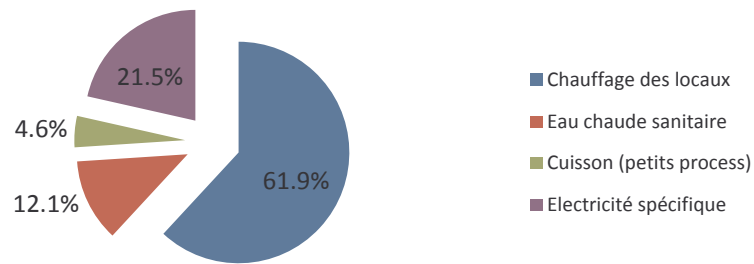
Regardons dans le détail les consommations de fonctionnement dans le résidentiel et le tertiaire (Salomon, Cahiers Global Chance, 2010) synthétise les données des consommations d'énergie finale (données 2008) des principaux usages électriques et thermiques dans le résidentiel et le tertiaire :

| Energie finale (Mtep) | Résidentiel | | | Tertiaire | | | Bâtiment |
|---|-------------|-------------|-----------------|--------------|-----------|---------------|-----------------|
| | Electricité | Chaleur | Tot_résidentiel | Electricité | Chaleur | Tot_tertiaire | TOTAL par usage |
| Chauffage des locaux | 3.4 | 26.4 | 29.8 | 1.9 | 7.8 | 9.7 | 39.5 |
| Eau chaude sanitaire | 1.6 | 2.5 | 4.1 | 0.4 | 3.2 | 3.6 | 7.7 |
| Cuisson (petits process) | 0.9 | 1.5 | 2.4 | 0.52 | | 0.52 | 2.92 |
| Total des applications substituables | 5.9 | 30.4 | 36.3 | 2.82 | 11 | 13.82 | 50.12 |
| <i>Electricité spécifique</i> | <i>6.4</i> | | <i>6.4</i> | <i>7.3</i> | | <i>7.3</i> | 13.7 |
| TOTAL par source | 12.3 | 30.4 | 42.7 | 10.12 | 11 | 21.12 | 63.82 |

Le détail pour l'électricité spécifique est le suivant :

| Electricité spécifique (Mtep) | Résidentiel | Tertiaire | TOTAL par usage |
|---|-------------|------------|-----------------|
| Froid | 1.35 | | 1.4 |
| Eclairage privé et public | 1.14 | 2.2 | 3.3 |
| Lavage | 1.28 | | 1.3 |
| Climatisation | 0.04 | 0.95 | 1.0 |
| Autres (audiovisuel, bureautique, outillage...) | 2.56 | 2.2 | 4.8 |
| Artisanat | | 1.95 | 2.0 |
| Total | 6.4 | 7.3 | 13.7 |

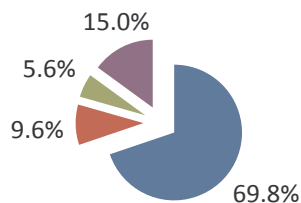
Energie dans le bâtiment (2008) : répartition par usage



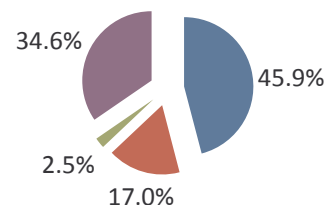
Graphique 5 : usages de l'énergie dans le bâtiment

En distinguant résidentiel et tertiaire :

Energie dans le résidentiel (2008) : répartition par usage



Energie dans le tertiaire (2008) : répartition par usage



Graphique 6 : usage de l'énergie dans le résidentiel et dans le tertiaire

Il est dès lors question de chercher à réduire ces consommations :

- Par le recours à des matériaux renouvelables, les plus locaux possibles, et nécessitant peu de transformation
- En agissant dès l'esquisse sur les facteurs susceptibles de réduire par la conception même (notamment l'enveloppe du bâtiment et ses composants) les besoins énergétiques du fonctionnement quotidien des bâtiments
- En incitant à une plus grande sobriété énergétique (usages raisonnables et raisonnés des équipements, mais aussi des composants du bâtiment)
- Par l'utilisation d'énergies renouvelables (bois-énergie, eau chaude solaire, photovoltaïque...)
- De favoriser l'usage d'équipements (éclairage, bureautique...) moins énergivores

L'objet de cette recherche concerne principalement sur le deuxième point énoncé ci-dessus : nous allons voir quel peut être l'impact de différentes mesures prises sur l'enveloppe du bâtiment sur les consommations énergétiques. Nous chercherons à vérifier qu'une variété de solutions peut aboutir à de bons résultats.

3. Contexte réglementaire

La nouvelle réglementation thermique, dite RT2012 ou réglementation thermique « Grenelle Environnement 2012 » est une réglementation d'objectifs. Elle consiste à généraliser dès 2013, toute construction en bâtiment basse consommation BBC.

Les objectifs fixés sont qualifiés de « saut énergétique », toute construction neuve au 1^{er} janvier 2013 devant afficher une consommation de 50 kWhep/m².an, avec coefficients correctifs selon 8 régions en France métropolitaine. De nouveaux indicateurs ont vu le jour :

- « B Bio » : besoins bioclimatiques, visant à favoriser une conception bioclimatique du bâti, avant le Permis de Construire. Un coefficient « B bio max » quantifie les besoins en énergie eu égard à 3 usages « chauffage/ refroidissement/ éclairage »
- « C max » : consommations de 50 kWhep/m².an pour les 5 postes chauffage, refroidissement, éclairage, ECS et auxiliaires
- « Tic » et « Tic réf » qualifient le confort d'été (exigences sur le facteur solaire des baies, la surface ouvrante minimale...)

La RT 2012 réglemente également le traitement des ponts thermiques, de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et le recours (quasi obligatoire) aux énergies renouvelables pour les maisons individuelles, par exemple. Parmi les exigences minimales réglementaires, citons l'accès à l'éclairage naturel, obligeant à avoir une surface de baies d'au moins 1/6^{ème} de la surface habitable.

Des coefficients « conventionnels » de conversion énergétique permettent pour le passage d'énergie finale (nécessaire pour atteindre le niveau de confort souhaité) à énergie primaire (énergie totale puisée dans la nature pour fournir l'énergie finale chez le consommateur).

La valeur des coefficients de conversion sont indiqués dans le tableau suivant, pour la France (RT et label BBC) et les labels Minergie et PassivHaus.

| Type d'énergie | France RT 2005 / RT 2012 | France Effinergie | Suisse Minergie | Europe Passif |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Convention utilisée pour le dossier | kWhep | kWhepp | kWhepp | kWhepnr |
| Électrique | 2,58 | 2,58 | 2 | 2,6 (2.7 avant 2010) |
| Bois | 1 | 0,6 | 0.7 (0,5 avant 2010) | 0,2 |
| Gaz / Fioul | 1 | 1 | 1 | 1,1 |
| Photovoltaïque | 0 | 2.58 | 2 | 0,7 |
| Solaire | 0 | 0 | 0 | 0 |

Source : Fiabitat Concept

4. *Energie et architecture : quelle relation ?*

La phase de conception (tant architecturale que technique) a des incidences énergétiques, notamment les postes de chauffage, d'éclairage et de refroidissement. Les autres usages, induisant principalement des consommations électriques, seront davantage orientés sur les choix d'équipements.

Il est clair que le choix de recourir à des productions électriques telles que le photo-voltaïque, le mini-éolien ou l'eau chaude solaire, par exemple, doivent également intervenir en phase conception, afin d'être partie intégrante et non pièce rapportée du projet architectural. Toutefois, dans le cadre de cette recherche, nous avons pris le parti d'orienter les pistes vers l'enveloppe (forme, orientation, matériaux), les baies (localisation, dimensions, nombre, caractéristiques des vitrages), les protections solaires et les possibles dispositifs *ad hoc* de captage énergétique et lumineux.

L'un des enjeux d'une telle recherche est de prendre du recul sur les règles « de bon sens », les « impondérables », afin de vérifier qu'un projet architectural qui souhaite minimiser les consommations énergétiques lors de son fonctionnement dispose d'un éventail de solutions moins restrictif pour s'adapter au site. Par ricochet, la question énergétique, si elle est pensée dès l'esquisse, n'est pas une véritable contrainte, et pourrait être perçue sous l'angle de la diversité des expressions.

Pour autant, cela ne signifie pas que ces règles soient un non-sens, mais qu'une conception intégrée laisse une latitude suffisamment ouverte pour ne pas contraindre la créativité architecturale par des règles générales et génériques (et donc parfois « hors sol »¹).

1.1.2. Le Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie

1. *Présentation*

Le CRAI, Centre de Recherche en Architecture en Ingénierie, est un laboratoire de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. Il constitue l'une des quatre équipes qui forment le FRE 3315, «Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage», qui associe le CNRS et le Ministère de la Culture et de la Communication. Ses partenaires sont des institutions publiques (principalement Etat et organismes associés), des grands centres de recherche (INRIA, CERIB, ...) ou encore des industriels.

Créé en 1987, le CRAI conduit des travaux de recherche fondamentaux et appliqués dans le domaine des modèles, de la simulation d'ouvrages, des méthodes et outils informatiques relatifs à la conception architecturale, urbaine et technique.

¹ C'est-à-dire que le sol et l'environnement local ne sont pas de simples supports du bâtiment

Créé en janvier 1998, Le MAP_FRE 3315 fédère quatre équipes de recherche des écoles nationales supérieures d'architecture. Les problématiques de recherche portent sur les applications de l'informatique à l'architecture, à la construction et au patrimoine, avec comme objectif la production d'outils ou de méthodes d'aide à la conception et à la décision. Les équipes mobilisées sont l'ARIA de l'école nationale supérieure d'architecture de Lyon, l'ASM de l'école nationale supérieure d'Architecture de Toulouse, le CRAI de l'école nationale supérieure d'architecture de Nancy, le GMSAU de l'école nationale supérieure d'architecture de Marseille.

2. Equipe et axes de recherches

Le CRAI met en œuvre et développe des outils de l'ingénieur, et les applique aux pratiques de l'architecte. Faite d'architectes, ingénieurs et informaticiens de formation, l'équipe se compose de 8 enseignant-e/chercheur-euse-s, 2 chercheur-euse-s, 8 doctorant-e-s, 2 agents administratifs et 5 chercheurs associés, auxquelles viennent s'ajouter plusieurs stagiaires, principalement issus du Master AME (Architecture, Modélisation, Environnement).

Le CRAI axe ses recherches sur la simulation et la visualisation pour l'architecture, avec pour domaines d'application le patrimoine, l'urbanisme, l'illumination et la restitution archéologique. Par ailleurs, différents travaux concernent le matériau bois, notamment par la réalisation de supports multimédia techniques ou encore à travers des recherches sur la mise en forme du bois dans les formes architecturales non-standards. Enfin, des recherches sont menées sur les questions thermiques et de traitement de la lumière dans les espaces bâtis. C'est sur ce dernier axe qu'a porté la présente recherche, encadrée par MM. Gilles Duchanois et Jean-Claude Bignon.

3. Le projet Ec-Co-Gen



Ec-Co-Gen est l'acronyme de « Eco-Conception Générative ». Il s'agit d'un projet de recherche mené depuis janvier 2011 par trois équipes de recherche, dans le cadre du programme Création – Processus, Acteurs, Objets, Contextes – édition 2010, de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche).

Il rassemble les équipes des laboratoires MAP-CRAI (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy), MAP-ARIA (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon), et Codisant-Sitcom (Université de Nancy 2).

La recherche aborde les phases de recherche conceptuelle en architecture, celles-ci étant constituées d'une dimension créative importante. L'instrumentation numérique de la créativité fait, depuis plusieurs années, l'objet d'études et de développements informatiques importants. C'est l'instrumentation numérique de la conception architecturale qui est au cœur d'Eccogen. Il vise à caractériser les mécanismes de la créativité dans une situation d'assistance générative, à travers laquelle l'outil numérique révèle une part d'autonomie et intègre des contraintes environnementales.

Plus précisément, l'enjeu est de concilier mécanismes créatifs et performances énergétiques, qui sont principalement les gains solaires thermiques et l'éclairage naturel. Le point de vue créatif suggère de caractériser :

- L'antagonisme entre une pensée explicite et une pensée implicite
- L'importance d'une indétermination signifiante
- Le concept de « trans-forme » (Marin, 2010)

Cette approche doit s'allier à un ou plusieurs moteurs de calcul, dans le but d'évaluer concomitamment les effets de la conception sur les consommations énergétiques. *In fine*, les aspects créatifs et la performance technique doivent s'alimenter l'un l'autre.

Le début de notre recherche et ses axes de travail coïncidant avec le démarrage de ce projet Ec-Co-Gen, ainsi qu'avec ses principales thématiques, tout lien entre les deux ne serait pas purement fortuit. Les pages qui suivent pourraient, en conséquence, apporter une pierre à l'édifice d'Ec-Co-Gen.

1.2 Rayonnement solaire : éléments de physique pour la lumière et la thermique – Etat de l'art des outils de simulation

Le rapport de l'architecture au soleil peut être l'histoire de compromis. La difficulté de l'exercice relève de la problématique même liée à l'énergie solaire : sur une séquence annuelle, les caractéristiques d'un bâtiment (matériaux, part de vitrage, orientation, etc.) auront des effets contradictoires sur la consommation énergétique globale. Une variété de compromis entre capter et se protéger doit être trouvée. Un compromis doit être aussi trouvé entre créativité architecturale et performance technique.

Cette recherche consiste à identifier puis expérimenter des méthodes et outils d'optimisation multi-critère et multi-objectif de l'énergie solaire dans l'espace bâti, tant pour la lumière naturelle que pour les apports thermiques passifs. Compte-tenu du nombre croissant d'outils généralistes et parfois grand public, nous souhaitons passer le cap des « grands principes », des estimations parfois trop approximatives, et proposer des éléments quantitatifs précis et fiables. De fait, la recherche d'un juste milieu s'appréhende au sein d'un environnement logiciel poussé en terme de capacités calculatoires.

L'objectif pratique est aussi de rendre compte des potentialités de programmes libres, qui puissent être à terme utilisés par tout type de structure, en n'importe quel point du globe : structures de recherche, praticiens (architectes, ingénieurs), collectivités, associations, ONG, etc.

La complexité des phénomènes en jeu nécessite donc un retour, ou plutôt un point technique sur les approches physiques liées au spectre solaire (lumière et énergie), ainsi que sur les modalités de captage et diffusion de lumière naturelle dans les bâtiments, sur les échanges thermiques dont il fait l'objet, et sur les méthodes numériques de simulation.

Sur cette base, une présentation succincte des méthodes numériques de calcul, puis des outils aujourd'hui performants et répondant à nos objectifs sera faite.

1.2.1. Spectre solaire

Le corps solaire (corps « noir » théorique) rayonne à 5800 K (env. 6000°C). Il émet des flux radiatifs allant des longueurs d'onde 0.25 à 2.5 μm . La constante solaire, énergie atteignant une surface normale aux rayons solaires dans les couches supérieures de l'atmosphère, est d'environ 1350 W/m². A cela il convient de soustraire les effets liés aux phénomènes de réflexion, absorption et diffusion des parties de ce rayonnement solaire, réduisant *de facto* l'énergie parvenant à la surface de la terre.

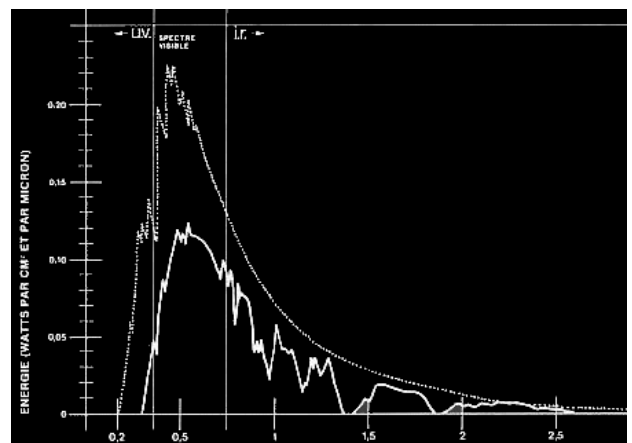


Figure 1: Guide de l'énergie solaire passive. (Mazria, 1981)

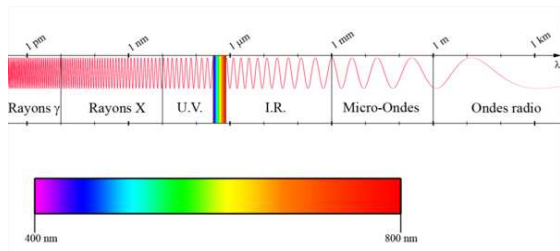


Figure 2 : ensemble du spectre électro-magnétique

<http://www.profdephysique.eu>

De l'ensemble du spectre électro-magnétique, les bandes du spectre solaire vont des UV aux IR. Les parties parvenant jusqu'à la surface de la terre se répartissent ainsi : 51% IR, 47% visible et 2% UV.

La quantité d'énergie parvenant jusqu'à nous dépend également de la géométrie solaire, c'est-à-dire la position relative du soleil (identifiée par l'azimut et la hauteur solaire), par le point considéré de la terre (latitude, longitude, altitude) et par la trajectoire de la terre autour du soleil et autour d'elle-même.

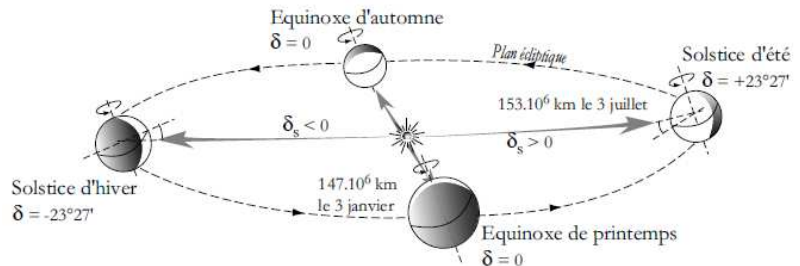


Figure 3 : position relative du soleil au cours d'une année

Dans les phénomènes thermiques nous intéressant, les rayonnements visibles, ainsi que les rayonnements infrarouges courte et grande longueur d'onde (on les nommera désormais RIR proches ou CLO et RIR GLO) sont de première importance dans ce que l'on peut nommer « solarité du bâtiment ». En effet, ce sont ces parties du spectre solaire que nous cherchons à capter ou dont nous souhaitons nous protéger, qu'il s'agisse de chaleur ou de lumière naturelle.

C'est donc cette tension entre les techniques de captage et de protection qui est au cœur de cette recherche. La relation du microclimat intérieur aux conditions extérieures est changeante, voire instable. Elle évolue au cours des journées et des saisons, de manière distincte d'une région à une autre. Il est impératif d'en tenir compte dans les calculs.

Bien que thermique et lumière soient intrinsèquement liés, pour des raisons de clarté, ces aspects sont traités successivement dans le texte, et non de manière intégrée. Nous allons tout d'abord aborder les questions ayant trait à la lumière naturelle, puis nous aborderons les aspects thermiques.

1.2.2. Eclairage naturel (soleil et voûte céleste)

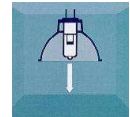
Les années 1970, notamment marquées par les crises pétrolières, ont permis le retour de l'éclairage naturel dans les problématiques architecturales. Nous en soucier aujourd'hui s'inscrit dans les multiples enjeux déjà cernés à l'époque. On ne mentionnera ici que les bienfaits de la lumière naturelle sur la santé (effets biologiques), l'ergonomie (impacts physiologiques), mais aussi ses impacts environnementaux (production d'électricité à cette fin).

Notions physiques pour la lumière naturelle

Définitions et unités

Rappelons brièvement les grandeurs photométriques principales. Nous abordons ici la photométrie visible (entre 400 nm et 780 nm). La photométrie énergétique (RIR) sera abordée dans la partie thermique. Notons bien que l'une et l'autre sont constituantes d'un même rayonnement, dans un lieu donné, à un instant t.

L'intensité lumineuse (cd) d'une source lumineuse est l'énergie rayonnée dans une direction donnée, à l'intérieur du spectre visible.

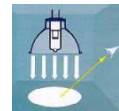


Le flux lumineux est l'énergie rayonnante visible, produite par une source lumineuse ponctuelle ; il s'exprime en lumen (lm).



L'exitance (ou émittance lumineuse) désigne le flux lumineux émis par une surface lumineuse. Elle s'exprime en lux (lm/m²) dans le visible et en W/m² sur l'ensemble du spectre.

La luminance est le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface pour un observateur lointain.



L'éclairement (lux) est le quotient du flux lumineux reçu au voisinage d'un point, c'est-à-dire la distribution de lumière par une surface. C'est généralement cette mesure qui intervient lorsque l'on parle de lumière naturelle. Dans les simulations, la référence est très souvent l'éclairement horizontal extérieur (mesuré en l'absence d'obstructions).



Figure 4 : illustration de 4 grandeurs photométriques (www.energieplus-lesite.be)

Propagation de la lumière

L'œil est sensible aux rayonnements de la gamme du visible qui proviennent des corps environnants. Aux températures usuelles ceux-ci n'émettent pas dans le visible : ils ne font donc que réémettre la lumière par réflexion, diffusion, ou diffraction. La trajectoire de la lumière se fait en ligne droite ou par diffraction (lorsqu'elle rencontre qui ne lui est pas complètement transparent).

Au contact de la matière (solide ou gazeuse, notamment dans la voûte céleste), trois phénomènes complémentaires se produisent : absorption, réflexion et transmission. La transmission induit elle-même trois comportements possibles du flux lumineux : sa diffusion, sa réfraction ou sa polarisation.

Sources de lumière naturelle

Les seules et uniques sources primaires d'éclairage naturel sont :

Le **soleil** (partie visible du spectre solaire, filtrée et diffusée par les molécules de l'air et les particules en suspension). La part visible de l'excitation énergétique du soleil apporte un éclairage direct, qui dépend de l'orientation et de l'inclinaison de la surface réceptrice, de la position apparente du soleil, de l'heure et du jour, etc.

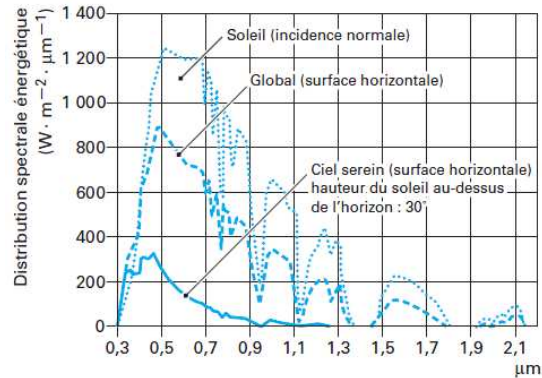


Figure 5 : Distribution spectrale normalisée de la lumière du jour et de ses composantes par ciel serein (Paule et Courret, 2010)

La **voûte céleste**, qui apporte un éclairage diffus, et pour laquelle on définit conventionnellement deux types de ciels : serein ou couvert

A cela, nous pouvons ajouter l'**environnement proche**, source secondaire (indirecte) du rayonnement solaire, quoiqu'en moindre proportion dans la partie du spectre visible. Paule et al. (2010) précisent que les obstacles à la lumière naturelle, eux-mêmes ensoleillés, ont ponctuellement une luminance suffisamment élevée pour contribuer à l'éclairage de locaux, par réflexion spéculaire ou diffuse. Il est donc déconseillé de négliger de tels phénomènes.

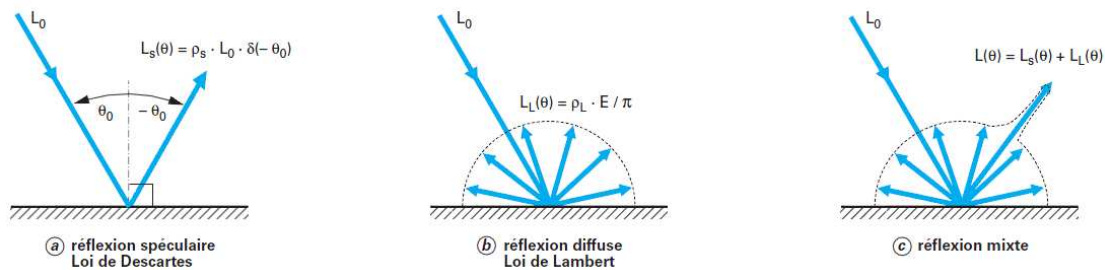


Figure 6 : photométrie et états de brillance (Paule et Courret, 2010)

Modèles de ciel

Le calcul de l'éclairage naturel dépend de la précision du modèle de distribution des luminances (cd/m^2) du ciel. Pour cela, de nombreux modèles existent, parmi lesquels les plus fréquents sont :

- **ciel clair CIE** (Commission Internationale de l'Éclairage)
- **ciel couvert** : on en recense deux types conventionnels. L'hypothèse faite est que la structure générale de leur luminance varie peu avec la hauteur du soleil, et que la révolution (selon l'axe Nord-Sud) est symétrique :
 - o ciel uniforme, autrefois utilisé pour calculer le FLJ, de luminance constante (isotropie) sur toute la voûte céleste, correspond à un ciel très fortement couvert

- CIE de Moon and Spencer, qui distribue les luminances du ciel conformément aux recommandations de la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)
- **modèle "tout temps" de Perez** (1990), modèle empirique basé sur un algorithme unique décrivant la répartition des luminances pour des conditions de ciel allant de « sans nuages » à « complètement couvert ». Son avantage est de ne nécessiter que de deux paramètres climatiques : clarté et luminosité (MAAMARI, 2004) et de mieux intégrer l'extrême variabilité des conditions d'éclairement extérieures.

Modèle de ciel Perez

Pour calculer la distribution lumineuse du ciel, le « modèle d'éclairement du ciel en tout temps » de Perez (1990) nécessite date, heure, coordonnées géodésiques du site, ainsi que les valeurs d'éclairement direct et diffus. Le modèle intègre deux modèles indépendants :

- l'efficacité lumineuse, qui calcule l'efficacité lumineuse moyenne des rayonnements direct et diffus, pour un état donné du ciel. Les paramètres d'entrée sont : l'angle solaire, la hauteur solaire, les éclairagements direct et diffus et l'humidité atmosphérique
- la distribution lumineuse du ciel, basé sur la date, l'heure, et les éclairagements direct et diffus. Le modèle comprend cinq paramètres qui influencent assombrissement ou éclaircissement de l'horizon, le gradient de luminance à l'horizon, l'intensité relative de la région circumsolaire (espace autour du soleil), sa largeur, et l'intensité relative de la lumière rétrodiffusée à partir de la surface de la Terre.

Alors que le ciel couvert CIE est symétrique, le modèle de Perez fait la distinction entre un ciel nuageux sombre et lumineux et fournit plus de détails dans la distribution lumineuse du ciel. La modélisation correcte d'un ciel nuageux s'avère importante (voire cruciale) dans la modélisation d'un ciel, d'autant que ce n'est pas chose rare sous nos latitudes.

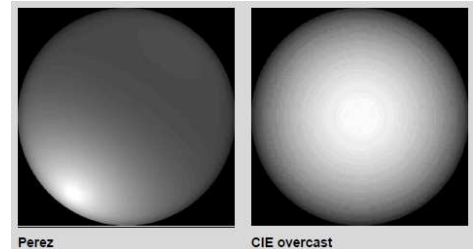


Figure 7 : Deux modèles de ciel (source : [Tutorial de DaySim 3.0](#))

Ainsi que l'explique Paule et al. (2010) : « Si la récurrence du jour est un phénomène stable, et parfaitement prévisible, il n'en est pas de même de sa qualité et de sa quantité. Les phénomènes climatiques, globalement assez réguliers d'une année à l'autre et pour chaque saison, restent parfaitement aléatoires et ne peuvent être approchés que statistiquement. On sera donc amené à étudier l'éclairement dans plusieurs cas, dont les probabilités de survenue sont indiquées par les résultats du traitement statistique des relevés de la météorologie » (un point sur les type et contenus de fichiers météorologiques et leur contenu est proposé dans la partie simulation thermique).

Mesures de la performance et de la disponibilité en lumière naturelle

Deux indicateurs sont généralement employés : le facteur de lumière du jour (FLJ) et l'autonomie en éclairage naturel.

Le FLJ est l'indicateur « traditionnel ». Il mesure le rapport entre l'éclairage naturel mesuré dans un bâtiment et celui mesuré sur un plan horizontal à l'extérieur (composantes directe et diffuse extérieures et réflexions internes, dépendant de la clarté et de l'état de surface des parois). Il a connu un certain nombre d'évolutions, visant à le rendre moins simpliste.

L'autonomie en éclairage naturel représente le pourcentage annuel où le niveau d'éclairage naturel permet l'économie de lumière artificielle, pendant les périodes d'occupation du bâtiment. Son calcul nécessite des modèles plus élaborés (détaillés plus loin) et la connaissance fine des données climatiques.

Dispositifs captage

Nous nous bornerons ici à reprendre les dispositifs explicités par De Herde (2003) et Lavigne (2010).

La transmission de la lumière naturelle de l'extérieur à l'intérieur d'un espace clos, puis à l'intérieur même de cet espace dépend des caractéristiques de la baie (dimensions, forme, position sur la paroi, caractéristiques optiques du verre, inclinaison), ainsi que des dimensions et de l'aménagement intérieur du local. La distribution à l'intérieur dépendra des caractéristiques de surface des matériaux des parois intérieures. La distribution de la lumière peut aussi se faire par la conception de **zones de distribution lumineuse**, comme les puits de lumière, les serres ou encore les atria.

Elle peut aussi se faire *via* des **systèmes de distribution lumineuse**, tels que les lightshelves (bandeaux lumineux), les sheds, les systèmes anidoliques ou les conduits solaires (ou cheminées de lumière) avec des matériaux à haut pouvoir réfléchissant*. De même, les appuis de fenêtre et les stores réfléchissants, les déflecteurs diffusants dans les ouvertures zénithales participent d'une pénétration lumineuse accrue.

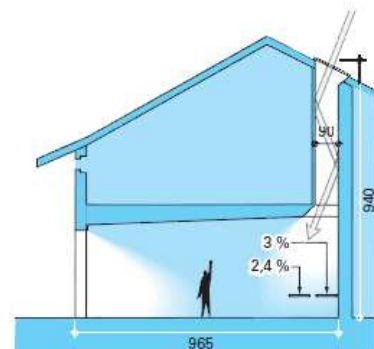


Figure 8 : Cheminée de lumière réalisée à Genève, en Suisse : FLJ de 3% (Paule et Courret, 2010)

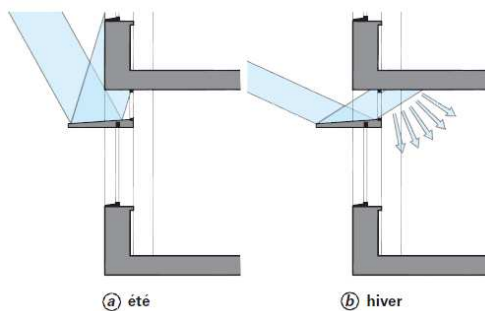
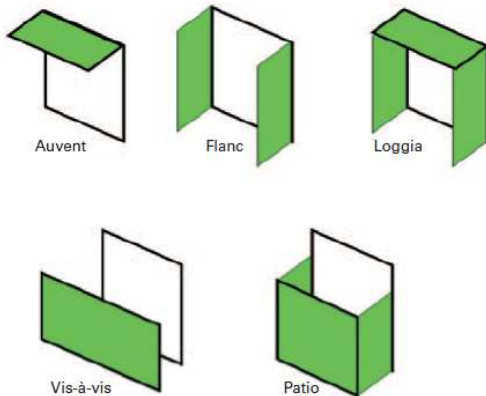


Figure 9 : Schéma de fonctionnement d'un lightshelf (Paule et Courret, 2010)

De tels dispositifs sont à considérer comme des dispositifs de captage mixte, lumière naturelle/énergie solaire car, s'ils s'avèrent pertinents sous le prisme de l'apport en lumière naturelle, ils peuvent avoir des conséquences thermiques non désirées, qu'il vaut mieux être en mesure de mesurer, de manière concomitante.

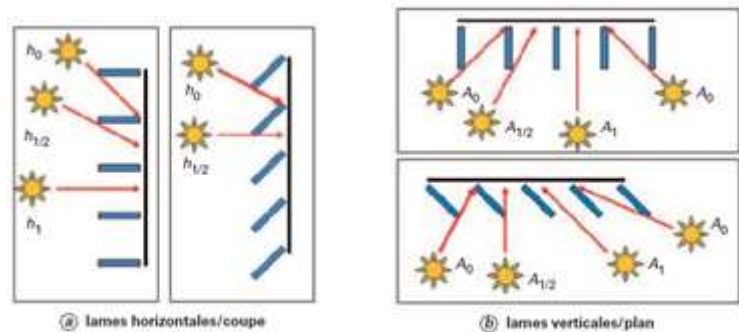
Dispositifs de protection

Le soleil étant une source possible d'éblouissement et de surchauffe, un grand nombre de protections existent : intérieures ou extérieures, fixes ou mobiles, horizontales ou verticales, à commande manuelle ou automatiques, etc.



Ces dispositifs influent de manières distinctes les uns des autres, sur la protection des occupants vis-à-vis des surchauffes (mais aussi du froid l'hiver, selon leurs propriétés thermiques), de l'éblouissement, de la diffusion de la lumière, etc. Il est donc important de disposer d'outils capables de modéliser cette variété de techniques, au plus près de la réalité.

Figure 10 : Différents types de protections solaires extérieures (Izard, 2010)



1.2.3. Simulations numériques pour la lumière naturelle

Les informations qui suivent reprennent in extenso la partie « outils informatique » du document « éclairage naturel » de Paule et Courret (2010).

De nombreux outils informatiques dédiés à l'éclairage (naturel, artificiel ou mixte) dans le bâtiment, sont développés depuis deux décennies. Trois types d'outils méthodes permettent des simuler l'éclairage naturel.

1. Calculs par flux séparés (« split flux methods »)

Cette méthode, élaborée par le Building Research Establishment permet de calculer, pour un ciel couvert CIE, le facteur de lumière du jour, en un point quelconque d'un local. Elle consiste à calculer séparément les trois composantes du facteur de lumière du jour (directe, diffuse et réfléchie). L'utilisation de ce type de méthode permet de réaliser, pour des volumes simples, des calculs extrêmement rapides.

Exemple de logiciel : DIAL-Europe

2. Méthode de la radiosité

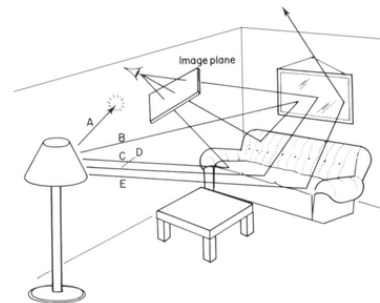
Les éclairagements ou les flux sont déterminés par la loi des échanges radiatifs entre les corps. Cette méthode est limitée au traitement des surfaces diffusantes, dites « Lambertiennes ». Réflexions spéculaires et réfractions (Lois de Descartes) ne sont pas prises en compte, « ce qui n'est pas rédhibitoire dans la plupart des cas, vu la faible occurrence de ces phénomènes dans l'éclairage des bâtiments ».

Dans le cas le plus général d'échanges radiatifs énergétiques entre des corps de dimensions finies, on doit tenir compte des réflexions mutuelles entre ces corps, ainsi que des échanges entre les parties d'un corps concave qui « se voient » mutuellement. En éclairage naturel, ces échanges sont parfois négligés. Ainsi, l'effet de la réflexion du sol sur la luminance d'un ciel clair est nul, ce qui n'est pas le cas de l'effet d'un sol enneigé par temps couvert ou brumeux. Généralement, les réflexions provenant des façades opposées aux baies des locaux étudiés sont prises en compte. Les programmes de calcul utilisant la méthode de la radiosité permettent d'appréhender l'éclairage et le facteur de lumière de jour, en n'importe quel point d'un local.

Exemple : Superlite (<http://btech.lbl.gov/tools/superlite>)

3. Méthodes du « lancer de rayons » (« ray tracing »)

Le « lancer de rayons » offre aujourd'hui la méthode la plus poussée, car elle simule l'influence de la brillance des matériaux sur la propagation de la lumière. Schématiquement, le principe consiste à suivre les rayons lumineux émis par chaque source primaire ou secondaire. Contrairement à la radiosité, cette méthode retranscrit les Lois de Descartes (réflexion spéculaire et réfraction). Lorsque le rayon frappe une surface, la lumière



Graphique 7 : principe du "lancer de rayons" (www.presence-pc.com)

réfléchi est calculée en fonction des qualités photométriques du matériau. Selon la rugosité, la brillance et la clarté, le rayon incident est « éclaté » en une multitude de rayons secondaires possédant chacun une luminance et une direction propre. Chaque rayon est ainsi suivi, de surface en surface, jusqu'à « extinction ». Cette technique permet en théorie de simuler n'importe quelle complexité géométrique et photométrique. Les logiciels utilisant ces techniques incluent des bases de données permettant de sélectionner une grande variété de matériaux, tant en transmission, qu'en réflexion.

Deux variantes de la méthode du « lancer de rayons » sont utilisées : soit le chemin de la lumière est calculé depuis les sources (« forward ray tracing »), soit il est calculé en sens inverse depuis l'observateur (« backward ray tracing », ou méthode inverse). La deuxième méthode est plus légère, seuls les rayons passant par le point de mesure sont calculés. En contrepartie, le calcul doit être recommencé pour chaque point de mesure. La première est qualifiée d'« objective » (résultat global) et la deuxième de « subjective » (résultat attaché à un point de vue fixé avant le calcul).

Exemple de logiciels : Radiance, Adeline et Genelux.

De plus en plus de programmes combinant « radiosité », pour acquérir la connaissance globale des échanges radiatifs par diffusion, et « lancer de rayons » (généralement méthode inverse), pour prendre en compte la spécularité des surfaces se développent. Ils permettent d'évaluer le risque d'éblouissement au point de vue considéré. Tel est, notamment, le cas de Radiance.

4. Mot complémentaire sur les logiciels utilisant le « lancer de rayons »

A l'heure actuelle, le logiciel le plus poussé (et l'un des plus utilisé) en matière de simulation de lumière naturelle est Radiance. Développé par Greg Ward au Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, 1987-2011), il fonctionne sous environnement LINUX. www.radsite.lbl.gov/radiance/

Il existe des logiciels faisant appel au moteur de calcul de Radiance, avec une interface plus ergonomique et fonctionnant sous d'autres systèmes d'exploitation. C'est le cas de DaySim, développé par Christoph Reinhart (Harvard GDS) depuis 2002.

Daysim (Simulations dynamiques de la lumière du jour) calcule la disponibilité annuelle de lumière du jour dans des édifices de géométries quelconques, ainsi que les consommations électriques liées à l'éclairage automatisé (technique de « *dimming* » : détecteurs d'occupation, cellules photoélectriques...), en complément des interrupteurs classiques (marche/arrêt). De cette manière, Daysim peut calculer, entre autres, l'autonomie d'éclairage naturel et l'indice d'éclairage naturel.

Radiance/DaySim combine le « lancer de rayons » (méthode inverse) avec une méthode utilisant les coefficients d'éclairage diurne. Basée sur le comportement physique de la lumière dans un modèle tridimensionnel, cette technique permet de représenter fidèlement la réalité (Ward, 1994). Le modèle de ciel pour calculer les profils d'éclairement annuel est le modèle de ciel « tout temps » (Perez, 1990), en partant des valeurs des fichiers météo TMY (cf. section réservée).

Un modèle stochastique permet d'évaluer l'évolution de l'éclairement intérieur en fonction de la moyenne horaire des valeurs des rayonnements direct et diffus. Les profils d'éclairement annuel sont associés à l'occupation des locaux, afin de déterminer la consommation annuelle d'électricité pour l'éclairage, selon la stratégie de commande de la lumière et des stores. Il peut également analyser les zones d'éblouissement, gère les dispositifs de protection solaire.

Les imports/exports avec différents outils de CAO (tant pour créer un modèle que pour visualiser les résultats) est un avantage supplémentaire : Rhinocéros, Autodesk Ecotect, Google SketchUp. Enfin, il peut être couplé à des programmes de simulation thermique tels que TRNSYS, EnergyPlus, eQuest et ESP-r, afin d'intégrer l'éclairage aux consommations énergétiques de chauffage, etc.

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/projets/irc/daysim.html>

1.2.4. Energie et bâtiments

Du point de vue physique, un bâtiment est un ensemble de volumes d'air séparés par des parois. L'enveloppe extérieure, pour partie opaque et pour partie vitrée, constitue le lien entre un microclimat intérieur et les fluctuations dynamiques des sollicitations extérieures (météo). Morphologie, orientation, organisation des espaces (volumes), composition des parois... sont autant d'éléments qui caractérisent les modalités de cet échange, et de la diffusion des calories/frigoriques vers l'intérieur ou l'extérieur.

Les équipements de chauffage, ventilation et refroidissement (l'acronyme CVC, pour chauffage, ventilation, climatisation, est régulièrement employé) assurent généralement la mise en confort de l'ambiance intérieure selon les critères fixés par les occupants, et qui impactent température et taux d'humidité.

L'enjeu de la conception architecturale de ce point de vue consiste donc à composer avec la dynamique climatique de l'environnement proche, pour limiter les charges, été comme hiver. Cela nécessite de connaître les normales climatiques du lieu considéré, à un pas suffisant pour rendre compte de leur variabilité dans le temps, et de comprendre les phénomènes physiques en jeu dans le transfert de chaleur.

Des outils mathématiques de modélisation rendant compte de cette dynamique sont intégrés dans des programmes de calcul informatiques (généralement nommés outils de STD, pour simulation thermique dynamique), permettant une modélisation réaliste de ces systèmes complexes.

1. L'enveloppe et ses composants

De manière triviale, nous pouvons considérer que l'enveloppe d'un bâtiment se compose de parois opaques et de parois vitrées. La caractérisation des matériaux qui les composent est déterminante pour une prise en compte réaliste de l'ensemble des échanges thermiques dont ils sont porteurs.

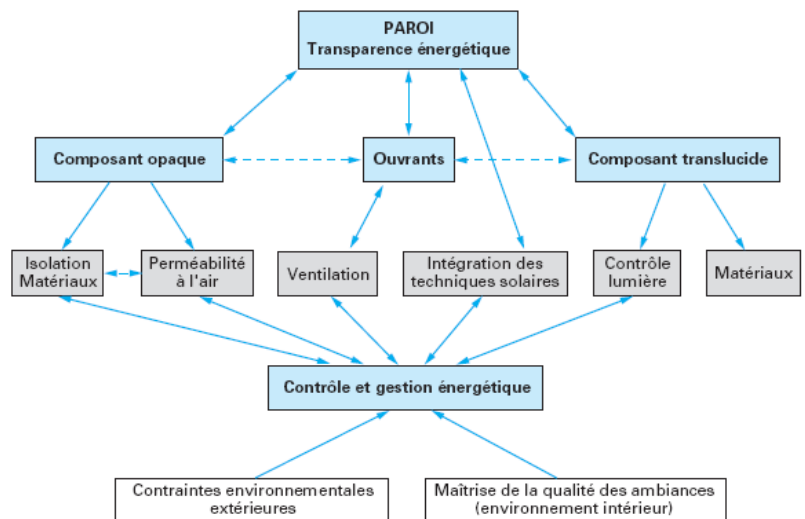


Figure 11 : enveloppe et performances énergétique (Lefèbvre, 1994)

Parois opaques

Les parois opaques régulent les flux de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur, mais aussi entre les volumes intérieurs. Deux familles de propriétés caractérisent leur comportement :

- Les propriétés matériaux : conductivité thermique λ (W/m.K), chaleur spécifique (J/kg.K), densité, épaisseur
- Les propriétés de surface : absorptivité thermique (émissivité), absorptivité solaire, absorptivité du rayonnement visible, rugosité, porosité, couleur

Parois vitrées

La pratique habituelle consiste à considérer les vitrages à travers trois indicateurs :

- U_g : coefficient de transmission surfacique du verre (W/m².K)
- g : facteur solaire (part transmise et absorbée du rayonnement solaire)
- TL : transmission lumineuse
- On y ajoute généralement le coefficient de transmission du châssis U_f (W/m².K), en procédant à une moyenne pondérée des surfaces vitrées et du châssis

Aussi, un double vitrage (DV) avec une lame d'air est ainsi assimilé à un seul composant doté de ces 3 caractéristiques. Si cette méthode a l'avantage de simplifier les calculs, elle ne pourra être qu'approximative. Un DV est défini par son verre intérieur, sa lame d'air (type et épaisseur), le verre extérieur.

La complexité du verre et des échanges thermiques, notamment liée aux différentes bandes spectrales du rayonnement solaire, nécessitent un paramétrage plus fin, caractérisant précisément les données thermiques et spectrales (solaires, visibles, infrarouges). Cela nécessite de connaître :

- les propriétés thermiques du verre : conductivité λ (W/m.K)
- ses propriétés spectrales, i.e. son comportement aux différentes bandes du spectre solaire, et dans toutes les directions. *A minima*, en incidence normale :
 - o Transmittivité et réflectivité (extérieure et intérieure) solaires
 - o Transmittivité et réflectivité (extérieure et intérieure) dans le visible
 - o Transmittivité et émissivité hémisphérique (extérieure et intérieure) dans l'infrarouge GLO

Les fabricants de verre fournissent ce type d'information. La Base de Données Internationale sur les Vitrages (IGDB) répertorie un très grand nombre de vitrages et leurs caractéristiques précises. Nous revenons sur ces aspects dans la partie 2.

Relevons à ce sujet les travaux de Bodart (2002), qui portent sur les baies et les types de vitrages dans les gains solaires. Les modèles de verre sont ceux d'un grand industriel français, et les simulations ont été réalisées sous TRNSYS, pour Uccle, en Belgique. Le regard croisé des impacts en terme de lumière et de chauffage y sont analysés, suivant différentes configurations de bâtiments.

Faiblesses du bâtiment

Les principales faiblesses dont il faut tenir compte dans la modélisation thermique d'un bâtiment concernent :

- Les ponts thermiques, causés par des discontinuités de surfaces (induisant des variations de la résistance thermique de l'ensemble de l'enveloppe)
- L'inétanchéité à l'air, liée à la qualité des matériaux, à leur mise en œuvre (gestion des interfaces entre corps d'état), ...

Leur maîtrise et leur modélisation sont des facteurs cruciaux, mais en dehors du cadre de cette recherche. Ces facteurs auront un impact sur le bilan énergétique, mais pas directement sur le captage d'énergie solaire et de lumière naturelle. En revanche, il est important que les outils de simulation puissent les y incorporer.

Contrôle du confort

Les équipements de CVC assurent le contrôle du confort (hygrothermique, qualité de l'air...). Il s'agit d'installations mécaniques, là aussi extérieures à notre propos.

2. Phénomènes en jeu : types de transferts thermiques

Comme le rappelle Lefèbvre (1994), les transferts d'énergie dans un bâtiment sont principalement des transferts de chaleur et de matière. Conduction, convection et rayonnement, pour les modes de transfert de la chaleur sensible, la chaleur latente mettant en jeu les phénomènes de changements de phases d'un corps (vapeur d'eau dans notre cas). Les transferts s'effectuent toujours « du plus vers le moins », qu'il s'agisse :

- Du déplacement du flux de chaleur (de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide)
- Du déplacement des masses d'air (des hautes aux basses pressions)
- De la migration de vapeur d'eau (concentration en vapeur d'eau)

Transferts de chaleur sensible

La **conduction** est le processus de transmission de la chaleur par diffusion dans la matière solide (transport de l'énergie interne dû à une hétérogénéité de l'agitation moléculaire). Elle est régie par la loi de Fourier, liant directement flux de chaleur et gradient de température en un point.

La **convection** est le transport d'énergie thermique par un fluide en mouvement (généralement air ou eau en thermique du bâtiment), au sein d'un fluide ou au contact d'un fluide et d'une surface solide. Lefebvre (1994) revient sur la complexité de ce phénomène : « la convection est régie par l'équation de Navier - Stokes qui n'a pas de solution simple dans le cas général. Les moteurs de la convection peuvent être un gradient de température dans un fluide dilatable tel que l'air (convection naturelle), un gradient de pression imposé (convection forcée) ou les deux à la fois (convection mixte) ». Ce mode de transfert est généralement approximé par des modèles plus simples. C'est

pourquoi les échanges convectifs entre parois et air ambiant sont régulièrement simplifiés au sein d'un simple coefficient h_c , fixe dans le temps, reliant la densité surfacique de flux de chaleur échangé entre solide et fluide et l'écart de température entre la surface de la paroi et la température moyenne du fluide. Toutefois, certains outils de simulation proposent des modèles plus élaborés, comme nous le verrons dans la partie 2.

Echanges convectifs intérieurs : les échanges convectifs entre les faces intérieures des parois et les volumes d'air sont dus, pour l'essentiel, à l'effet de convection naturelle résultant de la non-homogénéité des températures de surfaces, et aux mouvements d'air entre zones contiguës et vers ou depuis l'extérieur induisent des vitesses d'air. « Plutôt que d'essayer de résoudre l'équation locale de Navier-Stokes (impossible dans le cas général), des corrélations donnant les valeurs du nombre de Nusselt ou des coefficients d'échange superficiels en fonction de paramètres décrivant les principales configurations possibles sont généralement employés. » (Lefèbre, 1994)

Echanges convectifs extérieurs : les faces extérieures des parois échangent également de la chaleur avec l'air extérieur, mais de manière plus complexe, ces échanges étant principalement tributaires du vent (vitesse et direction). De nombreuses corrélations sont proposées.

Le **rayonnement** est un échange d'énergie à distance, entre des corps (émetteurs et récepteurs) du fait de leur température. Nous proposons un point plus complet.

Rayonnement solaire (RS)

Ce qui est vrai pour la partie visible du spectre solaire, l'est pour le spectre dans son ensemble : le RS a trois composantes, directe, diffuse, réfléchie (réémise par l'environnement proche).

Les principes physiques du rayonnement font intervenir un émetteur et un récepteur.

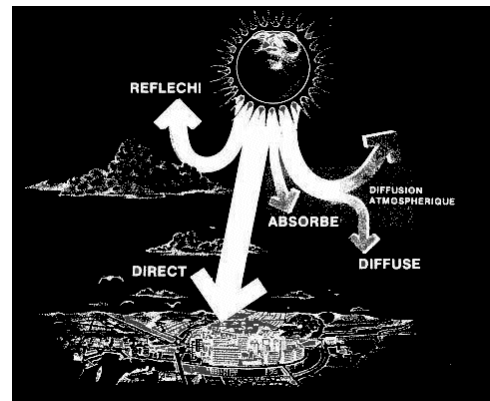


Figure 12 : Mazria, 1981

Rappel : l'émittance désigne l'émission d'un flux (lumineux, énergétique). Une distinction doit être faite selon la bande du spectre considérée :

- photométrie visible : entre 400 nm et 780 nm (émittance, lm/m^2)
- photométrie énergétique : l'ensemble du spectre ; l'émittance énergétique (ou exitance, W/m^2) est la densité de flux d'énergie émise par rayonnement sur tout le spectre des longueurs d'ondes ou entre deux longueurs d'ondes très proches (émittance monochromatique)

Les températures courantes allant d'environ 80 K à près de 6 000 K (soleil), le domaine usuel du rayonnement thermique s'étend du visible à l'infrarouge moyen, soit de 0.3 μm à 2.5 μm .

Lois physiques : le comportement de l'émetteur est régi par les lois de Kirchhoff et de Stefan-Boltzmann :

- première loi de Kirchhoff : l'émittance énergétique d'un corps noir totale (toutes longueurs d'onde confondues) ou monochromatique ne dépend que de sa température absolue T
- seconde loi de Kirchhoff ou de Draper : l'exitance d'un corps dépend de son facteur d'émission ou émissivité. Absorption et émission sont de même valeur $H = \epsilon \cdot H_0$ (W/m^2)
- Loi de Stefan-Boltzmann : l'émittance totale d'un corps noir vaut $H_0 = \sigma \cdot T^4$ (W/m^2), σ étant la constante de Stefan

D'où : l'émittance totale d'un corps quelconque est donnée par la relation $H = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$. Elle dépend donc de l'absorptivité, de l'émissivité et de la température du corps émetteur.

Récepteur : le comportement du récepteur est tributaire des caractéristiques radiatives des matériaux opaques (réflectivité, absorptivité, transmittivité), dont la somme vaut 1, et qui dépendent principalement de la nature du matériau et de l'état de surface (notamment leur rugosité). La transmittivité est considérée nulle pour les surfaces opaques.

Les corps ont en général un comportement différent aux rayonnements IR (rayonnement des corps aux températures courantes) et solaires, car ils sont sélectifs. Les comportements radiatifs diffèrent selon la bande de longueur d'ondes considérée. Il convient donc de distinguer le rayonnement émis par les corps opaques (courants dans la construction), les corps transparents et le soleil.

En général, les corps opaques absorbent le rayonnement sur leur surface et non dans leur épaisseur. Les phénomènes de réflexion, d'absorption et d'émission peuvent donc être assimilés à des phénomènes de surface, faisant donc intervenir les propriétés de la surface contrairement à la conduction de la chaleur qui dépend des caractéristiques du matériau massif.

Les propriétés émissives des matériaux sont définies à partir de celles d'un corps noir placé dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde à l'aide de coefficients appelés émissivités, monochromatiques ou totales, directionnelles (rayonnement direct) ou hémisphériques (rayonnement diffus). Le point sur les parois vitrées rappelait l'importance de la prise en compte de cette sélectivité aux différentes bandes de longueur d'onde.

Rayonnement et bâtiment

Le rayonnement est une composante importante des échanges thermiques dans le bâtiment, tant par les quantités de chaleur en jeu que pour la sensation de confort (ou d'inconfort) qu'il peut générer.

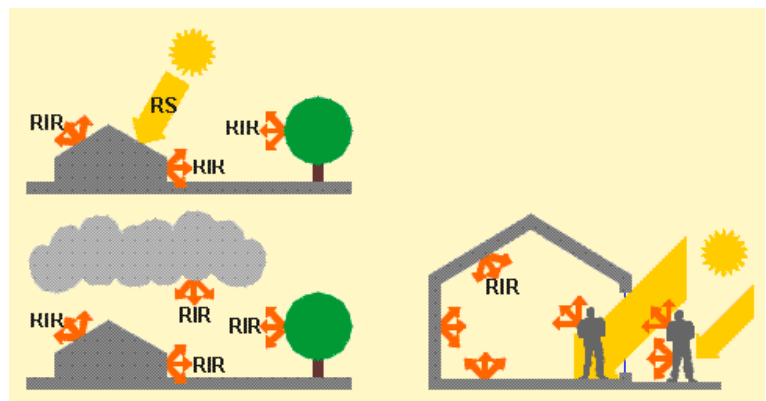


Figure 13 : échanges radiatifs entre un bâtiment et son environnement et dans les volumes intérieurs (<http://www.energieplus-lesite.be>)

Les phénomènes radiatifs dans le bâtiment sont liés :

- A l'extérieur :
 - o au rayonnement solaire (RS) direct et diffus, sur les parois opaques et transmis par les surfaces vitrées
 - o au rayonnement IR GLO (sol, ciel, immeubles voisins, végétation)
- A l'intérieur (RIR GLO)
 - o aux dispositifs d'éclairage artificiel, sources de rayonnement visible et de RIR GLO
 - o aux occupants
 - o aux échanges de chaleur entre solides (comme les parois), qui se produisent dans le domaine des IR GLO

Un édifice reçoit du RS durant certaines périodes ensoleillées et toujours du RIR de son environnement. Il en est de même des personnes.

Lefèbvre (1994) synthétise le parcours du flux radiatif solaire ayant pénétré dans une zone, en expliquant qu'il peut être supposé transformé en flux diffus isotrope, que son origine soit diffuse ou directe. « Les apports solaires transmis par les vitrages atteignent les parois intérieures ensoleillées du local (cf. en partie 2 la notion de tâche solaire), sont absorbés et réfléchis en fonction des caractéristiques solaires des parois. Des réflexions multiples entre les diverses parois se produisent, puis les flux solaires absorbés par chacune d'elle augmentent leur température de surface et interagissent avec l'environnement proche par convection (l'air s'échauffe à leur contact), par conduction (la chaleur de surface des parois se transmet à l'intérieur si la paroi n'est pas adiabatique, avec un déphasage et un amortissement du flux selon la masse thermique) et par rayonnement ».

Cas particuliers : dans le cas où des calculs plus précis sont nécessaires (cas d'un local très vitré tel qu'une serre), un calcul plus fin doit être déployé. Il faut prendre en compte, d'une part, l'anisotropie du rayonnement diffus entrant (qui vient essentiellement du ciel et varie selon la direction) et, d'autre part, le phénomène de tâche solaire. Les moteurs de calcul doivent être en mesure de déterminer le déplacement du contour de la tâche, et d'établir des modèles de parois capables de recevoir des sollicitations de flux absorbé tout au long de son trajet.

Transferts de chaleur latente

Un bilan de masse complète ce bilan thermique du bâtiment. Il porte sur :

- les échanges d'air (volontaires ou parasites, naturels ou mécaniques)
- les migrations de vapeur d'eau

Sous les pressions et aux températures courantes dans les bâtiments, l'humidité de l'air est très variable et les phénomènes de condensation ou d'évaporation mettent en jeu des quantités d'énergie (chaleur latente) loin d'être négligeables et qui ont des conséquences importantes sur le fonctionnement et la pérennité du bâtiment, ainsi que sur le confort des occupants. Certains outils prennent en compte l'énergie véhiculée par ce biais.

Les échanges d'air naturels se font sous l'effet du vent (différence de pression) ou par tirage thermique (ou « effet de cheminée » : l'air chaud monte). L'effet du vent permet une ventilation naturelle. Les gradients de pression entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur est le moteur d'infiltrations parasites.

La modélisation de la ventilation naturelle (VN) est complexe et fait souvent appel à des approches de mécanique des fluides spécifiques (généralement regroupés sous l'acronyme de CFD pour Computed Fluid Dynamic, que l'on peut traduire par Dynamique des Fluides Informatisée), notamment par leur dépendance à un facteur extérieur variable et complexe à appréhender : le vent. Notons que la majorité des logiciels de STD considère la température de l'air d'une zone homogène. Les logiciels de simulation aéraulique (CFD) permettent de mieux intégrer la réalité de ces phénomènes, notamment la stratification de l'air, mais nous ne l'aborderons pas ici. Toutefois, certains programmes de simulation thermique intègrent, à différents degrés de précision, des possibilités de modélisation de la VN ou de couplage avec des outils CFD.

1.2.5. Outils pour la simulation thermique dynamique

Ce schéma résume le système que les outils de simulation cherchent à résoudre. (Lefèbre, 1994)

1. Données météorologiques

L'intégration, en termes physiques, du bâtiment dans son environnement nécessite de connaître différents paramètres constitutifs du climat local, à un bon niveau de précision. Pour cela, des modèles de fichiers ont été élaborés depuis plusieurs décennies. Ils compilent les données horaires de différents indicateurs climatiques, et constituent un modèle d'année type (analyse statistique des séquences climatiques les plus représentatives des 20 à 30 années, fournissant les normales météorologiques), pour un site donné.

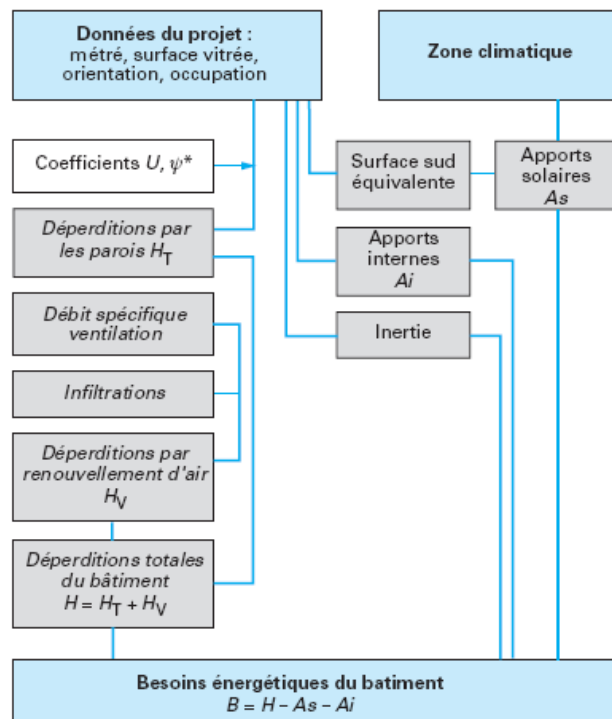


Figure 14 : Besoins énergétiques du bâtiment

Ces fichiers se nomment Test Reference Years (TRY), pour "année de référence". Ils contiennent la température extérieure, la densité de flux solaire direct sur plan normal ou horizontal, la densité de flux global sur le plan horizontal, la densité de flux diffus, la vitesse et la direction du vent, et l'humidité relative. Ces données correspondent à un site repéré par son nom, son identifiant, ses coordonnées géodésiques (latitude, longitude, altitude) et son temps GMT (Greenwich Mean Time).

De nombreux concepteurs de logiciels ont cherché à homogénéiser les fichiers météo et leur format, si bien qu'aujourd'hui .IWEC, .EPW, .TRY, etc. reprennent les mêmes données et sont compatibles avec bon nombre de logiciels.

Enfin, Meteonorm, base de météo mondiale, à la capacité de générer des données horaires par extrapolation de données statistiques d'un site (températures minimales, moyennes, maximales, etc.). Si les données ne sont pas des TRY véritables, elles présentent toutefois l'avantage de représenter horairement des tendances du site.

2. Méthodes de résolution

Avant toute chose, précisons que nous n'avons pas adopté les méthodes dites statiques, telles PHPP (label *Passivhaus*, Allemagne), méthode des DJU, etc. qui n'assurent pas de simulations en régime dynamique. D'autre part, les outils de modélisation aéraulique, tels que COMIS et CONTAM ne sont pas exposés.

Lefèbvre (1994) explique que le comportement thermique dynamique des bâtiments résulte du couplage du comportement de chacun de ses composants (cf. 'L'enveloppe et ses composants'). Les méthodes de simulation et d'analyse s'appuient ainsi sur les méthodes qui permettent de résoudre localement, dans chacun des composants, les équations de transfert de chaleur (sensible et latente). Il classe les méthodes de résolution de la manière suivante :

Solutions analytiques

- Méthode de séparation des variables
- Méthode modale
- Transformée de Laplace de l'équation de la chaleur
- Réponse harmonique d'un mur multicouche

Méthodes numériques directes

- Méthode des volumes finis
- Méthode des différences finies
- Méthode des éléments finis

La majorité des logiciels actuels, en modélisation thermique des bâtiments, utilisent la méthode des différences finies, certains avec une réduction modale, permettant des gains en temps de calcul. Les méthodes de calcul aux éléments finis sont plus développées dans des outils de calculs plus « ponctuels » (ponts thermiques, etc.), et celle des volumes finis concerne les outils de modélisation aéraulique (CFD pour computed fluid dynamic).

Les couplages peuvent être quasi instantanés, mais l'évolution de chacun des composants du bâtiment résulte de processus dynamiques que les couplages, eux-mêmes, modifient. Ce comportement n'est pas une simple juxtaposition du comportement de ses composants. Aussi, les moteurs de calculs réalistes ne peuvent donner instantanément l'impact d'un ou plusieurs changements d'un modèle (fenêtre, dimensions...) en termes énergétiques.

3. *Etat de l'art des outils de simulation*

Les logiciels voués à simuler le comportement thermique dynamique et les systèmes énergétiques pour le bâtiment sont nombreux, plus ou moins faciles d'accès (problème de langue, d'interface, de connaissances préalables en informatique, etc.), de précision variable, etc. Sans rechercher l'exhaustivité, il est néanmoins important de s'y arrêter un instant.

Ces logiciels, pour les plus performants ou les plus utilisés, évoluent régulièrement, affinent leurs modèles ou en proposent de nouveaux, notamment en ce qui concerne les échanges radiatifs et convectifs, ainsi que les transferts aérauliques (notamment pour la ventilation naturelle et les infiltrations parasites), les systèmes CVC, mais aussi la prise en compte de la lumière naturelle. Une liste de critères a été établie, afin de procéder au choix d'un logiciel de STD.

Critères de sélection des outils de simulation

Cherchant à optimiser le captage solaire dans la conception architecturale, les principales qualités exigées vis-à-vis des outils de simulation étaient les suivantes :

- Validité : qu'il ait été validé par une procédure reconnue
- Performances des calculs :
 - o capacité à modéliser les phénomènes physiques réels dans leur complexité
 - o mesures à pas de temps réduit de nombreux paramètres (températures, consommations par poste énergétique, lumière naturelle, confort, ...)
 - o Possibilité de modéliser finement différents types de protections solaires
 - o Possibilité de modéliser différents systèmes CVC
 - o Ventilation naturelle
 - o Adaptation au site (impact de la localisation, masques proches et lointains, fichier météo horaire propre)
- Disponibilité de ressources documentaires variées
- Reconnaissance des milieux de la recherche et des praticiens
- Interopérabilité avec d'autres logiciels et flexibilité (dans l'usage, mais aussi quant à l'évolution de l'outil dans le temps) :
 - o Outils de CAO
 - o Autres moteurs de simulation thermique et/ou lumière
 - o Outils d'optimisation
- OpenSource (éviter le risque de « boîte noire ») et libre de droit (permettre l'utilisation par tout type d'acteur : recherche, BE, architectes, associations...)

Judkoff et Neymark (1995, 2002) ont réalisé de travaux d'évaluation de logiciels de thermique pour le bâtiment, ainsi que des tests de comparaison. Ils ont aboutit à la définition de la procédure BesTest (IEA, Agence Internationale de l'Energie), amplement répandu et faisant aujourd'hui autorité en la matière. Wetter (2005) propose des tableaux récapitulatifs très complets de comparaison des différents outils testés par le BesTest. Wurtz et al. (2010) en propose une traduction.

Les descriptions à suivre reprennent la classification proposée par Peuportier et al. (2003).

Obtenir des tendances

PHPP (« Passive House Planning Package ») : développé par le Passivhaus Institut de Darmstadt (PHPP, 2004). Il propose une approche quasi-statique du calcul des besoins de chauffage, aussi nous l'avons écarté.

ECOTECT : (Autodesk, 2011) suite logicielle comprenant un modèleur 3D ergonomique, permettant d'entrer les données utiles au calcul du comportement thermique et acoustique d'un bâtiment, ainsi que les calculs d'ombre ou d'éclairage naturel. Le moteur de calcul étant fermé (« boîte noire »), il n'est pas possible de connaître son principe de fonctionnement, mais il ne réalise pas de calculs thermiques dynamiques.

Optimiser l'enveloppe

Les outils de cette catégorie sont plus poussés et peuvent être utilisés dans un stade plus avancé de la conception. Toutefois, les systèmes énergétiques y sont simplifiés, ils ne peuvent donc pas rendre précisément compte du fonctionnement dynamique réel des systèmes.

CODYBA (« COmportement DYnamique des BATiments ») et sa version plus récente KOZIBU. Développés au Centre de Thermique de l'INSA de Lyon, leur objectif principal est de prédire la consommation d'énergie et les amplitudes de variation des températures et de l'humidité dans le bâtiment (Noël et al., 2001 et 2005). Le cœur de calcul utilise la réduction modale du problème physique, ce qui le rend très rapide.

COMFIE (de l'anglais « comfy » : confortable) est un noyau de calcul développé depuis la fin des années 80 au centre d'énergétique de l'école des Mines de Paris (Peuportier, 2005). Il a été conçu pour faire face au manque de logiciels simples d'utilisation prenant en compte la dynamique du comportement thermique du bâtiment (Salomon et al. 2005). La méthode de réduction modale est également appliquée. Il est associé aux interfaces Pléiades (saisie des bibliothèques, gestion du bâtiment, calcul et d'analyse de résultats) et Alcyone (modélisation géométrique), développées par Izuba Energies.

Dimensionner les équipements, calculer des consommations

Les outils suivants permettent de prendre en compte des phénomènes beaucoup plus complexes, parfois au détriment d'une interface ergonomique et de vitesse de temps de calcul.

ESP-R (Clarke 1985) : cet outil, aujourd'hui libre, développé au sein de l'ESRU (Energy Systems Research Unit), à l'Université de Strathclyde (Glasgow, Ecosse) permet la résolution de problèmes de thermique, d'acoustique et d'éclairage. Initialement orienté recherche, il pénètre progressivement le monde des praticiens. Il dispose d'une bibliothèque de modèles bien fournie qui a fait l'objet d'un grand nombre de tests de validation (Strachan et al. 2008) principalement dans le cadre du BESTEST-AIE. Il est considéré comme l'un des plus performants.

EnergyPlus (Pedersen et al., 1997 ; Crawley et al. 1998) : il se présente comme un gestionnaire de simulation (« simulation manager » en anglais) qui fait appel à divers types de modules, afin d'estimer les besoins énergétiques des bâtiments utilisant différentes sources d'énergie (modèle d'enveloppe de bâtiment, modèles de ciel, calcul d'ombre, boucle d'air, systèmes etc.). Il possède une bibliothèque de modèles importante, en perpétuel développement et personnalisable. Plus d'éléments sont fournis dans la partie 2.

IDA-ICE (Björzell, 1999) : ICE, pour Indoor Climate and Energy, permet de caractériser le comportement énergétique des bâtiments. Il possède une bibliothèque de modèles assez fournie avec une interface graphique conviviale adaptée aux besoins des bureaux d'étude.

SIMULINK est une plateforme de simulation multi-physique servant à la modélisation de systèmes dynamiques, développée par MathWorks. Dans cet environnement, une bibliothèque de modèles relatifs au comportement thermique du bâtiment appelée SIMBAD a été développée par le CSTB. Cette bibliothèque comprend des modèles de bâtiments multizones, ainsi que des modèles d'éléments de production (PAC, chaudière ...), de distribution (conduits, pompe...), d'émission (convecteurs, planchers chauffants...) et de régulation (Chlela 2008).

SPARK (pour Simulation Problem Analysis for Research Kernel), anciennement SPANK, est un environnement basé sur les systèmes d'équations. SimSPARK qui dérive de SPARK permet de simuler le comportement énergétique des bâtiments. Sa bibliothèque de modèles permet de prendre en compte les phénomènes couplés thermo-hydro-aérauliques au sein de l'enveloppe et d'intégrer un certain nombre de systèmes énergétiques. SIMSPARK est développé depuis maintenant une dizaine d'années en France, d'abord au LEPTAB (Laboratoire d'études des phénomènes de transfert appliqués au bâtiment, La Rochelle), puis au LOCIE (Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement, à Chambéry). (Wurtz et al., 2006)

TRNSYS (SEL et al. 2004) (« TRaNsient SYstem Simulation program ») est développé en collaboration par l'université de Wisconsin (Madison), une entreprise privée de la même ville (TESS), le groupe TransSolar en Allemagne et le CSTB en France. Il est l'un des moteurs commerciaux les plus performants actuellement.

Eléments de comparaison de 3 programmes

Différentes études de laboratoires nord-américains mais aussi français rendent compte des avantages et contraintes de différents logiciels de STD. Nous recommandons notamment la lecture de Wetter (2005), de Tittlein (2008) et de Wurtz et al. (2009 et 2010).

Dans le cadre du projet DYNASIMUL, une étude comparative de différents moteurs de calcul a été réalisée. Son coordinateur, Etienne Wurtz, relève que « si tous les outils sont en mesure de traiter les transferts de chaleur dans le bâtiment, seuls EnergyPlus, TRNSYS (associé à Comis/TRNFlow) et SimSPARK sont en mesure de traiter les transferts thermo-aérauliques couplés (et par voie de conséquence les problèmes qualité de l'air ou de ventilation naturelle). (Wurtz, 2010) Le rapport final indique que les différences les plus marquantes portent sur la modélisation des effets du vent

(aéroulque), du suivi de la tâche solaire, du calcul des apports solaire avec protections à géométrie complexe (et leur contrôle), de l'éclairage naturel ou encore du couplage conductif avec le sol.

Parmi la batterie de programmes testés, trois se distinguent : **EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS**. Ce sont les seuls programmes :

- en mesure d'effectuer des calculs d'éclairage naturel pour le contrôle de l'éclairage artificiel
- en mesure de résoudre des systèmes à événements discret (essentiel pour une représentation correcte des organes de contrôle et des équipements)
- à mettre en œuvre des calculs 2D/3D pour les transferts par conduction avec le sol
- en mesure de proposer une modélisation couplée des phénomènes thermiques et aéroulques (formulation couplée du problème pour ESP-r, itérations entre un modèle thermique et un modèle aéroulque pour les deux autres)

Par ailleurs, ces logiciels s'imposent au niveau international par leur usage, parfois massif, dans les laboratoires, bureaux d'études, cabinets d'architectes... sur les cinq continents.

4. Tests de performance : la procédure BestTest

L'Agence International de l'Energie, notamment à travers le programme *Solar Heating and Cooling* (chauffage et refroidissement solaires), a développé une procédure de test, dès le milieu des années 90. Cette procédure, nommée BESTEST (Building Energy Simulation TEST), est constituée par une série de tests et diagnostics portant sur différents composants d'un bâtiment. Il permet un examen et une comparaison des logiciels de STD, tels que BLAST, DOE2, EnergyPlus, ESP-R, Pléïades-Comfie, TASE, TRNSYS, etc. Certains laboratoires ou éditeurs de logiciels ont couplé cette validation en modélisant des bâtiments réels, afin de rendre compte de la crédibilité des résultats des simulations. (Judkoff et Neymark, 1995)

Les tests, des plus simples aux plus complexes, mesurent la capacité de calcul des charges annuelles (consommations énergétiques) et charges de pointe, les températures annuelles des zones thermiques, la modélisation de la masse thermique, des gains solaires directs par les fenêtres, les effets de l'orientation des baies, des dispositifs d'ombrage, l'infiltration parasite, les gains de chaleur internes (échanges radiatifs, équipements, métabolisme...), les transferts de conduction par le sol, les effets des vérandas, le contrôle des températures de consigne (thermostat)... Cette procédure constitue aujourd'hui une méthodologie d'évaluation de référence.

La norme ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 formalise un cadre reprenant l'ensemble de ces procédures.

1.3 Méthodes d'optimisation

Liminaire

Les recherches en optimisation, quel que soit le domaine d'application, est extrêmement prolifique depuis plusieurs années. Nous tentons ici de synthétiser ces méthodes en les replaçant dans leur logique historique, et sous leur approche contextuelle. Les questions de formalisation mathématique des méthodes ne seront pas abordées, l'objectif premier étant d'identifier les méthodes les plus utilisées aujourd'hui, et particulièrement dans le champ qui nous intéresse, puis d'en appliquer une. Nous présentons donc en fin de chapitre une série d'outils et techniques permettant de combiner optimisation dans le cadre de conception de bâtiments « basse énergie ».

Jacquenot (2010) rappelle que les problèmes d'optimisation peuvent être combinatoires ou continus (ou un mélange des deux types). Résoudre un problème d'optimisation combinatoire, c'est trouver l'optimum d'une fonction, parmi un nombre fini de choix, souvent très (trop) important. L'optimisation peut porter sur un ou plusieurs objectifs.

Différentes méthodes existent pour satisfaire les besoins de résolutions de tels problèmes. Parmi les plus performantes, les approches évolutionnaires rassemblent un large panel d'outils qui ont déjà démontré leur robustesse. De fait, elles sont prépondérantes dans les lignes qui suivent.

Des méthodes dites « de recherche directe » apportent elles aussi des motifs de satisfaction. La combinaison de ces deux approches constitue depuis plusieurs années l'une des pistes d'évolution des recherches en la matière. En effet, l'hybridation de métaheuristiques avec des méthodes d'optimisation locale exploitent au mieux les avantages des deux méthodes. Pour autant, il n'est de méthode universelle qui puisse répondre seule aux multiples objectifs d'une diversité de problèmes.

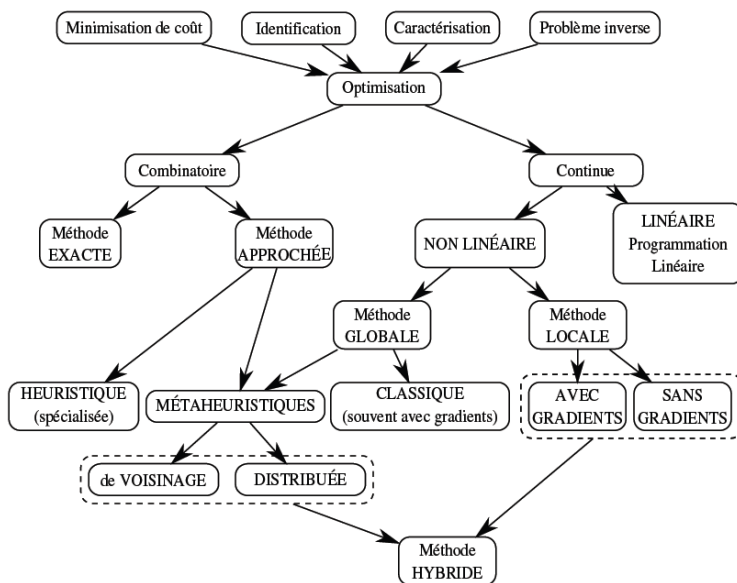


Figure 15 : Classification générale des méthodes d'optimisation (Jacquenot, 2010, d'après Collette et Starry, 2002)

1.3.1. Les approches évolutives (AE)

La logique même des AE et des algorithmes qui en découlent nécessite un rappel théorique et sémantique quant aux principes de l'évolution connus à ce jour. Notons d'ors et déjà que, inspirées des théories de l'évolution naturelle (qu'elles soient néo-darwinienne, lamarckienne ou baldwinienne), les méthodes évolutives extrapolent généralement l'évolution naturelle vers une conception artificielle de l'évolution. Comme le rappelle Marsault (2011), les modélisations informatiques peuvent rarement reproduire l'expérience sur de courtes expériences de temps et sans poser des hypothèses incontestables, notamment en ce qui concerne la « survie des individus faibles », la mémoire génétique sur plusieurs générations.... Il ne s'agit donc pas de calquer véritablement des phénomènes naturels, mais de s'en inspirer.

1. AE, éléments sémantiques : théorie de l'évolution

a) Terminologie et définitions

La génétique est la science de l'hérédité et de la variation, selon Bateson (1905). L'expression génétique des individus d'une population s'exprime par trois principaux termes, qui sont ensuite réinterprétés en termes informatiques :

Allèles : formes que peut prendre un même gène et qui se manifestent de façon visible sous la forme d'un phénotype

Génotype : ensemble ou partie donnée de la composition génétique d'un individu ; porté par les chromosomes, il représente son patrimoine héréditaire (liste complète des allèles de tous les gènes), transmis des parents à leurs descendants

Phénotype : ensemble des traits observables (anatomiques, morphologiques, moléculaires, ...) d'un individu. Il dépend des gènes et des conditions du milieu. La diversité des phénotypes est un élément fondamental de l'évolution par sélection naturelle.

Selon Darwin, la nature utiliserait le hasard et la sélection naturelle pour faire évoluer graduellement les espèces ; ce sont les deux principes qui sous-tendent les premiers algorithmes évolutives. L'approche baldwinienne apporte l'hypothèse selon laquelle la sélection ne se fait pas uniquement selon des caractéristiques innées des individus, mais aussi en fonction de leur expérience : elle dépend à la fois de l'aptitude de l'individu à apprendre et à s'adapter à son milieu.

Schématiquement, plusieurs mécanismes sont à l'œuvre (Marin, 2010) :

- Les caractéristiques d'un organisme sont en grande partie codées dans ses gènes,
- Chaque population d'organismes est composée d'individus tous différents,
- Les différences entre individus leur confèrent une adaptation plus ou moins grande à leur environnement,
- Les organismes transmettent une partie de leurs caractéristiques à leurs descendants,
- Les individus les plus adaptés se reproduisent plus « efficacement », leurs caractéristiques ont donc tendance à davantage se répandre dans la population

b) De la théorie de l'évolution à l'informatique

Les éléments qui précèdent se retrouvent, comme nous le verrons, au centre des intérêts des chercheurs en matière de stratégie d'optimisation. De fait, le vocabulaire « courant » se compose des termes :

- Population (parents et descendants), générations
- Individus : solutions potentielles
- Chromosomes : ensemble de gènes
- Gènes : variables
- Allèles : valeurs que peuvent prendre les variables
- Génome, génotype et phénotype
- Sélection
- Reproduction
- Transformations : croisement, mutations (émergence de nouveauté et chromosomes originaux, mais également disparition potentielle de séquences génétiques « efficaces »)
- *Fitness* : fonction-objectif ou fonction d'évaluation. Comme le souligne Marsault (2011), l'évolution des systèmes biologique ne fait pas intervenir de *fitness*

De manière triviale, chercher à optimiser une fonction en s'inspirant des processus de l'évolution consiste à trouver les diversités d'assemblages génétiques et les capacités d'adaptation au milieu, assurant au mieux la survie des individus, cette capacité de survie étant mesurée par une *fitness*. Les approches évolutionnaires en informatique font régulièrement intervenir :

- Des mécanismes de sélection, dont le critère est une fonction d'évaluation du programme (« performance » de l'individu)
- L'algorithme passe par des phases de recombinaison, mutation et sélection des individus, assure un héritage génétique, et ainsi la diversité de l'espèce, qui contribue donc à lutter contre une convergence prématurée d'un algorithme vers une solution qui ne serait pas globalement optimale
- Des probabilités de reproduction en fonction du degré de réponse à la *fitness*
- ...

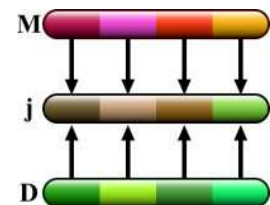


Figure 16 : Croisements et mutations (Rutten, 2010)

2. AE : classification

Les approches évolutionnaires ont historiquement été convoquées dans différents champs de la recherche pour résoudre des problèmes complexes, notamment de résolution de fonctions non-linéaires ou/et soumises à des contraintes, ou encore pour des problèmes demandant des temps de calcul trop longs. Marsault (2011) souligne que les premiers algorithmes évolutionnaires ont initialement été utilisés comme des heuristiques d'optimisation, en particulier pour ces problèmes dits « difficiles ».

On admet communément quatre principales familles historiques :

- Programmation évolutionnaire (Fogel, 1966) : méthode d'intelligence artificielle pour la conception d'automates à états finis
- Stratégies évolutives (Rechemberg, 1973) : résolution de problèmes d'optimisation continus
- Algorithmes génétiques (JH Holland, 1975) : optimisation combinatoire (ou discrète) ; ex : trouver plus court chemin entre deux sommets d'un graphe (sans tester l'intégralité des solutions)
- Programmation génétique (Koza, 1992) : construction automatique de programmes

Les trois premières familles ont ensuite beaucoup évolué et ont convergé vers la catégorie générique d'algorithmes évolutifs, complétés par les algorithmes à estimation de distribution et l'évolution différentielle :

- Les algorithmes mémétiques (Moscato, 1989) sont des algorithmes évolutifs hybridés avec une méthode de recherche locale, vouée à atteindre l'optimum global
- les algorithmes à estimation de distribution (Mühlenbein et Paaß, 1996)
- les algorithmes à évolution différentielle (Price et Storn, 1997)

3. Principe général d'un algorithme génétique (AG)

Nous exposons brièvement le fonctionnement d'un AG dans les lignes qui suivent, comme illustration de la logique qui gouverne le fonctionnement de base des approches bio-inspirées.

D'après Rennard (2000), « l'idée fondamentale de Holland était la suivante : le pool génétique d'une population donnée contient potentiellement une meilleure solution à un problème adaptatif donné. Cette solution n'est pas exprimée car la combinaison génétique sur laquelle elle repose est dispersée chez plusieurs individus. »

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. La démarche consiste à identifier les paramètres qui génèrent une optimisation. Puis, ces paramètres sont encodés sous forme de gènes, leurs valeurs (allèles) étant soumises à l'évolution, et la fonction *fitness* évaluée. Autin (2006) identifie cinq éléments nécessaires à un AG :

1. Un principe de codage de l'élément de population : cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données.
2. Un mécanisme de génération aléatoire de la population initiale, qui doit être capable de produire une population d'individus non homogène, qui servira de base pour les générations suivantes. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global.
3. Une fonction à optimiser (*fitness*, fonction d'évaluation de l'individu), dépendant de la proximité des différents individus avec l'objectif.
4. Une sélection des individus devant se reproduire en fonction de leurs parts respectives dans l'adaptation globale (fonctions de transition probabilistes, non déterministes). Des

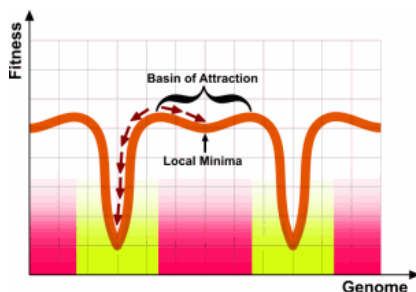
opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'états. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.

- Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Une fois les génomes des parents croisés, on obtient un nouveau pool génétique, avec lequel on repart du point 3. Un AG consiste donc à construire et évaluer une population initiale, jusqu'à atteindre un critère d'arrêt (par exemple un nombre maximum de générations) :

- sélection d'une partie de la population,
- reproduction des individus sélectionnés,
- mutation de la descendance,
- évaluation du degré d'adaptation de chaque individu,
- remplacement de la population initiale par une nouvelle population.

Il existe toujours au moins un opérateur utilisant un processus aléatoire, au minimum pour la construction de la population initiale et pour la mutation, mais souvent pour la sélection et la reproduction également.



Graphique 8 : Minimum local (Rutten, 2010)

Cette formalisation rapide reflète la philosophie générale des AE. Toutefois, les AE « classiques » présentent certaines faiblesses : favorisation de l'élitisme (élimination trop rapide d'individus moins performants), convergence rapide vers des optimums locaux, et parfois des solutions uniques, etc. Ce manque de robustesse est plus inopérant encore dans le cadre de recherches d'optimisation multi-objectif, où l'on cherche à optimiser une fonction suivant plusieurs critères, dont certains peuvent être antagonistes, et où il est intéressant d'explorer de nombreuses régions de l'espace.

Pour répondre à de tels problèmes, les connaissances acquises grâce aux « familles historiques » ont permis de développer de nouvelles approches.

1.3.2. AE : tendances contemporaines et apports dans le champ architectural

Marin (2010) rappelle que les approches bio-mimétiques sont des méthodes de résolution de problèmes, dont l'objectif est de répondre à des problèmes non-linéaires, discontinus voire chaotiques. Les algorithmes développés cherchent à pallier les limites des méthodes purement analytiques, pour lesquelles le problème doit être régi par des fonctions continues et dérivables. Il montre que les algorithmes évolutionnaires constituent des méthodes de résolution de ces

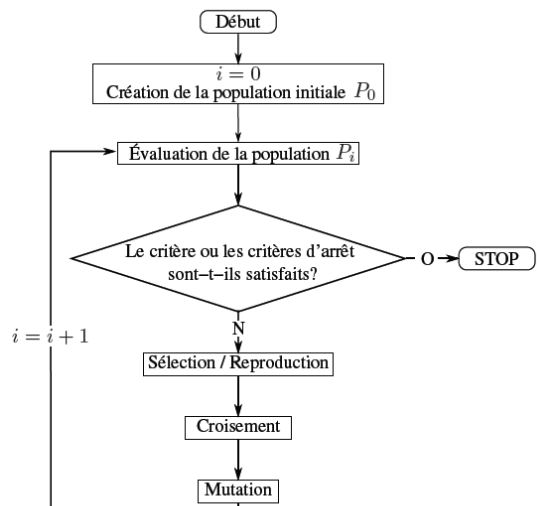


Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un AG (Jacquenot, 2010)

problèmes complexes, à la fois polyvalents, simples et robustes (notamment face aux optima locaux). Toutefois, elles peuvent souffrir d'un certain nombre de limites. Pour ces raisons, de nombreuses recherches, tant théoriques qu'appliquées, grouillent de plus en plus d'approches évolutives « nouvelle génération », comme c'est le cas depuis plus de 10 ans dans le champ de la conception architecturale.

1. *AE et architecture*

La conception évolutive se situe aux frontières des sciences informatiques, de la conception et de la biologie évolutive. Dans le domaine architectural (et même de la construction), on procède généralement au couplage d'un logiciel de CAD et d'un logiciel d'analyse (Marin, 2010). Deux types de démarches se distinguent :

- celles vouées à l'optimisation, que nous développerons dans la suite de cette section
- celles assurant un support à un mécanisme créatif : dans ce domaine, les AE peuvent constituer un moteur d'aide à la conception (design), favorisant la morphogenèse
- notons qu'une approche mixte « créativité-performance » est également envisageable. C'est la philosophie du projet Ec-Co-Gen.

La logique d'optimisation dans le champ architectural est récurrente depuis la fin des années 1990. On note notamment un recours régulier et diversifié à cette approche concernant la thermique du bâtiment (basse énergie), l'optimisation de l'éclairage naturel, le « bilan carbone », les coûts de construction, le dimensionnement des systèmes CVC, etc. Ces méthodes se retrouvent également dans l'optimisation des dimensionnements structurels.

Dans le domaine bâtiment/énergie, le souci de répondre à des problèmes multi-objectifs a contribué au développement d'algorithmes plus poussés, comme les NSGA (non-determinate sorted genetic algorithm) utilisant l'optimal de Pareto², ou les métaheuristiques hybrides, décrits plus loin dans ce rapport. Ces solutions présentent l'avantage de ne pas orienter le champ des solutions optimales autour d'un seul objectif, mais bien de combiner un ensemble de paramètres, en parcourant amplement l'espace des solutions, réduisant les risques de buter sur un optimum local. De cette manière, une plus grande variété de solutions est possible, une plus grande liberté est laissée au concepteur, et un compromis plus large est permis, par exemple entre une approche architecturale et des performances techniques.

Ces approches plus « performantes » sont notamment amorcées par Caldas et Norford (1999, 2000, 2003). Le nombre de publications mondiales croisant AE et puissants moteurs de calcul connaît dès 2000 une croissance notable. Des laboratoires tels que Lawrence Berkeley National Laboratory (USA, Californie), le Massachusetts Institute of Technology (MIT) ou le Laboratoire d'Energie Solaire (LESO) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Suisse) se sont progressivement emparés de ces approches et ont commencé à développer des outils. Progressivement, ces logiques se diffusent plus largement.

² En économie, un optimum de Pareto est un état dans lequel on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre.

Dans l'hexagone, nous remarquons le développement l'outil Optisol (Optisol, 2008 ; Pernodet et al., 2009), par des centres de recherche français (CSTB et Ecole des Mines de Paris), associant TRNSYS et un AG développé par Turkkan (2006). Néanmoins, une seule solution « optimale » est disponible. Les travaux de Flory-Celini (2008) et de Vitte (2007) abordent également le couplage d'outils de STD avec des approches évolutionnaires, mais sans plus de précisions outre mesure.

Ces méthodes se diffusent aussi parce qu'elles sont extrêmement flexibles et peuvent être utilisées en différentes phase du processus de conception. Les AE peuvent générer des formes et orientations par exemple, tout comme elles peuvent « recommander » des dispositions d'espaces, répartir les surfaces vitrées, leurs tailles, etc. à partir d'une intention morphologique relativement simple.

Les possibilités de couplage de ces approches avec des moteurs de calculs performants permettent de croiser des paramètres difficiles à concilier au moment de la conception, étant parfois incertain d'en mesurer, parfois même qualitativement, les implications sur d'autres critères. Il est, dans ce sens, primordial d'effectuer un choix de programmes souples et adaptables, qui puissent s'intégrer, se combiner, se compléter.

2. Les métaheuristiques

De nombreux problèmes d'optimisation ne peuvent être résolus de manière exacte. Ce sont des problèmes « difficiles », souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique efficace (pas de solution mathématique ou algorithmique). Des heuristiques de résolution ont ainsi été conçues. Aucune propriété de continuité ni de dérivabilité n'est nécessaire au bon déroulement de ces méthodes. (Autin, 2006)

Les applications concrètes sont nombreuses : production industrielle, transports, économie... partout où se fait sentir le besoin de minimiser des fonctions numériques, dans des systèmes où interviennent simultanément un grand nombre de paramètres. A ces problèmes de minimisation, les métaheuristiques permettent, dans des temps de calcul raisonnables, de trouver des solutions, peut-être pas toujours optimales, mais souvent très proches d'un optimum. (Autin, 2006)

Définition et types

Composé des mots grecs « heuristique » (heuriskein=trouver) et « meta » (au-delà, dans un niveau supérieur). Feigenbaum et Feldman (1963) définissent une heuristique comme une règle d'estimation, une stratégie, une astuce, une simplification... toute stratégie réduisant considérablement la recherche des solutions dans l'espace des configurations possibles et favorisant les chances de rencontrer un optimum global.

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction non-linéaire, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution.

Elles viennent donc renforcer considérablement l'approche « classique » (qui procédait principalement par transformations génétiques « pures »), en jouant sur l'apprentissage (accumulation de l'expérience durant la recherche de l'optimum, pour mieux guider la suite du processus de recherche), l'autoadaptation d'une population d'individus, la parallélisation (pour ne pas bloquer la recherche dans un optimal local), les comportements d'exploitation ou d'exploration d'un espace de recherche, etc.

Les plus connues sont (Marsault, 2011) :

- le recuit simulé (inspiré par la thermodynamique),
- les AE (inspirés par l'évolution des populations biologiques),
- les algorithmes de colonies de fourmis (inspirés par le comportement collectif et stigmergique d'insectes sociaux),
- l'optimisation par essaims de particules (inspirée du comportement des oiseaux, des insectes et des poissons, lesquels convergent collectivement vers un objectif en n'ayant qu'une perception locale de leur environnement).

Classement : approches « population » et « recherche directe »

Les approches « population » (ou évolutionnaires) consistent à travailler avec un ensemble de solutions simultanément, et de les faire évoluer graduellement. Ces méthodes permettent d'améliorer l'exploration de l'espace des solutions. Mentionnons :

- les algorithmes génétiques
- les algorithmes par colonies de fourmi
- l'optimisation par essaim particulaire
- les algorithmes à estimation de distribution
- ...

Les méthodes de recherche directe, également appelées approches « trajectoire » ou de « recherche locale », proposent des algorithmes partant d'une solution initiale (obtenue de façon exacte, ou par tirage aléatoire) et s'en éloignant progressivement, pour réaliser un parcours progressif dans l'espace des solutions.

Luersen (2004) rappelle que les méthodes de recherche directe sont apparues dans les années 50 et 60. Parmi elles, il relève les algorithmes de Box (1957), Hooke et Jeeves (pattern search method, 1961), Spendley, Hext et Himsworth (1962), Powell (1964), et l'algorithme de Nelder-Mead (1965). Il classe ces méthodes de recherche en trois sous-groupes :

- les méthodes de recherches par motifs généralisés (*generalized pattern search methods*, GPS),
- les méthodes des directions conjuguées (algorithme de Powell et variantes),
- les méthodes basées sur la figure géométrique d'un simplexe (méthode de Nelder-Mead et variantes).

Luersen (2004) explique que les GPS généralisent la méthode de Hooke et Jeeves (1961). La spécificité de ces méthodes est que les directions de recherche ne changent pas au cours des

itérations. Les GPS sont caractérisées par une série de déplacements exploratoires autour du point courant. Ces déplacements forment des motifs qui présentent une disposition invariable (patterns). A chaque itération, la fonction-objectif est évaluée sur les points du motif. Si une amélioration est trouvée, le point associé est accepté comme nouveau point courant, et la taille du motif suivant est conservée ou augmentée. Sinon, la taille du nouveau motif, généré autour de l'ancien point courant, est réduite. Les GPS présentent des propriétés de convergence robustes pour des fonctions continues, différentiables et bornées. Certaines métaheuristiques font usage de l'historique de la recherche au cours de l'optimisation.

Enfin, certaines métaheuristiques utilisent les concepts de diversification et d'intensification. La diversification permet une exploration assez large de l'espace de recherche et la découverte de nouvelles zones contenant éventuellement de meilleures solutions. L'intensification met plus l'accent sur l'exploitation de l'information accumulée durant la recherche, en dirigeant l'effort de recherche vers les meilleures solutions. Le bon dosage de ces deux ingrédients est important pour que l'exploration puisse rapidement identifier des régions de l'espace de recherche qui contiennent des solutions de bonne qualité, sans perdre trop de temps à exploiter des régions moins prometteuses. Cet équilibre dépend du problème à résoudre, de son paysage de recherche, et des réglages de l'algorithme utilisé.

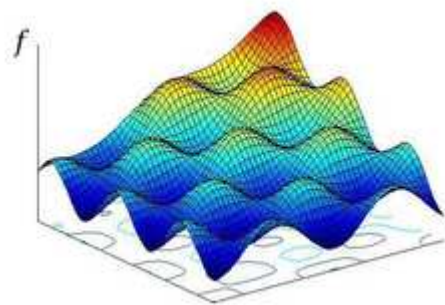


Figure 19 : Fonction multimodale à deux variables (Luersen, 2004)

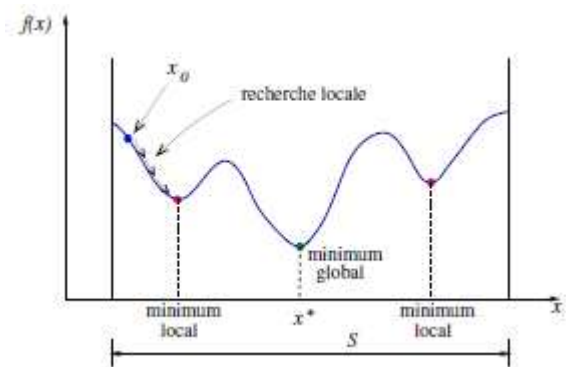


Figure 18 : Minima locaux et minimum global d'une fonction à une variable (Luersen, 2004)

Intérêts des métaheuristiques pour cette recherche

Pour notre recherche, nous mentionnons avec Marsault (2011) les avantages suivants :

- l'optimisation multicritère, où il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. La recherche vise non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima « au sens de Pareto³ » formant la « surface de compromis » du problème, qu'il s'agira ensuite d'explorer « manuellement »
- l'optimisation multimodale, dont le but est de trouver un ensemble d'optima locaux de bonne qualité, sans nécessairement se limiter au seul optimum global. Les variantes de type

³ En économie, un optimum de Pareto est un état dans lequel on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre. En somme, le front de Pareto permet de trouver l'ensemble des solutions permettant d'optimiser de manière équilibrée des objectifs « contradictoires ».

multipopulations exploitent en parallèle plusieurs populations qui s'attachent à détecter plusieurs optima distincts

- l'hybridation, qui vise à tirer parti des avantages respectifs de méta-heuristiques différentes en les combinant. Souvent, elle convoque une méthode désormais classique de « recherche locale », qui, partant d'une solution initiale arbitraire ou donnée, sélectionne de proche en proche une solution voisine. La force de cette technique dépend bien sûr du type de fonction de voisinage choisi.

3. Les algorithmes performants : métaheuristiques hybrides

Utilisés depuis plus de 10 ans dans le domaine de l'optimisation énergétique du bâtiment, les algorithmes évolutionnaires font l'objet de recherches quant aux stratégies les plus performantes. Quelques articles récents présentent un intérêt direct et ont orienté nos choix d'algorithmes : Caldas (2001), Wetter et Wright (2004), Crawley (2006), Kämpf et al. (2010).

NSGA II

Le NSGA-II (Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II) est l'un des algorithmes génétiques multi-objectifs de référence. La plupart des nouvelles métaheuristiques à population lui sont comparées. La littérature abonde d'algorithmes multi-objectifs, dont les premiers datent des années 1980. Mentionnons ici ceux qui apparaissent régulièrement dans le champ de la performance énergétique du bâtiment : VEGA, MOGA, NPGA2, etc. Les différences entre tous ces algorithmes résident dans la manière dont sont réalisées les diverses opérations génétiques, dont l'élitisme est pris en compte, etc.

Le NSGA-II est un algorithme élitiste qui cherche à obtenir rapidement les solutions efficaces du problème tout en conservant une diversité dans l'espace des objectifs. L'élitisme permet à l'algorithme de ne perdre aucune solution efficace. Caldas et Norford (2002) s'en servent pour localiser et dimensionner les baies, afin d'optimiser la consommation annuelle d'énergie (chauffage, lumière, refroidissement), ou encore le système CVC. Wright et al. (2002) ont recours à une MOGA (multi-objective optimization using GAs), qui cherche le front de Pareto entre coût énergétique et confort des occupants.

CMA-ES/HDE

Cette métaheuristique est le résultat de l'hybridation de deux approches évolutionnaires : CMA-ES et HDE.

La dénomination « CMA-ES » est un acronyme pour l'anglais Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategies (stratégies d'évolution avec adaptation de matrice de covariance ; une matrice de variance-covariance est une matrice carrée caractérisant les interactions linéaires entre p variables aléatoires). La méthode a été proposée par A. Gawelczyk, N. Hansen, et A. Ostermeier (1995, 2003). En 2005, cette méthode était l'une des meilleures métaheuristiques pour les problèmes continus.

Elle repose sur l'adaptation, au cours des itérations, de la matrice de variance-covariance de la distribution multi-normale utilisée pour la mutation des individus. Une adaptation des paramètres de mutation permet de tenir compte des progrès accomplis par les individus sélectionnés. Une description détaillée de l'algorithme CMA-ES peut être trouvée dans Hansen & Ostermeier (2001).

Le HDE est une forme modifiée de l'original DE (évolution différentielle) par l'ajout d'une phase de migration, après la phase de sélection. La population d'individus est choisie aléatoirement dans les limites du domaine. Une technique de migration déplace les variables des individus vers les frontières du domaine, lorsque la diversité de la population est trop faible. La diversité mesure la proximité des individus regroupés autour du meilleur individu. Une description détaillée de l'évolution différentielle (DE) peut être trouvée dans Feoktistov (2006) et sur sa forme modifiée HDE dans Chang et al. (2007). On peut classer l'évolution différentielle parmi les méthodes métaheuristiques stochastiques d'optimisation. D'après la classification acceptée, l'évolution différentielle est inspirée par les algorithmes génétiques et les stratégies évolutionnistes combinées avec une technique géométrique de recherche.

Kämpf et al. (2010) démontrent que cette hybridation fonctionne bien, en la testant sur une optimisation multi-objectif, portant sur la maximisation de l'irradiation solaire.

PSO/HJ

Il s'agit d'un algorithme mémétique, résultant de l'hybridation de deux méthodes :

- PSO : particle swarm optimization (optimisation par essaim de particules), métaheuristique évolutionnaire (approche « population »)
- HJ : algorithme de Hooke and Jeeves, de la catégorie GPS (méthodes de recherche directe)

L'optimisation par essaim de particules est une méthode d'optimisation stochastique, pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social et développée par Eberhart et Kennedy (1995). L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons. Ces simulations ont mis en évidence la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage. (Calas, 2009)

Ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersées de façon aléatoire dans un espace de recherche. Dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont chercher à reproduire son comportement. Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus.

L'hybridation consiste à lancer le PSO sur un certain nombre de générations, puis à lancer une recherche locale à partir du point le plus bas de l'espace trouvé. Wetter et al. (2004) et Kämpf et al. (2010) le classent parmi les plus performants dans le champ de l'optimisation énergétiques du bâtiment.

1.3.3. Le théorème du « No Free Lunch »

Introduit par David Wolpert and William G. Macready en 1995, ce théorème énonce qu'il n'existe pas de méthode universelle assurant une performance pour tout problème complexe. Les auteurs expriment le fait qu'il existe un AE optimal par problème. Ce qu'un algorithme d'optimisation gagne sur un problème par rapport à d'autres algorithmes, il le perd sur un autre. La recherche en optimisation, pour être pertinente, doit lier l'algorithme au problème. (Marsault, 2011)

Pour autant, il faut se garder des surinterprétations de ce théorème, en sous-estimant les potentialités de ces méthodes ou en mettant en doute leur fiabilité, en dépit des succès avérés dans différents domaines industriels, financiers, etc.

« Les algorithmes évolutionnaires sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur un parallèle grossier avec l'évolution darwinienne des populations biologiques. Ils fournissent une approche heuristique, à l'occasion performante, et dans certains cas prouvée », Marc Shoemaker, cité par Marsault (2011).

1.3.4. Panorama des outils d'optimisation énergétique pour le bâtiment

Enfin, nous passons en revue une liste non-exhaustive d'outils informatiques récemment conçus en vue d'améliorer les performances thermiques des projets de construction. Certains mobilisent des approches évolutionnaires, d'autres sont dans une approche de modélisation paramétrique.

BEopt (Christensen, 2005) : développé pour le NREL, ce logiciel cherche des modèles de construction optimale pour des « bâtiments zéro énergie ». L'utilisateur sélectionne les variables de différentes composantes de l'édifice. La combinaison la plus performante en terme d'énergie et de production d'électricité PV est recherchée. BEopt utilise les moteurs énergétiques DOE-2 (LBNL, 1982) et TRNSYS (TRANSYS, 2007), couplés à une recherche séquentielle, qui automatise le processus de recherche d'un optimum (Christenson and Horowitz, 2006). Une interface graphique permet de sélectionner des options prédéfinies des variables. Ce programme est plus orienté pour les Etats-Unis, le nombre d'options est souvent très limité, et le résultat « optimal » est unique.

OptEPlus (Flager 2008) : structure d'analyse utilisant EnergyPlus (DOE, 2007) couplé à des routines de recherche pour identifier les stratégies pour une conception optimale du bâtiment. Le programme consiste en une collection de fichiers d'entrée, de fichiers de sortie, d'un jeu de dossiers et d'un modèle de données XML permettant le transfert des données à travers les divers composants. De nombreuses données sources sont intégrées au programme. La visualisation des solutions est cependant limitée, et l'optimisation multi-objectif n'est pas prise en charge.

GENE_ARCH : issu des premiers travaux de Caldas et Nordford (1999), GENE_ARCH est un modèle de conception générative, basé sur une approche évolutionnaire. Le système combine initialement un AG, puis un NSGA-II avec DOE-2, pour des problèmes multi-objectif contraints (Caldas, 2006). Le programme dispose de fonctionnalités de génération morphologique avancées, il est évolutif et a des

bonnes capacités de visualisation. L'optimisation multidisciplinaire entre plusieurs moteurs de simulation n'est pas possible.

GenOpt (Wetter, 2000) est un programme générique d'optimisation, utilisé par les programmes de simulation utilisant des fichiers texte en entrée et sortie. L'outil dispose d'une bibliothèque composée de différents algorithmes d'optimisation, qui fonctionnent avec des variables continues ou discrètes. La modularité, la flexibilité et la quantité de stratégies d'optimisation en fait une plateforme robuste. Toutefois, elle pâtit de capacités visuelles limitées.

JEplus (Zhang, 2009) : il s'agit d'une interface pour des études paramétriques avec EnergyPlus, qui permet d'explorer l'intégralité d'options de conception fixées par l'utilisateur (plusieurs variables de conception simultanément). JEplus réalise une recherche exhaustive qui, par une grille de recherche assez fine, peut aboutir à une solution globale optimale. JEplus peut effectuer des analyses paramétriques complexes, avec des variables multiples, et facilite ensuite l'analyse (notamment comparative) des résultats. S'il permet de disposer de l'ensemble des fichiers de sortie pour chaque ensemble de paramètre, il nécessite des temps de calculs longs et un espace de stockage certain, pour les centaines de fichiers de sortie générés.

DIVA for Rhino : Rhinocéros est un modéleur 3D pour la conception de formes non-standard (NURBS pour Non-Uniform Rational Basis Splines). Le module Grasshopper qui lui est associé permet une modélisation paramétrique, c'est-à-dire la définition de paramètres variables, offrant ainsi la possibilité de transformations morphologiques diverses. Ces transformations peuvent être d'ordre dimensionnel, mais aussi concerner la forme de surfaces (plane, incurvée), leur maillage (une face peut être divisée en des mailles, et de cette manière le nombre de fenêtres, par exemple, peut être portée de 0 à 10 sur une surface donnée), etc. Les modifications sont faites par le biais de curseurs (*sliders*), paramétrés au préalable.

Le plugin DivaforRhino (Reinhart, 2004) permet d'associer l'environnement Rhino/Grasshopper avec Radiance/DaySim, et ainsi de visualiser et de mesurer précisément l'impact de modifications morphologiques sur le captage de lumière naturelle et l'autonomie en lumière du jour. Courant juillet 2011, un article rédigé pour la Conférence internationale IBPSA (novembre 2011) annonce une nouvelle version de DIVA, disponible en fin d'année, intégrant DaySim et EnergyPlus pour le calcul des charges de chauffage et de refroidissement. (Jakubiec et Reinhart, 2011)

La vidéo de démonstration suggère des mesures en temps réel des impacts de la morphologie sur les consommations énergétiques, mais nous ne disposons malheureusement pour l'heure d'aucun élément sur les modèles utilisés, ni sur les temps de calcul. Notons également que la vidéo montre l'expérimentation du plugin sur un modèle standard (orthogonalité). Si DIVA 2.0 permet l'exploration de multiples solutions, avec une action directe de l'utilisateur, il n'assure pas de trouver un éventail de solutions optimales. Il ne permet l'affichage que d'une seule solution à la fois. Néanmoins, il constitue potentiellement un outil précieux et précis pour l'exploration morphologique et la compréhension des impacts énergétiques.

Nous allons maintenant puiser dans cet éventail de connaissances, méthodes et logiciels, afin de conduire cette recherche.

2. Chaleur et lumière : de la modélisation des phénomènes physiques à leur optimisation

L'utilisation de moteurs de simulation pour répondre à des problèmes complexes d'ingénierie est en augmentation. Ces problèmes impliquent généralement plusieurs variables indépendantes, et souvent des critères d'évaluation multiples et contradictoires. Ils ne peuvent donc être optimisés que par le biais d'outils numériques. Cette partie décrit l'environnement logiciel choisi pour répondre aux objectifs de cette recherche.

Compte-tenu des exigences et des critères que nous nous étions fixés, et en l'état des connaissances des phénomènes physiques qui régissent les principes de transferts thermiques et de lumière, mais aussi des stratégies récentes en mesure de les optimiser, nous avons fait le choix des programmes libres de droits :

- EnergyPlus (LBNL, 1998) pour les simulations thermiques et d'autonomie en éclairage naturel
- GenOpt (LBNL, 1998) comme interface au moteur algorithmique
- Sketchup (Google, 2008) pour les visualisations
- Utilitaire interne : programme écrit en Visuel Basic (CRAI, 2011)

2.1. Energie et lumière : EnergyPlus



2.1.1. Présentation générale du logiciel

1. Généralités

Développé depuis la fin des années 90 par le Lawrence Berkeley National Laboratory, pour le compte du Département Américain de l'Energie (DOE), il est issu de la fusion de deux moteurs de calculs (DOE-2 et Spark), que le DOE souhaitait regrouper en un seul pour recentrer ses financements. Le langage de programmation est Fortran. Le projet EnergyPlus compte comme acteurs le U. S. Army Construction Engineering Research Laboratories (CERL), l'Université de l'Illinois (UI), le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), l'Université de l'Etat d'Oklahoma (OSU), GARD Analytics, le Centre de l'Energie Solaire de Floride (FSEC) et le DOE.

En développement permanent, il propose régulièrement de nouvelles modélisations (modèles de ventilation, de lumière naturelle, nouveaux composants d'équipements CVC, etc.). Actuellement à la version 6.0, 2 mises à jour sont proposées chaque année.

2. Avantages pour cette recherche

Aspects pratiques

Documentation : le logiciel dispose d'une documentation conséquente, tant en termes d'usage qu'en termes scientifiques (bases d'ingénierie des algorithmes de calculs et autres modèles). De nombreux documents techniques, fichiers et ressources variées sont mis à disposition.

Utilisateurs : le programme est utilisé par une large communauté de plus de 85.000 usagers réguliers sur tous les continents. Un forum très fréquenté et réactif a été créé.

Fichiers météo : il existe plusieurs milliers de fichiers météo horaires pour l'ensemble du globe. Il est aussi possible d'en obtenir de nouveaux, issus des données statistiques de Météonorm.

Qualités techniques

Sur la plan technique et calculatoire, sa performance est reconnue. Il permet de traiter, à différents degrés de précision, les calculs des charges de chauffage/refroidissement (avec de nombreux systèmes), la ventilation (naturelle, mécanique et mixte), la lumière naturelle et artificielle, etc. Par ailleurs, un module plus récent permet d'aborder un projet sous l'angle de son cycle de vie (ACV).

Wurtz et Thiers (2011) affirme qu'« au niveau international, les deux environnements de simulation du bâtiment les plus complets sont EnergyPlus et TRNSYS (Crawley et al., 2005). Ils permettent de coupler un modèle de l'enveloppe aux modèles des équipements issus de leurs bibliothèques. »

La force du logiciel EnergyPlus est, entre autres, de permettre à l'utilisateur de simuler toutes sortes d'arrangements de systèmes et d'avoir le contrôle sur tous les paramètres de la simulation. A chaque nouveau modèle, il passe la procédure Bestest.

Soulignons néanmoins que l'usage des fonctionnalités plus avancées nécessite un bon niveau de connaissance de l'outil, ce qui prend d'autant plus de temps que l'interfaçage est aujourd'hui relativement modeste.

Interfaces graphiques : critères de choix et disponibilité

Cette faiblesse, régulièrement évoquée, d'EnergyPlus est son absence d'interface graphique intégrée (GUI : Graphical User Interface). Dans la version « de base », la description géométrique se fait dans un fichier texte. Mais de nombreuses interfaces, de plus ou moins bonne qualité, libres de droits ou sous licence commerciale, ont été développées. A l'heure actuelle, trois d'entre elles sont particulièrement intéressantes, tant du point de vue ingénierie que du point de vue de la conception architecturale. Notre choix d'un modèleur 3D de conception et de visualisation portait sur des critères de qualité et de facilité d'usage, d'usage régulier par les praticiens et chercheurs et de coût.

Interfaces disponibles :

Parmi les GUI disponibles, Autodesk Ecotect est une solution intéressante, mais commerciale, dont les autres atouts ne suffisent pas à justifier son utilisation. L'interface la plus aboutie et la plus intégrée avec EnergyPlus est résolument DesignBuilder (également sous licence commerciale), conçue à cette fin. Rhinoceros devrait également pouvoir, à terme, constituer un support de conception graphique pour EnergyPlus. Cela serait d'autant plus intéressant que le CRAI développe des compétences concernant ce logiciel.

A noter qu'à l'automne 2011 devrait sortir la nouvelle version d'EnergyPlus, comportant une interface complète, qui devrait changer considérablement l'usage du logiciel. En effet, la description

complète du modèle devrait pouvoir se faire intégralement à travers une interface graphique unique, y compris pour les équipements CVC.

SketchUp : l'usage de plus en plus fréquent de l'outil Google SketchUp, ainsi que l'existence d'une version libre et de différents *plugins* nous intéressant directement nous a poussés vers ce choix. Le NREL a développé une suite de programmes, nommée OpenStudio (NREL, 2008) visant à faciliter le traitement des fichiers d'entrée et de sortie d'EnergyPlus. Ces programmes sont diffusés librement, et il intègre un plugin OpenStudio for SketchUp. Il permet de pré-paramétrer des fichiers EnergyPlus et facilite la définition géométrique des bâtiments. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une interface totalement intégrée, sa prise en main est simple et son utilisation pratique. L'existence de ce plugin ne dispense ni d'une connaissance de base, ni d'une pratique minimale d'EnergyPlus.



Figure 20 : aperçu de la barre d'outil OpenStudio dans Google SketchUp

3. Interopérabilité

Enfin, EnergyPlus peut fonctionner avec d'autres logiciels, dont beaucoup sont conçus au sein du LBNL : Windows 6.0 et Optics 5.0 (modélisation de fenêtres et vitrages complexes), Radiance, Therm (modélisation aux éléments finis de ponts thermiques), etc.

2.1.2. EnergyPlus : modélisation et méthodes de calcul

Sans être exhaustif, il paraît opportun d'exposer la logique générale du logiciel et de dresser un panorama des principes de modélisation propres à EnergyPlus, afin d'en observer la conformité aux éléments du 1.2., et de présenter un horizon de ce qui peut être modélisé. Le choix d'EnergyPlus était aussi celui d'un outil capable de modéliser un bâtiment, du plus simple au plus poussé, quand bien même le cadre de cette recherche n'était pas de simuler le fonctionnement énergétique complet d'un édifice déjà projeté.

Principes de base

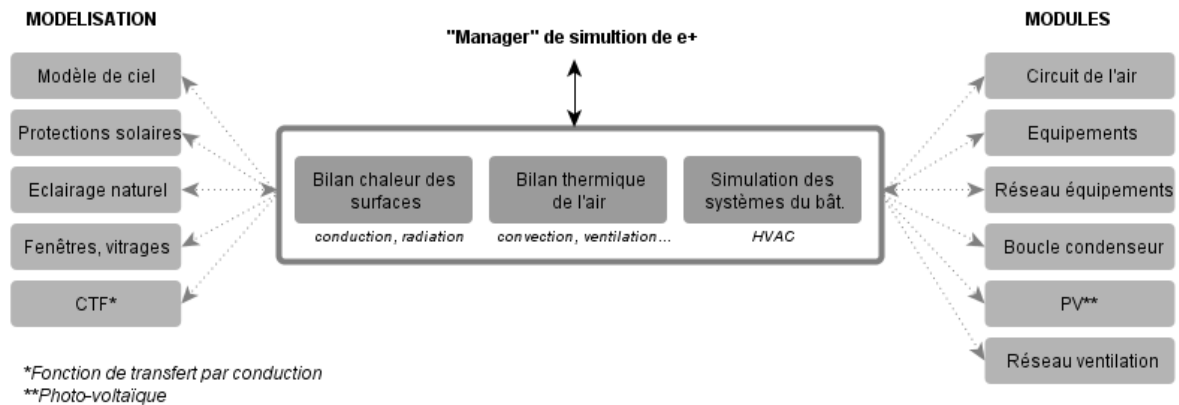


Figure 21 : principes de base d'EnergyPlus

Exprimé simplement, considérons que la modélisation thermique est l'interaction du modèle de bâtiment, d'un modèle climatique et d'un modèle de fonctionnement (occupation et équipements).

Le « Integrated Solution Manager » de EnergyPlus (manager de simulation) est un gestionnaire intégré mettant en relation ce qui a trait aux surfaces et volumes (conduction et rayonnement des points de vue thermiques et éclairage), le déplacement des masses d'air et les équipements (majoritairement CVC). Il constitue une interface entre le bilan thermique et le gestionnaire de simulation des systèmes du bâtiment (qui s'appliqueront aux zones du bâtiment).

Le bilan de chaleur surfaces et le bilan thermique de l'air reposent sur des modèles de transferts de chaleur à définir (au choix). Ils seront détaillés plus loin. Les systèmes du bâtiment sont les différents éléments mécaniques qui assureront le confort (consignes de chauffage, refroidissement, renouvellement de l'air intérieur). Des itérations successives sont faites entre les deux, afin d'équilibrer l'apport mécanisé de confort et les besoins.

EnergyPlus permet d'aller très loin dans les détails de description du modèle, mais laisse également la liberté d'indiquer un nombre d'informations réduit. Le logiciel se présente comme un fichier d'entrée unique (*input* au format .idf pour input data file), appelé par le moteur de calcul à travers l'interface EPLaunch, qui génère de nombreux fichiers de sortie (*output*). Ces derniers peuvent être lus par différents programmes, selon leur contenu.

Données de base

- Localisation et données météo
- Géométrie du bâtiment et matériaux : volumes d'air, parois opaques (couches de matériaux), baies, protections solaires.
- Scénarii :
 - o charges internes (éclairage, occupation, équipements)
 - o régulateurs (puissances et consignes de température, d'humidité et de ventilation).
- Equipements et contrôles

Système de fichiers

- *Inputs*
 - o Géométrie : Sketchup
 - o Créer, modifier : idfEditor et fichiers texte
- *Outputs* : de nombreux fichiers, contenant spécifiquement : données géométriques, calendriers/scénarii, schéma HVAC, erreurs, résultats (différents formats : .mtr, .eso, .xls...), types et noms des sorties disponibles, matériaux utilisés et propriétés, etc.

Paramètres de simulation

Un fichier d'entrée fonctionne par classes. Celles-ci contiennent des objets, qui permettront à EnergyPlus d'interpréter les données (et donc le bâtiment) et de réaliser correctement les calculs.

Parmi eux, les premiers à définir sont les paramètres de la simulation. Ces paramètres portent sur la version du programme, la période de simulation, et surtout des informations sur le bâtiment (cf. image suivante), sur les algorithmes utilisés dans les calculs ou encore le pas de temps (de 1 à 60, soit de 1 min à 1h). L'objet « bâtiment » (*building*) doit comporter, *a minima*, un nom, une orientation et un terrain (pour les caractéristiques orographiques).

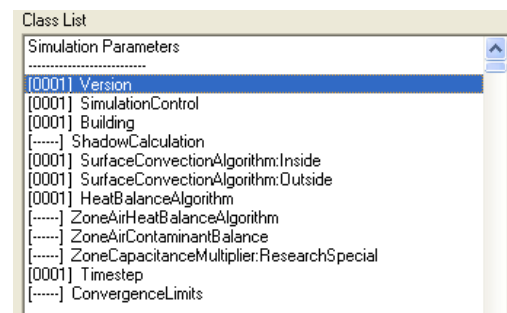


Figure 22 : interface IDFEditor

1. Données météorologiques

Les données météorologiques sont issues du format TRY et ont une extension .epw. Elles sont fournies avec des fichiers .ddy qui regroupent l'analyse statistique des données horaires et contient les jours-types de chaque saison (.ddy pour design day year), les extrêmes, etc. Ces données servent à dimensionner les systèmes de chauffage, refroidissement et ventilation. Ces « design days » sont calculés selon la norme *ASHRAE HOF design condition tables*.

Les données des fichiers .epw sont indiquées avec :

- Année, mois, jour, heure
- Températures (°C) : sèche, humide et point de rosée
- Humidité relative (%)
- Pression atmosphérique (Pa)
- Rayonnement solaire
 - o Rayonnement horizontal infrarouge du ciel (Wh/m²)
 - o Irradiation solaire horizontale (Wh/m²)
 - o Irradiation solaire directe sur plan normal (Wh/m²)

- Irradiation solaire horizontale diffuse (Wh/m²)
- Eclaircissement :
 - Éclaircissement horizontal global (lux)
 - Éclaircissement direct sur plan normal (lux)
 - Éclaircissement horizontal diffus (lux)
 - Luminance zénithale (cd/m²)
- Vents
 - Direction du vent
 - Vitesse du vent (m/s)

2. Géométrie : principe d'héritage

La géométrie du modèle est définie par des surfaces filaires :

- l'épaisseur des parois n'est pas dessinée, elle est prise en compte par le biais des matériaux
- les retraits (des fenêtres par exemple) ne sont pas dessinés, ils sont indiqués par leur valeur numérique, etc.

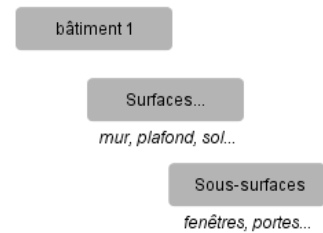


Figure 23 : principe d'héritage

Un projet EnergyPlus est constitué de un à plusieurs bâtiments, chacun étant décomposé en zones (thermiques), qui se divisent en surfaces (murs, sols, plafonds, etc.), elles-mêmes divisées en sous-surfaces (fenêtres, portes, etc.). C'est une logique d'héritage (système d'entonnoir) : le principe réside dans le fait que de nouvelles classes appelées classes « filles » héritent des propriétés des classes d'origine appelées classes « mères ».

Zones et surfaces

C'est à l'objet *Zone* que seront liées les différentes surfaces. Une zone est définie par son origine (classe *ThermalZones and Surfaces*), i.e. 3 coordonnées (x, y, z) dans un repère absolu.

Des règles géométriques doivent être définies au préalable, afin que les surfaces soient lues correctement. Ces dernières sont géométriquement construites par un système de coordonnées qui dépend d'un système de repère, soit absolu, soit relatif (par rapport à l'origine de la zone à laquelle elle appartient). Pour que le logiciel interprète correctement la disposition des surfaces (grossièrement, qu'elles ne soient pas lues à l'envers), il faut lui indiquer à quel nœud démarre la surface (en haut à gauche, etc.) et le sens de lecture de la séquence de nœuds (anti-horaire...).

| Field | Units | Obj1 |
|-----------------------------------|----------------|-------|
| Name | | Zone1 |
| Direction of Relative North | deg | 0 |
| X Origin | m | 0 |
| Y Origin | m | 0 |
| Z Origin | m | 0 |
| Type | | |
| Multiplier | | 1 |
| Ceiling Height | m | |
| Volume | m ³ | |
| Zone Inside Convection Algorithm | | |
| Zone Outside Convection Algorithm | | |
| Part of Total Floor Area | | |

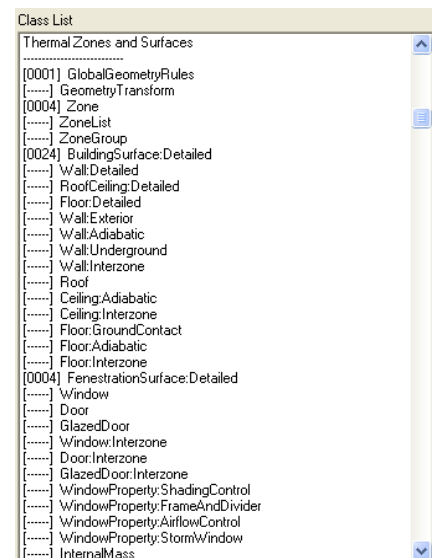


Figure 24 : IDFEdition, zones et surfaces

Surfaces

Une surface est :

- incluse dans une zone
- définie par des nœuds (3 et plus)
- identifiée par son nom (unique)
- associée à une composition de paroi (cf. matériaux)
- en contact avec un environnement (une zone ou l'extérieur)

Il y a différents types de parois : mur extérieur, cloisons (mur intérieur), sol (contact avec le sol), plancher intermédiaire, plafond, toit. Ces parois peuvent être définies :

- dans l'objet générique *BuildingSurfaceDetailed* : les nœuds sont identifiés par 3 coordonnées (qui dépendent du système de repère choisi)
- dans des sous-catégories indiquant leur type (*WallExterior, FloorDetailed...*). Deux options sont possibles par catégories : la surface est repérée par 3 coordonnées dans l'espace ou par une origine (x, y, z), une orientation (*azimut*), une largeur et une hauteur.

Les surfaces ne sont pas nécessairement verticales, ni orthogonales. Dans le cas de surfaces incurvées, selon la complexité de la forme, le temps de simulation peut augmenter, compte-tenu des calculs de géométrie solaire.

Notons, enfin, qu'une cloison interne peut séparer deux zones (*Wall :Interzone*) ou faire partie d'une zone (*Interior partition*). En effet, une zone thermique n'est rarement qu'une seule pièce. Généralement, une zone regroupe les pièces dont les conditions de confort sont semblables (chauffage, ventilation...), tout comme l'exposition, etc. Aussi, dans ce cas fréquent où une zone thermique regroupe différents locaux, il est possible de définir des cloisons, qui ne seront pas traitées comme les surfaces d'échanges que sont les murs *Interzone*.

Fenêtres

Une fenêtre (une sous-surface en général) est définie par :

- un nom (unique)
- une composition (cf. vitrages)
- la surface dont elle dépend
- des nœuds dont les coordonnées sont indiquées par autant de (x,y,z) qu'il y a de points, soit par une origine (x,y), le z étant automatiquement identifié par celui de la surface mère, une largeur et une hauteur
- contrôle (optionnel) des protections solaires
- une série de propriétés optionnelles, dont *WindowProperty:FrameAndDivider*, qui permet de définir les retraits du vitrage (intérieur et extérieur, haut et bas), les matériaux du cadre, le châssis, etc.

3. Caractéristiques des matériaux

Les surfaces et sous-surfaces ont des compositions de parois. Ces parois sont constituées de une à plusieurs couche(s) de matériaux. Ces matériaux, dans le cas général, sont soit opaques, soit composés de verre.

Matériaux opaques

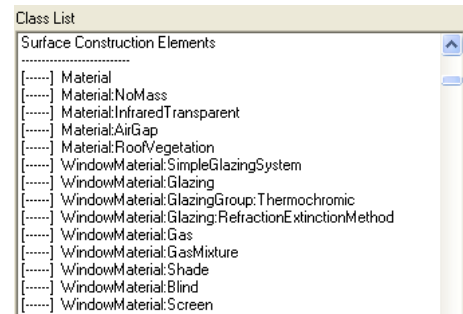


Figure 25 : IDFEditor, matériaux

Dans l'objet *Material*, on définit les caractéristiques des matériaux utilisés dans la constitution des parois :

- Propriétés des matériaux: conductivité thermique, chaleur spécifique, densité, épaisseur
- Propriétés de surface : absorptivité thermique⁴, absorptivité solaire, absorptivité du rayonnement visible, rugosité

Dans le cas d'un calcul incluant la chaleur latente, des données supplémentaires sur l'humidité des matériaux sont à entrer.

Vitrages et fenêtres

Les vitrages peuvent être définis de trois façons, de la plus simple à la plus réaliste :

Méthode simple (*WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*) : méthode « conventionnelle », avec les caractéristiques Ug, g et TL.

Méthode plus réaliste : *WindowMaterial:Glazing*

Dans cet objet est défini un type de verre, caractérisé par des données thermiques et spectrales (solaires, visibles, infrarouges). L'objet *WindowMaterial:Gas* permet de définir le gaz (type, épaisseur, conductivité, chaleur spécifique et éventuellement viscosité) compris entre les couches de verre pour un double ou triple vitrage.

Les gains solaires (lumière et chaleur) sur une fenêtre sont calculés comme la conjonction des rayonnements solaires directs, diffus et réfléchis. De fait, les transmissivités doivent être précisées selon les bandes du spectre électro-magnétique concernées. Deux types de caractérisation des données d'un verre sont possibles :

- Bande : les données de transmission et de réflexion sont des moyennes sur toutes les longueurs d'onde
- Spectrale : option la plus précise où les données de transmission et de réflexion solaire sont définies pour un intervalle de longueur d'onde entre 0,1 et 4 microns

⁴ Elle concerne les IR GLO et sert à calculer les échanges radiatifs entre surfaces=émissivité pour les matériaux opaques

Dans la mesure du possible, il est recommandé d'utiliser des vitres avec des données spectrales définies car les calculs effectués dans EnergyPlus représentent de manière plus précise la façon dont la transmission solaire se fait. La définition des verres nécessite donc :

- Données spectrales du verre : spectrale ou par bande
- Epaisseur (m)
 - o Données en incidence normale = transmissivités et réflectivités (extérieures et intérieures) solaires et dans le visible ; transmissivité et émissivité hémisphérique (extérieure et intérieure) dans l'IR GLO
- Conductivité (W/m.K)

Méthode « réelle » : *Construction:WindowDataFile*

Enfin, il est possible de simuler les comportements des vitrages de façon très poussée. Cela consiste à utiliser la Base de données internationale de vitrages (IGDB), qui répertorie plusieurs milliers de types de données spectrales de vitrages commerciaux. Elle est intégrée dans le logiciel de modélisation des fenêtres WINDOW 6.0. Par ailleurs, il est possible de créer ses propres vitrages (incluant la pose d'une couche faible émissivité, par exemple), par le biais de OPTICS 5.0. Ces logiciels ont été tous deux conçus pour fonctionner conjointement, et pour être couplés avec EnergyPlus. L'avantage est double, puisque cela simplifie à la fois la définition d'un vitrage réaliste et son intégration dans EnergyPlus. Les calculs optiques et thermiques des deux dernières modélisations sont basés sur les algorithmes de Windows 6.0 (Arasteh et al. 1989 ; Finlayson et al. 1993), qui est aujourd'hui le logiciel le plus abouti dans le domaine.

4. Modèles de transfert conductif

Il existe quatre modèles de simulation du transfert de chaleur par conduction : deux sont d'usage « commun » et deux sont orientés recherche. Nous ne listons ici que les deux premiers, plus habituels et plus simples à mettre en œuvre :

- *ConductionTransferFunction* (CTF) : transfert de chaleur sensible
- *MoisturePenetrationDepthConductionTransferFunction* : transfert de chaleur sensible et stockage de l'humidité dans les matériaux (ce qui nécessite des données additionnelles sur les propriétés des matériaux vis-à-vis de l'humidité)

Le modèle CTF permet une méthode de résolution plus performante que la méthode de transformation de Laplace. L'équation de conduction thermique transitoire est résolue par la méthode des différences finies, appliquée aux couches successives de chaque élément de construction, chacune étant discrétisée dans l'espace (maillage). Les variables d'état sont les températures nodales, les températures de l'environnement (intérieur et extérieur) sont les entrées et les flux de chaleur résultant sur les surfaces sont les sorties.

Conduction par le sol : différentes modélisations sont possibles. On peut : définir un sol adiabatique (pas de transfert), indiquer la température mensuelle moyenne du sol à une certaine profondeur, ou utiliser un utilitaire spécifique, modélisant ces transferts en s'appuyant sur les données météo.

5. Modèles radiatifs

Nous exposons successivement la façon dont EnergyPlus prend en compte le rayonnement des différents corps, au cours d'une simulation, à l'extérieur (rayonnements solaire, céleste et de l'environnement proche), puis à l'intérieur (rayonnements des parois, des occupants, des dispositifs d'éclairage artificiel et des équipements électriques).

Rayonnements extérieurs : soleil et environnement

Le rayonnement solaire incident sur une surface est la somme des rayonnements direct, diffus et réfléchi. Les rayonnements diffus et directs (soleil et ciel) sont dans les bandes visibles et IR proches et GLO, tandis que l'environnement réfléchissant ces rayonnements émet dans le domaine des IR GLO et visible (notamment dans le cas d'une réflexion spéculaire).

Définition des masques :

Qu'il s'agisse de thermique ou de lumière, les phénomènes de rayonnement provenant de l'extérieur sont atténués par les dispositifs d'ombrage, volontaires (protections solaires) ou non (masques proches et lointains). Dans la classe *ThermalZones and Surfaces*, il est possible de définir tout type de masque, en lui attribuant des propriétés réfléchives.



Figure 26 : IDFEditor, masques solaires

Rayonnement extérieur direct et diffus :

Il est déterminé par la localisation du bâtiment, l'orientation, l'inclinaison et les propriétés de surface de chaque face, la présence ou non de protections solaires, les conditions météorologiques, etc. Le logiciel utilise les données d'irradiation horaire contenues dans le fichier météo, et les intègre au calcul de géométrie solaire (azimut, hauteur solaire, trajectoire annuelle elliptique). Pour les IR, il est considéré que :

- chaque surface extérieure opaque émet ou réfléchit de manière diffuse ; elle absorbe ou émet, mais ne transmet pas de flux ($\alpha = \varepsilon$, $\tau = 0$, $\rho = 1 - \varepsilon$)
- pour les baies, sont pris en compte les phénomènes d'absorption, réflexion et transmission (transmission dans le visible et les IR proche)
- chaque surface est à une température uniforme
- le flux d'énergie quittant une surface est réparti uniformément sur toute la surface

Rayonnement extérieur réfléchi :

La réflexion par l'environnement proche du bâtiment du rayonnement solaire se fait dans le domaine des IR GLO. Pour la réflexion diffuse du rayonnement, l'hypothèse est que ce rayonnement est uniforme. Le flux de chaleur par rayonnement est calculé à partir de l'absorptivité et de l'émissivité de la surface, sa température ainsi que celles du ciel et du sol.

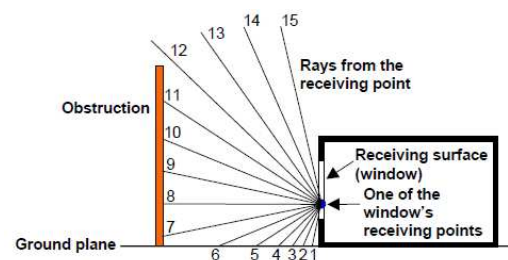


Figure 27 : réflexion du bâtiment sur son environnement extérieur

La méthode du « lancer de rayon » est appliquée aux surfaces réceptrices extérieures du bâtiment (murs, toits, fenêtres, etc.) qui « renvoient », par réflexion, le rayonnement solaire direct et diffus (voûte céleste) à son environnement proche (sol, construction voisine, ciel). C'est autant de rayonnement qui n'est pas pris en compte dans le calcul de l'énergie entrant. Les réflexions secondaires ne sont pas intégrées dans le calcul.

Réciproquement, l'environnement extérieur renvoie un rayonnement diffus au bâtiment. Par exemple, les rayons frappant le sol sont pour partis captés par le bâtiment.

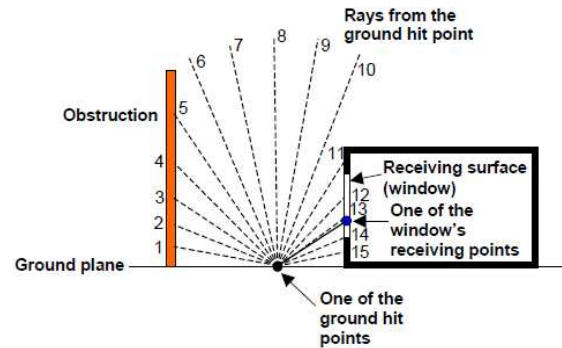


Figure 28 : réflexion du rayonnement extérieur

Le rayonnement solaire direct provoquant une réflexion spéculaire est pris en compte. C'est le cas, par exemple, d'un immeuble voisin avec une surface vitrée (image de droite).

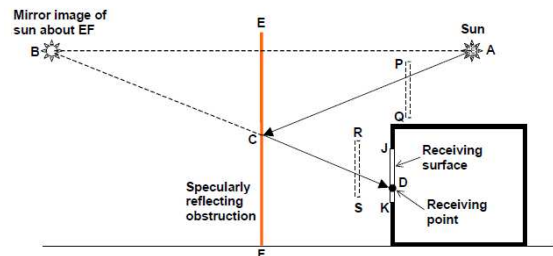


Figure 29 : réflexion spéculaire

Ombres :

Le calcul prend en compte la présence d'obstacles ou non « entre le soleil et la surface réceptrice » et entre la surface réceptrice et le bâtiment.

EnergyPlus prend en compte les géométries complexes. Il réalise une projection de l'ombre liée au bâtiment en fonction de la position relative du soleil, et réduit la réflexion du rayonnement direct au sol. La transmission du rayonnement diffus par réflexion sur le sol n'intervient que pour les zones ensoleillées.

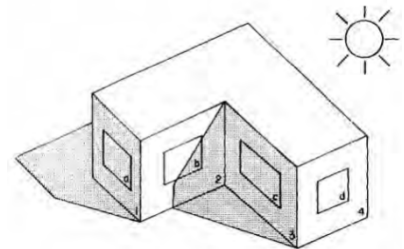


Figure 30 : ombres portées

ShadowingCalculations permet d'indiquer la fréquence de calcul des ombres (« tous les x jours »).

Rayonnements internes

Tâche solaire

Le rayonnement solaire direct entrant par une fenêtre est souvent pris en compte dans les logiciels de façon simplifiée (Bryn et Schiefloe, 1996). Tittlein (2008) rappelle que certains considèrent qu'il n'entre en contact qu'avec le sol, d'autres l'assimilent à une source de flux convectif, omettant l'inertie interne du bâtiment (déphasage et amortissement des gains solaires, avant transformation

partielle en charges convectives). L'analyse thermique des gains solaires nécessite des approches plus précises.

D'après Tittlein (2008), le logiciel qui aujourd'hui prend le mieux en compte la tâche solaire est EnergyPlus, un module spécifique permettant d'en calculer la position et la surface dans une pièce convexe de géométrie quelconque. Pour des gains de temps de calcul, il est possible d'en limiter la précision.

« Le moteur procède par projection de polygones dont il calcule la position des sommets et quand la projection a lieu sur plusieurs surfaces, il détermine la position du nouveau sommet sur la ligne d'intersection. Il décompose enfin les polygones trouvés en triangles élémentaires dont il calcule l'aire, le masque pouvant avoir une position et une géométrie polygonale quelconques. »

Le rayonnement solaire pénètre à l'intérieur par les baies, sous forme de RIR (proches et GLO) et de rayonnement visible. La distribution solaire se fait selon 5 modes possibles, que l'on définit dans le champ *Solar Distribution* de la classe *Building* : de la prise en compte minimale de la tâche solaire (donc des ombres portées) à la modélisation de la trajectoire solaire directe, diffuse et réfléchi et à la répartition des flux sur l'ensemble des surfaces intérieures éclairées, en passant par différents intermédiaires.

Sources internes

Le rayonnement émis par les parois, le système d'éclairage artificiel, ainsi que les occupants (métabolisme) sont également intégrés dans les calculs. Relevons qu'ils génèrent à la fois énergie sensible et énergie latente. Il est donc possible d'indiquer la part relative de chaque composante. Nous y revenons dans le point sur la prise en compte des phénomènes convectifs.

6. Lumière naturelle

EnergyPlus a développé depuis plusieurs années des modules de simulation de la lumière naturelle. Il est ainsi possible de calculer les facteurs de lumière du jour (FLJ), d'obtenir des cartes d'éclairement (zonages de l'éclairement par voies naturelles, en lux), mais aussi l'autonomie en lumière naturelle.

Modèle de calcul

Le calcul de la lumière naturelle se fait en trois étapes :

- Calcul de l'éclairement extérieur horizontal
- Calcul de l'éclairement au niveau de chaque baie (à l'extérieur, puis côté intérieur) et dans la zone (pour ciel couvert et ciel clair)
- La division des deux donne le FLJ

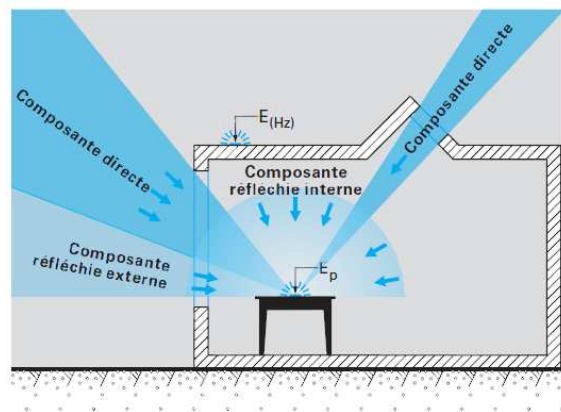


Figure 31 : Prise en compte de l'éclairage naturel (Paule et al., 2010)

Le rayonnement direct visible est calculé par « lancer de rayon ». L'éclairement intérieur lié à la diffusion des parois internes est calculé par la méthode de « répartition des flux ». Cette dernière approche présente toutefois quelques lacunes dans la précision de prédiction de la lumière du jour disponible dans un espace.

EnergyPlus calcule au pas de temps horaire les valeurs d'éclairement annuel, les reflets et éblouissements permettant d'évaluer la performance de protections solaires et les exigences d'éclairage électrique pour un espace.

Les éclairagements directs et diffus moyens pour chaque baie et pour chaque heure de soleil dans l'année sont déterminés en utilisant les données météorologiques annuelles types (TMY). La distribution du rayonnement issu de la voûte céleste se fait par le modèle de ciel anisotrope « tout temps » de Pérez (superposant quatre modèles CIE standard : clair, clair trouble, intermédiaire et couvert).

La détermination de l'éclairement en un point de l'espace se fait par l'intermédiaire du calcul des FLI pour chaque fenêtre ayant une contribution en ce point. Ces derniers sont ensuite multipliés par les éclairagements directs et diffus de chaque fenêtre concernée (DOE, 2010).

Reinhart (2011) rappelle la différence des méthodes employées par DaySim et EnergyPlus, les algorithmes de calcul de DaySim semblant plus précis et plus proches de la réalité. Notons notamment l'hypothèse faite dans EnergyPlus, selon laquelle une protection solaire diffuse uniformément l'éclairement reçu.

Reinhart (2011) conclut de ses essais que les calculs de lumière naturelle faits sous EnergyPlus peuvent sous-estimer les gains et surévaluer les besoins en éclairage artificiel, mais que pour les bâtiments ne nécessitant pas d'importants éclairages, le modèle reste raisonnable.

Il n'est pas automatique de coupler GenOpt avec deux outils de simulation distincts. Par ailleurs, les calculs de lumière naturelle d'EnergyPlus ne sont pas aussi fins que ceux de DaySim, mais en phase conception, ce n'est pas préjudiciable, d'autant qu'il s'agira avant tout d'intégrer la surestimation des besoins en lumière artificielle dans l'analyse des résultats. Les hypothèses n'apparaissent pas farfelues pour autant.

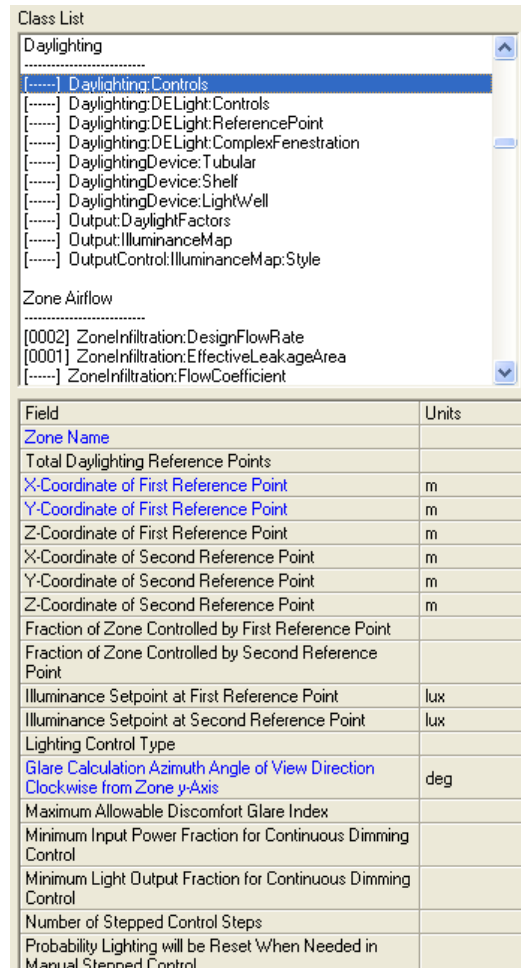


Figure 32 : IDFEditor, classe "Daylighting"

Paramétrer la mesure de la lumière naturelle

L'autonomie en lumière naturelle est mesurée de la façon suivante :

- Placer 1 ou 2 points de mesure (*Reference Point*) de l'éclairement (sondes) dans les zones où l'on souhaite le déterminer, et indiquer la portion de l'espace contrôlé par chaque sonde
- Associer à ce(s) point(s) un seuil minimum (par exemple 500 lux) avant déclenchement de la lumière artificielle
- *Lighting Control Type* permet ensuite de choisir le dispositif de déclenchement de lumière artificielle
- Il est possible de mesurer le niveau d'inconfort permis

Ce calcul d'autonomie nous permettra d'aborder l'optimisation de captage de lumière naturelle sous cet angle.

Par ailleurs, il est possible de dessiner une carte de l'éclairement (*illuminance map*) au sein d'une zone. Généralement, il s'agit d'un rectangle disposé à 80 cm du sol. Elle peut avoir les dimensions de la zone, ou être limitée à un espace autour d'une fenêtre (cas des bureaux, par exemple, où l'on souhaite mesurer l'éclairement et les risques d'éblouissement dans la zone de travail, pas dans l'ensemble de la pièce).

Dispositifs de captage de lumière naturelle

En plus des fenêtres, EnergyPlus permet de définir trois dispositifs de captage de la lumière naturelle (ils ont été énumérés au chapitre 1.2) : conduits solaires, lightshelves et puits de lumière. Les modèles intègrent à la fois les gains lumineux et les gains/pertes thermiques.

Pour plus de détails, on se réfèrera à Ellis et al. (2005).

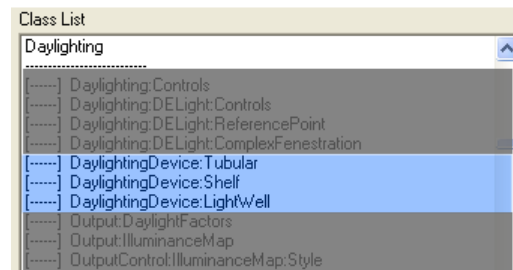


Figure 33 : IDFEEditor, dispositifs de captage solaire

EnergyPlus traite donc de nombreux aspects liés à la lumière naturelle, en étant capable d'en évaluer les impacts thermiques. Le large panel d'options disponibles permet de comparer les dispositifs existants. De telles dispositions permettent de traiter conjointement notre problématique thermique et lumière, au sein d'un seul programme.

Dispositifs de protection solaire

Globalement tous les types de protection solaire, d'intérieur comme d'extérieur, peuvent être modélisés. Beaucoup sont simples à modéliser. Une protection solaire est définie par son type (*Fin, Overhang...*), ses caractéristiques de surface (absorptivité...), ses dimensions, ainsi que la baie à laquelle elle est attachée. Les protections à lames (brise-soleil, stores...) peuvent avoir une inclinaison variable, en fonction de critères à indiquer. Les brise-soleil peuvent être à lames horizontales ou verticales.

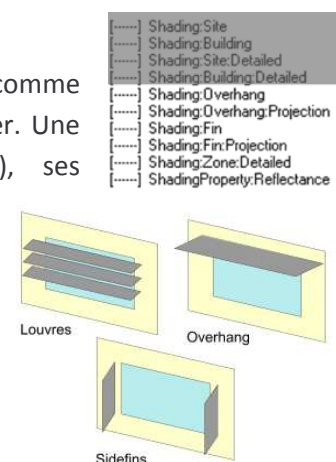


Figure 34 : Protections solaires sous EnergyPlus

7. Phénomènes convectifs (convection libre)

Les phénomènes de convection libre dans EnergyPlus sont de quatre ordres :

- Convection au niveau des parois (effets du vent et gradient de température), fonction du coefficient de convection généralement appelé résistance superficielle
- Infiltration parasite et ventilation naturelle
- Déplacements d'air entre zones
- Convection provenant des gains internes

Coefficients de convection

Coefficient de convection intérieure :

SurfaceConvectionAlgorithm:Inside

Les trois modèles possibles sont (cf. *Simulation Parameters*) :

- *Simple* : coefficient fixe (dépend de l'orientation de la paroi
- *Detailed* : coefficient variable en fonction de l'inclinaison de la paroi et de la différence de température entre la paroi et le fluide en contact avec celle-ci
- *CeilingDiffuser* : modèle de convection mixte et forcé pour la diffusion de l'air par le plafond.
- *AdaptiveConvectionAlgorithm* : algorithme « dynamique », regroupant de nombreux modèles de convection. Il choisit au cas par cas celui qui s'adapte le mieux à la situation.

Un modèle de coefficient fixe peut également être défini dans *SurfaceProperty:ConvectionCoefficients*. Il permet de fixer les coefficients h_i et h_e , tels qu'ils sont conventionnellement utilisés en France.

Coefficient de convection extérieure : *SurfaceConvectionAlgorithm:Outside*

Les modèles disponibles, plus ou moins élaborés, sont issus de la recherche et de l'expérience :

- *SimpleCombined* : le coefficient dépend de la rugosité de la paroi et de la vitesse du vent. Il combine convection et radiation, puisqu'il inclut les rayonnements célestes, terrestres et l'air

Les autres coefficients à suivre dépendent de la rugosité, de la vitesse du vent et de l'orographie du terrain (cf. Classe *Building > Terrain*). Ils ne traitent que de la convection, les calculs de transfert par rayonnement étant effectués par le programme.

- *TARP* : il combine convection naturelle et essais en laboratoire
- *MoWITT* et *DOE-2* : issus de mesures *in situ*
- *AdaptiveConvectionAlgorithm* : idem que pour la convection intérieure.

Enfin, la définition de ces deux coefficients peut également être appliquée zone par zone, auquel cas, il faut chercher la Classe *Zone* et son champs *Zone Inside Convection Algorithm* et/ou *Zone Outside Convection Algorithm*.

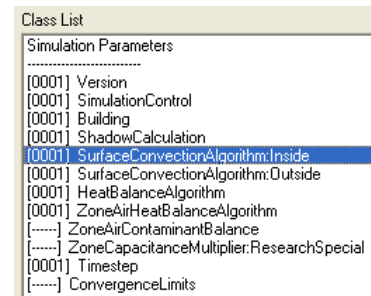


Figure 35 : IDFEEditor, convection de surface

Ventilation naturelle et infiltrations

- Ventilation naturelle : contrôlable en fonction des conditions intérieures et extérieures. Celle-ci peut intégrer les ouvertures de fenêtres et « l'effet cheminée ».
- Infiltrations

L'une et l'autre peuvent être modélisés de manière simplifiée à très élaborée.

Méthode simplifiée : *Classe ZoneAirflow*

Cette classe permet de définir assez simplement trois types de mouvements convectifs :

Le calcul des débits d'infiltration sont à faire selon la norme EN 13790, et à indiquer dans le champ correspondant.

La définition de la ventilation mécanique (simple ou double flux, par exemple) nécessite les caractéristique du ou des ventilateurs. Le ventilateur est indiqué comme servant à l'extraction ou à l'insufflation.

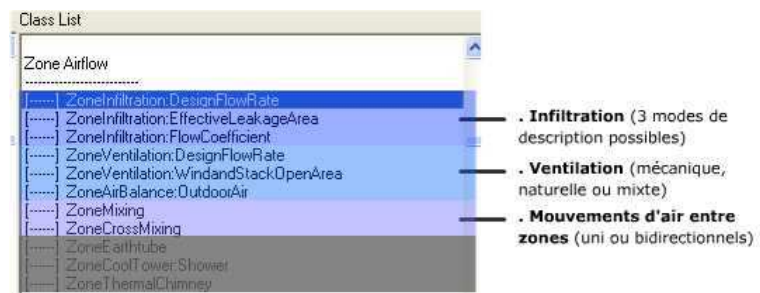


Figure 36 : IDFEEditor, mouvements d'air - méthodes simplifiées

Lorsque l'air circule entre plusieurs zones, les débits de ventilation (hors infiltrations donc) doivent être équilibrés (autant d'extraction d'air que d'insufflation).

Méthode complexe : *AirFlowNetwork* (AFN)

Littéralement « modèle de réseau d'air », ce module a remplacé le couplage de EnergyPlus avec COMIS (Conjunction Of Multizone Infiltration Specialists, LBNL, 1988). Il offre la possibilité de simuler des débits d'air multizone dus à l'effet du vent. Il peut également simuler les impacts des systèmes de ventilation mécanique, y compris les entrées et sorties d'air liées aux fuites inétanchéités) du réseau. (Gu, 2007). C'est un modèle poussé de modélisation des effets de la ventilation naturelle. De fait, il est plus complexe à mettre en œuvre. Il nécessite la mise ne place d'un réseau de nœuds définissant le « circuit » de l'air, le calcul des coefficients de pression du vent sur le bâti, etc.

Gains internes

Les gains internes proviennent des occupants, de l'éclairage et des équipements électriques de tout type. Ils se décomposent en une composante latente et deux composantes sensibles. La chaleur sensible est constituée d'une part radiante et d'une part convective, directement ajoutées dans le bilan thermique de l'air. Compte-tenu de la complexité du phénomène réel, il est simplement possible d'entrer la part relative de chaque composante. Leurs proportions varient d'une source à l'autre. D'autre part, les gains internes liés à l'éclairage (artificiel) sont différents par nature, puisqu'ils induisent une part thermique (IR) et une part visible de ce rayonnement.

Exemple : lampe à incandescence classique : 10% visible, 80% radiatif (thermique) et 10% convectif.

8. Régulation du confort : équipements CVC

Rappel : CVC est l'acronyme Chauffage, Ventilation et Climatisation. Sa correspondance en anglais est HVAC, pour Heating Cooling and Air Conditioning. On le retrouve en de nombreuses sections d'EnergyPlus.

L'objectif de la recherche n'était pas d'aller jusqu'au dimensionnement de ces équipements HVAC. EnergyPlus propose des modèles « clés en main », utiles et suffisamment précis. Il nous semblait important de disposer d'un outil capable d'assumer les deux fonctions, la description détaillée des systèmes CVC pouvant également, lors d'une phase plus avancée de la conception, faire l'objet d'optimisation ou, *a minima*, de comparaison. Notons le couplage EnergyPlus/GenOpt est régulièrement testé en recherche pour l'optimisation des systèmes HVAC. Il est possible de définir soi-même l'intégralité d'un système et de ses composants, EnergyPlus permettant de définir :

- Chaudières, brûleurs, fours...
- PAC
- Conduits, gaines...
- Ventilateurs, échangeurs de chaleur (eau/air, air/air, etc.)
- Condenseurs

2.1.3. Input et output

L'ensemble des « objets » disponibles dans EnergyPlus, c'est-à-dire les éléments de base permettant de définir un modèle, est listé dans le fichier *ObjectStatus.xls* du dossier *C:\EnergyPlusV6-0-0-037*.

1. Phénomènes pris en compte – synthèse

Données climatiques TRY

- Contenu : rayonnements solaires, éclairagements, températures, vents, neige
- Disponibilité : onglet WeatherData de www.energyplus.gov et données Météonorm
- Calcul des DJU et des « journées types » pour chaque saison (notamment pour le dimensionnement des systèmes de chauffage et de refroidissement)

Echanges thermiques

- Conduction : différents modèles
 - Utilisé : Conduction Transfer Function
 - Conduction par le sol : modèle simple utilisé
- Rayonnement
 - Rayonnement extérieur
 - Rayonnement solaire sur les parois opaques et vitrées, calcul précis des ombres
 - Rayonnement diffus de la voûte céleste
 - Rayonnement réfléchi par le sol, les bâtiments voisins, etc.

- Rayonnement intérieur
 - Calcul précis de la tâche solaire pour les IR proches et visibles pénétrant par les baies
 - Réflexion des parois et échanges par rayonnement des IR GLO
 - Rayonnement des systèmes d'éclairages
 - ... des équipements électriques
 - ... des occupants
- Convection naturelle
 - Modèle simplifié
 - Modèle complexe (AirFlow Network – AFN - a remplacé le couplage à Comis)

Lumière naturelle vs. artificielle

- Méthodes de calcul fiable, mais qui surestime légèrement les besoins
- Différents dispositifs de captage disponibles
- Divers types de protections solaires possibles

Equipements et réseaux

2. Procédure générale pour créer un fichier eplus

1. Éditeur de création des fichiers E + (IDFEditor)
2. Version d'EnergyPlus
3. Type de calculs que la simulation doit effectuer (dimensionnement, annuel...)
4. Paramètres de description du bâtiment et du site
5. Pas de temps Période(s) de simulation
6. Valeurs utilisées dans les scénarii (nombre réel pour les T°C, on/off, etc.)
7. Calendrier simplifiés (synthétiques)
8. Propriétés thermiques et de surface des matériaux
9. Composition des parois (mur, sol, plancher, toit, vitrages)
10. Règles géométriques (pour définir zones, surfaces, sous-surfaces...)
11. Origine (x,y,z), nom, orientation, informations des parois
12. Gains internes liés à l'occupation, à l'éclairage artificiel et aux équipements électriques
13. Zone de commande du thermostat (modèle préparamétré)
14. Système (préparamétré) de réponse idéale aux charges de chauffage et refroidissement (en fonction du Thermostat)
15. *Outputs* : Report Variable, Report Meter, fichier .dxf (visualiser la géométrie), Rapport récapitulatif (synthétique ou détaillé)

3. Outputs

De nombreux fichiers de sortie sont générés au cours d'une simulation. Ceux qui nous intéressent sont ceux qui stockent les résultats des simulations.

L'analyse de la performance énergétique se fait par les données qu'EnergyPlus appelle des *Report Variable* et *Report Meter*, respectivement stockées dans les fichiers *.eso* et *.mtr*. Un fichier *.csv* directement importable dans un logiciel de tableur les stocke également. Ces fichiers sont automatiquement créés au cours de la simulation, et se trouvent dans le même dossier que le fichier d'entrée (*.idf*).

Les données de ces fichiers sont potentiellement très nombreuses. Leur nombre dépend du fichier d'entrée. Pour avoir la liste entière, il faut lancer une simulation « à vide », sur au moins 1 jour. Des fichiers *.rdd* et *.mdd* (qui sont des dictionnaires de données) sont générés. Ils contiennent l'ensemble des indicateurs potentiels pour la simulation (ils regroupent l'ensemble des sorties disponibles pour le fichier d'entrée). On peut alors sélectionner les paramètres, puis les indiquer dans le fichier d'entrée (généralement avec le pas de temps de calcul souhaité : annuel, mensuel, horaires).

Une fois la simulation effectuée, les valeurs des paramètres sélectionnés se trouvent dans les fichiers *.eso* et *.mtr*. Les données peuvent être les consommations par poste énergétique, les températures par zone, les débits de ventilation, etc. Le fichier *.eso* attribue un identifiant à chaque indicateur. Par exemple :

```
Program Version,EnergyPlus 6.0.0.037, 17/08/2011 22:03
1,5,Environment Title[],Latitude[degrees],Longitude[degrees],Time Zone[],Elevation[m]
6,1,Environment,Outdoor Dry Bulb [C] !Hourly
55,11,ZONE1,Zone/Sys Sensible Heating Energy [J] !RunPeriod
66,1,ZONE1,Zone Mean Air Temperature [C] !Hourly
106,1,ZONE1,Zone/Sys Sensible Heating Energy [J] !Hourly
107,11,ZONE1,Zone/Sys Sensible Cooling Energy [J] !RunPeriod
128,1,ZONE1,Zone/Sys Sensible Cooling Energy [J] !Hourly
```

L'indicateur donnant la consommation horaire de chauffage est identifié par '106'. Attention : ce chiffre peut varier d'une simulation à une autre (si l'on change le modèle, de nouveaux indicateurs peuvent être disponibles, par exemple ; ou encore, l'ajout d'une zone peut changer le numéro identifiant) : il est donc nécessaire de lancer une simulation, ne serait-ce que sur un jour, pour obtenir un fichier *.eso* permettant de connaître le « bon » identifiant. Cela est nécessaire pour le couplage avec GenOpt.

Dans l'optique d'optimiser le captage d'énergie solaire, nous avons considéré pertinent de mesurer les consommations annuelles d'énergie nécessaires pour chauffer, refroidir et éclairer l'intérieur du bâtiment. Aussi, notre fonction-objectif sera une fonction linéaire de ces trois objectifs « individuels » non-linéaires (une agrégation de ces trois indicateurs). De fait, il est nécessaire d'indiquer ces identifiant, afin de déterminer les bonnes valeurs des objectifs à optimiser.

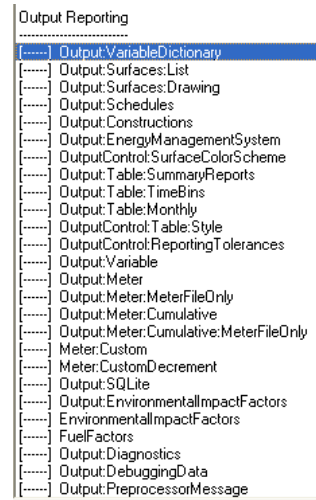


Figure 37 : IDFEditor, outputs

2.2. Processus d'optimisation : GenOpt



Parmi les différents outils voués à optimiser les performances des bâtiments, peu étaient disponibles ou distribués librement. D'autre part, dans certains cas, il s'agissait tout simplement d'algorithmes (dans différents langages de programmation) couplés à des logiciels tels que e+, TRNSYS, ESP-r... mais difficiles à mettre en œuvre. Il est apparu que GenOpt présentait de nombreux avantages :

- Il a été écrit pour fonctionner, notamment, avec EnergyPlus
- Il est couplable à d'autres moteurs de calcul (pré-programmé ou programmable)
- Il contient déjà 9 algorithmes, et il est possible d'en implémenter de nouveaux
- Il revient régulièrement dans la littérature
- Sa documentation est suffisante pour le maîtriser, et son concepteur est très réactif aux questions techniques

Nous passons en revue ses objectifs, son fonctionnement général et ses algorithmes dans la section suivante. Puis nous décrivons la façon de coupler l'ensemble de l'environnement logiciel et, ce faisant, détaillons le fonctionnement et le paramétrage précis de GenOpt.

2.2.1. Présentation générale du logiciel

1. Objectifs et grandes lignes

Écrit en Java afin d'être indépendant de toute plateforme informatique, GenOpt (pour *Generic Optimization*, programme d'optimisation générique) est développé et diffusé librement depuis 1998 par le Lawrence Berkeley National Laboratory. Il en est à la version 3.0.3. Notons qu'aujourd'hui le logiciel est en simple maintenance, le DOE ayant donné d'autres orientations de recherche au LBNL.

Le programme assure le lien entre un logiciel de simulation (externe) et un algorithme d'optimisation (à choisir ou écrire), afin de minimiser la fonction-objectif (*fitness*) d'un problème en jouant sur les valeurs d'une multitude de paramètres à définir. L'évaluation étant calculée par un programme de simulation externe, il permet de résoudre une grande diversité de problèmes d'optimisation pour lesquels la fonction-objectif est coûteuse en temps de calcul, ou non-linéaire (propriétés analytiques non connues ou inexistantes). Il est par ailleurs possible de configurer la plateforme pour « communiquer » avec d'autres outils de simulation que ceux qui sont proposés, ou encore d'incorporer un nouvel algorithme. Cela ne se fait pas sans certaines bases de programmation.

Il est divisé en une partie du noyau qui lit les fichiers d'entrée, lance automatiquement le programme de simulation, stocke les résultats ... et une partie optimisation qui contient les algorithmes d'optimisation (Wetter, 2008).

Les utilisations récurrentes de GenOpt dans la construction concernent la consommation d'énergie, le dimensionnement des systèmes CVC, la baisse du coût environnemental (ACV), l'optimisation des coûts d'exploitation, etc. À l'origine, le programme a d'ailleurs été conçu de telle sorte à répondre aux propriétés particulières de problèmes d'optimisation dans le domaine du bâtiment, notamment du point de vue énergétique.

Variables

Les variables peuvent être continues (bornes inférieure et supérieure, pas de variation et valeur initiale), discrètes (la variable prend alors un ensemble de valeurs précis) ou les deux. Des contraintes sur les variables peuvent être définies en utilisant des fonctions de pénalité ou « barrières ». Les variables continues peuvent prendre n'importe quelle valeur sur une droite réelle, entre les limites inférieure et supérieure.

Les variables discrètes peuvent être numériques ou des chaînes de caractères. Dans ce dernier cas, il peut par exemple s'agir du nom d'une composition de paroi. Tous les algorithmes ne peuvent pas fonctionner avec des variables discrètes.

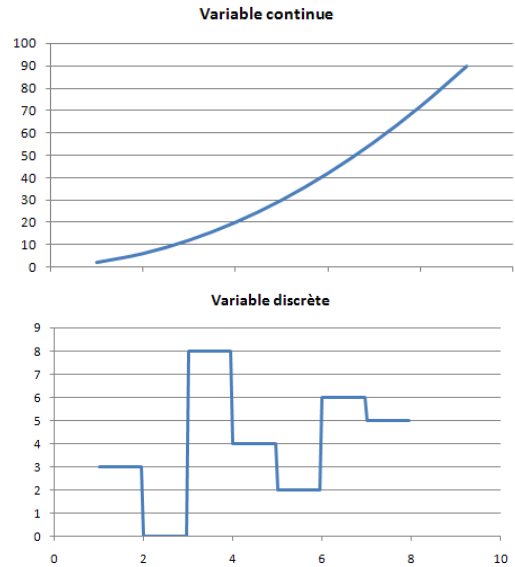


Figure 38 : Variables continues et discrètes

L'algorithme d'optimisation fait varier les valeurs (allèles) des variables indépendantes (gènes) d'une itération à l'autre. Chaque fois qu'une variable est modifiée, toutes les autres variables deviennent généralement non-optimales, et donc doivent également être réajustées pour répondre au mieux à la *fitness*. Des fonctions reliant les variables peuvent être définies, comme nous le verrons ultérieurement (il s'agit donc de variables dépendantes).

Dans GenOpt, aucune limitation du nombre de variables indépendantes n'est imposée. Toutefois, il est recommandé d'en fixer un nombre de l'ordre de 10 pour assurer une bonne exploration de l'espace des solutions et éviter une convergence trop rapide vers un optimum local. La multiplication du nombre de variables peut également engendrer un nombre de simulations très important, ce qui accroît considérablement les temps de calcul.

Exemples de logiciels couplés à GenOpt

Les programmes de simulation fonctionnent sur la base de *input* et *output* basés sur du texte ayant déjà été couplés avec GenOpt sont :

DOE-2, EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, SimSPARK, IDA-ICE, Modelica...

L'éventail de choix est large, démontrant une réelle flexibilité de l'utilisation de GenOpt en ce qui concerne la détermination de la fonction d'évaluation. Remarquons que TRNSYS intègre le module TrnOpt, liant TRNSYS et GenOpt. Il a d'ailleurs été utilisé dans le cadre de la thèse de Flory-Celini (2008), portant sur l'étude de solutions bioclimatiques pour le parc résidentiel existant.

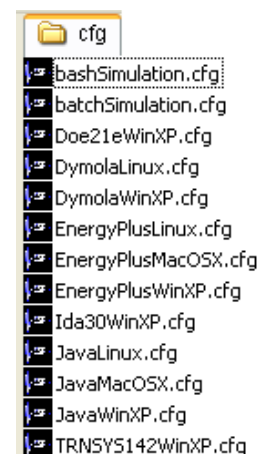


Figure 39 : Outils de simulation pour GenOpt

2. Flexibilité des possibilités de GenOpt en matière d'algorithmes

Aperçu des algorithmes contenus dans la librairie de GenOpt

GenOpt dispose d'une bibliothèque de 9 algorithmes permettant l'optimisation (locale et globale), uni ou multi-dimensionnelle, que l'utilisateur définit. Le programme dispose d'algorithmes peu sensibles aux discontinuités de la fonction de coût, tels que des algorithmes de recherche généralisée (Generalized Pattern Search), qui peuvent également être utilisés conjointement avec des métaheuristiques d'optimisation globale. En général, on ne peut pas obtenir une solution exacte, mais on peut obtenir une bonne solution numérique approchée.

Le répertoire `...\genopt\src\genopt\algorithm` (généralement `C:\Program Files\genopt\src\genopt\algorithm`) contient les algorithmes disponibles dans GenOpt : *DiscreteArmijoGradient*, *Fibonacci*, *GoldenSection*, *GPSCoordinateSearch*, *GPSHookeJeeves*, *GPSPSOCHJ*, *Mesh*, *NelderMeadONeill*, *Optimizer*, *Parametric*, *PSOCC*, *PSOCCMesh*, *PSOIW*

Leur description complète est donnée dans le manuel d'utilisation (Wetter, 2010), et une large analyse en est faite dans Wetter et Wright (2005).

Il est également possible d'implémenter un nouvel algorithme. C'est l'un des intérêts de l'outil : se contenter de lier le fichier texte *input* d'un programme de simulation à un jeu de fichiers, qui feront appel à un algorithme quelconque. Il n'a pas été possible, dans ce temps de stage, de développer un algorithme propre. Nous avons donc opté pour la solution de tester les algorithmes reconnus comme performants à l'heure actuelle, et disponibles. C'est l'objet de la section suivante.

3. Croisement avec l'état de l'art : choix d'un algorithme

Bref rappel sur les AE : critères de choix

Au chapitre 1, nous avons vu que les avancées de ces dernières années en matière d'optimisation combinatoire se sont faites par l'avènement des métaheuristiques hybrides. Nous rappelons que trois méthodes émergeaient dans le domaine de l'optimisation énergétique du bâtiment :

- *NSGAI : Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms*
- *CMA-ES/HDE : Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy Algorithm (CMA-ES) and Hybrid Differential Evolution (HDE)*
- *PSO/HJ : Particle Swarm Optimisation (PSO) et Hooke-Jeeves algorithm (HJ)*

Nous nous référons aux articles de Caldas (2001, 2003, 2008), de Wetter et al. (2004) et de Kämpf et al. (2009, 2010) pour appuyer techniquement nos choix. Il en existe d'autres, mais eu égard à la récurrence de leur emploi dans le domaine qui nous intéresse, nous avons fait le choix de nous orienter sur ces trois méthodes, puis d'en choisir une.

Nous rappelons le théorème du « No Free Lunch » : en dépit des bonnes performances de ces méthodes :

- Il n'existe pas de méthode universelle, sensément LA plus performante ; d'autres pourraient aboutir à d'aussi bons résultats, avec des individus semblables ou distincts. Il faudrait, dans l'absolu, écrire un algorithme *ad hoc*, c'est-à-dire directement lié au problème à résoudre ;
- Il ne faut pas imaginer aboutir systématiquement sur la (ni même les), mais sur des solutions optimales, parmi d'autres possibles. C'est d'ailleurs la richesse de ces approches : apporter une variété de réponses et, ce faisant, ouvrir la création architecturale et non la restreindre à des considérations exclusivement techniques.

Pour cette recherche, il était tout aussi important de pouvoir disposer d'un algorithme existant (déjà écrit et diffusé ou diffusable), notamment du fait de la contrainte de temps et des difficultés techniques potentielles. Nous le souhaitons directement exploitable avec GenOpt ou, *a minima* avec EnergyPlus. Rappelons que la logique de cette recherche était également d'obtenir une réelle diversité de solutions acceptables du point de vue des performances thermiques et énergétiques. En d'autres termes, l'éventail de possibilités et de variations ne devait pas être réduit sous le seul critère de la solution la plus optimale, mais bien de la diversité des choix s'offrant au concepteur de manière ouverte et pertinente.

PSO/HJ

La méthode choisie dans le cadre de cette recherche est une méthode hybride, basée sur un algorithme évolutionnaire (PSO) et une optimisation locale (HJ). Cette métaheuristique hybride étant disponible dans GenOpt (nommée GSPSOCCHJ), nous l'avons privilégiée afin de réaliser nos expérimentations.

Il s'agit d'un algorithme hybride combinant l'approche évolutionnaire (approche "population") de Particle Swarm Optimisation (PSO) et l'algorithme de "recherche directe locale" Hooke-Jeeves (HJ). Nous proposons d'en détailler le fonctionnement.

1. PSO : d'optimisation par essaim de particules

Description

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules a initialement été proposé par Eberhart et Kennedy (1995). Il s'agit d'un algorithme basé sur une population (i.e. ensemble des individus, ici appelés « particules ») évoluant de génération en génération, par mimétisme du comportement des nuées d'oiseaux ou des bancs de poissons, à la recherche de nourriture dans un champ spatial donné. La nourriture peut se trouver en différents endroits, que les oiseaux ne connaissent pas. La stratégie consiste à suivre l'oiseau qui tend à être le plus proche de la nourriture.

Les particules se déplacent au sein de l'espace des solutions possibles vers un point correspondant à une plus faible valeur de la fonction-objectif (connue des itérations précédentes), en modélisant les comportements cognitif et social des « bons » individus.



Figure 40 : Banc de poissons
(<http://bellacha.canalblog.com>)

Chaque oiseau (particule) est une solution possible, avec sa propre valeur de la fonction-objectif. Chaque particule a sa propre vitesse de déplacement. La trajectoire au sein de l'espace « de faisabilité » (ou espace de recherche) est donnée par celle des particules les meilleures à un instant donné. L'algorithme ne fonctionne pas avec une seule solution à la fois, mais bien avec toute une population.

Le calcul démarre d'une population aléatoirement tirée (initialisation), et fait des itérations où chaque particule est changée pour l'améliorer, en suivant les 2 meilleurs vecteurs du groupe (le vecteur de la meilleure *fitness* obtenue jusque là, et le vecteur qui a la meilleure *fitness* de la population actuelle). Cette heuristique permet une optimisation globale, généralement satisfaisante.

Formalisation

La population initiale est distribuée de façon aléatoire et homogène dans l'espace de recherche. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. À partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage. À partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va, normalement, converger vers la solution optimale globale du problème traité.

Calas (2009) expose qu'un essaim de particule est caractérisé par :

- le nombre de particules de l'essaim
- la vitesse maximale d'une particule
- la topologie et la taille du voisinage d'une particule qui définissent son réseau social
- l'inertie d'une particule
- les coefficients de confiance, qui pondèrent le comportement conservateur (ie. la tendance à retourner vers la meilleure solution visitée) et le panurgisme (ie. la tendance à suivre le voisinage)

Une particule est caractérisée, à l'instant t , par :

- sa position dans l'espace de recherche ;
- sa vitesse ;
- la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée ;
- la position de la meilleure solution connue de son voisinage ;
- la valeur de *fitness* de sa meilleure solution ;
- la valeur de *fitness* de la meilleure solution connue du voisinage ;

Critère d'arrêt

La convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, un nombre maximum d'itérations est définie pour pallier ce risque.

Configuration de la méthode

1. Nombre de particules : il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, si ce n'est en tester en nombre afin de mieux maîtriser l'algorithme.
2. Topologie du voisinage : elle définit les individus avec lesquels chaque particule va pouvoir communiquer
3. Coefficients de confiance : les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme.
4. Vitesse maximale et coefficient de constriction : afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, fixer une vitesse maximale permet d'améliorer la convergence de l'algorithme. Le coefficient de constriction permet de resserrer l'hyper-espace de recherche.
5. Facteur d'inertie (SHI et EBERHART, 1995) : il définit la capacité d'exploration de chaque particule. Plus il est grand, plus la particule dispose d'une grande amplitude de mouvement et donc, *in fine*, d'exploration globale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

La version de cet algorithme dans GenOpt utilise un coefficient de constriction. Par ailleurs, il est mis sur un maillage, ce qui signifie que même si les variables sont considérées comme continues dans l'algorithme, lorsque l'évaluation de la fonction objectif a lieu, les coordonnées du point le plus proche sont utilisées pour calculer la fonction objectif. La distance entre les points du maillage est donnée par une taille de pas pour chaque variable. Le « voisinage de Von Neumann » (grille rectangulaire) est utilisé. Il est possible de définir deux autres structures de voisinage.

2. HJ : Hooke-Jeeves

L'algorithme de Hooke et Jeeves (1961) appartient à la famille des algorithmes de recherche de modèle généralisé (GPS : Generalized Pattern Search en anglais). Il recherche le long de chaque direction de l'espace des solutions les coordonnées assurant la réduction de la fonction-objectif. Le maillage initial pour la recherche est donné par une taille de pas (variation) pour chacune des variables. Si aucune amélioration de la fonction-objectif n'est atteinte, la taille du pas est divisée par un diviseur de maillage. Quand la recherche locale autour du point courant trouve un meilleur point, l'algorithme effectue une recherche globale continue dans la même direction.

Afin de tester la différence entre algorithmes, nous précisons que ce « simple » GPSHJ a été testé dans l'une des séries de simulation. Notons que Vitte (2007), a testé GenOpt avec le GPSHJ, constatant la convergence vers un optimum local (mais aucune information n'est donnée quant aux valeurs données aux différents paramètres de l'algorithme).

3. Hybridation PSO/HJ pour GenOpt

L'hybridation utilise le PSO comme un algorithme d'optimisation globale, qui se rapproche de la valeur minimale globale, puis affine la recherche en lançant par l'algorithme de HJ. Pratiquement, l'algorithme PSO est exécuté pour un nombre de générations spécifié par l'utilisateur, puis le HJ utilise comme point de départ de recherche le meilleur individu obtenu par l'algorithme PSO. Comme l'ont montré Wetter et al. (2004) et Kämpf (2009, 2010), cette hybridation offre de bons résultats.

CMA-ES/HDE


CMA-ES et HDE sont 2 algorithmes évolutionnaires basés sur une population. Une description sommaire de son fonctionnement a été faite au chapitre 1. Pour plus de détails, se référer à la bibliographie. Il a été possible d'obtenir de Jérôme Kämpf (LESO de l'EPFL), le CMA-ES/HDE testé dans le cadre de son doctorat et décrit dans Kämpf et al. (2009). Il n'est pas directement implémentable dans GenOpt, mais a été écrit (en C++) pour être couplé à EnergyPlus. Malheureusement, fin août 2011, il n'a pas encore été possible de tester le couplage, en l'absence de temps pour appréhender la façon de lier les deux outils. Quoiqu'il en soit, le tester peut être une piste de poursuite de la recherche, compte-tenu de sa performance. Jérôme Kämpf est ici, une nouvelle fois remercié de cet échange de connaissance et de pour ses explications.

2.2.2. Fonctionnement de GenOpt : couplage AE/logiciel de STD

1. Interface

GenOpt fonctionne sur la base de 4 fichiers texte (que l'on ouvre avec n'importe quel éditeur de texte), ainsi que du fichier météo horaire correspondant au site géographique (qui est conservé à son emplacement original C:\EnergyPlusV6-0-0-037\WeatherData).

Après ouverture de GenOpt, l'interface (minimaliste)

se lance en cliquant sur . Les simulations démarrent lorsqu'on sélectionne un fichier d'initialisation, appelé *optWinXP.ini*, comme l'indique l'impression d'écran suivante.

Pour réaliser les simulations souhaitées, il faut donc préalablement paramétrer 4 fichiers.

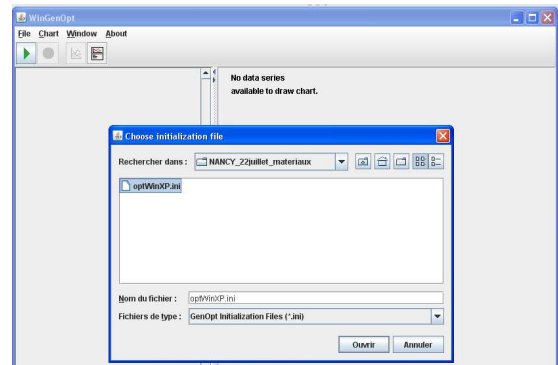


Figure 41 : interface de GenOpt

2. 4 fichiers d'entrées : contenu et interactions avec EnergyPlus

Les 4 input

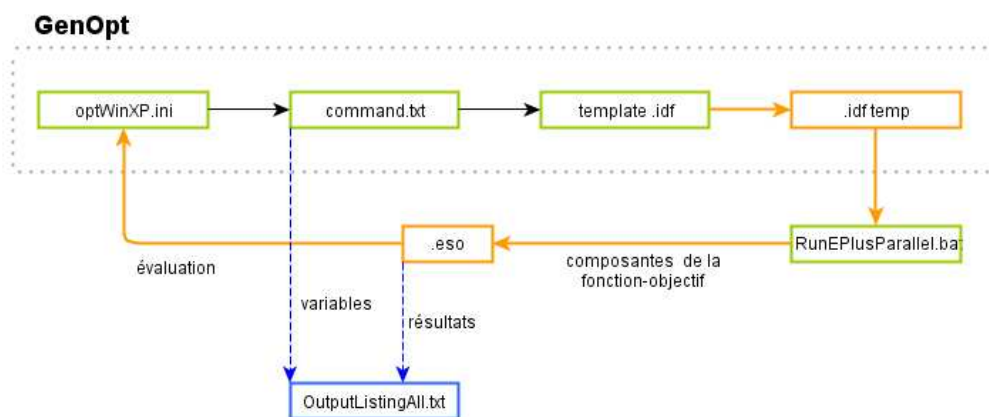


Figure 42 : Schéma simplifié de l'interaction des 4 fichiers de GenOpt

...**_template.idf** : « modèle » de fichier d'entrée d'EnergyPlus, contenant les variables ; il sera réécrit à chaque simulation par GenOpt, afin de lancer EnergyPlus

optOptWinXP.ini : fichier d'initialisation spécifiant l'emplacement et le nom des fichiers utilisés lors des simulations (*template, input, output, fichiers log*), l'emplacement du fichier de configuration ...\\cfg\\EnergyPlusWinXP.cfg et du fichier météo, ainsi que la définition de la fonction-objectif. Le dossier contenant ce fichier de configuration (C:\Program Files\genopt\cfg\) est à copier à la racine du dossier de simulation, par exemple.

command.txt : Spécification des noms, valeur min et max et variations des paramètres, identification et paramétrage de l'algorithme

RunEPlusParallel.bat : fichier appelant le logiciel de simulation (ligne 55 : *set program_name=EnergyPlus.exe*). Il est propre à chaque logiciel et fourni avec le package GenOpt. Il n'y a pas besoin de le modifier

Interactions : schéma de « dialogue » entre les 4 fichiers et avec EnergyPlus

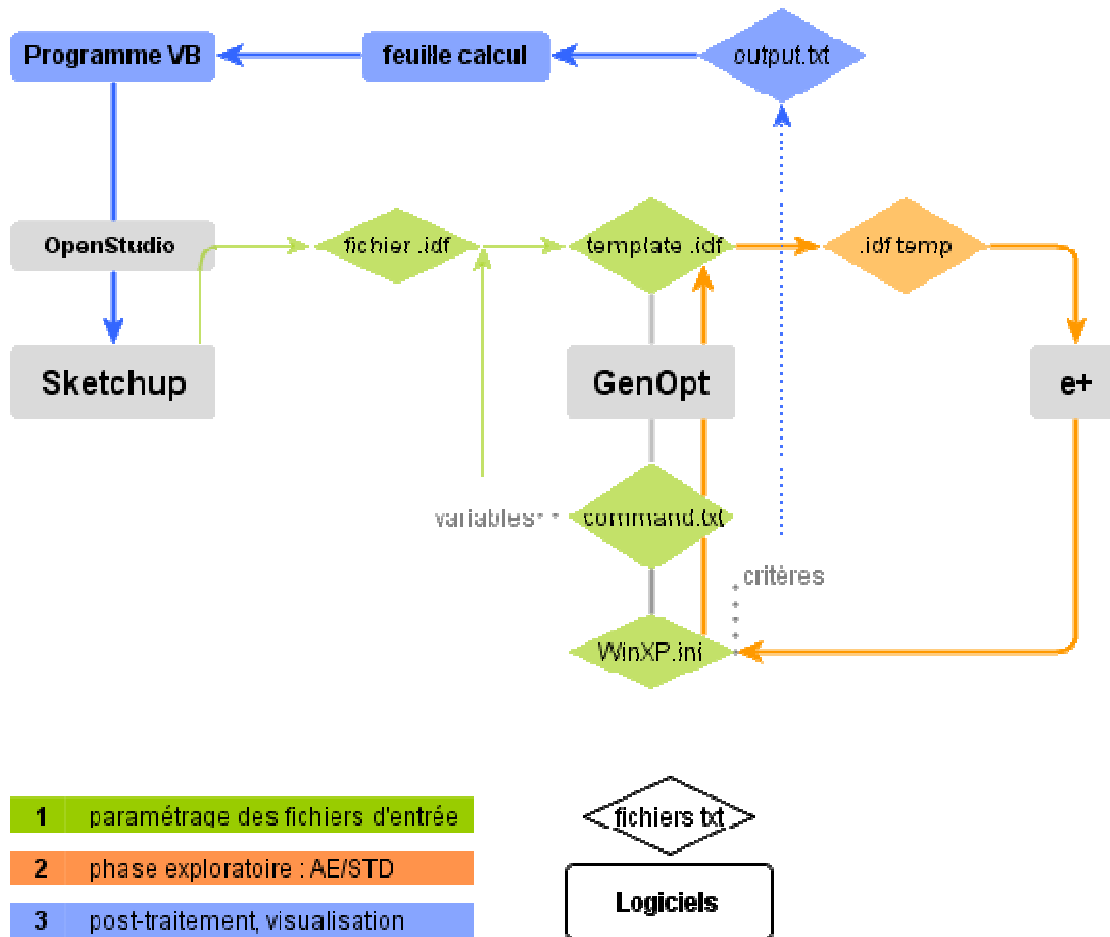


Figure 43 : Schéma de principe de l'environnement logiciel

Détaillons le schéma ci-dessus :

1. paramétrage des fichiers d'entrée pour GenOpt

- Etape 1 :
 - o conception du modèle thermique (géométrie : zones, surfaces, sous-surfaces... / matériaux et compositions / scénarii / consignes de T°C / équipements CVC / ...), en partie sous Sketchup, puis sous IDFEditor ou *via* un éditeur de texte
 - o Génération d'un fichier *input.idf* figé
- Etape 2 : transformation de *input.idf* en un fichier modèle (*_template.idf*), en transformant les paramètres que l'on veut faire varier (qui ont encore une valeur numérique fixe), par le nom des variables auxquelles ils sont associés, selon la convention suivante : %nom_variable% (leur définition précise est réalisée dans le fichier *command.txt*)
- Etape 3 : fichiers pour GenOpt
 - o Définition des variables et déclaration de l'algorithme (*command.txt*)
 - o Définition de la *fitness* dans *OptWinXP.ini*

2. phase exploratoire : AE/STD

Une fois les fichiers correctement paramétrés, les simulations peuvent être lancées : 

- GenOpt crée des dossiers temporaires (nommés *tmp-genopt-run-1*) où il stocke les fichiers définis dans *command.txt*, notamment le fichier *.idf* portant le nom du modèle (par exemple, si le *template* s'appelle *essai_genopt_template.idf*, le fichier temporaire s'appellera *essai_genopt1.idf*)
- Les %variables% de *essai_genopt_template.idf* sont remplacées par les valeurs définies dans *command.txt* et insérées dans *essai_genopt1.idf*, base des simulations sous e+
- Lorsque la simulation s'achève, les résultats (plus précisément l'ensemble des *function* définies dans *OptWinXP.ini*) sont stockés progressivement dans le fichier *OutputListingAll.txt*, et le dossier *tmp-genopt-run-1* et ce qu'il contient est supprimé
- Ce processus tourne sur un grand nombre d'itérations, jusqu'à ce que l'algorithme s'achève

3. post-traitement, visualisation

Cet aspect de la recherche sera explicité finement au 2.3.3. et dans la partie 3 consacrée aux expérimentations menées sur le principe de cet environnement logiciel, mais nous mentionnons ici la logique : dans le dossier contenant les 4 fichiers initiaux se trouve *OutputListingAll.txt* qui contient la totalité des données et résultats des simulations. Les données de ce fichier sont importées dans un logiciel de tableur, facilitant l'exploitation des résultats (souvent plusieurs centaines de lignes). De cette manière, il est possible de sélectionner quelques dizaines de résultats, selon divers critères (à la discrétion de chacun-e). Afin de visualiser cette sélection, il est nécessaire d'assurer un traitement des données, de telle sorte à ce que l'ensemble des « bâtiments » (ou volumes) sélectionnés se trouve dans un fichier *.idf* unique, qui puisse être importé dans Sketchup grâce au plugin OpenStudio.


```
ObjectiveFunctionLocation
{
    Name1    = Es_tot_kWh_m2;
    Function1 = "add( %E_lumiere_kWh_m2%, %E_chauffage_kWh_m2%)";

    Name2    = E_lumiere_kWh_m2;
    Function2 = "divide( %E_lumiere%, 3600000)";

    Name3    = E_chauffage_kWh_m2;
    Function3 = "divide(%E_chauffage_J%, 3600000)";

    Name4    = E_lumiere;
    Delimiter4 = "58,";

    Name5    = E_chauffage_J;
    Delimiter5 = "297,";
}
} // fin de la section Simulation
```

Enfin, le nom du fichier `command.txt` est précisé, car c'est dans ce fichier que `OptWinXP.ini` ira puiser les valeurs des variables, pour les remplacer dans un fichier d'entrée temporaire à partir du modèle `.idf` (template), lancer la simulation, lire les résultats `(.eso)` et les stocker, avant de lancer une nouvelle simulation. Chaque partie doit se clore par un `};` Pour ajouter des commentaires, il faut insérer deux slash `//`

```
Optimization {
  Files {
    Command {File1 = command.txt; }
  }
}
```

Nous insistons sur le fait que les données « brutes » des indicateurs repérées dans les fichiers de sortie EnergyPlus dédiés au stockage des résultats `(.eso : Standard Output File)` par un identifiant, qu'il est OBLIGATOIRE de définir. Il faut donc en premier lieu les repérer correctement. En effet, comme nous l'avons mentionné dans le précédent chapitre, EnergyPlus génère un certain nombre de fichiers de sortie, aux fonctions diverses. Ils sont générés automatiquement à la fin d'une simulation.

4. Syntaxe du fichier `command.txt` : déclaration des variables et de l'algorithme

Le fichier `command.txt` se divise en 3 parties :

| | |
|------------------------------------|--|
| <code>Vary{</code> | où l'on définit les variables (Parameter si elle est indépendante Function si elle dépend d'une ou plusieurs autre-s variable-s) |
| <code>OptimizationSettings{</code> | qui permet le réglage général du processus d'optimisation (nombre maximum d'itérations, de doublons, etc.) |
| <code>Algorithm{</code> | où l'on appelle l'algorithme souhaité |

Définition des variables

Les variables, quelle que soit leur nature, sont déclarées entre Vary{ et }

Variables indépendantes continues

La définition d'une variable continue nécessite : nom, valeurs minimale et maximale, valeur initiale, pas de variation.

```
Vary{
    Parameter{ Name= X; Min = 3; Ini = 6; Max = 12; Step= 1.0;
    } // fin de la déclaration de la variable
    Parameter{ Name= x1_sud; Min = 0; Ini = 0.5; Max = 1; Step= 0.1;
    }
    .....
} // fin de la déclaration de l'ensemble des variables
```

Variables indépendantes discrètes

Tous les algorithmes ne fonctionnent pas avec des variables discrètes. C'est le cas de l'algorithme de Hooke and Jeeves. Une variable discrète se définit ainsi :

```
Parameter{Name = String; Ini = Integer; Values="valeur1, valeur2, valeur3";[ Type = SET; ]}
```

Variables dépendantes

Ces variables sont en réalité des fonctions, c'est-à-dire qu'elles sont directement corrélées à la variation d'une variable indépendante (*Parameter*). Une fois ceux-ci déclarés, on définit une fonction (*Function*) :

```
Vary{
    Parameter{ Name= X; Min = 3; Ini = 6; Max = 12; Step= 1.0;
    }
    Parameter{ Name= Y; Min = 3; Ini = 6; Max = 12; Step= 1.0;
    }
    Parameter{ Name= x1_sud; Min = 0; Ini = 0.5; Max = 1; Step= 0.1;
    }
    .....
    Function{ Name =convY_H_L; Function = "divide( 3.0, %Y%)" ;
    }
    Function{ Name= xFen1_Sud; Function="add(0.1,multiply(0.5,%x1_sud%,add(%X%,-1)))";
    }
}
```

Ces *Function* peuvent avoir recours à différentes fonctions mathématiques, telles que : 'Add' pour une somme, 'Multiply' pour multiplier, 'Divide' pour diviser (NB : Fonction = "divide(3.0, %Y%)" ; réalise l'opération « 3 divisé par %Y% »)... La déclaration de la fonction débute par " et s'achève par ". Une fonction mathématique peut être incluse dans une autre. La variable indépendante (*Parameter*) dont dépend cette *Function* doit être mise entre '%' pour être reconnue. Cette fonctionnalité peut être très intéressante, notamment pour garder des proportions, pour ne pas accroître le nombre de variables indépendantes, etc.

Réglages généraux de l'optimisation

Ces réglages ont été laissés tels quels :

```
OptimizationSettings{
  MaxIte = 2000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
  UnitsOfExecution = 0;
}
```

Implémentation du PSO/HJ

Dans le fichier *command.txt*, il suffit de copier-coller la syntaxe suivante dans la partie « Algorithme », en ajustant au besoin les paramètres relatifs aux 2 algorithmes (PSO et HJ) :

| | |
|------------------------------------|---|
| Algorithm{ | |
| Main = GPSPSOCCHJ; | Syntaxe pour appeler l'algorithme |
| NeighborhoodTopology = vonNeumann; | Nom de l'algorithme (correspond au nom du fichier .java du dossier) |
| NeighborhoodSize = 5; | Voisinage : type ("gbest", "lbest" ou "vonNeumann") |
| NumberOfParticle = 15; | Voisinage : taille |
| NumberOfGeneration = 15; | Particules : nombre d'individus pour chaque itération |
| Seed = 1; | Génération : nombre de lancements de l'algorithme |
| CognitiveAcceleration = 2.8; | « Graine » |
| SocialAcceleration = 1.3; | Accélération cognitive |
| MaxVelocityGainContinuous = 0.5; | Accélération sociale |
| MaxVelocityDiscrete = 4; | Vitesse maximale (en gains continus) |
| ConstrictionGain = 0.5; | Vitesse maximale (discrètes) |
| MeshSizeDivider = 2; | Constriction (resserrement de la maillure) |
| InitialMeshSizeExponent = 0; | Diviseur de maillage |
| MeshSizeExponentIncrement = 1; | Exposant du maillage initial |
| NumberOfStepReduction = 4; | Pas (incrément) de la taille du maillage |
| } | Nombre de réductions du pas |

5. Déroulement des simulations

Une fois GenOpt lancé, les simulations se déroulent automatiquement. Une fenêtre de commande est constamment présente : il s'agit d'EnergyPlus, qui effectue les simulations. La partie texte de l'interface de GenOpt indique progressivement les résultats des simulations (les *Name* et *Function* définis dans *optWinXP.ini*), tandis qu'une partie graphique permet leur représentation visuelle. C'est données sont celles qui sont stockées progressivement dans *OutputListingAll.txt*. Différentes simulations peuvent être lancées en parallèle par EnergyPlus.

2. Post-traitement : écriture d'un programme en Visual Basic

Les colonnes de *OutputListingAll.txt* contiennent notamment les valeurs prises à chaque simulation (chaque ligne dans ce fichier) par les paramètres variables. Il s'agit donc des valeurs qui ont été prises à chaque simulation par les %variables% du fichier *_template.idf* pour générer un fichier d'entrée .idf temporaire.

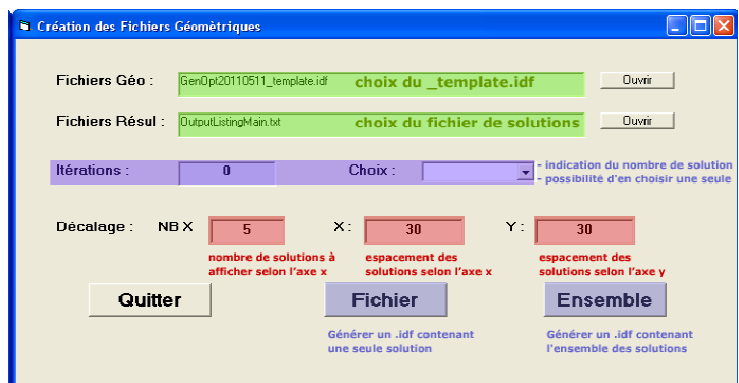
Afin de visualiser une solution, il est nécessaire d'avoir un fichier .idf avec des valeurs fixes, que l'on pourrait importer dans SketchUp. Pour visualiser un ensemble de solutions, il faut pouvoir toutes les stocker dans un même fichier .idf, avec les valeurs fixes correspondant à chaque ligne de *OutputListingAll.txt*.

Nous avons donc écrit un programme en Visual Basic, qui permet de générer un tel fichier .idf. Son principe est de rechercher dans l'en-tête des colonnes la chaîne de caractères correspondant au nom de chacune des %variables% du fichier *_template.idf*. Cela permet d'identifier le numéro de la colonne correspondant à telle variable. A chaque ligne est donc associée un ensemble de zones, surfaces, sous-surfaces (toujours selon le principe d'héritage), dont les caractéristiques variables prennent la valeur correspondant à la simulation.

Comme nous l'avons exposé, les différents objets géométriques doit être identifiés par un nom unique. Si bien que lorsqu'on souhaite visualiser plusieurs solutions, il est important de les nommer distinctement, des zones aux sous-surfaces. Pour ce faire, à chaque ligne est associé un numéro d'incrémementation, venant achever la dénomination de chaque élément. Ainsi, par exemple :

- pour la ligne 1 : bureau1, mur_sud1, mur_ouest1..., fenetre_sud1...
- pour la ligne 5 : bureau5, mur_sud5, mur_ouest5..., fenetre_sud5...
- pour la ligne i : bureaui, mur_sudi, mur_ouest1..., fenetre_sudi...
- ...

Enfin, la zone est identifiée par une origine (x,y,z). Cette origine également doit varier de zone en zone, afin qu'elles ne se superposent pas dans SketchUp. On indique le nombre de solutions selon l'axe x, et l'espacement entre les solutions selon x, et selon y. L'interface est la suivante :



2.3. Couplage et validation de l'environnement logiciel

2.3.1. Interactions entre les différents programmes : chaîne de modélisation

Dans le précédent chapitre, a été présentée la logique de couplage des différents programmes interagissant dans le processus d'optimisation, du paramétrage des fichiers à leur visualisation. Le schéma ci-dessous dresse la liste des étapes « pratiques » de configuration des fichiers, en précisant les programmes permettant de saisir les données et ceux qui, d'une certaine manière, les transforment.

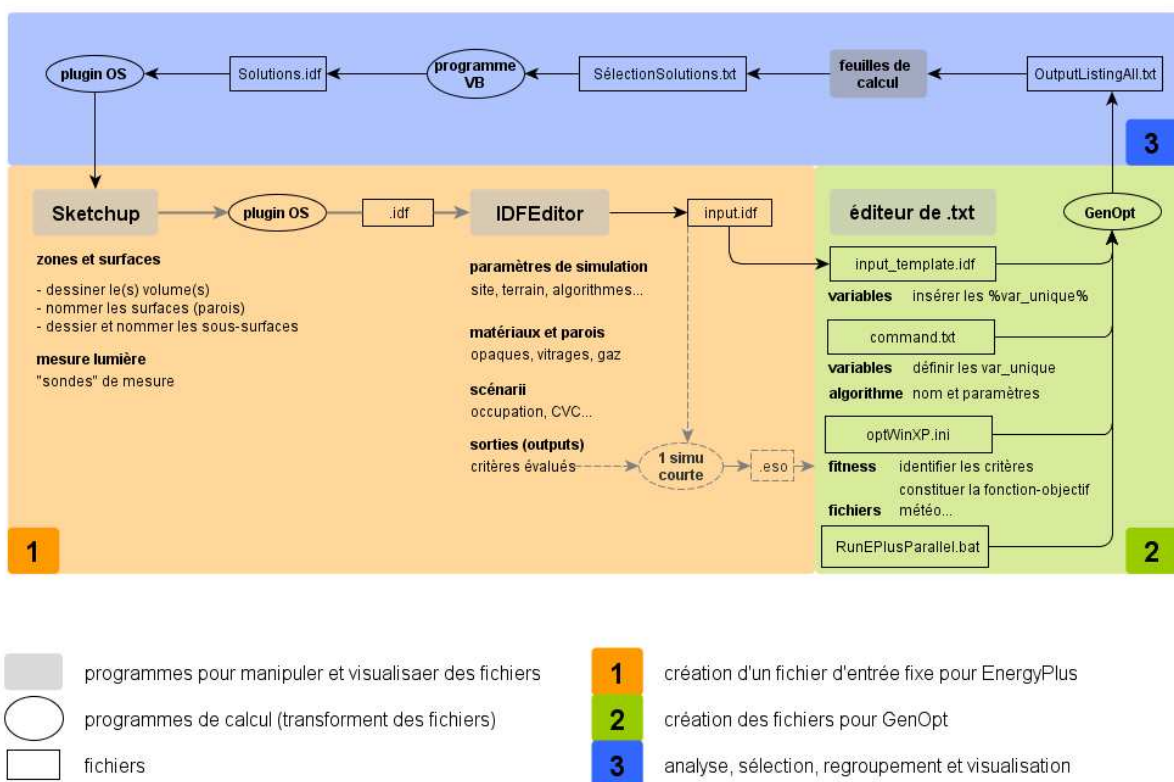


Figure 47 : "chaîne" de modélisation

2.3.2. Test comparatif thermique : EnergyPlus vs. Pléiades-Comfie

Une série de tests sur modèles réduits a ensuite permis de valider les résultats obtenus avec le couplage GenOpt/EnergyPlus, par comparaison avec les calculs du logiciel français Pléiades-Comfie. Le modèle géométrique est un cube de 3 m de côté. Les matériaux des parois et le nombre de fenêtres diffèrent d'un modèle à l'autre :

1. 6 parois en béton non isolé / aucune baie
2. 6 parois en béton non isolé / 1 baie 1.5 m * 1.5 m sur la face Sud
3. Sol et toit béton non isolé / 1 baie par paroi

1. Préalable : homogénéisation des paramétrages des deux programmes

Différences d'hypothèse entre les deux logiciels

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par les deux logiciels, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation de leurs méthodes et hypothèses de calcul.

Comfie présente quelques lacunes quant à son traitement des phénomènes convectifs de surface, le suivi de la tâche solaire ou encore les mouvements d'air. Alors qu'EnergyPlus permet d'évaluer les coefficients de convection (intérieur et extérieur) à chaque pas de temps, par le biais de corrélations intégrant les écarts de température entre les surfaces considérées et l'air (Wurtz et al., 2009), et traite des phénomènes radiatifs tel que nous l'avons exposé au précédent chapitre, le noyau Comfie adopte des coefficients fixes au sein desquels il fige les échanges superficiels par convection. Pour la convection extérieure, la prise en compte des effets du vent se fait par le biais d'un critère d'exposition au vent (fort, abrité ou normal). Les transferts radiatifs grande longueur d'onde vers l'extérieur (sol, ciel, bâtiments environnants,...) sont également inclus dans les coefficients h_{ext} . La donnée de la température de ciel n'est pas non plus prise en compte dans ce modèle.

| Position de la paroi | émissivité | h_{int} | h_{ext} (selon exposition au vent) | | |
|----------------------|------------|-----------|--------------------------------------|---------|--------|
| | | | normale | abritée | sévère |
| verticale | 0.9 | 8.13 | 18.2 | 12.5 | 33.3 |
| | 0 | 3.29 | 14.9 | 9.1 | 33.3 |
| plafond externe | 0.9 | 9.43 | 22.2 | 14.3 | 50 |
| | 0 | 4.59 | 18.9 | 11.1 | 50 |
| plancher externe | 0.9 | 6.67 | 20 | 20 | 20 |
| | 0 | 1.78 | 20 | 20 | 20 |
| horizontale interne | 0.9 | 8 | - | - | - |
| | 0 | 3 | - | - | - |

Pour simplifier les modèles, nous avons considéré une émissivité nulle, l'objet de cette comparaison les facultés de l'un et l'autre, mais le calibrage du modèle, afin de valider le couple GenOpt/EnergyPlus.

La distribution solaire pour EnergyPlus a été réglée sur *MinimalShadowing*.

Enfin, notons deux différences supplémentaires :

- Pléiades-Comfie calcule sur des années de 364 jours (soit 8736 heures), alors que EnergyPlus inclut le 28 février (les fichiers météo font 365 jours, soit 8760 heures) ; pour y remédier, nous avons « shunté » cette date dans EnergyPlus
- Pléiades-Comfie prend une température initiale des zones égale à la température extérieure, tandis que EnergyPlus la fixe à 23°C puis laisse s'homogénéiser en fonction de la température extérieure.

Réglage des modèles

Parois :

L'ensemble des modèles est composé de parois identiques non isolées (les 5 faces hors plancher ont la même composition), présentant les caractéristiques suivantes ($U_{\text{paroi}}=5.9 \text{ W/m}^2.\text{K}$ et $U_{\text{plancher}}=0.84 \text{ W/m}^2.\text{K}$ hors résistances superficielles) :

| Parois et toit | ép. (cm) | lambda (W/m.K) | R (m ² .K/W) | masse vol (kg/m ³) | chal. Spécifique (J/kg.K) |
|----------------|----------|----------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| BA13 | 1.3 | 0.32 | 0.04 | 850 | 799 |
| Béton lourd | 15 | 1.75 | 0.09 | 2300 | 920 |
| BA13 | 1.3 | 0.32 | 0.04 | 850 | 799 |

| Plancher | ép. (cm) | lambda (W/m.K) | R (m ² .K/W) | masse vol (kg/m ³) | chal. Spécifique (J/kg.K) |
|---------------------|----------|----------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Béton lourd | 20 | 1.75 | 0.11 | 2300 | 920 |
| Polystyrène expansé | 4 | 0.039 | 1.03 | 25 | 1380 |
| Mortier | 5 | 1.15 | 0.04 | 2000 | 840 |
| Carrelage | 2 | 1.7 | 0.01 | 2300 | 700 |

Emissivité et absorptivité sont fixées à 0.

La modélisation des fenêtres dans EnergyPlus se fait par la méthode simplifiée, conformément à ce qu'impose Pléiades. Les fenêtres sont des double-vitrages 4/12/4 avec les caractéristiques suivantes :

| Type | g moyen | Ug (W/m ² .K) |
|-----------------|---------|--------------------------|
| DV (100% vitré) | 0.53 | 2.95 |

Températures de consignes :

- Chauffage : 19°C de 7h à 21h, tous les jours de l'année (364 jours) ; 15°C le reste du temps
- Refroidissement : 27°C constamment (tous les jours, toute l'année)

Données météo

Nous avons utilisé le fichier .iwec de Nancy fourni avec EnergyPlus. Météocalc (Izuba Energie) permet d'importer ce fichier pour le mettre au format .TRY reconnu par Pléiades. Nous avons vérifié la correspondance après import, et également en analysant les températures horaires qui apparaissent dans le fichier de résultats. Les données concordent exactement.

Occupation et équipements : le volume n'est ni occupé, ni ventilé, ni équipé. La température du sol est fixée à 18°C toute l'année. L'albédo n'est pas pris en compte.

2. Trois modèles monozone simples

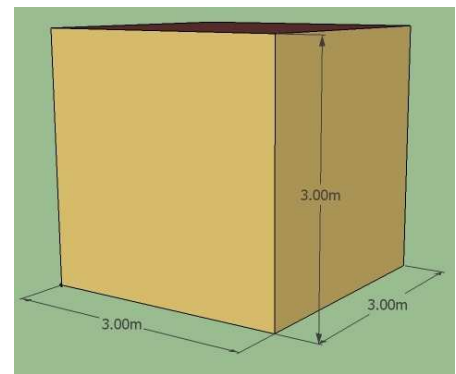
Il s'agit de réaliser des simulations en évolution libre, c'est-à-dire sans consignes de chauffage, afin d'observer l'évolution de la température intérieure d'un programme à l'autre. Les méthodes de calcul des consommations de chauffage étant différentes, elles seront ici purement indicatives. Pléiades-Comfie réalise un calcul basé sur les DJU, tandis que sous EnergyPlus, nous avons paramétré des réponses idéales du système CVC, sans limite de puissance. Cela signifie que dès que la température intérieure est en dehors des limites de consigne, le système peut répondre rapidement et sans limitation de puissance aux conditions de confort. De fait, les résultats ne peuvent pas s'aligner, mais l'objectif est avant tout d'observer les tendances à la diminution ou non. Ces informations auront donc une valeur qualitative.

Modèle 1 : cube intégralement opaque

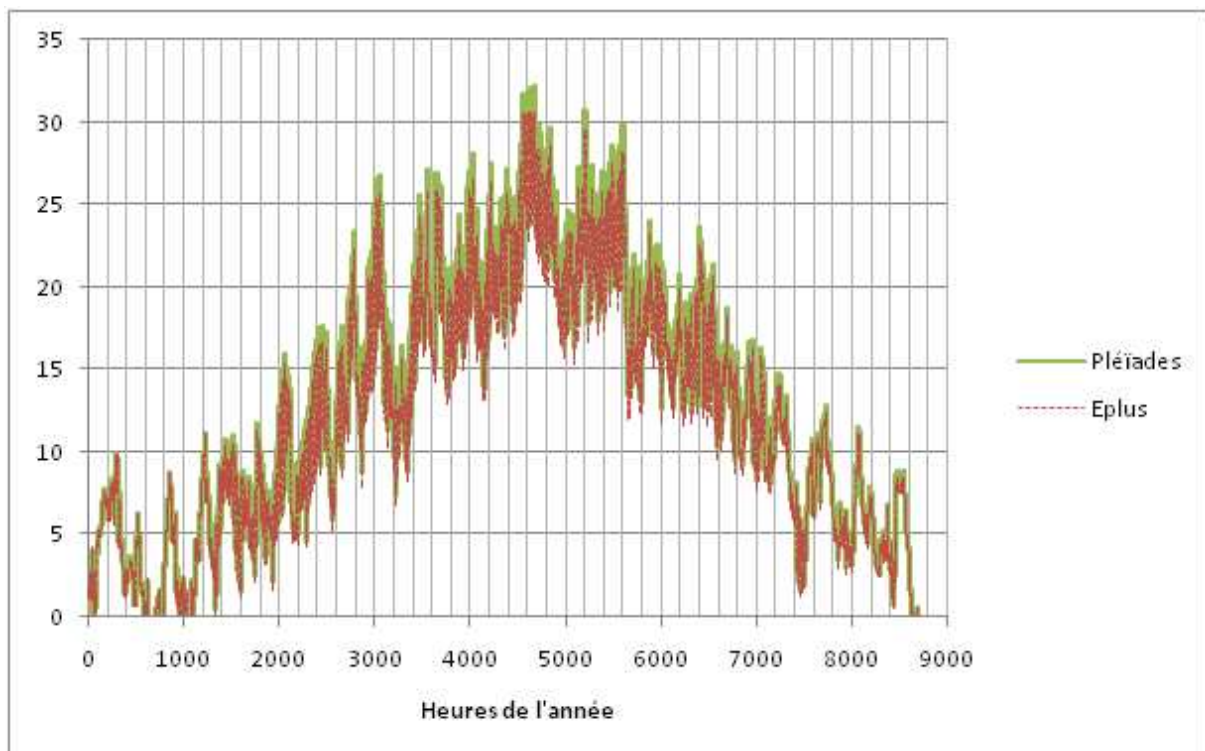
Il s'agit d'un cube de 3 m de côté, orienté selon les directions cardinales. Sans consignes de températures, les températures extrêmes et moyennes sont :

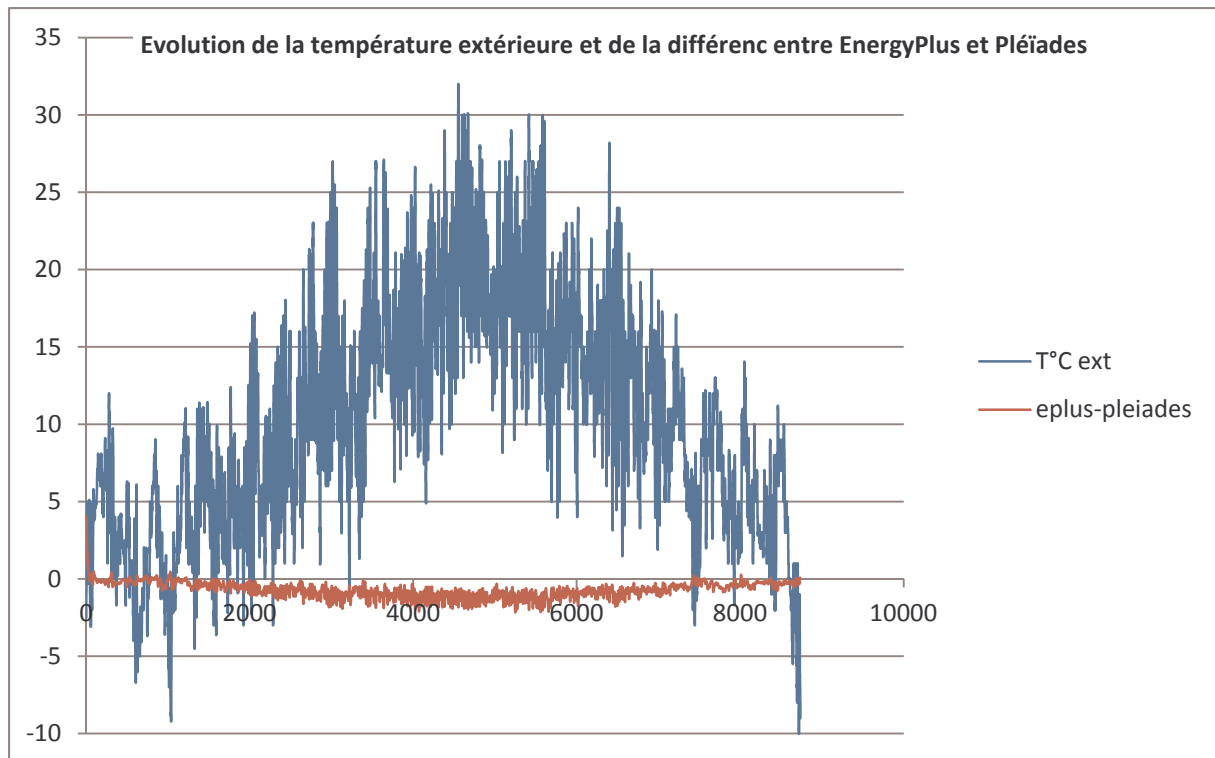
| | Eplus | Pléiades | Différence* |
|------------|-------|----------|-------------|
| min | -5.4 | -5.1 | -2.2 |
| moy | 12.1 | 12.8 | -0.7 |
| max | 30.6 | 32.2 | 4.1 |

*températures obtenues par EnergyPlus « moins » températures obtenues avec Pléiades



Elles sont très proches, l'écart de 5.4°C étant lié à la mise à température lors des premières heures. L'évolution horaire des températures dans la zone, pour chaque logiciel est :





Les courbes coïncident, et dans le cas général se recouvrent. Leurs pics extrêmes sont les mêmes, sauf pour la surchauffe, moindre avec EnergyPlus. D'une manière générale, les températures intérieures sont légèrement plus faibles avec EnergyPlus, mais le delta reste très faible (moyenne annuelle de -0.7°C ; en période estivale, la différence ne dépasse guère 2°C).

Consommations énergétiques

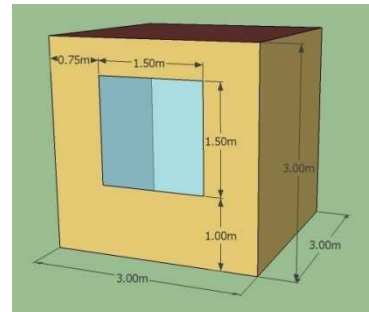
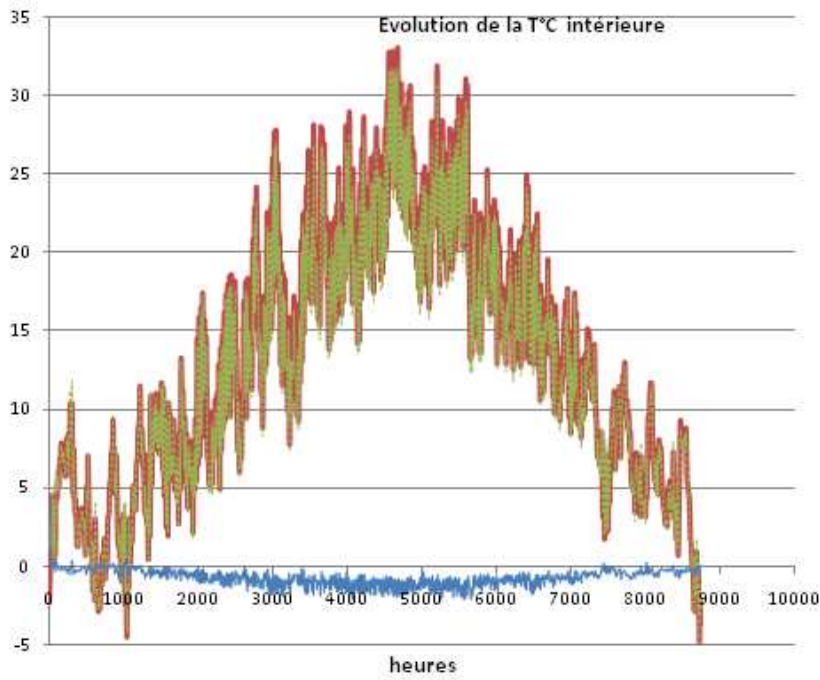
Pour ce modèle, lorsque l'on impose les températures de consigne, on obtient :

| Consommations (kWh) | eplus | P+C | ratio |
|----------------------------|--------------|------------|--------------|
| Refroidissement | 26 | 81 | 3.1 |
| Chauffage | 5573 | 7304 | 1.3 |

La différence des températures intérieures, accumulée sur une année, ainsi que les différents modèles de calculs des charges, expliquent les différences de consommation.

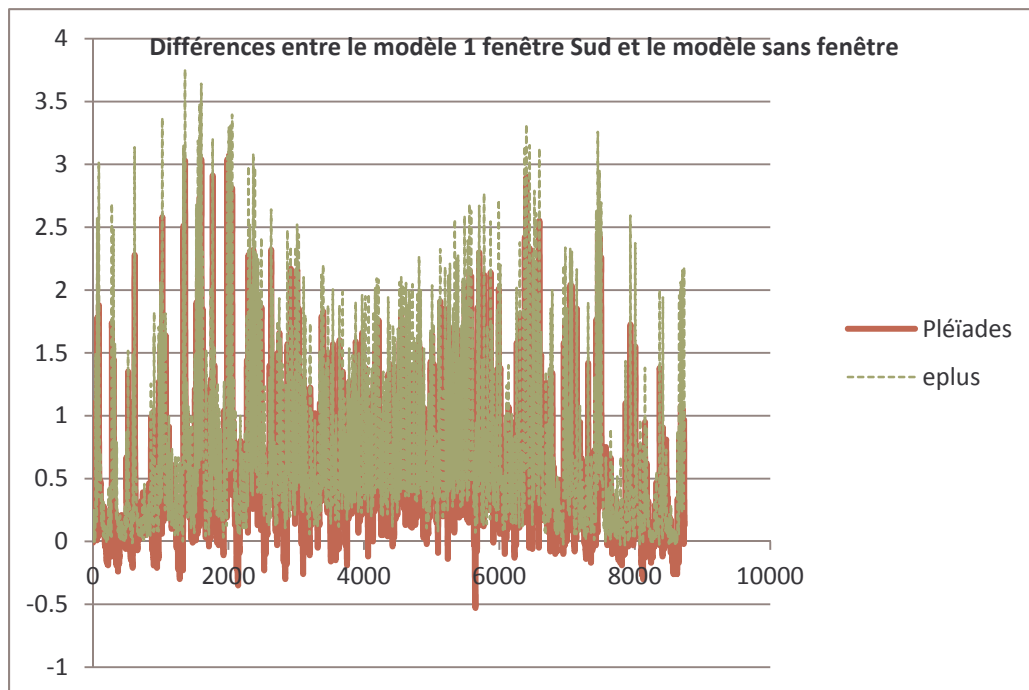
Modèle 2 : cube opaque avec 1 vitrage Sud

Au précédent modèle nous ajoutons une baie plein sud.



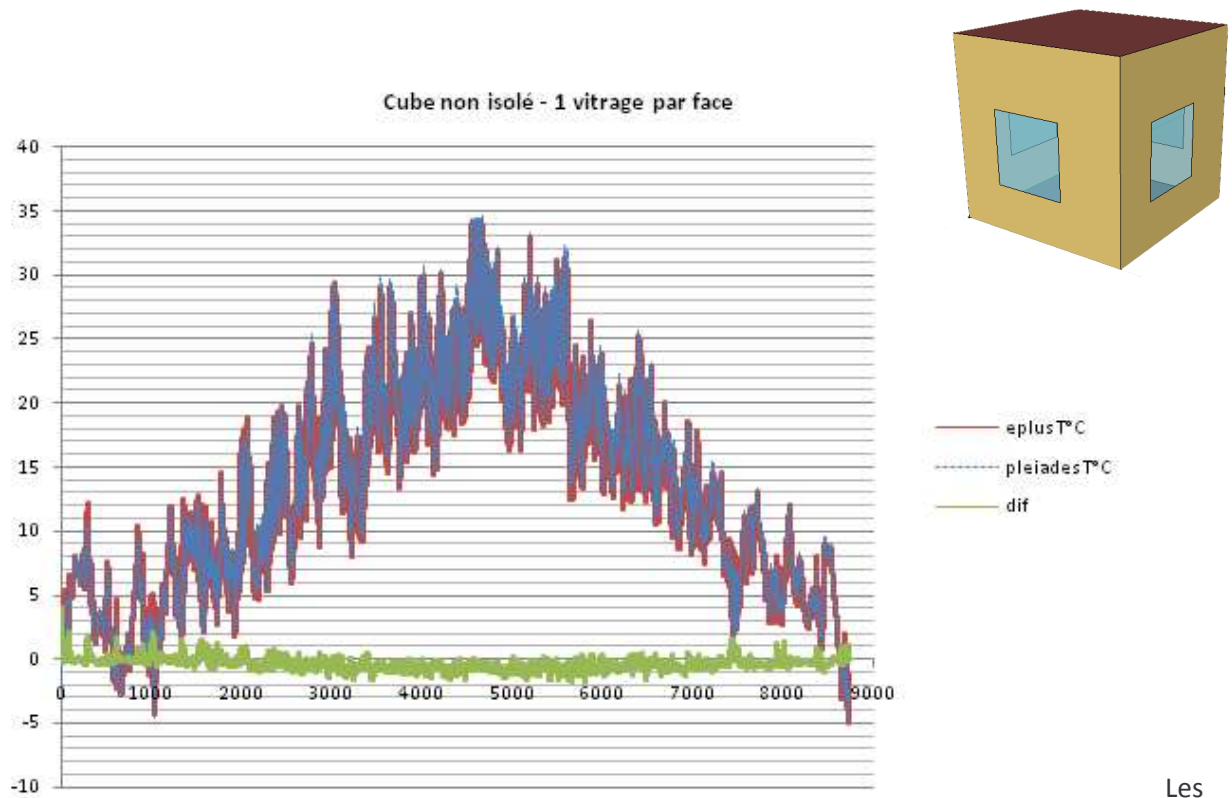
- Pléiades
- - - eplus
- eplus-Pléiades

Les observations sont les mêmes que pour le modèle sans fenêtres, avec une très forte similitude des profils de températures. L'évolution du précédent modèle à celui-ci, pour chaque programme est :



L'ajout d'une fenêtre plein Sud est positif pour les deux programmes. Dans EnergyPlus, l'apport global est plus important.

Modèle 3 : cube avec 1 baie sur chaque paroi verticale



Les

températures des deux logiciels correspondent bien. Au niveau des consommations, des divergences apparaissent encore :

| | Es_tot_kWh | E_chauffage_kWh | E_froid_kWh |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| E+ | 5052.6 | 4941.2 | 111.4 |
| P+C | 7005 | 6779 | 226 |
| Différence | 1952.43661 | 1837.818146 | 114.6184602 |
| % | 38.6% | 37.2% | 102.9% |

Du fait des différences de

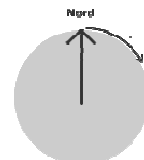
températures, on note que P+C nécessite 39% de charges totales supplémentaires pour atteindre le niveau de confort fixé.

2.3.3. Un modèle optimisé : taille du vitrage Sud et orientation

Nous reprenons le précédent modèle, avec 4 fenêtres (une par face), chacune initialement orientée selon les 4 directions cardinales. Nous cherchons à optimiser les consommations énergétiques en faisant varier l'orientation du volume et les dimensions de la fenêtre. Sous GenOpt, nous définissons :

- « azimuth » : variable de 0 à 180° par pas de 20°, avec valeur initiale de 0°

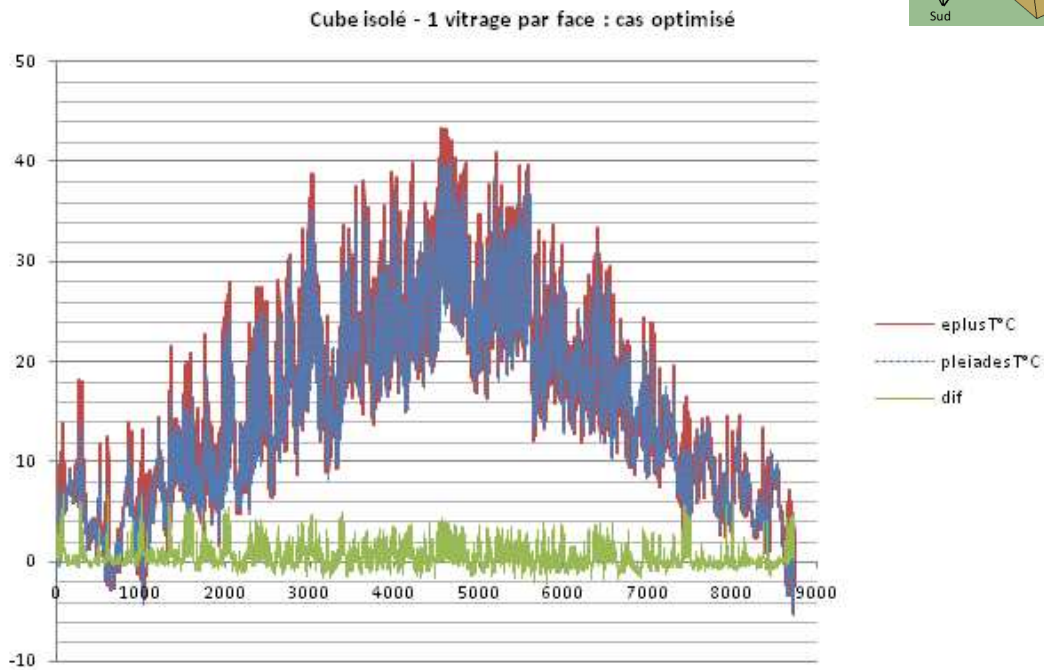
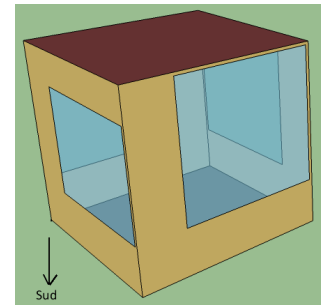
Parameter{ Name= azimuth; Min = 0; Ini = 0; Max = 180; Step= 20;}



- « LFen_Sud » et « HFen_Sud » : respectivement largeur et hauteur de la baie au Sud, variables de 0.2 à 2.2 m, par pas de 0.5 m, avec valeur initiale de 1.2 m

Parameter{ Name =LFen1_Sud; Min = 0.2; Ini = 1.2; Max = 2.2; Step= 0.5;} // idem pour HFen1_Sud

Nous souhaitons donc vérifier que l'optimisation thermique réalisée via GenOpt/EnergyPlus est valide (algorithme PSO/HJ). Nous choisissons aléatoirement une des solutions ayant permis de diminuer les charges annuelles de chauffage et refroidissement. Celle-ci présente le profil de température intérieur suivant, lorsque l'on met le volume en évolution libre :



Ici, les tendances sont les mêmes, mais on constate que, si la partie basse des oscillations de l'un et de l'autre sont semblables, la partie haute d'EnergyPlus est toujours supérieure.

| | Es_tot_kWh | E_chauffage_kWh | E_froid_kWh |
|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| E+ | 4440.0 | 3846.0 | 594.0 |
| P+C | 5549 | 4994 | 555 |
| <i>Différence</i> | <i>1109.01301</i> | <i>1148.007537</i> | <i>-38.99452374</i> |
| % | 25.0% | 29.8% | -6.6% |
| evol. E+ | -12.1% | -22.2% | 433.3% |
| evol. P+C | -20.8% | -26.3% | 145.6% |

Nous constatons que ce nouveau modèle :

- Accroît les charges de refroidissement (de manière très importante pour EnergyPlus)
- Diminue de manière à peu près équivalente les dépenses de chauffage
- Améliore globalement le modèle initial de 12% pour EnergyPlus et de 20% pour Pléiades-Comfie.

Les raisons des différences sont celles déjà exposées au préalable. Nous voyons donc que le couplage GenOpt/EnergyPlus, avec l'algorithme PSO/HJ, est opérant puisqu'il permet bien d'obtenir des solutions globalement plus performantes du point de vue thermique.

3. Expérimentations

Précisons d'emblée que l'objectif de ces expérimentations n'est pas de qualifier la faisabilité de la basse consommation dans un endroit donné. Elles cherchent plutôt à mesurer l'impact de tel ou tel paramètre sur la consommation énergétique annuelle, et à vérifier que les choix possibles durant la conception ne sont pas uniques et, dès lors, qu'ils n'agissent pas comme une contrainte. L'ensemble des résultats est présenté en annexe (pour illustration, seuls les résultats pour Nancy sont affichés dans cette partie).

3.1. Méthodologie et invariants des modèles

Cette partie expose différentes expérimentations réalisées autour de cet environnement logiciel. Après différentes discussions, le choix s'est porté sur des volumes géométriques simples (et non une « maison standard » à optimiser par exemple), principalement pour les raisons suivantes :

- Nous pouvons y faire varier successivement différents paramètres, et les analyser également progressivement ; la multiplication de trop nombreux paramètres de nature sensiblement différente tendrait à compliquer l'analyse des résultats
- La superposition de différents modules peut permettre à terme de reconstituer des édifices bien plus complexes, aussi mieux vaut-il travailler dans un premier temps sur des modules unitaires
- Cela permettrait de tester le couplage sur des modèles nécessitant des temps de calcul plus réduits
- La visualisation des résultats dans Sketchup était simplifiée
- Cela permettait une appropriation plus fine des outils
- Opter pour un modèle de bâtiment allait de pair avec la définition de régimes d'occupation plus précis, ce qui n'était pas véritablement au cœur de nos objectifs

3.1.1. Méthodologie

La démarche s'est en partie construite au fur et à mesure de la compréhension et de l'apprentissage des outils, et donc à partir d'une meilleure maîtrise des potentialités et limites de l'environnement logiciel. Nous avons procédé comme suit :

1. Déterminer un environnement logiciel adapté à la problématique, et performant
2. Valider l'environnement logiciel
3. Expérimenter l'environnement logiciel

Les expérimentations sont présentées dans cette partie. Un modèle cubique simple a servi de base. Les variables ont été étudiées progressivement, selon l'ordre suivant (qui reprend le plan de cette partie) :

3.2. Test 1 : variation des fenêtres et des protections solaires

- Variables = « dimensions des baies »
- Variante : ajout des variables « dimensions des protections solaires »

3.3. Test 2 : orientation et volume

- Les dimensions des baies sont variables comme dans le test 1.
- Test 2.1. : variable = orientation du bâtiment
- Test 2.2. : variable = gabarit

3.4. Combinaison de 4 types de variables sur le site Nancy

3.5. Test 3 : variables = matériaux

- Variante 1 : variables = épaisseur de la « masse » et conductivité de l'isolant
- Variante 2 : variable = coefficients g et TL des vitrages

3.6. Test 4 : localisation des fenêtres

3.1.2. Invariantes

Trois sites pour chaque série de test : afin de rendre compte de la diversité climatique de la France Métropolitaine, chaque série de test (et leurs variantes) ont été appliquées à : Nancy, Brest et Montpellier.

Type de bâtiment et morphologie : les modèles sont mono-zones et parallélépipédiques (l'objectif à terme étant de superposer ces zones, selon X,Y ou Z). Les ponts thermiques ne sont pas pris en compte. Il n'est pas compliqué de les intégrer, mais leur modélisation n'apporterait que peu dans la comparaison des différentes solutions.

Matériaux et composition des parois :

Matériaux utilisés

| Caractéristiques | Enduit de chaux | Enduit terre (adobe crue) | Ouate de cellulose soufflée | Paille (label BBC) | Panneau OSB |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|
| Epaisseur (m) | 0.01 | 0.06 | 0.30 | 0.45 | 0.012 |
| Conductivité thermique (W/m-K) | 0.7 | 0.64 | 0.04 | 0.069 | 0.12 |
| Densité (kg/m ³) | 1600 | 1450.00 | 23.00 | 110 | 470 |
| Chaleur spécifique (J/kg-K) | 850 | 850.00 | 1900.00 | 1332 | 2500 |

Le verre pour le vitrage a été choisi dans la base de données IGDB :

WindowMaterial:Glazing,

| | |
|-----------------|--|
| SpectralAverage | Optical Data Type |
| 0.0038 | Thickness {m} |
| 0.837 | Solar Transmittance at Normal Incidence |
| 0.075 | Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence |
| 0.075 | Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence |
| 0.898 | Visible Transmittance at Normal Incidence |
| 0.081 | Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence |
| 0.081 | Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence |
| 0 | Infrared Transmittance at Normal Incidence |
| 0.84 | Front Side Infrared Hemispherical Emissivity |
| 0.84 | Back Side Infrared Hemispherical Emissivity |
| 0.9 | Conductivity {W/m-K} |

Parois opaques

| Murs | épaisseur | U (W/m ² .K) | R (m ² .K/W) |
|---------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| Enduit de chaux | 0.01 | 70.00 | 0.01 |
| Enduit terre (adobe crue) | 0.06 | 10.58 | 0.09 |
| Paille (label BBC) | 0.45 | 0.15 | 6.52 |
| Enduit terre (adobe crue) | 0.06 | 10.58 | 0.09 |
| Enduit de chaux | 0.01 | 70.00 | 0.01 |
| TOTAL | 0.59 | 0.15 | 6.74 |

| Toit et sol | épaisseur | U (W/m ² .K) | R (m ² .K/W) |
|-----------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Panneau OSB | 0.012 | 10.00 | 0.10 |
| Ouate de cellulose soufflée | 0.3 | 0.14 | 7.14 |
| Panneau OSB | 0.012 | 10.00 | 0.10 |
| TOTAL | 0.324 | 0.14 | 7.34 |

L'absorptivité thermique est fixée à 0.9 et les absorptivités solaires et visibles sont fixes à 0.7 pour tous les matériaux opaques.

Parois vitrées

Hormis pour la série de test n°3 (variante 2), les baies sont des doubles vitrages (DV), composés de deux couches du verre (caractérisé ci-dessus) de 3.8 mm, de part et d'autre d'une lame d'air de 16 mm. Les calculs effectués par Windows 6.3 le donne équivalent à un DV de :

- Ug = 2.725 W/m².K
- g = 0.766
- TL = 0.814

Occupation et équipements

Nous n'avons pas pris en compte l'occupation des locaux, ni leurs équipements. Ce choix ne nie pas l'impact que cela peut avoir sur le bilan annuel (moins de chauffage en hiver et surchauffes potentielles en été dans le cas général), nous en sommes plus que conscient. Toutefois, cela se justifie par la volonté d'observer ce qui se passe au sein d'un bâtiment « vide » (en évolution libre) et, pour ainsi dire « neutre », l'objectif premier étant de mesurer la « solarité » des modèles. Par ailleurs, la prise en compte de ces éléments dans le paramétrage du modèle ne nécessite pas de prouesse technique particulière, aussi il serait relativement aisé de les y intégrer dans un deuxième temps.

Les équipements se limitent à l'éclairage artificiel. Nous avons pris une valeur moyenne de 18 W/m². La lumière se déclenche lorsque l'éclairage naturel en 2 points de mesures passe sous le seuil de 500 lux.

Scénarii

Chauffage : du 1/1 au 31/12

- 15°C de 20h à 8h en semaine
- 19°C de 7h à 8h en semaine
- 15°C 24h/24 le week-end

Rafrâchissement : du 1/1 au 31/12

- 27°C de 7h à 20h en semaine
- aucune consigne en dehors de cette plage horaire

Ventilation naturelle : tous les jours de la semaine

- du 1/1 au 15 mars : 0 vol./h (24h/24)
- du 16/3 au 1/6 : 5 vol./h de 20h à 8h
- du 2/6 au 15/10 : 12 vol./h de 20h à 8h
- du 16/10 au 31/12 : 0 vol./h (24h/24)

Eclairage artificiel : du 1/1 au 31/12 (se déclenche entre 8h et 20h sous 500 lux de lumière naturelle)

Autre

- Distribution solaire : *FullInteriorAndExterior*
- Modèle conductif : Conduction Transfer Method
- Coefficients de convection :
 - o Intérieur : modèle simple
 - o Extérieur : modèle simple détaillé
- Pas de temps : 1/4h
- Température du sol : 18°C
- Albédo : 0.2 (béton)

3.1.3. Objectif mesuré (performance)

La mesure « fitness » est, sauf mention contraire, la somme des consommations de lumière (nous nous servons du calcul de l'autonomie en lumière naturelle de EnergyPlus), de chauffage et de refroidissement. C'est cette valeur agrégée que nous cherchons à réduire. Dans le fichier .eso, nous identifions le numéro correspondant à chacun de ces trois indicateurs, et le définissons dans le fichier optWinXP.ini comme exposé dans la précédente partie.

Précisions : afin de ne pas concentrer les recherches de l'algorithme sur la réduction des consommations liées au refroidissement, nous avons inclus une ventilation naturelle nocturne telle que définie ci-dessus. Evidemment, il serait nécessaire d'affiner les réglages (dates et heures, débits...). Nous avons opté pour la méthode de modélisation simple, explicitée dans la partie 2.

Visualisation : La représentation graphique simultanée de plusieurs résultats était souhaitée, mais nous avons estimé nécessaire d'en limiter le nombre par fichier, afin de ne pas en compliquer la lecture.

3.2. Série de tests 1 : dimensions des baies et des protections solaires

Pour cette série de simulations, nous avons dans un premier temps fait varier uniquement la taille des fenêtres, puis dans un second temps (variante 2) celle des fenêtres et des protections solaires. Le volume de départ est un simple cube de 3 m de côté, dont les parois opaques sont tel qu'indiqué au 3.1.

Précisions pour la lecture des graphiques :

- $E_{tot} = f(\% \text{ vitrages/opaque})$ représente la répartition des solutions trouvées par l'algorithme, relatives au pourcentage vitré de chacune des 4 faces
- $E_{tot} = f(\% \text{ vitrages/surface au sol})$ donne, par face, la part vitrée par rapport à la surface au sol
- $E_{tot} = f(\text{vitrage OUEST})$ apporte deux "mesures" du vitrage : le poids des vitrages de chaque face dans la surface vitrée totale et la part vitrée de chaque face
- "Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage" donne des indications sur l'ensemble de la part vitrée du volume (toutes faces confondues) : surface totale des vitrages par rapport à la surface au sol et par rapport aux parois déperditives vitrées (hors toit donc)

3.2.1. Variante 1 : variation dimensionnelles des baies

Chaque face verticale dispose d'une fenêtre. Cette fenêtre est, quelle que soit sa taille, centrée sur la face (les centres de la fenêtre et de la paroi coïncident en permanence). La fenêtre est donc définie de telle sorte à ce qu'elle ne dépende que d'une variable indépendante : la connaissance de la coordonnée x permet de déterminer y , puis les deux dimensions L et H . La baie étant centrée, il est simple à partir d'une variable de définir automatiquement les autres informations. Cela marche de la même manière sur une demi-face, un quart de face,... quelle que soit la géométrie de la paroi (carré ou rectangle).

La face étant de forme carrée, on a : $x=y$. La largeur (ou la hauteur) peut donc varier de $3-2x$ (ou $3-2y$). La baie ne peut toucher l'arête du cube et ne peut être nulle, donc, en gardant une marge de 10 cm, elle peut varier de 0.2 m à 2.8 m en largeur et en hauteur. Nous faisons donc varier $x (= y)$ de 0.1 à 1.4 (moitié de la largeur amputée de 10 cm), et avec cette seule variable faisons varier y , L et H .

Nous appliquons ce principe aux 4 faces.

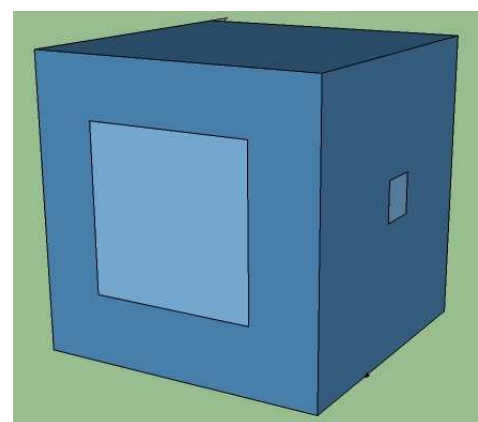
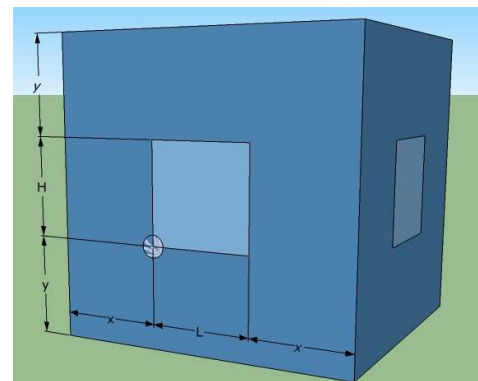
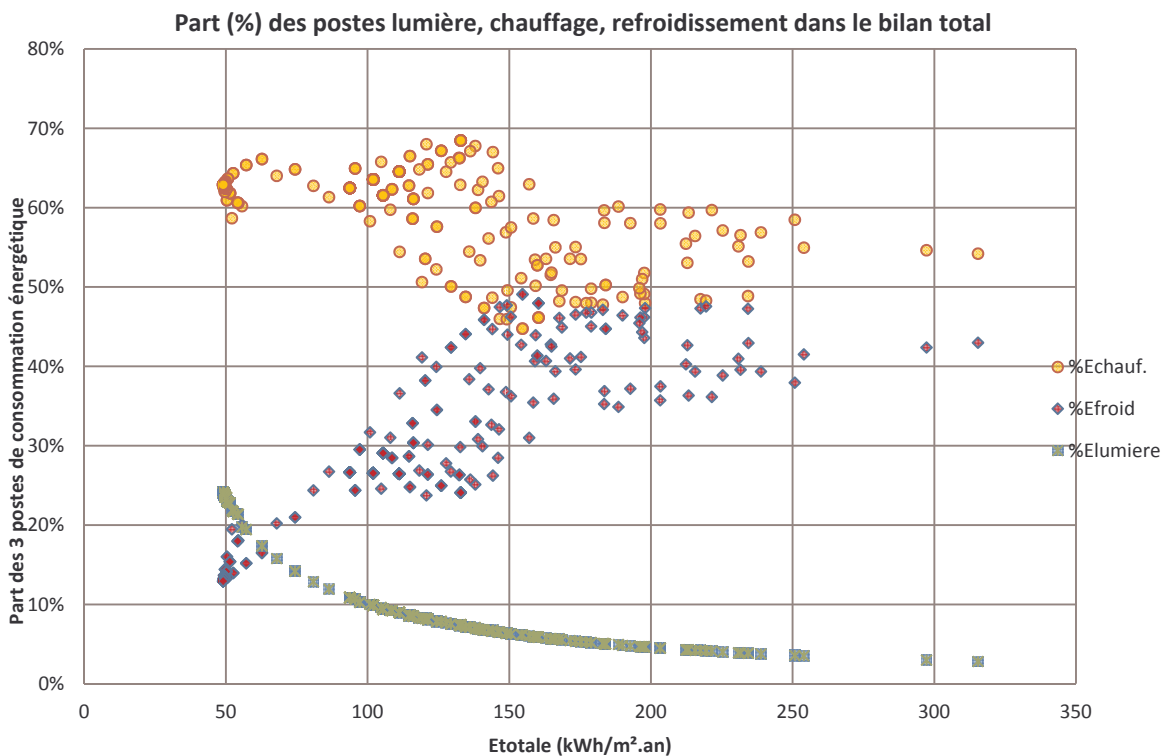
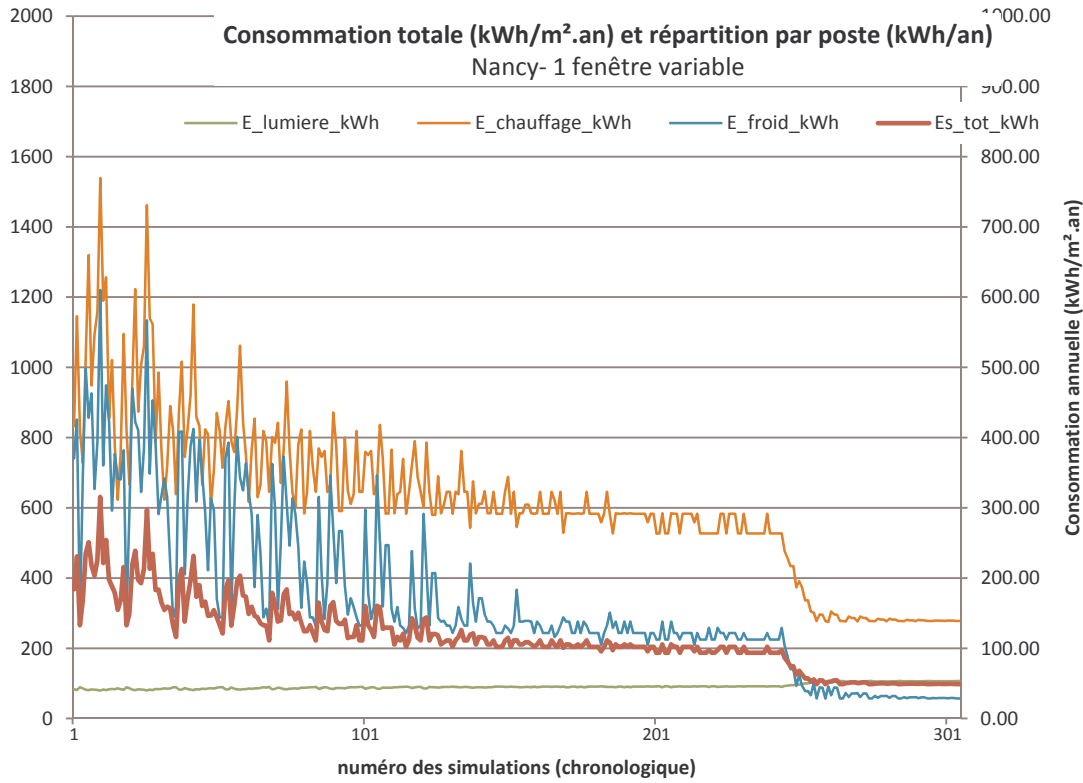


Figure 48 : série de test 1 - Exemples de variation des dimensions des baies (vue Sud)

1. Vue générale des consommations

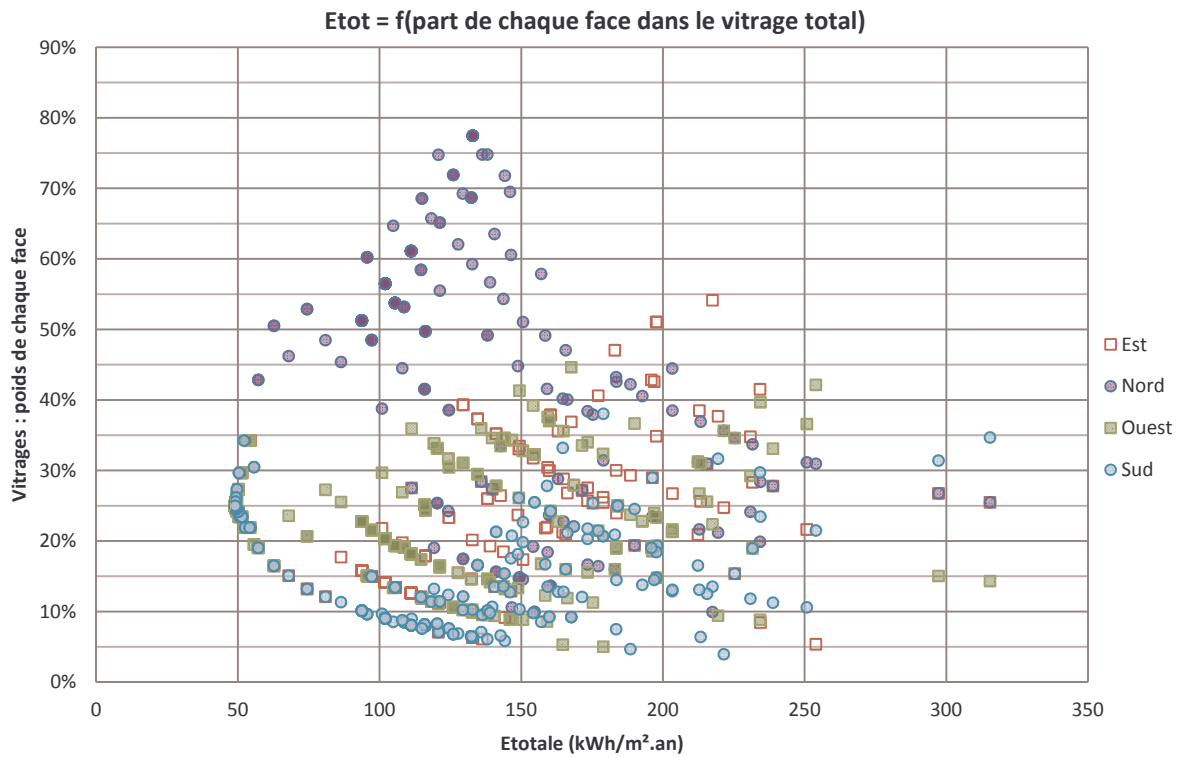
Nancy : 305 simulations

| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
|-----|------------|-----------|----------|---------|------|------|------|-------|
| max | 315.41 | 2.8% | 54.2% | 43.0% | 7.84 | 5.76 | 5.76 | 3.24 |
| min | 49.04 | 24.2% | 62.9% | 12.9% | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 0.64 |



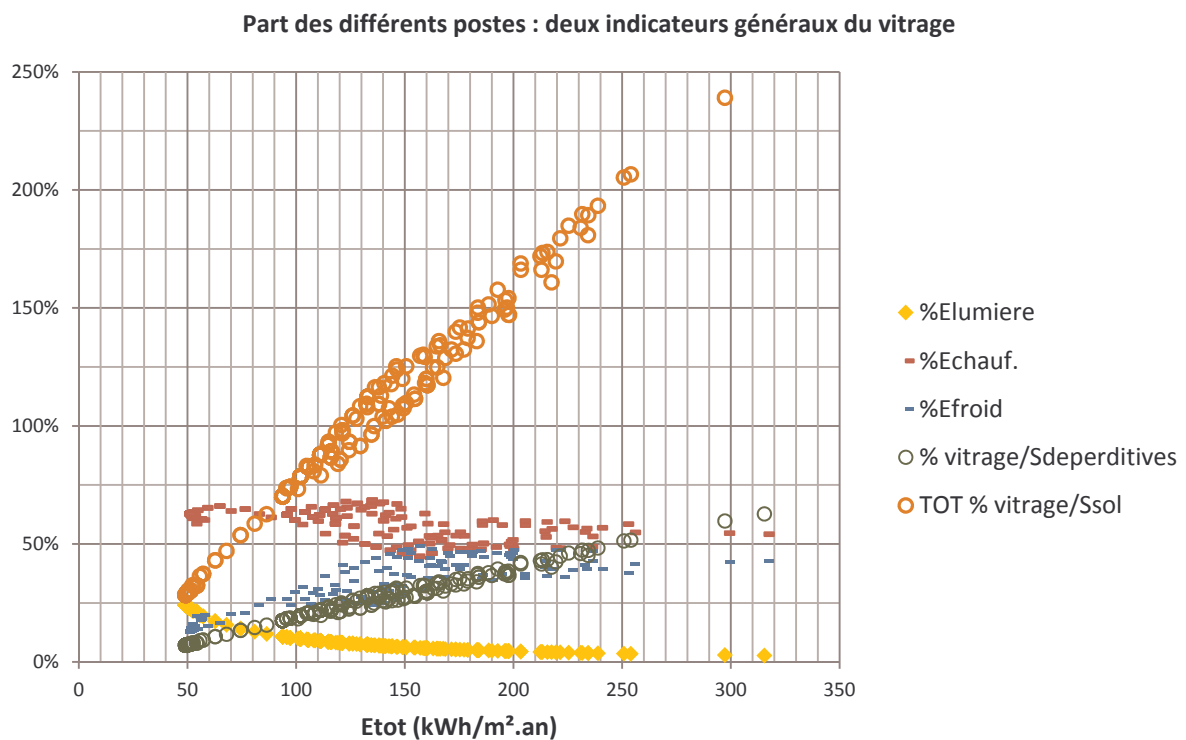
2. Répartition des vitrages

Nancy

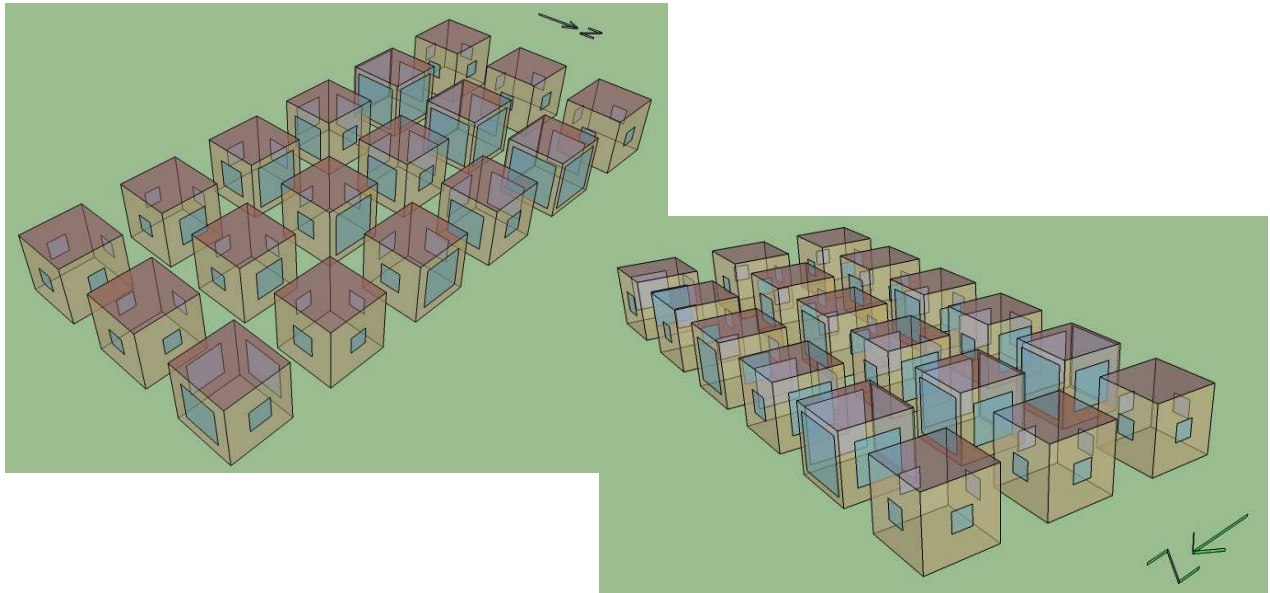


3. Consommations et vitrages

Nancy



4. Visualisations



5. Quelques conclusions

Pour Brest, la consommation de lumière est assez stable, celle de refroidissement plutôt réduite. L'algorithme cherche à réduire les charges de chauffage. Plus la part de rafraîchissement diminue, plus celle de la lumière augmente (et celle du chauffage dans une moindre mesure). Pour un même niveau de consommation, différentes options sont possibles. Pour Montpellier, le constat est le même, avec un besoin de refroidissement prédominant, et des besoins de chauffage quasi « neutralisés ». Dans le cas de Nancy, le chauffage a une part importante, mais le froid n'est faible que sur le dernier palier, où il ne pèse plus qu'un peu plus de 10%, lumière et chauffage augmentant.

La part respective de chaque face dans le vitrage est somme toute assez variable pour les trois sites. L'algorithme semble chercher à vitrer le Nord. Les consommations globales les plus faibles sont obtenues en équilibrant la part de chaque face. Les deux indicateurs généraux de vitrage suggère une baisse linéaire du ratio surface vitrée sur surface au sol et surface vitrée sur surface déperditive (hors toit). Le premier est proche des 30%, et le second sous 10% dans les 3 cas.

Nous avons mené, sans avoir le temps de les analyser, des séries de simulations, avec 2 fenêtres par face. De manière générale, il serait en effet intéressant de multiplier les baies par face (avec parcimonie, afin de ne pas ralentir les calculs notamment). Cela permettrait une approche plus fine du captage lumière/chaaleur. D'autre part, dans notre test, les grandes baies vont nécessairement de bas en haut. Or, prévoir des bandeaux de lumière, éviter les baies sous une certaine hauteur (sous laquelle il n'y plus de gains, mais que des déperditions), etc. assureraient de bons résultats.

3.2.2. Variante 2 : dimensionnement des protections solaires

Cette variante reprend exactement le même modèle, en ajoutant une loggia (auvent+flancs). Leur profondeur est une variable propre à chaque loggia. Elle prend au maximum la même dimension que la hauteur de la fenêtre, et au minimum 10% de cette hauteur.

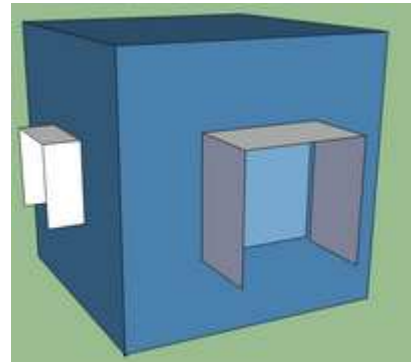
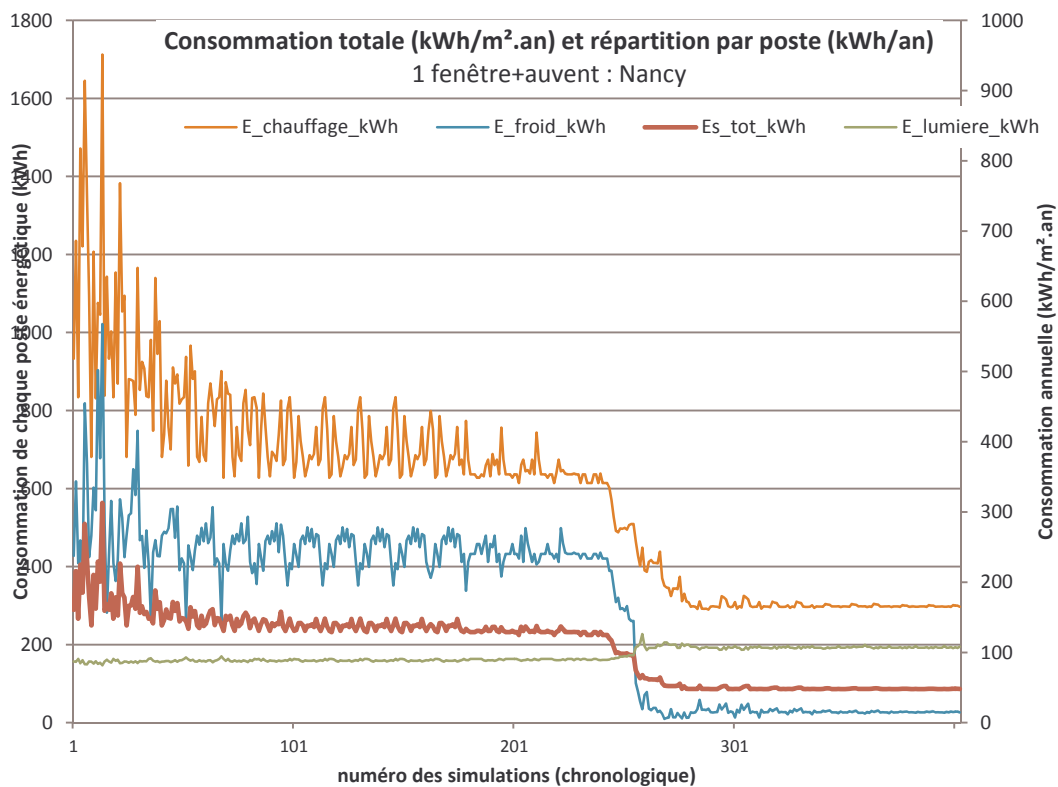


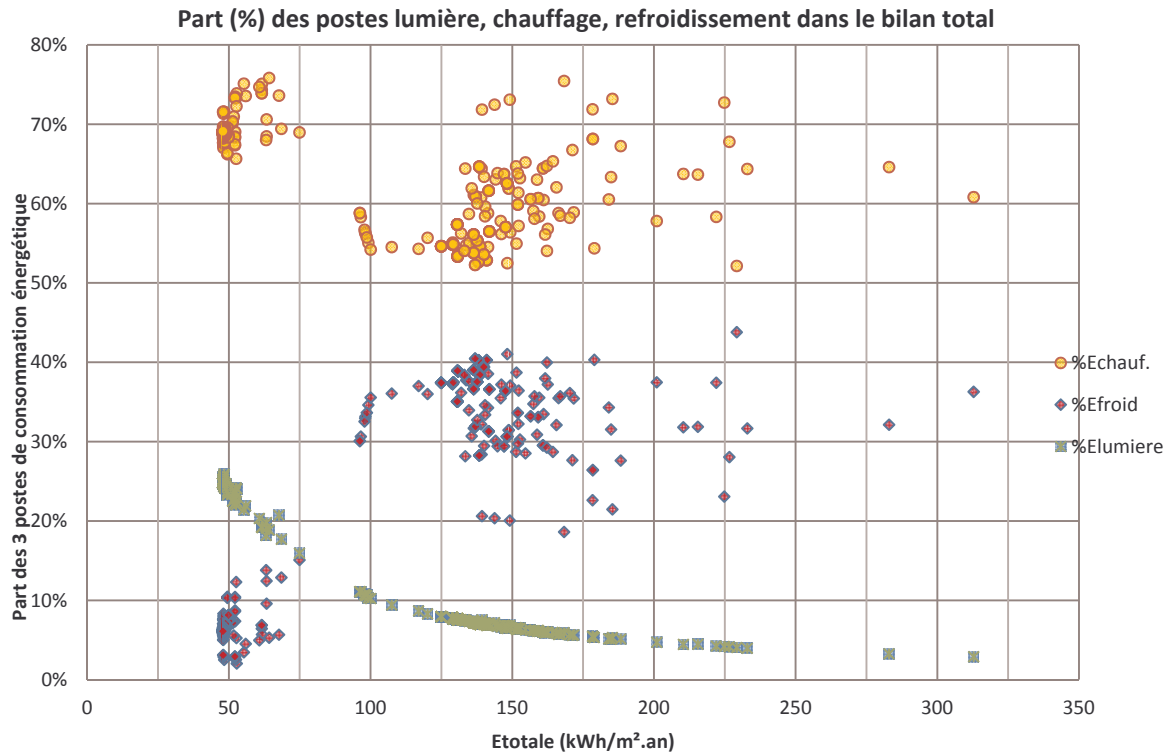
Figure 50 : Modèle avec loggia

1. Vue générale des consommations

Nancy : 445 simulations

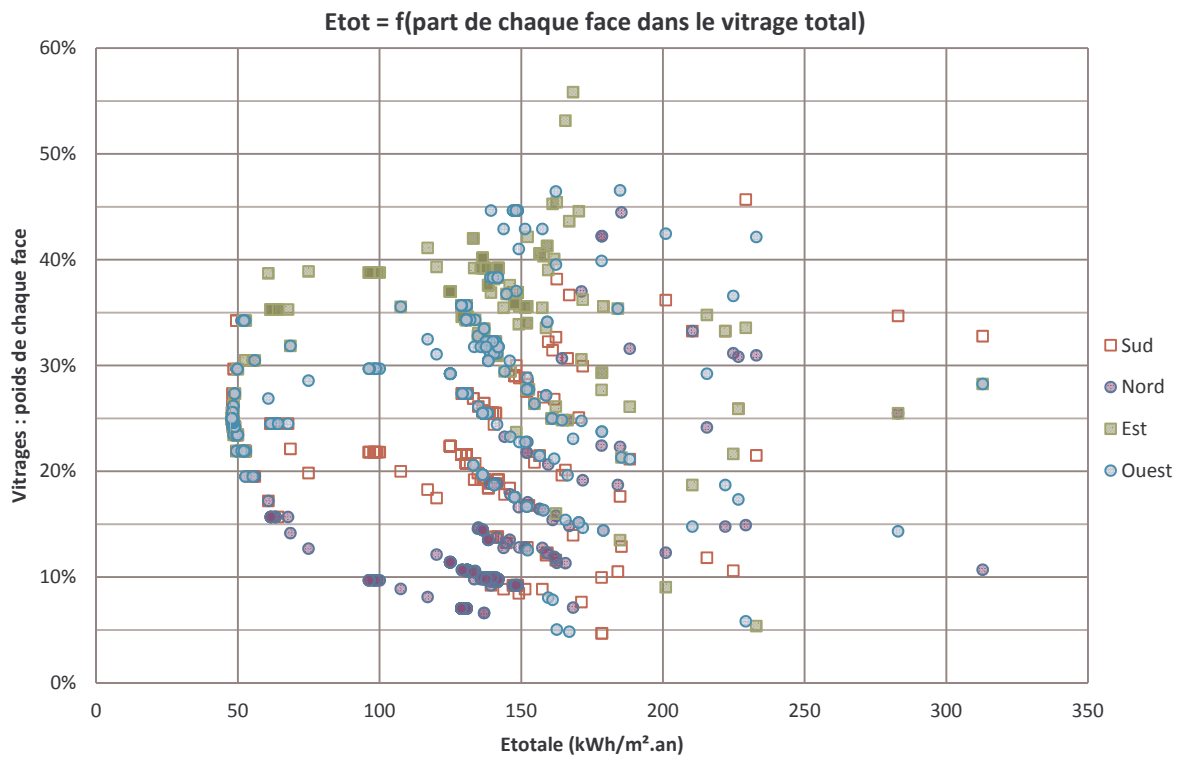
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | | Profondeur loggia/Hfen | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Sud | Nord | Est | Ouest |
| Max | 312.82 | 0.03 | 0.61 | 0.36 | 87.1% | 28.4% | 75.1% | 75.1% | 14.3% | 33.3% | 14.3% | 11.1% |
| Min | 47.89 | 0.25 | 0.69 | 0.06 | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 11.8% | 11.1% | 33.3% | 9.1% |





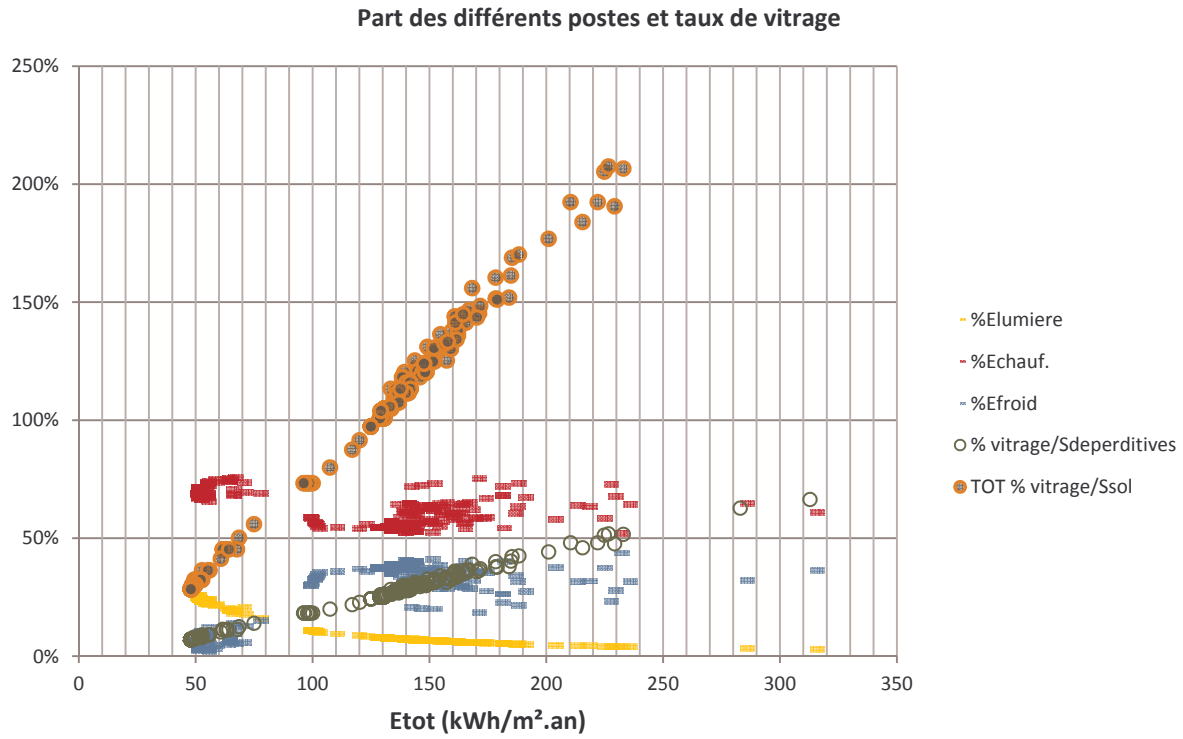
2. Répartition des vitrages

Nancy



3. Consommations et vitrages

Nancy



4. Quelques conclusions

L'ajout de protections solaires, tel que nous l'avons fait, permet une légère baisse à Brest et Nancy, mais c'est à Montpellier que l'on note une diminution de 10 kWh/m².an. On observe en réalité que ces protections solaires ont un effet bénéfique global... sauf sur la lumière, dont le niveau de consommation augmente. En effet, nous n'avons pas paramétré des protections solaires particulièrement adaptées. Il serait donc pertinent de développer une approche plus fine de tels dispositifs, afin que les gains sur les consommations de rafraîchissement ne soient pas tout ou partie « compensés » par des dépenses en électricité. A Montpellier le constat est le même, mais la réduction en absolu et en relatif de la part de refroidissement additionnée à un chauffage faible génère une bonne performance. Reste à savoir si cela semble convenable au concepteur, qui irait vers moins de lumière naturelle de cette manière. Cependant, notons que de bonnes performances sont aussi atteintes avec un équilibre des parts de chaque poste énergétique.

A Nancy, la part de froid diminue, celle de lumière augmente légèrement et celle de chauffage augmente (augmentation probablement due à un surdimensionnement des protections solaires empêchant le rayonnement solaire d'hiver de passer en quantité suffisante).

Enfin, les vitrages représentent 25 à 50% de la surface au sol pour les deux premiers sites, et 25% pour le dernier.

Globalement, on remarque au dernier palier qu'atteindre un même niveau de consommation peut se faire par différentes stratégies (aboutissant à des parts variables de trois postes de consommation). Si cela sonne comme une évidence, il est toutefois intéressant de l'observer pour les trois climats.

L'exploration des solutions de dimensionnement ne semble pas très satisfaisante. Il aurait été plus judicieux de ne pas faire varier les vitrages dans un premier temps, afin de laisser, seules, les protections solaires « trouver » le compromis lumière/chauffage/rafraîchissement.

Nous savons qu'EnergyPlus permet de modéliser différents types de protections solaires, et d'en régler le contrôle. A la lumière de ce simple test, il est à penser qu'une approche moins « triviale » du dimensionnement des protections solaires semble nécessaire. L'approche des protections solaires s'est limitée à des loggias. Il s'agit maintenant de diversifier la palette de techniques disponibles.

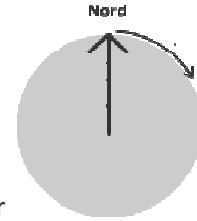
La question des baies mériterait une approche plus fine entre moitié haute et moitié basse des parois, ou encore entre partie gauche et partie droite. Ici, nous souhaitons avoir une baie se déformant proportionnellement par rapport à sa taille initiale. Mais, de fait, les larges baies sont aussi celles qui vont de bas en haut, alors qu'il est aisé d'imaginer qu'en-dessous d'un mètre du sol, les apports de lumière et de chaleur sont moins importants que les déperditions.

D'autre part, la question des surchauffes est à traiter de manière spécifique. Nous voyons tout au long des expérimentations menées que les solutions moins optimales regroupent très souvent des configurations pour lesquelles les parts chauffage et lumière sont très faibles en proportion du refroidissement. Aussi, il est facile d'imaginer que des solutions « basse consommation » se trouvent dans cet échantillon de population-solutions.

3.3. Série de tests 2 : orientation et gabarit

3.3.1. Variante 1 : variation de l'orientation

La variation d'orientation est simple à paramétrer. Dans le fichier d'entrée d'EnergyPlus, dans la classe *Building* est définie cette orientation. Il suffit donc de la remplacer par %azimut% (par exemple), celui-ci étant défini dans le fichier *command.txt* pour GenOpt ainsi : `Parameter{ Name= azimut; Min = 0; Ini = 0; Max = 90; Step= 10;}`

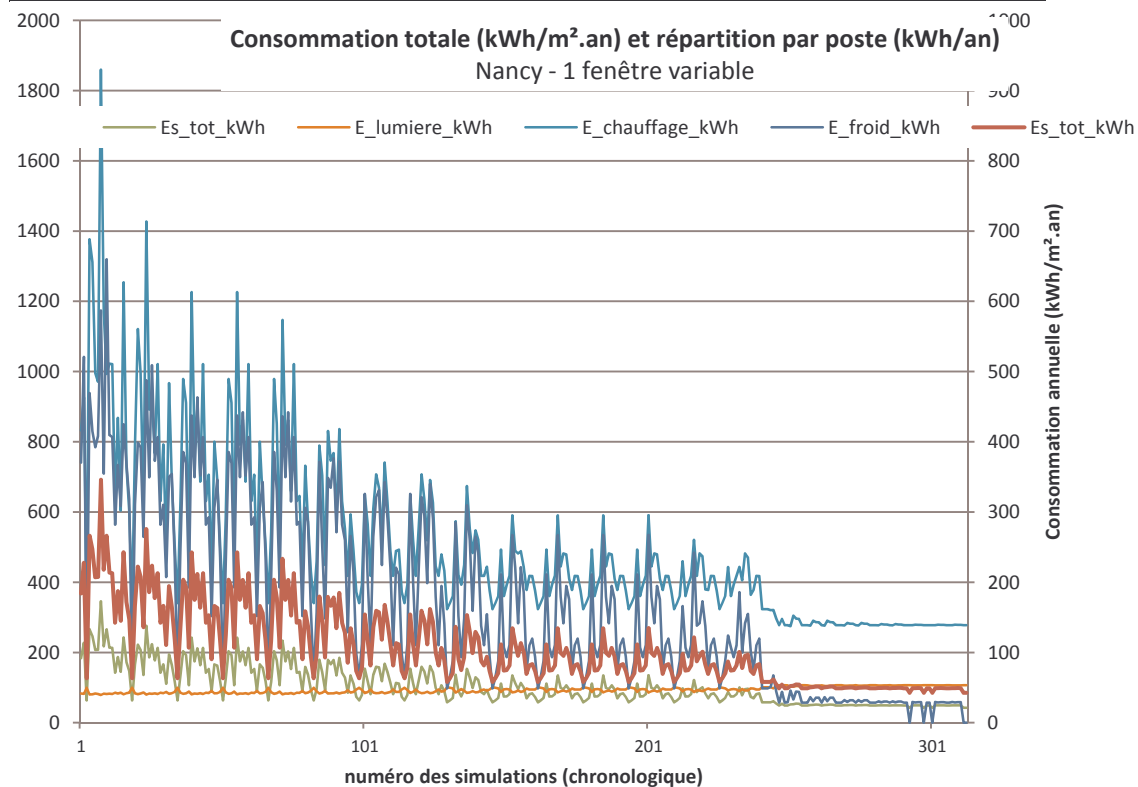


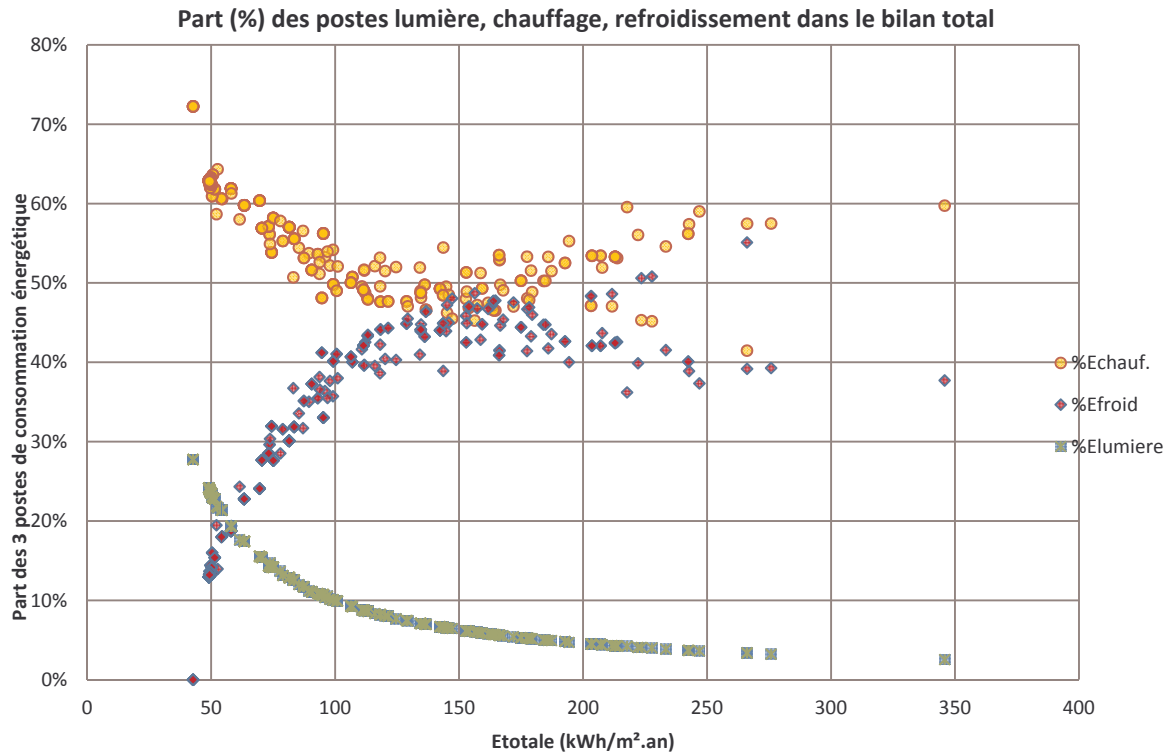
L'orientation varie donc de 0 à 90° (dans le sens des aiguilles d'une montre), avec un pas de variation de 10°. NB : un azimut de 0° signifie aucune rotation, et donc orientation inchangée des 4 faces.

1. Vue générale des consommations

Nancy : 313 simulations

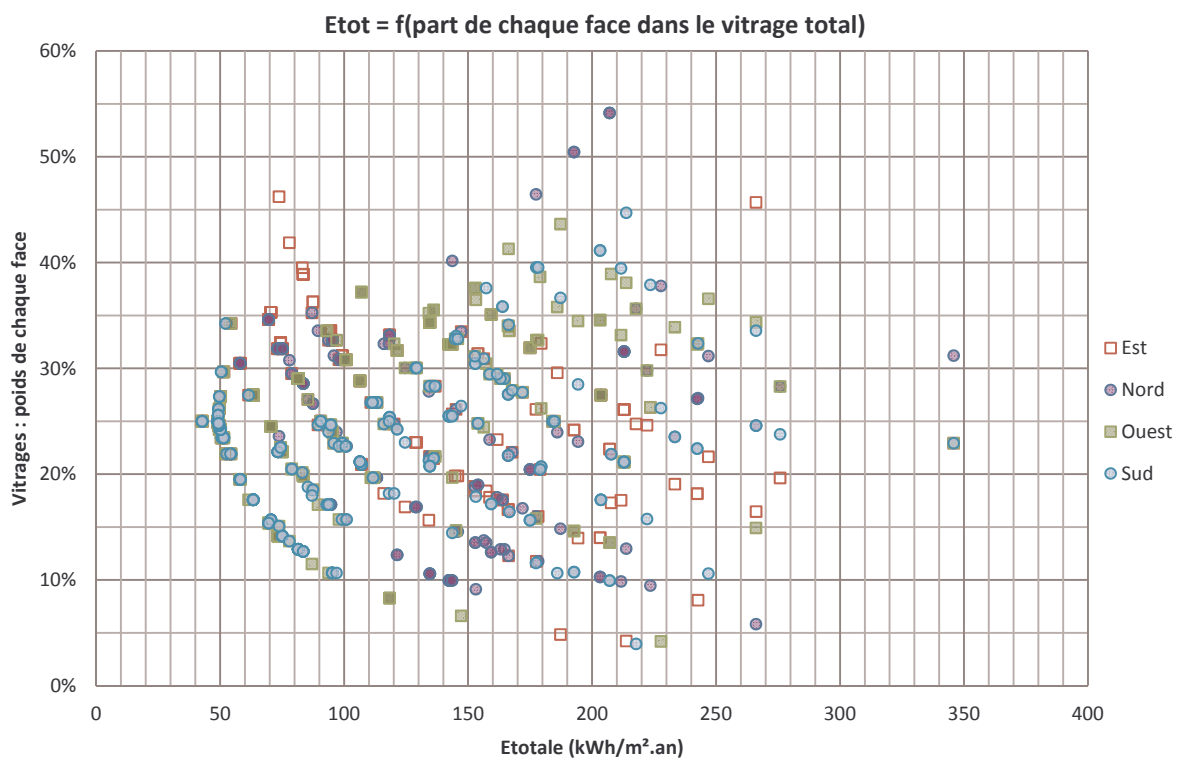
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
| max | 345.81 | 2.5% | 59.7% | 37.7% | 64.0% | 87.1% | 64.0% | 64.0% |
| min | 49.04 | 24.2% | 62.9% | 12.9% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 7.1% |





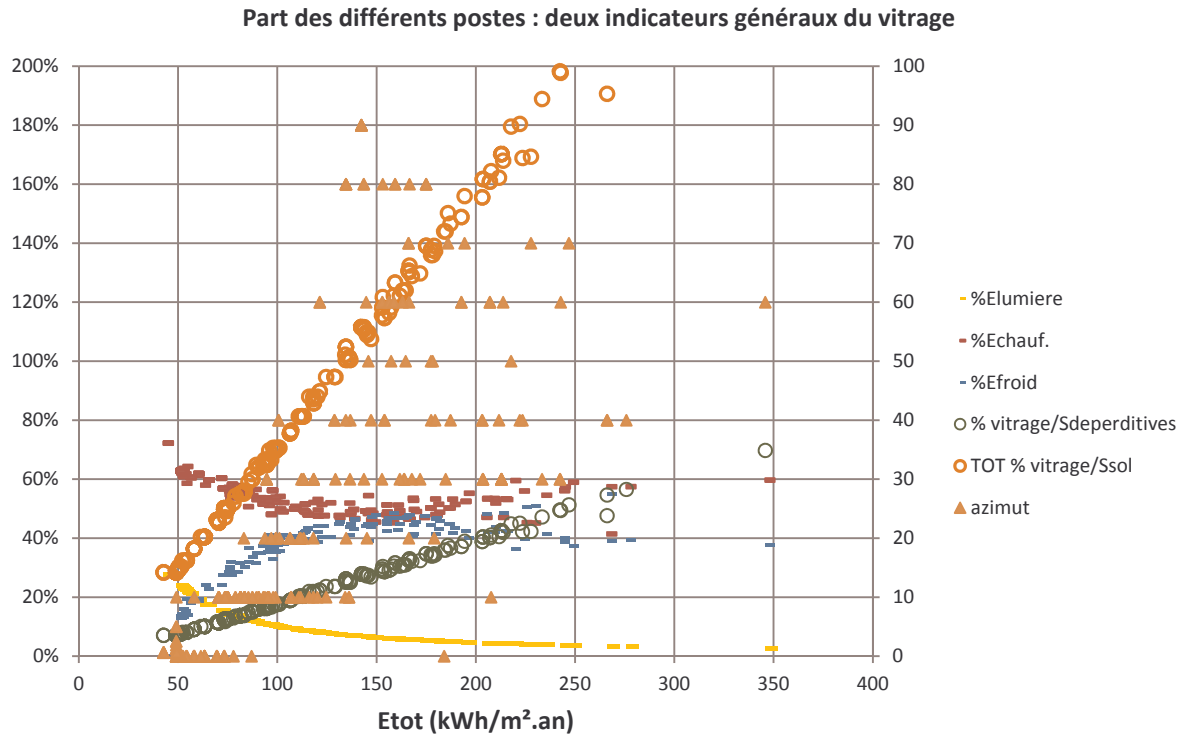
2. Répartition des vitrages

Nancy



3. Consommations, vitrages et orientation

Nancy



4. Conclusion

La différence des résultats de cette séquence avec ceux du test 1 / variante 1 ne relève pas tant des valeurs des consommations que de leur répartition. En fait, cette variation d'orientation offre des solutions comparables, mais différentes, et accroît la diversité des solutions. On observe dans les trois cas qu'il s'agit de réduire la part de refroidissement. Ne pas orienter plein Sud trouve des solutions équivalentes en performance à bien des options de la série de test 1 (notamment jusqu'à 45°). Mais on observe aussi une tendance à la diminution en s'approchant du Sud. Enfin, il serait intéressant de ne pas initialiser à 0°, mais surtout de coupler avec d'autres variables (nous ébauchons cette option au 3.4).

5. Visualisations

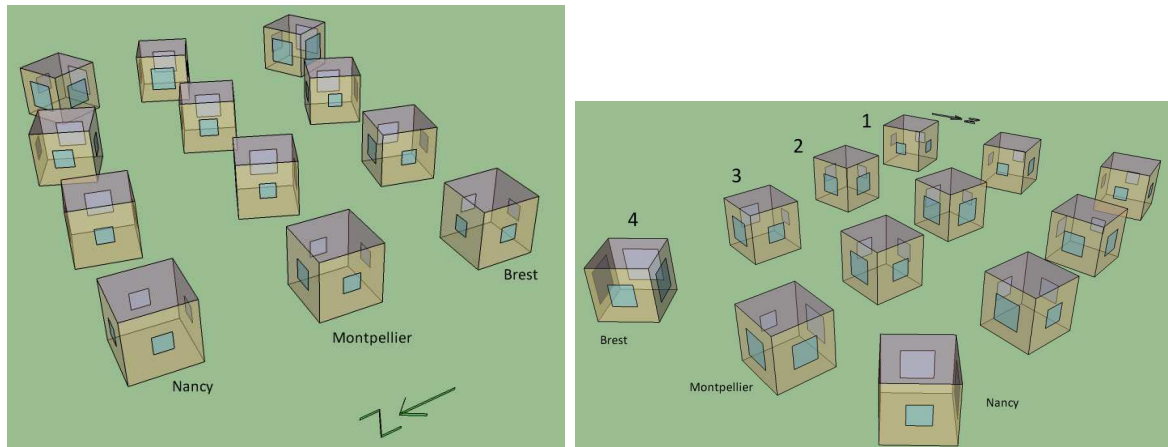


Figure 51 : Exemples avec diverses orientations

| | | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid |
|-------------|---|------------|-----------|----------|---------|
| Brest | 1 | 28.98 | 34.4% | 52.6% | 13.0% |
| | 2 | 43.18 | 20.0% | 46.1% | 33.9% |
| | 3 | 51.59 | 16.4% | 34.9% | 48.7% |
| | 4 | 104.38 | 7.3% | 31.5% | 61.3% |
| Montpellier | 1 | 33.97 | 26.6% | 16.5% | 56.9% |
| | 2 | 87.61 | 9.2% | 6.1% | 84.8% |
| | 3 | 76.90 | 10.8% | 5.8% | 83.4% |
| | 4 | 87.20 | 9.3% | 10.2% | 80.4% |
| Nancy | 1 | 42.69 | 27.7% | 72.3% | 0.0% |
| | 2 | 73.56 | 14.2% | 56.1% | 29.6% |
| | 3 | 83.13 | 12.5% | 50.7% | 36.7% |
| | 4 | 121.35 | 8.0% | 47.7% | 44.3% |

3.3.2. Variante 2 : variation du gabarit

La variation de gabarit se fait, indépendamment, selon l'axe Y (profondeur Nord-Sud) et l'axe X (largeur Est-Ouest).

Largeur et profondeur peuvent varier de 3 à 12 m, avec un pas de 1 m.

La variabilité des baies reste la même. Les baies restent donc centrées, et suivent les déformations selon X et Y.

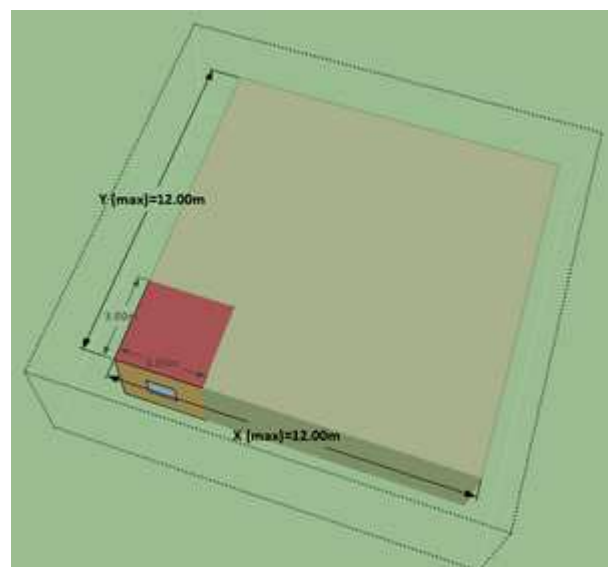
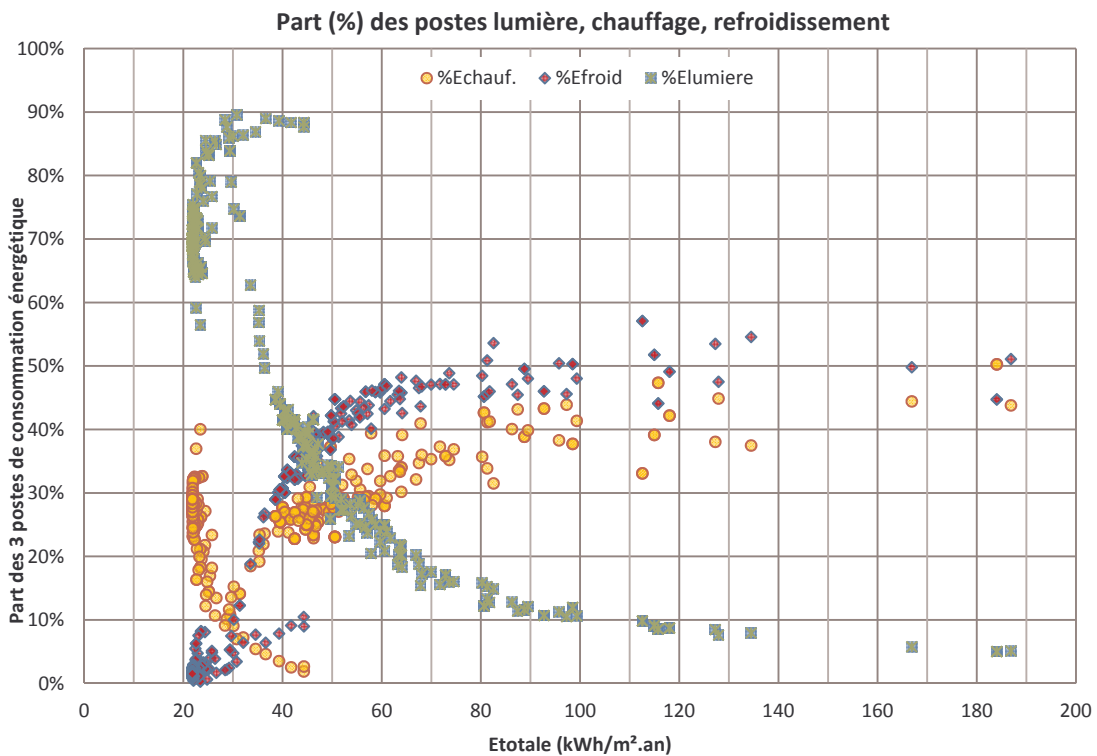
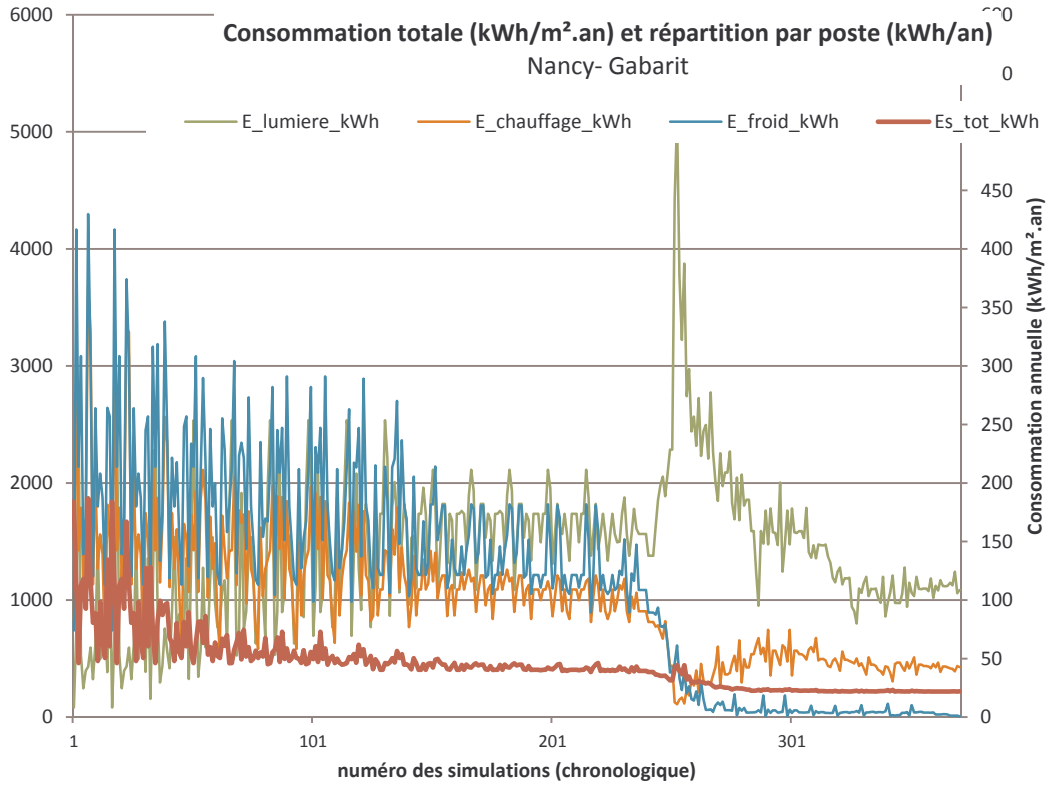


Figure 52 : Principe du changement de gabarit

1. Vue générale des consommations

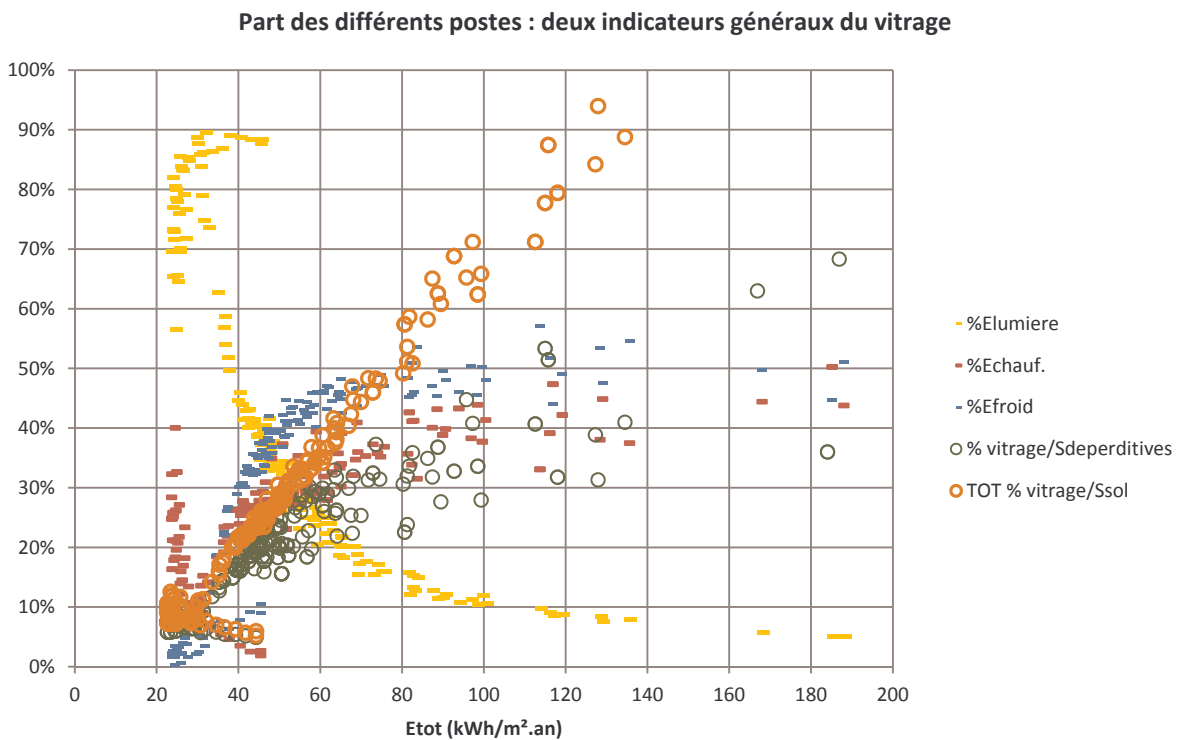
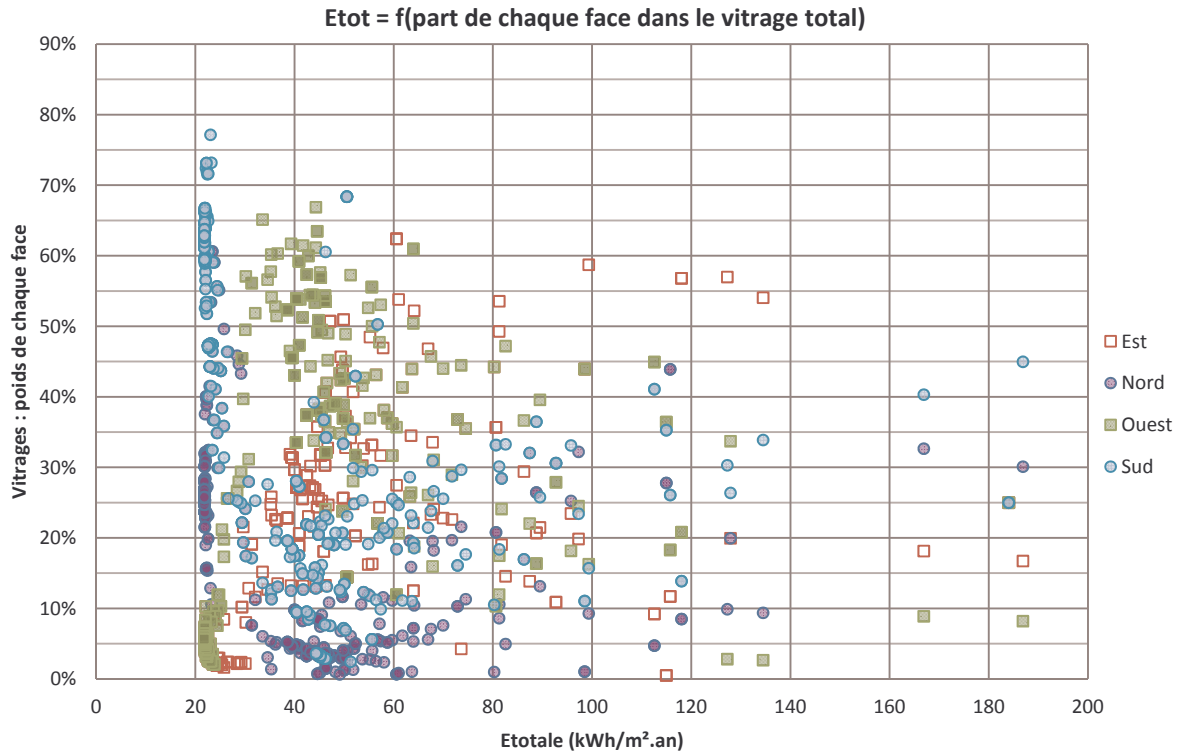
Nancy : 448 simulations

| | consommations | | | | % vitrée de la face | | | | Gométrie | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|---------------------|-------|-------|-------|-----------|------|---------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Compacité | X/Y | Surface |
| Max | 186.88 | 5.1% | 43.8% | 51.1% | 95.6% | 64.0% | 64.0% | 31.4% | 0.96 | 1.80 | 45.00 |
| Min | 21.80 | 70.2% | 28.3% | 1.5% | 10.2% | 4.2% | 1.9% | 1.9% | 0.84 | 2.04 | 70.50 |



2. Répartition des vitrages

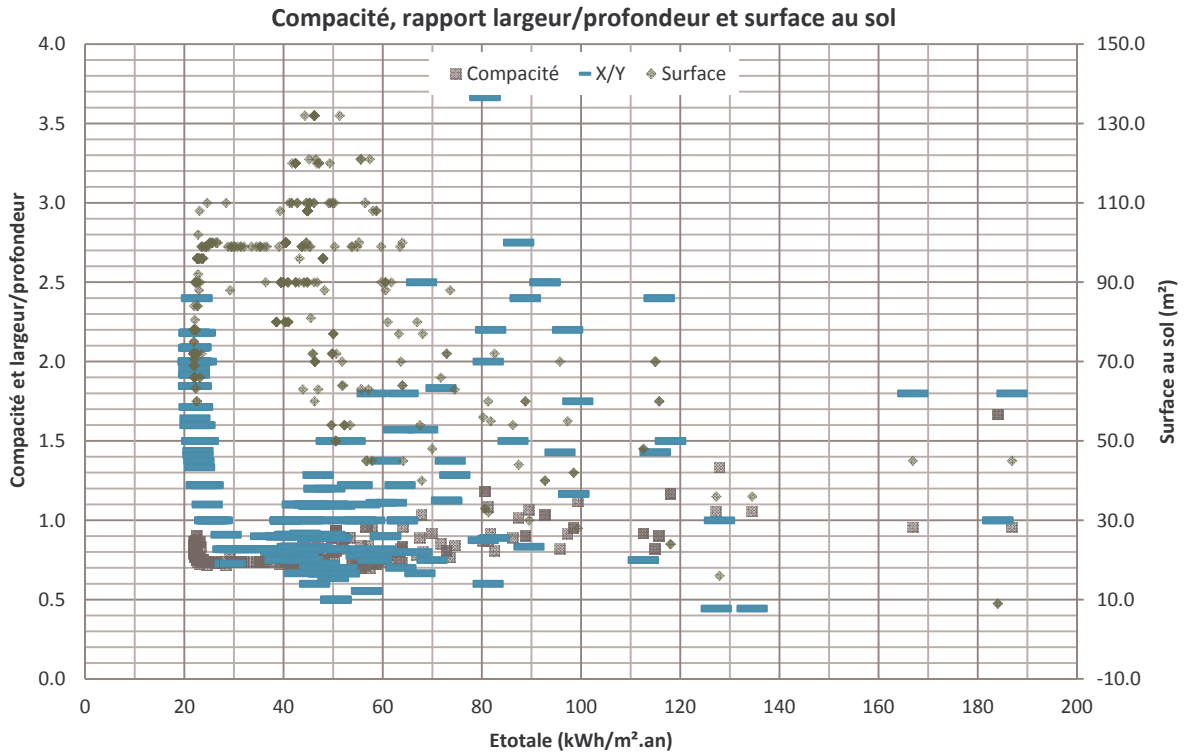
Nancy



3. Compacité

Nb : la compacité est la somme des surfaces déperditives sur le volume.

Nancy



4. Mots de conclusion

La variation de gabarit amène dans tous les cas à des possibilités de baisse des consommations, notamment des charges de chauffage et de refroidissement (très forte pour Montpellier et Brest, moins concernant le chauffage à Nancy). La part lumière a un poids plus important, puisque largeur et profondeur du volume augmentent. La part chauffage est presque toujours sous 1/3 pour Brest et Nancy, et 1/10^{ème} pour Montpellier. Charges de lumière et de refroidissement semblent plus corrélées dans leur évolution. Dans les trois cas les bonnes solutions sont trouvées au détriment de la lumière naturelle, mais l'algorithme trouve de bonnes solutions qui ont moins d'1/3 de part lumière.

Nous observons également que la contribution relative de chaque face, concernant les vitrages, peut être très variable.

Nous n'avons pas pu intégrer de dispositifs de captage de lumière, tels que les conduits solaires dans ces séries de simulation, mais l'ayant testé sur des cas isolés, il est à penser que des solutions plus généreuses en lumière naturelle et bien moins énergivores puissent être trouvées.

On observe que les coefficients de compacité sont entre 0.8 et 1 en moyenne, soit légèrement supérieur à ce qui est communément recommandé. Enfin, les surfaces supérieures à 45 m² sont privilégiées (pour les « meilleures » solutions : jusqu'à 60 m² à Montpellier, 70 m² à Brest et 100 m² à Nancy), avec des rapports largeur sur profondeur variés.

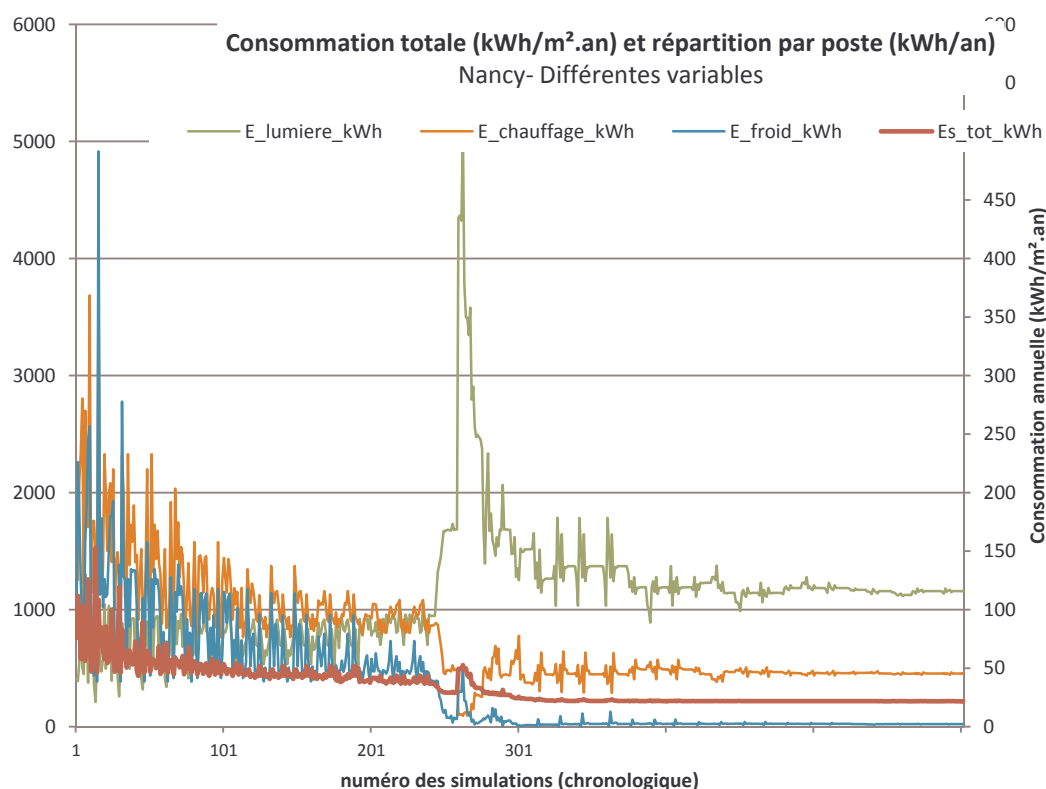
3.4. Combinaison de 4 types de variables : exemple de Nancy

Enfin, nous avons mené une séquence de simulations, exclusivement pour le climat de Nancy, portant sur l'ensemble des types de variables testées jusqu'à présent, hors protection solaire : dimension des baies, orientation et gabarit.

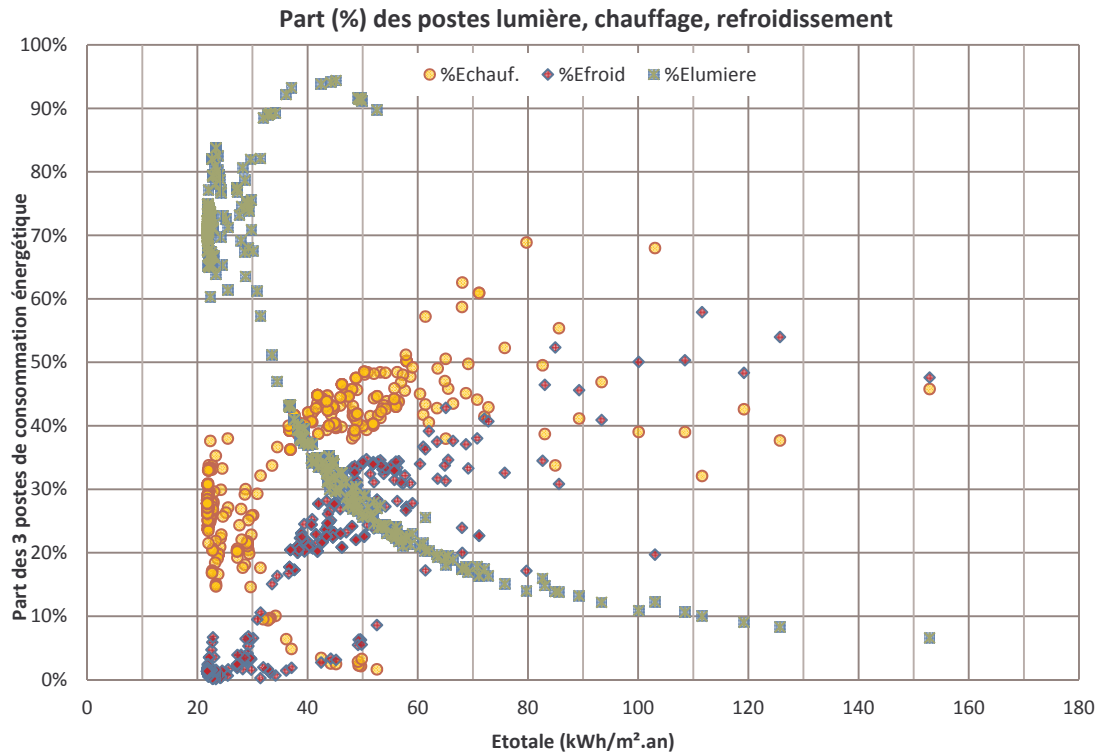
3.4.1. Vue générale des résultats

602 simulations

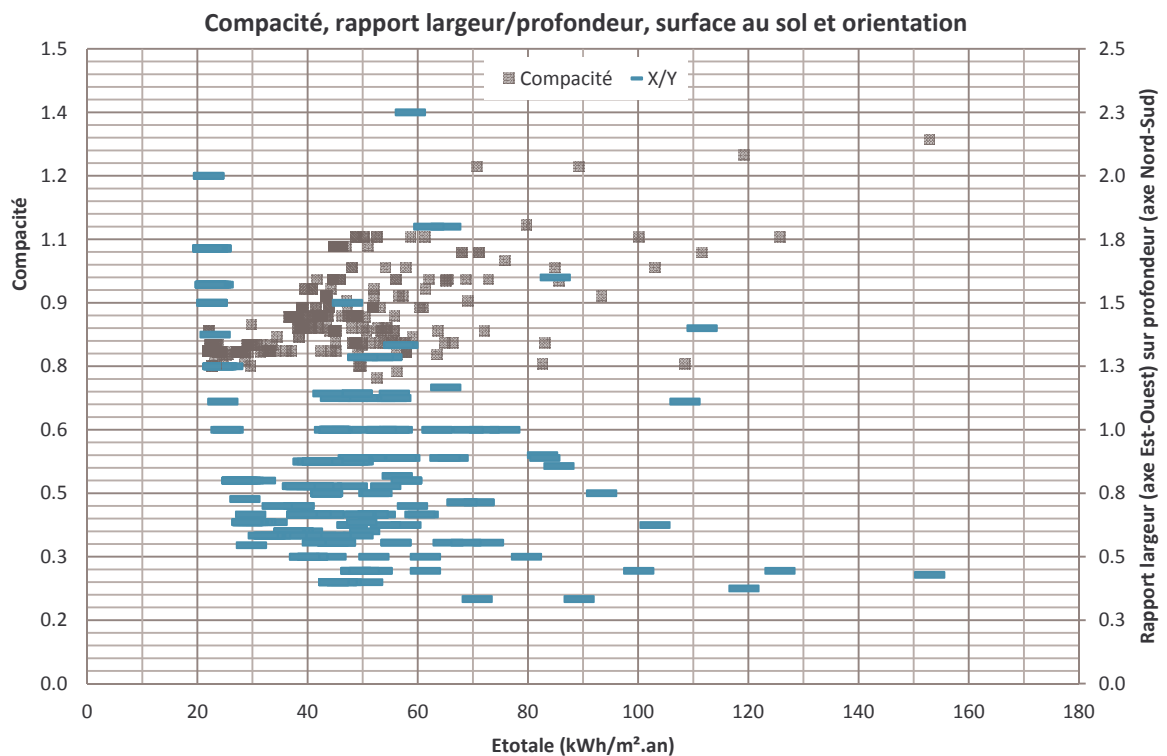
| | consommations | | | | % vitrée de la face | | | | Gométrie | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|---------------------|-------|-------|-------|-----------|------|---------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Compacité | X/Y | Surface |
| Max | 152.88 | 0.07 | 0.46 | 0.48 | 44.4% | 36.0% | 64.0% | 13.8% | 1.29 | 0.43 | 21.00 |
| Min | 21.79 | 0.71 | 0.28 | 0.01 | 11.3% | 4.9% | 1.6% | 1.6% | 0.82 | 1.92 | 75.00 |



On observe un « long » palier autour de 20 kWh/m².an. Les charges de froid sont quasi nulles, celles de chauffage stable et peu élevées, celles de lumière plus importantes et plus variables.

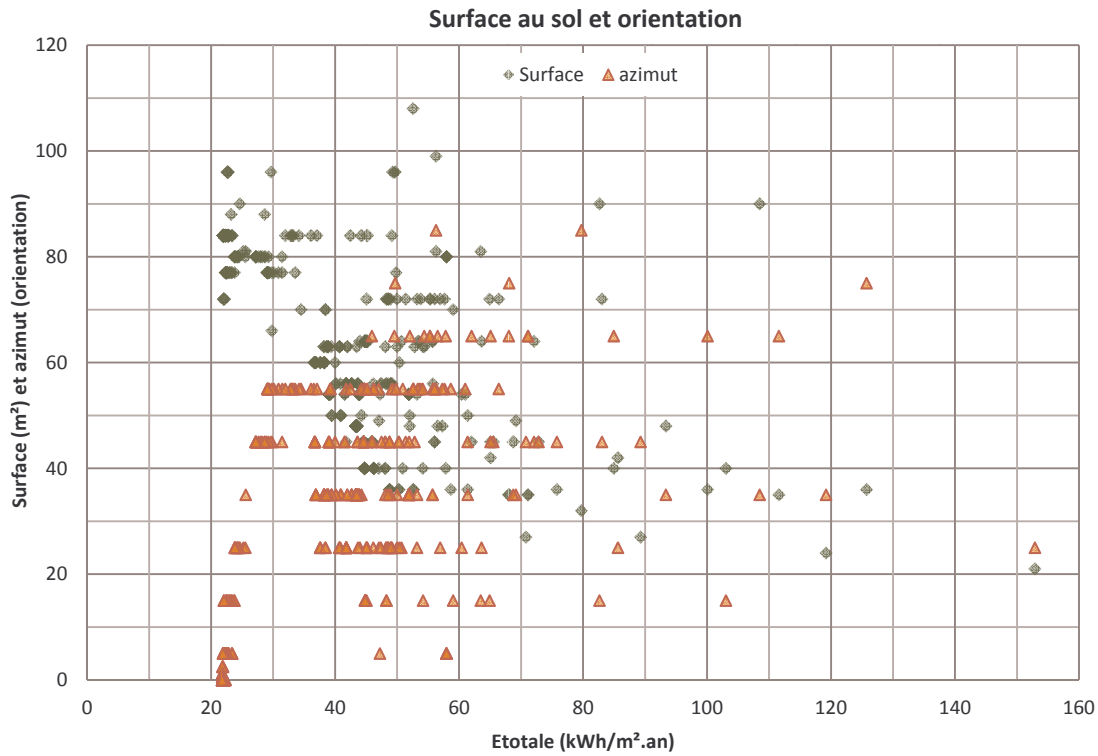


De bonnes solutions sont obtenues avec un équilibre des trois postes (en moyenne 30 à 40% chaque). La lumière, dans les cas « optimaux » représente plus de 2/3 des consommations annuelles.

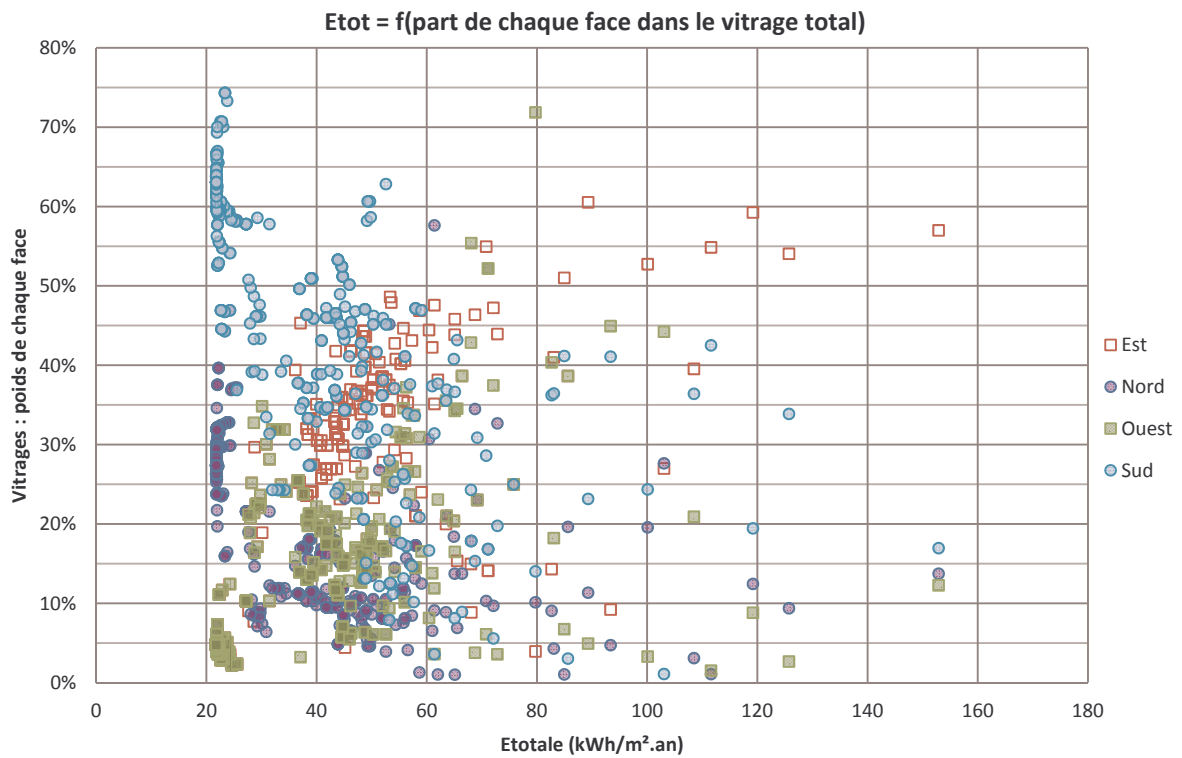


Une compacité de 0.8 donne les meilleurs résultats (conditions non suffisante). Les meilleurs cas correspondent à une largeur 2 fois plus importante que la profondeur, mais dans beaucoup de cas le

volume est allongé selon l'axe Nord-Sud. Les surfaces « intéressantes » vont de 40 à 80 m². L'orientation ne joue pas un rôle prépondérant, variant jusqu'à 55° sans engendrer de détérioration de la consommation annuelle au m².

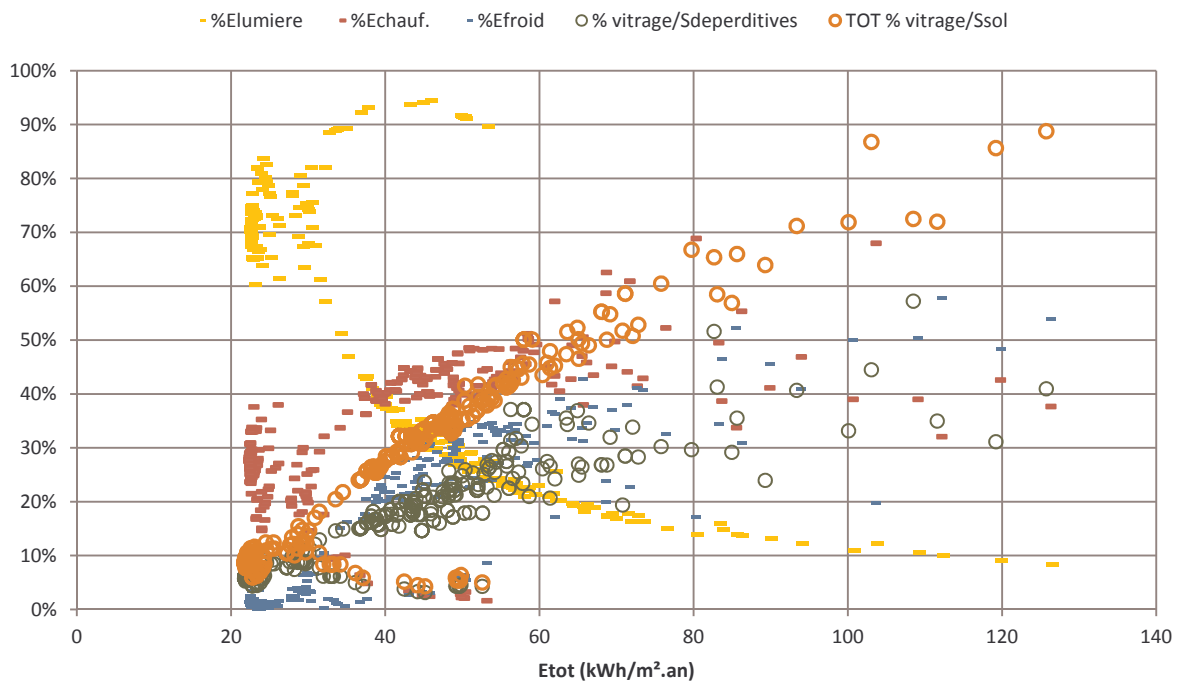


Vitrages



Grand nombre de compositions de vitrages possible. Le Sud est privilégié, mais n'oublions pas qu'il « tourne » dans ce cas.

Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage



La surface de vitrage par rapport à la surface au sol est de 5 à 12%.

Sur cet exemple, on voit que la combinaison de variables de différentes natures permet, sur le contexte climatique le moins favorable jusqu'à présent, de réduire considérablement les consommations énergétiques. La majorité des cas correspondent à 20 à 60 kWh/m².an pour trois postes énergétiques. D'autre part, ici aussi on constate qu'une diversité de solutions permet d'obtenir de résultats. On sent bien la complexité des interactions entre les différentes composantes d'un bâtiment, mais on constate également la variété de réponses possibles et globalement comparables.

3.4.2. Visualisation de quelques résultats

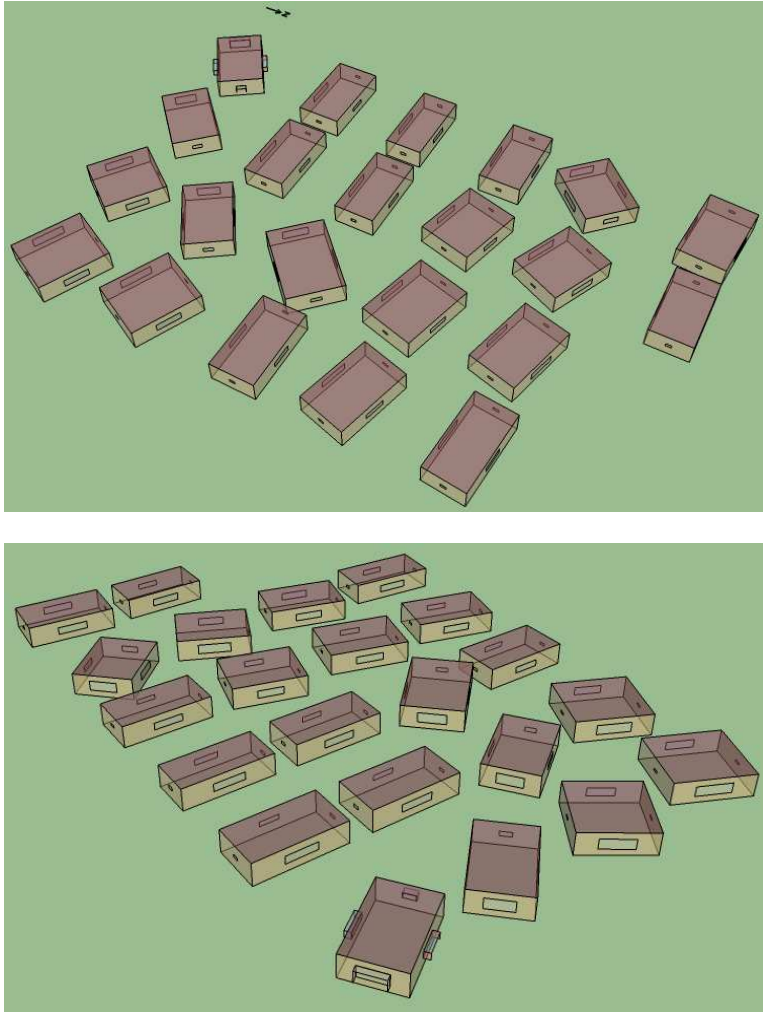


Figure 53 : Solutions < 30 kWh/m².an

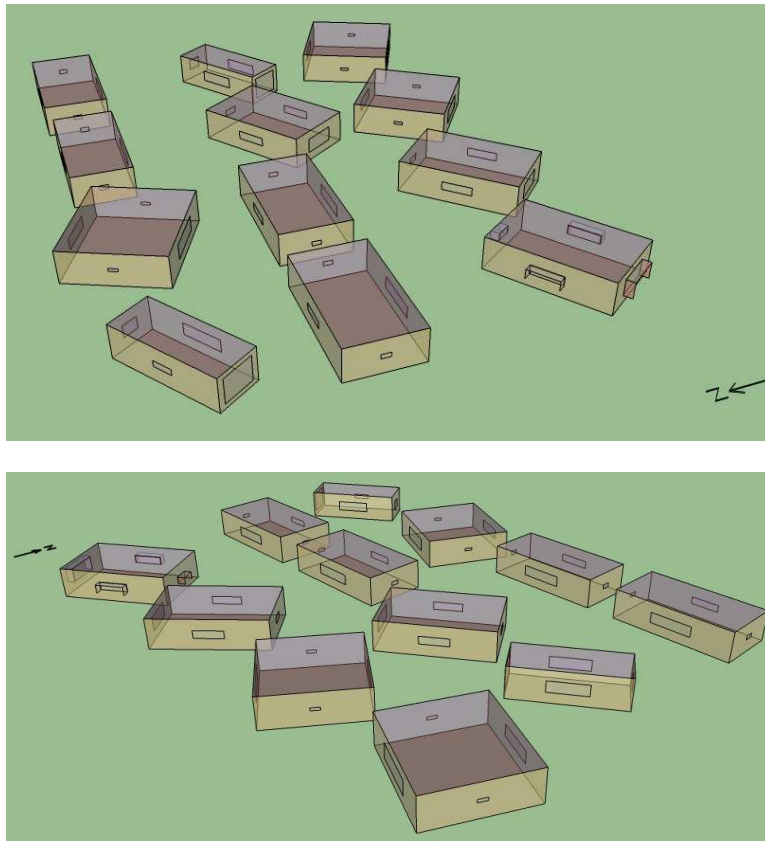


Figure 54 : variété de solutions

3.5. Série de tests 3 : impact des caractéristiques des matériaux

Ce chapitre ne traite que des parois opaques. En raison d'un problème technique d'évaluation de la part lumière (interne à l'interaction GenOpt/EnergyPlus), les résultats des séquences de simulation sur les parois vitrées ont été faussés. Le laps de temps restant étant trop juste, il a été décidé de ne pas les relancer.

3.5.1. Présentation de l'expérimentation – éléments techniques

1. Modèle :

- Géométrie : telle que décrite au 3.1. (cube de 3 m de côté, les 4 faces verticales orientées selon les 4 directions cardinales)
- 1 vitrage fixe de 1.05*1.05 m par face (centré sur chaque face, soit 0.9 m de part et d'autre, en largeur et en hauteur) ; modèle simplifié : $U_g=1.1 \text{ W/m}^2.\text{K}$; $g=0.65$; $TL=0.8$
- Occupation : de 8h à 20h (365 jours/an)
- Températures de consigne : comprises entre 19°C et 27°C toute l'année, de 8h à 20h
- Ventilation naturelle nocturne l'été :
 - o Du 15 mars au 1^{er} juin : 5 vol/h (de 20h à 8h)
 - o Du 1^{er} juin au 30 septembre : 12 vol./h (de 20h à 8h)

2. Variables et paramètres

Cette série de simulations cherche à appréhender l'importance et le rôle joué par l'inertie d'absorption des bâtiments et l'isolation des parois. Nous considérons donc 6 parois distinctes les unes des autres, isolées par l'extérieur, la masse se trouvant côté intérieur. Il s'agit donc de 6 parois composées de 2 matériaux, chaque face ayant 2 matériaux variables indépendants des 5 autres.

3. Isolant variable

Nous faisons varier le coefficient de transmission surfacique U ($\text{W/m}^2.\text{K}$) de l'isolant de 0.1 à 1.1 $\text{W/m}^2.\text{K}$ (0.1 étant très performant), avec une incrémentation de 0.05, soit 20 valeurs possibles. Dans EnergyPlus, on peut définir l'épaisseur e d'une couche (m) et sa conductivité thermique λ (W/m.K). Puisque $U = \lambda/e$, nous avons fixé l'épaisseur à 40 cm et faisons varier λ de 0.04 à 0.42 W/m.K , avec un incrément de 0.02. Dans le fichier *command.txt* pour GenOpt, nous définissons ce paramètre pour chaque paroi. Exemple pour le sol (le U initial de chaque paroi est fixé à 0.15 $\text{W/m}^2.\text{K}$, tel que suggéré par le standard « passif ») :

```
Parameter{ Name=lambda_sol;Min=0.04;Ini=0.06;Max=0.42;Step=0.02;}
```

Dans le fichier *_template.idf*, nous remplaçons la valeur fixe de la conductivité par `%lambda_sol%` :

```
Isolant_sol,    !- Name
MediumRough,   !- Roughness
0.4,           !- Thickness {m}
%lambda_sol% ; !- Conductivity {W/m-K}
```

4. Masse thermique

Côté intérieur, nous prenons pour matériau minéral de départ la terre crue, dont nous faisons varier l'épaisseur de 1 à 31 cm, avec un incrément de 2 cm. Dans *command.txt* :

```
Parameter{ Name=ep_masse_sol;Min=0.01;Ini=0.01;Max=0.31;Step=0.02;}
```

Puis dans le fichier *template* :

```
Mineral_sol, !- Name
Rough,       !- Roughness
%ep_masse_sol%,    !- Thickness {m}
0.635,        !- Conductivity {W/m-K}
1450,         !- Density {kg/m3}
850,         !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,         !- Thermal Absorptance
0.7,         !- Solar Absorptance
0.7;        !- Visible Absorptance
```

5. Paramètres mesurés

Nous ne cherchons évidemment à mesurer que les effets de ces variations de matériaux sur les charges de chauffage et de refroidissement. Nous limitons donc la fonction-objectif à la somme de ces deux postes de consommation. Dans le fichier *optWinXP.ini* pour GenOpt :

```
ObjectiveFunctionLocation
{
  Name1    = E_tot_kWh_m2;
  Function1 = "divide(add(%E_chauffage_kWh%, %E_froid_kWh%),9.0)"; // kWh/m²
  Name2    = E_chauffage_kWh;
  Function2 = "divide(%E_chauffage_J%, 3600000)";
  Name3    = E_froid_kWh;
  Function3 = "divide(%E_froid_J%, 3600000)"; // passage de J à kWh
  Name4    = E_chauffage_J;
  Delimiter4 = "186,";
  Name5    = E_froid_J;
  Delimiter5 = "237,";
}
```

3.5.2. Résultats : synthèse

Nancy : 524 simulations

| valeur | E_tot_kWh_m ² | % chauffage | % refroidissement |
|----------|--------------------------|----------------|----------------------|
| initiale | 39.9 | 30.7% | 69.3% |
| min | 7.7 | 0.0% | 100.0% |
| max | 71.5 | 94.4% | 5.6% |

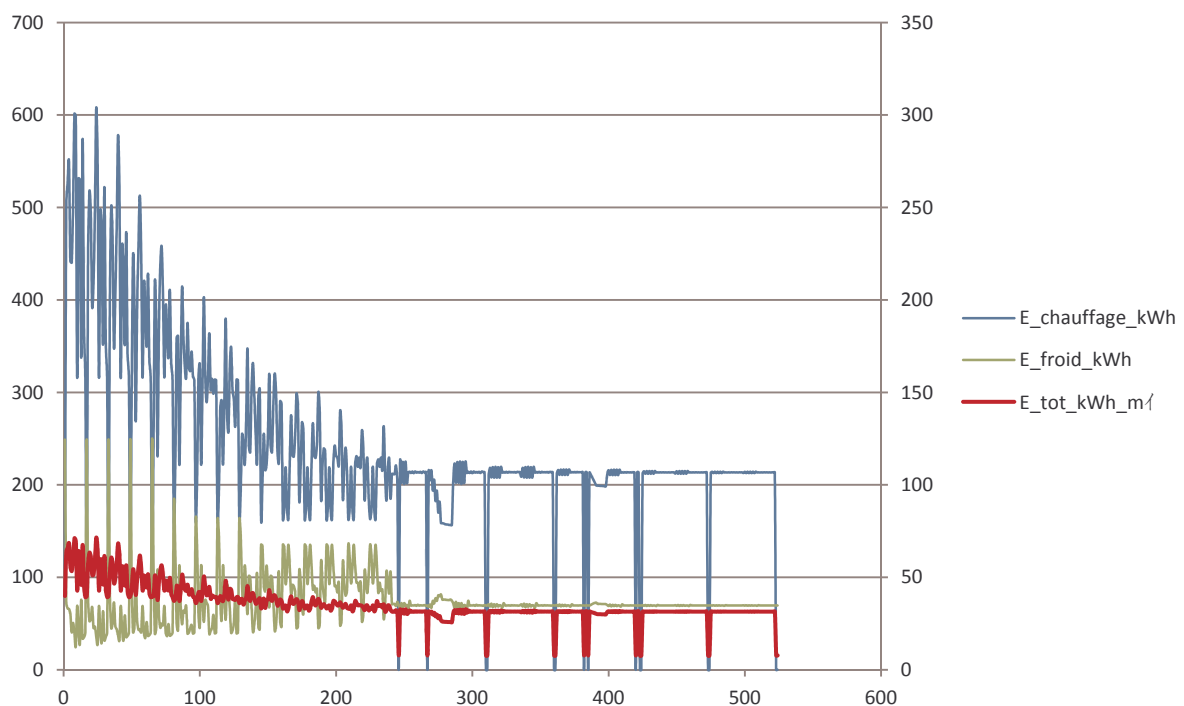
| valeur | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
|----------|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| initiale | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| min | 0.3 | 0.35 | 0.2 | 0.15 | 0.25 | 0.4 |
| max | 0.5 | 0.75 | 0.35 | 0.9 | 0.8 | 0.75 |
| | ep_masse_sud | ep_masse_nord | ep_masse_est | ep_masse_ouest | ep_masse_toit | ep_masse_sol |
| initiale | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| min | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.135 | 0.17 |
| max | 0.09 | 0.17 | 0.05 | 0.19 | 0.07 | 0.25 |

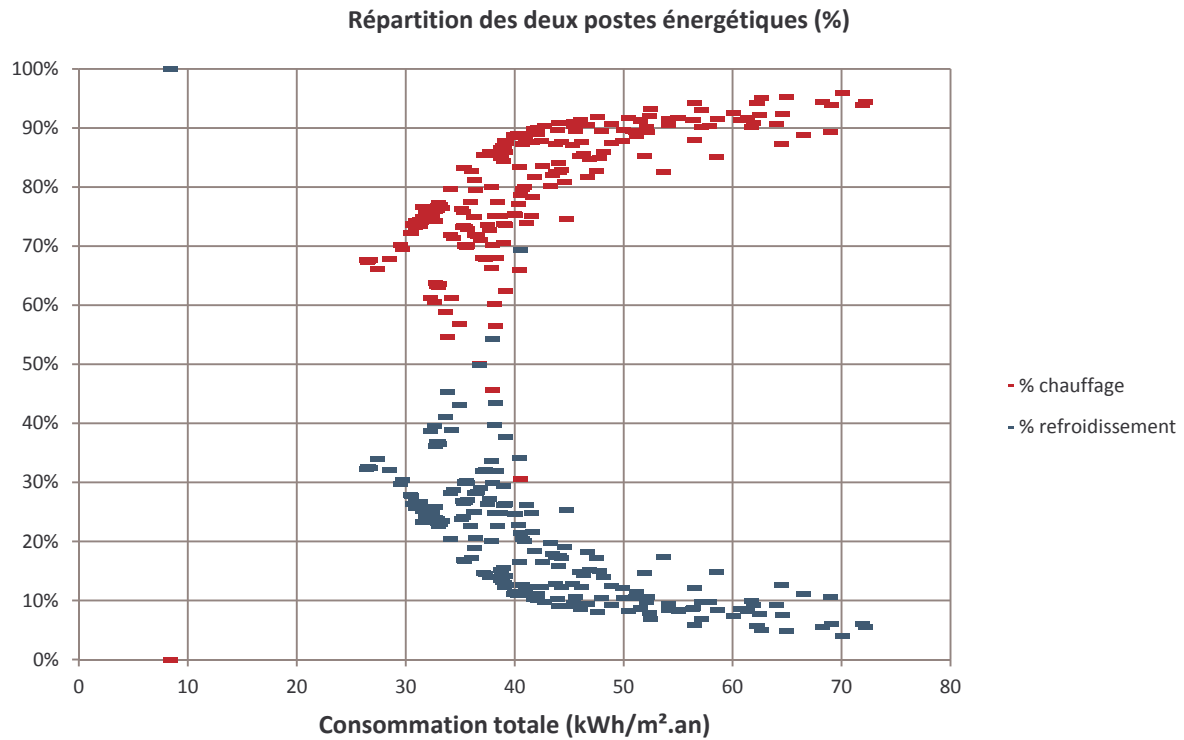
Le jeu sur les matériaux permet de diviser par 5 les consommations du cas initial. Dans ce climat continental, un juste milieu isolant/masse est à préconiser. Les performances d'isolation des parois restent un élément déterminant.

3.5.3. Vue globale des consommations

Nancy

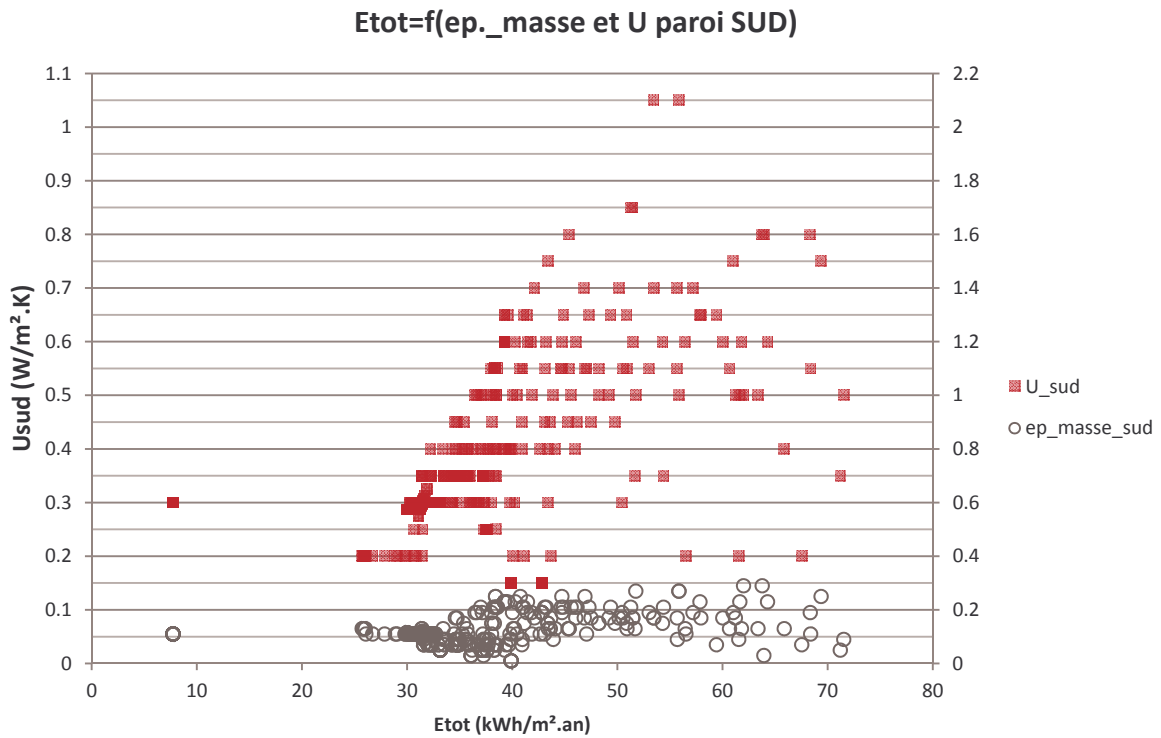
Consommations : globale (kWh/m².an) et par poste (kWh/an) au fil des simulations



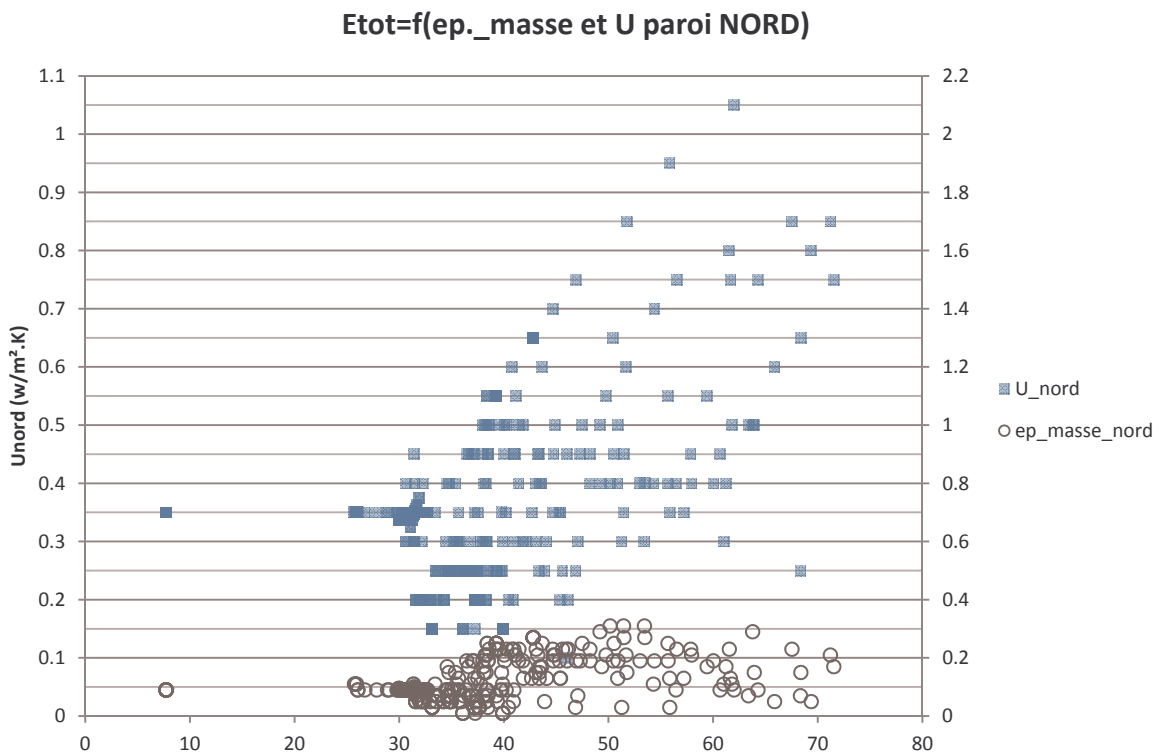


3.5.4. Isolation et masse par face : exemple sur Nancy

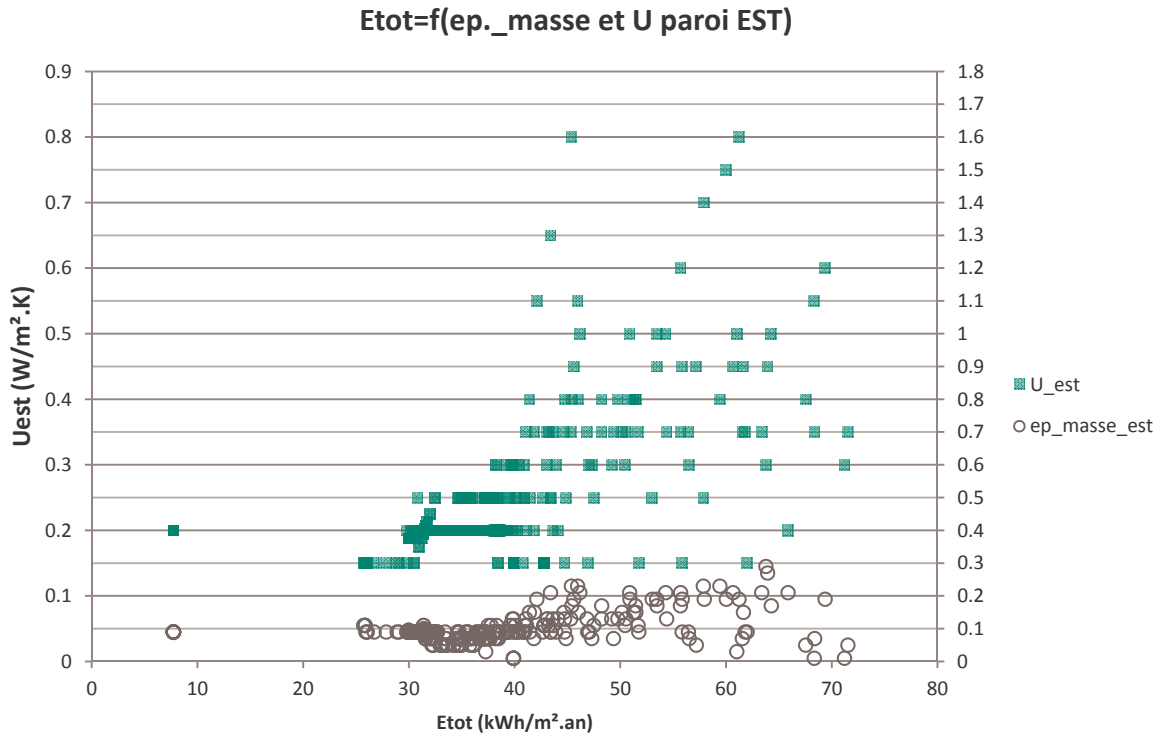
Avant toute chose, précisons que l'interaction combinée des 6 faces avec l'environnement extérieur, puis au sein du volume intérieur résulte d'une mécanique complexe. Il serait cavalier de juger de l'impact sur l'énergie totale de la composition de la paroi de l'une de ces faces, indépendamment des autres. C'est l'équilibre entre la part isolante extérieure et la part « captante » intérieure de chaque paroi qui mène à une réduction progressive des consommations, par ce simple jeu sur les matériaux.



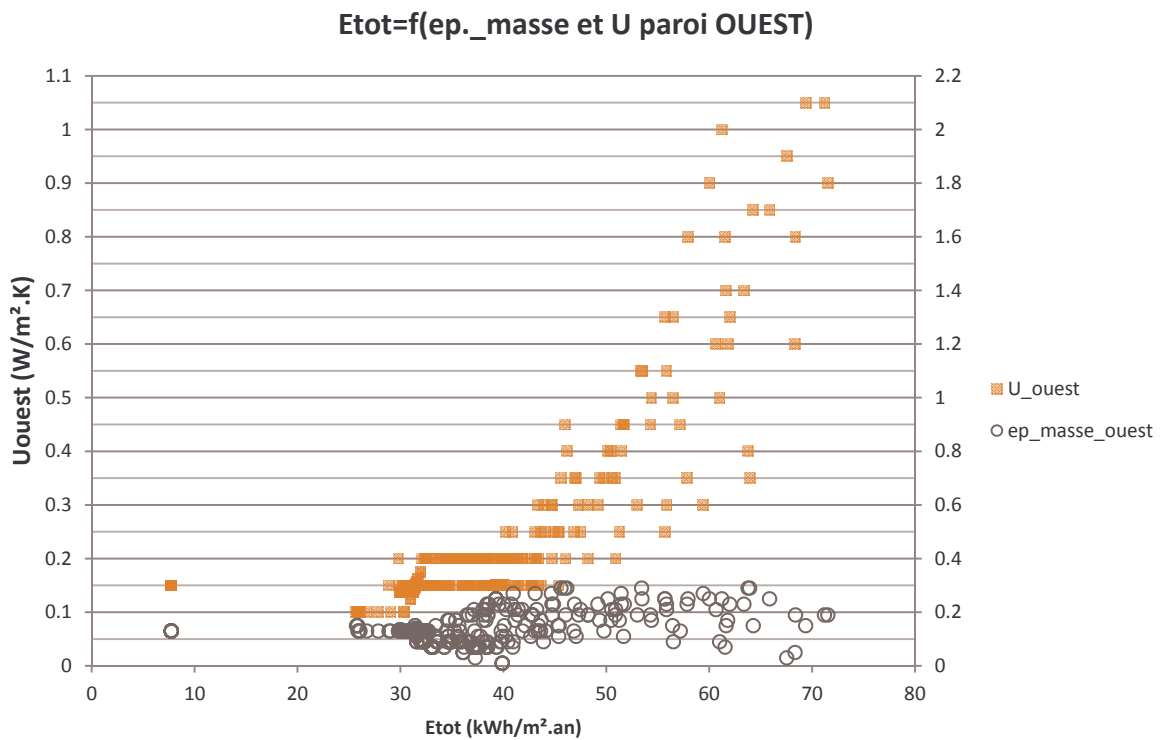
La bonne performance globale du bâtiment est ici conditionnée à une bonne isolation Sud (U de 0.2 W/m².K, éventuellement 0.3). La masse avoisine 10 cm.



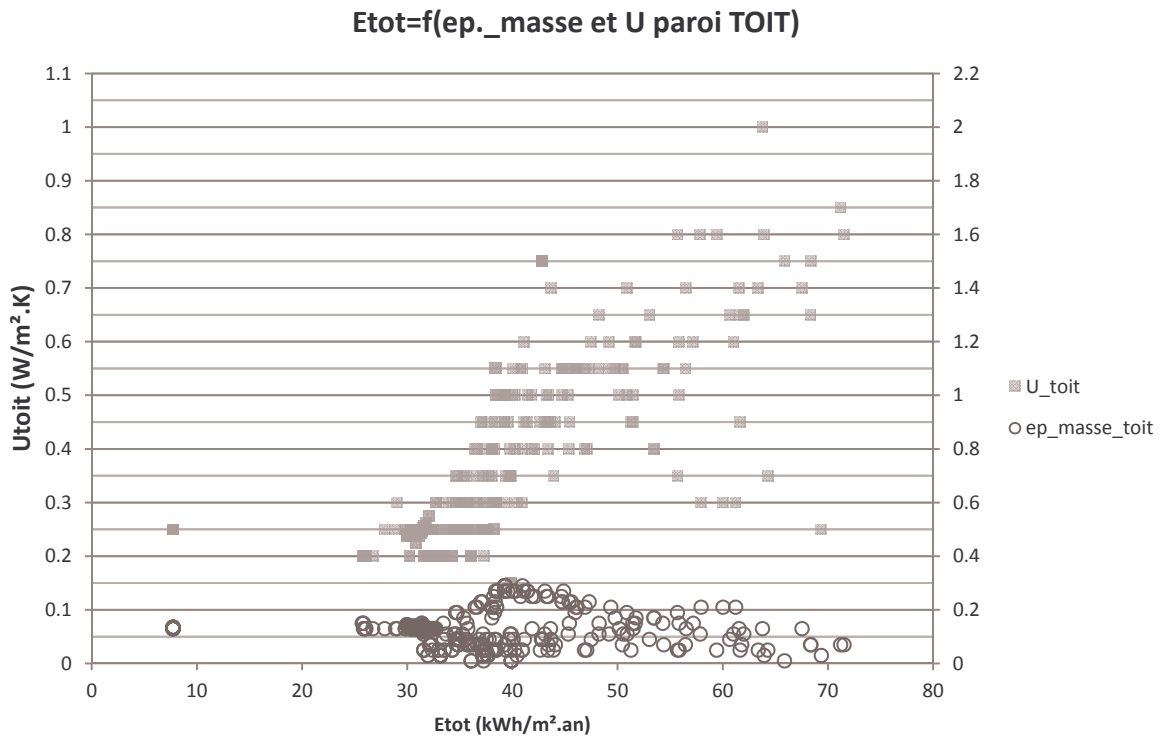
Au Nord, un U de 0.35 W/m².K associé à une masse de 10 cm est dans l'ensemble plus favorable qu'une isolation plus forte.



A l'Est, si la masse est la même, un U plus faible est exigé (du même niveau que le label passif).



A l'Ouest la tendance est la même qu'à l'Est du point de vue isolation. La masse avoisine 15 cm.



Au niveau du sol, enfin, l'isolation est plus secondaire que la présence importante de masse (Usol autour de 0.4 W/m².K pour 20 cm de passe).

3.5.5. Conclusions pour Nancy

En climat continental, la forte isolation globale participe à la protection de l'intérieur du bâtiment vis-à-vis des hivers froids et des étés chauds. L'isolation représente en moyen 60% de l'épaisseur des parois, hormis au sol, qui compte 60% de masse. Cette masse, notamment, profite au captage de l'énergie et à sa diffusion progressive et atténuée.

Considérant une dernière fois un isolant comme la ouate de cellulose, nous obtenons :

| | | | | | | |
|-----------------------|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| Mur initial | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
| ouate de cellulose | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| épaisseur paroi | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| Mur performant | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
| ouate de cellulose | 14 | 12.0 | 21 | 28 | 16.8 | 10.5 |
| épaisseur paroi | 25 | 21.0 | 30 | 41 | 30.3 | 27.5 |

3.5.6. Conclusions générales sur l'expérimentation sur les matériaux opaques

Les solutions générées par l'algorithme répondent bien aux exigences climatiques liées à chaque site. Du climat océanique au climat continental en passant par un climat chaud, les options et tendances sont différentes, privilégiant tantôt la masse (Montpellier), tantôt l'isolation (Nancy) ou un équilibre entre les deux (Brest).

On voit aussi qu'il est pertinent de différencier les parois selon leur orientation, chacune jouant un rôle particulier dans la protection ou la captation vis-à-vis du climat extérieur. Ce type de considération n'est, par ailleurs, pas nécessairement synonyme de complication sur chantier. On constate le potentiel d'économie matière et d'économie financière d'étudier plus finement la composition des parois. Evidemment, la différenciation selon l'orientation dépendra aussi de la taille et de la localisation des vitrages (en plus de leurs caractéristiques).

Plus généralement, il est intéressant de constater sur ces expérimentations simples le potentiel de gains énergétiques (ou de non-dépense) qu'apporte l'analyse du rapport isolant/masse. D'autant plus que ces gains ne font pas nécessairement par l'ajout d'épaisseur, et qu'ils peuvent être obtenus par une réelle variété d'options.

3.6. Influence de la position des baies

1. Présentation du modèle

Ce modèle est assez complexe. Il vise à tester l'influence de la position des baies sur chaque face donnant sur l'environnement extérieur. Partant d'un cube, il y a donc 5 faces potentiellement exposées au soleil et au vent. L'idée est aussi de voir quelles potentialités de composition de façade l'algorithme permettrait éventuellement de trouver. L'objectif est avant tout visuel.

Le principe est de diviser ces 5 parois en un maillage carré. Nous sommes partis d'un cube de 6.4 m de côté, divisé en 36 carrés de 1 m* 1 m (5 cm séparent les carrés les uns des autres). Maille est soit un vitrage, soit une surface opaque.

Définition dans EnergyPlus

Comme nous l'avons vu dans la partie 2, une fenêtre est un objet (*Window*), défini par différents champs (nom unique, nom de la composition, point de départ, largeur, hauteur...). Une dimension nulle ne peut être interprétée par le programme, qui ne peut démarrer la simulation. Il est par ailleurs plus complexe de créer une nouvelle fenêtre ou d'en supprimer une, puisque cela consiste à créer/supprimer un objet défini dans le fichier texte d'entrée.

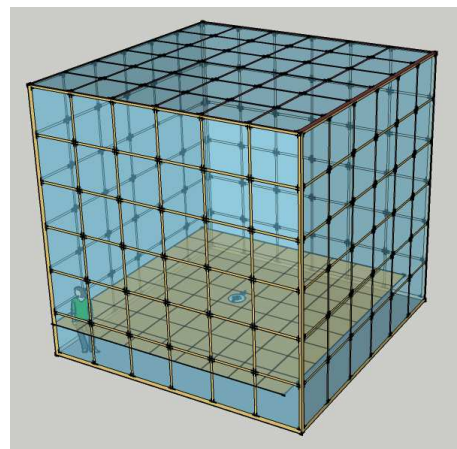


Figure 55 : Lumicube et carte d'éclairciment

EnergyPlus n'acceptant pas la définition d'une fenêtre aux dimensions nulles, nous avons opté pour une solution simple : la définir « très » petite. Pour cela, il est nécessaire de vérifier que, à l'échelle d'une année (période de simulation pour toutes les séries d'expérimentations réalisées), un cube sans fenêtres et un cube avec 180 « petites » fenêtres (36 fenêtres sur 5 faces) ont une dépense énergétique comparable (chauffage, refroidissement et lumière).

| | 180 "petites" fenêtres | 0 fenêtre | 0/180 fenêtres |
|-----------------|------------------------|-----------|----------------|
| Chauffage | 3054.67 | 3888.86 | 1.27 |
| Refroidissement | 18246.75 | 16623.14 | 0.91 |
| Lumière | 1643.86 | 1643.86 | 1.00 |
| Total | 22945.28 | 22155.86 | 0.97 |

Nous relevons des différences entre les charges de chauffage et de refroidissement des deux modèles. Toutefois, la différence totale est très faible. Rappelons par ailleurs que cette comparaison est faite sur le modèle le plus « extrême », avec 180 fenêtres. Dans la majeure partie des cas, le nombre de « petites » fenêtres est plus faible. Enfin, cette série d'expérimentation ne s'est faite que sur la période de chauffe, et non sur l'année entière, rendant plus acceptables encore ces différences.

Tous les réglages sont identiques au socle commun des simulations. Seule la période de simulation change. Elle n'est appliquée qu'à la saison de chauffe (du 15 octobre au 30 avril). Nous revenons sur ce choix en fin de section.

Définition dans GenOpt

Dans le fichier *command.txt*, nous définissons les 180 paramètres, de la même manière :

```
Parameter{
    Name= DimFen_Sud1;
    Min = 0.001;
    Ini = 0.001;
    Max = 1;
    Step= 0.999;
}
```

Un *Parameter* correspond à une variable indépendante, c'est-à-dire chaque maille carrée (180 au total). Nous les distinguons les uns des autres en indiquant l'orientation et un chiffre, (les mailles peuvent prendre, indépendamment les unes des autres, deux valeurs : 0.001 ou 1) :

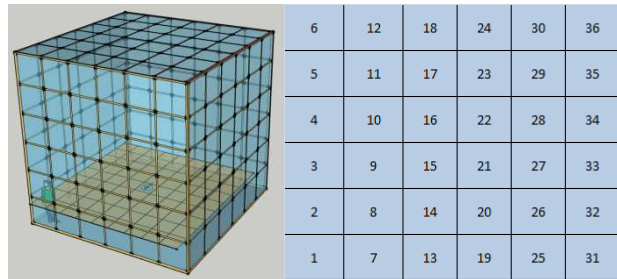


Figure 56 : Maillage du lumicube

Améliorations

Une autre approche avait été envisagée. Elle permettait de définir la présence ou non d'une fenêtre, et ainsi un gain de temps et de précision. Elle consistait à définir des variables discrètes, se basant sur la syntaxe du fichier d'entrée d'EnergyPlus. Les « ! » ouvrent des commentaires dans ce fichier .idf et « Window » définit chacune des fenêtres. Nous avons défini une variable par fenêtre possible, qui est considérée comme telle si le *Parameter* prend la valeur « Window », ou bien n'est pas prise en compte, étant assimilé à un commentaire, si on lui attribue la valeur « ! ». Au-delà du fait que la définition de paramètres discrets empêche l'utilisation de l'algorithme GPS de Hooke and Jeeves, et donc l'hybride PSO/HJ, nous avons été confronté au problème de changement d'identifiant des composantes de la fonction-objectif. En effet, la création ou la suppression d'objets actualise le fichier .eso et, ce faisant, bouleverse la définition de la *fitness*.

Visualisation

Voici une série de sélection pour Brest.

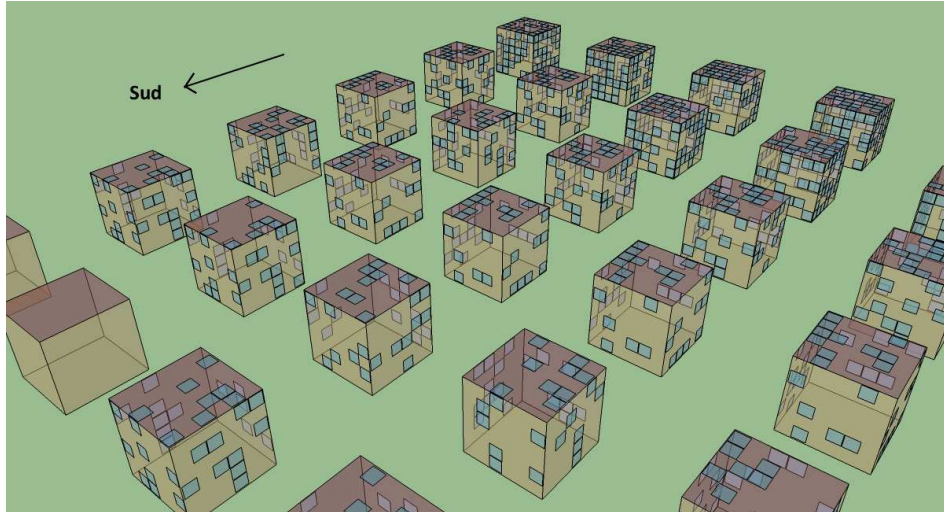


Figure 57 : Lumicube, Brest, vue Sud-Est

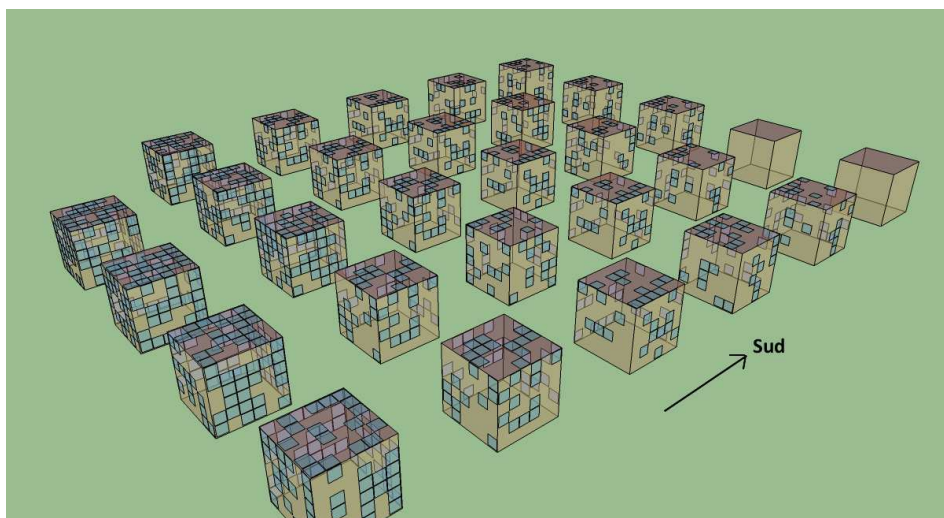


Figure 58 : Lumicube, Brest, vue Nord-Ouest

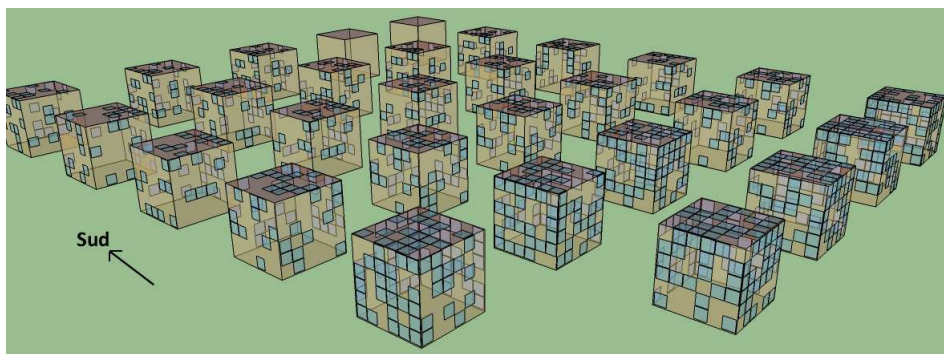


Figure 59 : Brest, vue Nord-Est

Limites du modèle

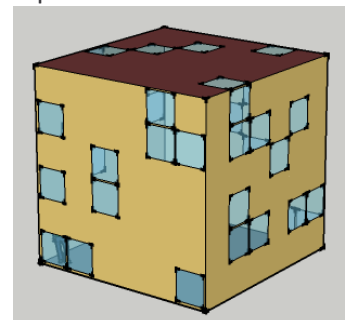
Le modèle est intéressant mais, en l'état, inadapté à EnergyPlus et à l'algorithme PSO/HJ. Le grand nombre de fenêtres allonge considérablement les temps de calculs, ainsi que l'import dans Google Sketchup. L'autre contrainte est qu'EnergyPlus calcule finement les effets des vitrages des points de vue thermique et lumineux (notamment calcul de la tâche solaire, etc.). Il le fait pour chaque fenêtre (quelle qu'en soit la taille) et à de multiples reprises durant la période de simulation. Aussi, réaliser ces simulations avec 180 fenêtres ralentit considérablement le temps de calcul d'une simulation (les calculs ont duré plusieurs jours, et seulement 2350 simulations ont été réalisées). Il est d'ailleurs souvent recommandé de regrouper plusieurs vitrages proches en un seul pour optimiser le temps de calcul.

Par ailleurs, aucune alternative à l'approximation (« petite fenêtre »=pas de fenêtre) n'a pu être trouvée. D'autre part, l'algorithme ne semble pas adapté à la dimension qui lui est imposée. 180 paramètres constituent un nombre excessif, limitant sa capacité à explorer un large espace. Au terme de plus de 2500 simulations, une large variété de composition vitrée de chaque face n'a pu être explorée. Il aurait été probablement plus pertinent, eu égard aux contraintes induites par EnergyPlus et GenOpt, de créer un maillage plus lâche, de l'ordre de 9 ou 16 mailles par face.

Il est par ailleurs commode de définir une grille d'analyse des résultats, comme nous l'avons fait dans les précédentes séries de tests. Agréger des données pour les analyser avant de les visualiser est plus aléatoire dans le cas du lumicube : difficultés d'identifier de « vrais » doublons, obligation de recourir à des groupements de vitrages sur des portions de face, etc.

Visuellement nous obtenons en revanche une réelle diversité, bien qu'il ne soit pas toujours aisé de distinguer la différence entre certaines solutions. On remarque que de nombreuses solutions se superposent sur les graphiques. En effet, les données représentées regroupant des informations par face, il est évident que 20% de vitrages peuvent être obtenus de différentes manières. C'est pour cela que nous avons ajouté un graphique avec la part des vitrages situés sur la moitié inférieure. Nous aurions pu le faire de manière plus détaillée, mais ce modèle se prêtait moins à l'analyse. Notons qu'il n'est pas garanti que l'algorithme explore les jeux que l'on pourrait souhaiter (plus ou moins inconsciemment) attendre.

Enfin, cette expérimentation avait un intérêt certain du point de vue architectural, permettant éventuellement d'identifier des zones à vitrer, ou à faire émerger des compositions de façade intéressantes, etc. Du point de vue analytique, cela reste plus complexe à exploiter. Il n'est pas envisageable, à la lumière de ces résultats, de faire ressortir la pertinence d'un bandeau en hauteur, de vitrages centrés, etc. Pour ce faire, il aurait été préférable de définir une autre stratégie que ce maillage, celle-ci étant adéquate dans l'absolu, mais moins pertinente pour cet environnement logiciel.



Conclusions

Limites et améliorations de l'outil

Interface

La manipulation de différents fichiers textes, à diverses reprises durant la procédure (paramétrage, post-traitement, visualisation), ne relève pas de la prouesse technique, mais nécessite de bien saisir les tenants et aboutissants de l'ensemble de l'environnement logiciel, et d'accepter un travail sur différentes interfaces (souvent avec des éditeurs de texte). En ce sens, il serait opportun d'envisager de développer une interface simple, servant simplement d'écran unique de saisie de certains fichiers texte ne demandant pas un grand nombre d'informations en général (ou peu ou prou les mêmes d'une séquence de simulations à une autre). Certaines tâches récurrentes pourraient par ailleurs être pré-paramétrées. Le post-traitement des données n'est pas non plus complexe en soi, mais le travail sur tableur ne permet pas toujours d'avoir une vue claire sur l'ensemble des résultats (doublons, tri selon critères, etc.). La définition d'un cadre précis de l'outil, concernant les paramètres variables et leur nombre, ou encore les dispositifs de captage et protection mis à disposition des utilisateurs faciliterait la mise en place de telles interfaces, automatisant le post-traitement.

Interactions

D'autre part, une caractéristique du couplage EnergyPlus/GenOpt est qu'il n'est pas possible d'interagir avec l'algorithme durant les simulations, ni de visualiser directement les changements morphologiques générés. Dans un sens, cet aspect peut stimuler la pensée implicite, l'exploration du champ de faisabilité se faisant une fois pour toute à la fin de la séquence de simulation. D'un autre côté, elle peut être source de frustration ou être oubliée du concepteur, à défaut d'être sélectionnable ou mémorisable en temps réel.

Temps

Notons également que la précision recherchée par l'utilisation d'un outil tel qu'EnergyPlus peut générer des temps de calcul longs. Néanmoins, il a été possible de réduire à quelques dizaines de secondes la durée d'une simulation, et plusieurs simulations peuvent être réalisées simultanément. Le point précédent ressurgit, puisque la contrainte de temps est ici encore corrélée au nombre de simulations et à l'impossibilité d'interagir avec l'algorithme. En conséquence, l'une des options pour un gain de temps est d'arrêter volontairement la séquence de simulation. De manière moins radicale, il conviendra de travailler plus en détail la question de l'algorithme.

Identification de la fitness

La plus grande limite reste toutefois d'un ordre plus technique. En effet, l'identification des indicateurs composant la fonction-objectif (énergie annuelle pour le chauffage, la lumière, etc.) contraint à passer par l'intermédiaire de 2 simulations courtes et de chercher dans certains fichiers générés (extensions .rdd et .eso notamment). La limite provient surtout du fait qu'un changement de composant (une fenêtre par exemple) peut provoquer un changement du numéro attribué à la consommation de chauffage annuelle, par exemple. Encore une fois, la définition de cadres prédéfinis pour l'outil pourrait permettre de pallier ce défaut.

Enseignements et perspectives

En dépit de ces écueils, principalement liés à l'interface, les expérimentations ont permis d'aborder l'environnement logiciel en exploitant des variables de différentes natures : dimension de baies, profondeur d'auvents, gabarit de bâtiment, orientation et matériaux.

Dans l'absolu, nous voyons le potentiel d'« économies constructives » d'énergie dès la conception, sur la base de calculs fiables, réalistes et en adéquation avec le climat local. Les outils utilisés démontrent la diversité des options disponibles à cette fin. Elles ont été obtenues, sauf dans un cas, sur des variables de même nature. Les différentes séquences de simulations portant sur des paramètres morphologiques, appliqués à des modules simples (mono-zones), témoignent du potentiel d'appui à la créativité. La poursuite d'expérimentations sur des modèles plus poussés et sur des variables de nature morphologique présenterait un intérêt certain de ce point de vue.

Il était important dans un premier temps d'appréhender ces outils sous un angle modeste et simple, et ne pas chercher « trop de choses, trop rapidement », quand bien même certaines séries de tests n'aboutissent pas à des variations visuelles évidentes, en raison du choix des variables. Le jeu complexe des interactions entre les variables (qui peuvent être celles testées, comme bien d'autres) peut offrir des combinaisons distinctes, amenant à des niveaux de consommation comparables, et illustre bien le fait que diversité des possibles et performances énergétiques sont compatibles.

La visualisation simultanée de plusieurs solutions au format .dfx ou Sketchup constitue par ailleurs un avantage réel, permettant une démarche exploratoire et pensée implicite.

Améliorations et perspectives pour Ec-Co-Gen

Approche annuelle

L'avantage de cet environnement logiciel est sa prise en compte des particularités de chaque climat, et la réalisation de simulations à l'échelle de l'année. Un travail sur une période de temps longue nécessite toutefois un approfondissement relevant de la logique captage/protection vis-à-vis de l'énergie solaire. Il ressort en effet que la « tension naturelle » entre besoins en lumière, chauffage et refroidissement exige une approche plus fine et appropriée au site. Dans maintes simulations, si l'on neutralise les charges de refroidissement (protections solaires plus adaptées, ventilation naturelle mieux travaillée, etc.), on s'aperçoit que des solutions performantes apparaissent. Un travail plus poussé est donc à mener en la matière.

En élargissant, une autre perspective serait d'établir des contraintes sur des aspects de la *fitness*, telles que l'éclairage, afin que les apports naturels (et donc les baies) ne soient pas limités au strict minimum. D'ailleurs, en intégrant les coefficients conventionnels de conversion énergétique, un autre équilibre serait trouvé (en prenant 2.58 pour l'éclairage artificiel et 0.6 pour le bois par exemple). Cela peut se faire dans une approche cherchant par exemple à évaluer à tous les stades du projet la performance de différentes solutions au regard des exigences du label BBC ou de la RT2012, d'autant qu'il est possible d'intégrer les cinq postes de consommations énergétiques dans les évaluations faites par l'algorithme après calculs d'EnergyPlus.

Morphologie

Suite à cet ensemble de tests, nous disposons de modules simples, qu'il conviendrait de juxtaposer et transformer, en leur conférant d'autres fonctions, d'autres occupations, et en matérialisant les liens entre volumes. Il est possible d'envisager des modèles plus élaborés, avec un travail plus approfondi sur les baies, des variations morphologiques différentes, des localisations stratégiques des baies, etc. L'ajout de dispositifs de captage de lumière ou/et de chaleur pourrait venir amplifier cette dynamique, d'autant qu'ils sont directement disponibles dans EnergyPlus.

Il serait donc intéressant de pousser les possibilités de morphogénèse, afin d'adapter l'outil à des approches plus plastiques qui imprègnent les débuts de la conception, et de s'appuyer sur les contraintes énergétiques pour nourrir la créativité architecturale.

AE

Il serait en outre pertinent de tester différents réglages d'initialisation des populations. Au-delà, la suite exigerait également de tester d'autres algorithmes, dont le CMA-ES/HDE développé par Kämpf (2010). A terme, le développement d'un algorithme propre, adapté à une recherche particulière, par exemple sur les baies, serait une étape probablement nécessaire. Une telle perspective permettrait de régler la question de la durée d'une séquence de simulation.

L'environnement logiciel s'avère donc pertinent dans le cadre du projet Ec-Co-Gen. Performant du point de vue des simulations énergétiques, il reste souple quant au choix de l'approche évolutionnaire. Il peut être envisagé de coupler simultanément EnergyPlus et Radiance-DaySim avec GenOpt, afin de disposer d'une précision accrue sur les aspects d'autonomie en lumière naturelle, mais des tests resteraient à faire dans cette perspective. La principale question concerne le modeleur 3D. Sketchup est aujourd'hui connu et maîtrisé par bon nombre de praticiens, et l'utilisation que nous en avons faite dans les expérimentations peut être utile, en tant qu'elle génère automatiquement des solutions et permet de susciter la créativité en proposant des solutions potentiellement non envisagées par l'utilisateur. Mais il pourrait constituer une limite en cas de volonté d'approche paramétrique. Dans ce cadre, Rhinoceros et Grasshopper constituent des outils intéressants, quoiqu'ils ne génèrent pas à l'heure actuelle de réponses « optimisées » au problème posé, sans interaction de l'utilisateur. Notons que le plugin DivaForRhino permettrait d'utiliser conjointement EnergyPlus et Radiance-DaySim avec ce modeleur 3D. En ce cas, la définition d'une AE interagissant avec cet environnement logiciel pourrait constituer une piste d'intérêt.

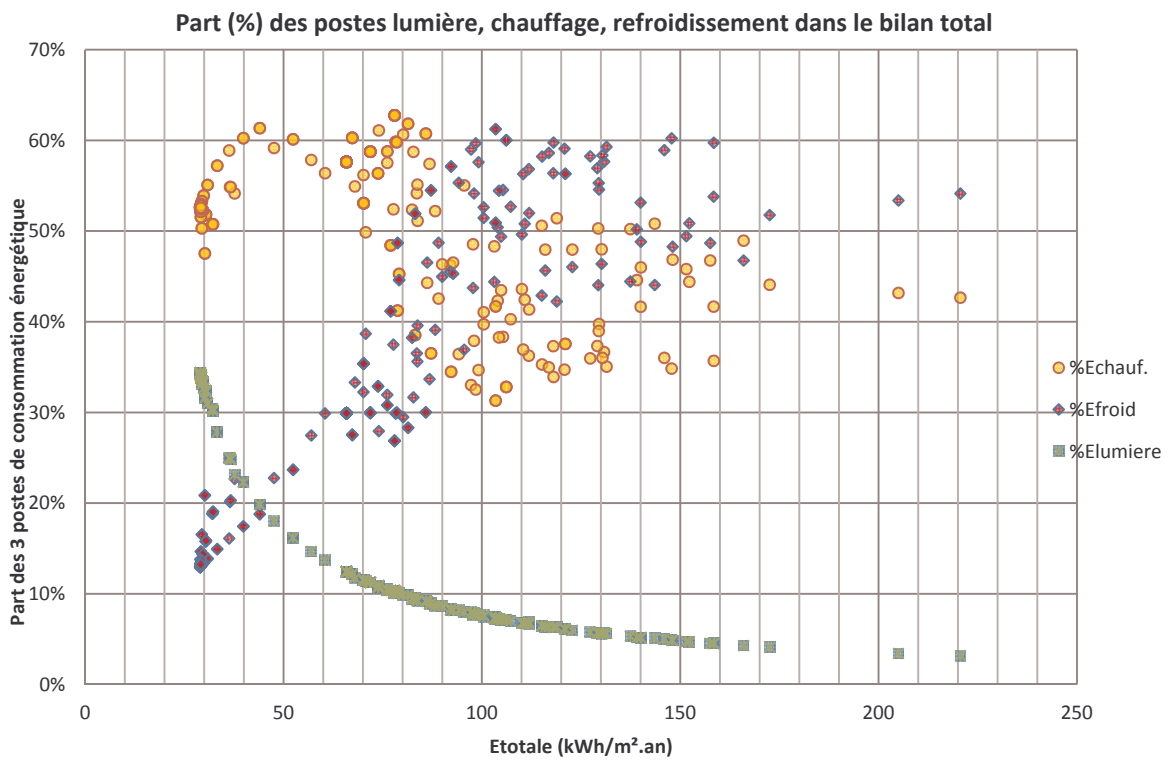
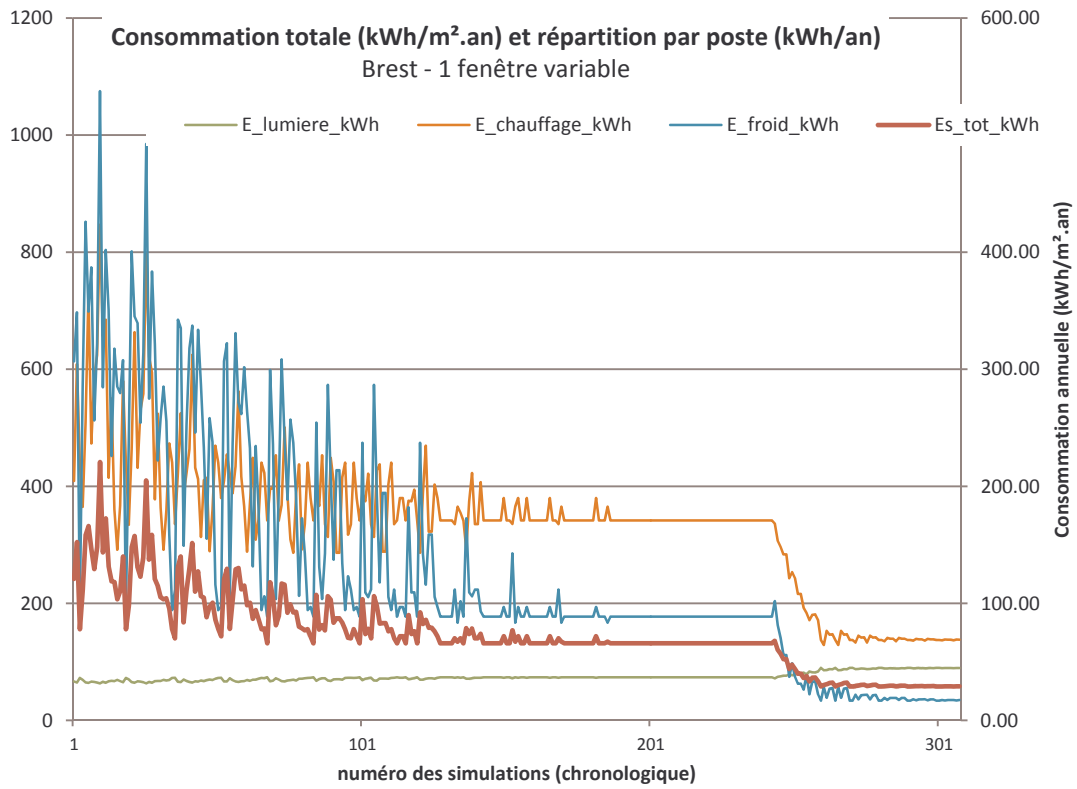
4. Annexes

4.1. Série de tests 1 : dimensions des baies et des protections solaires

4.1.1. Variante 1 : variation dimensionnelles des baies

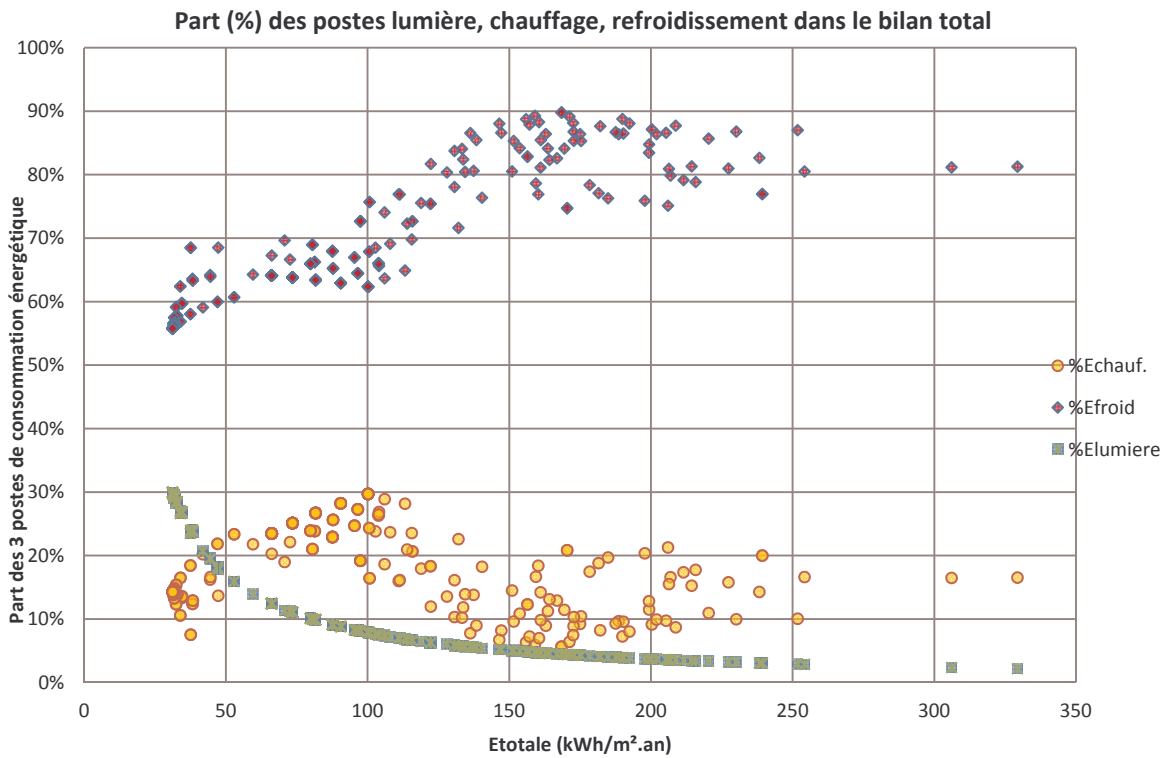
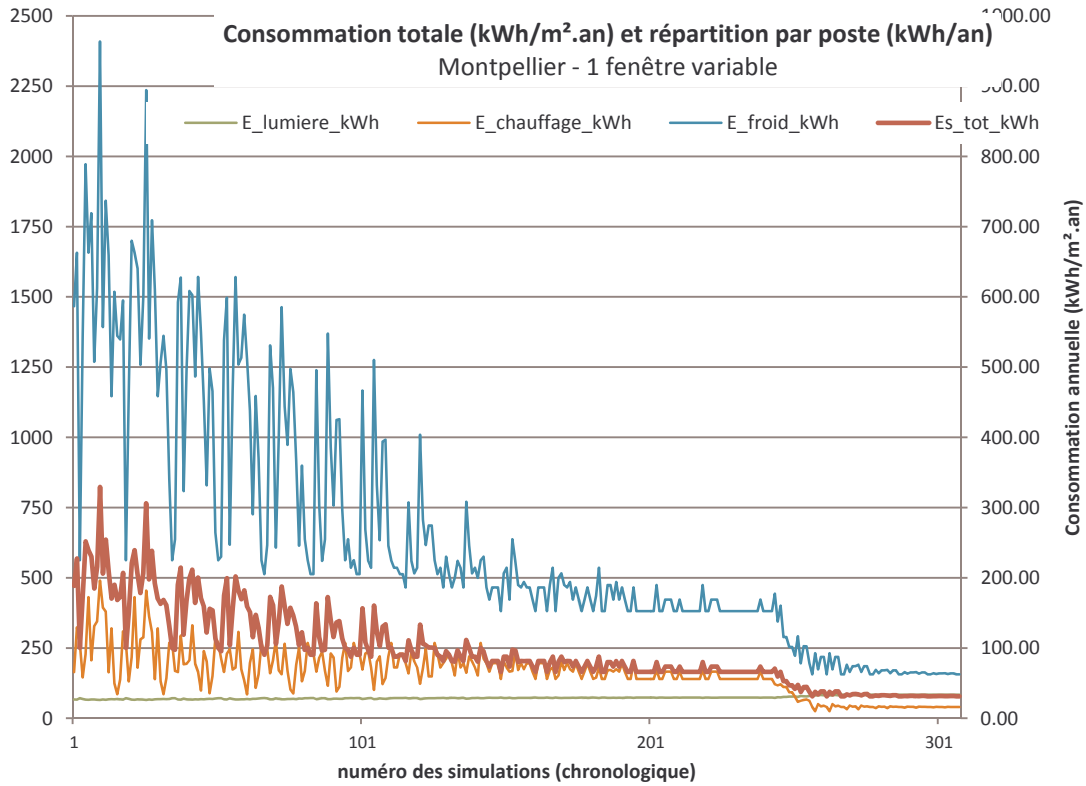
1. Vue générale des consommations

| Brest : 311 simulations | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
|-------------------------|---------------|--------------|----------|---------|-------|------|------|-------|
| | min | 28.98 | 2.8% | 54.2% | 43.0% | 0.64 | 0.64 | 0.64 |
| max | 220.60 | 3.2% | 42.7% | 54.1% | 7.84 | 5.76 | 5.76 | 3.24 |



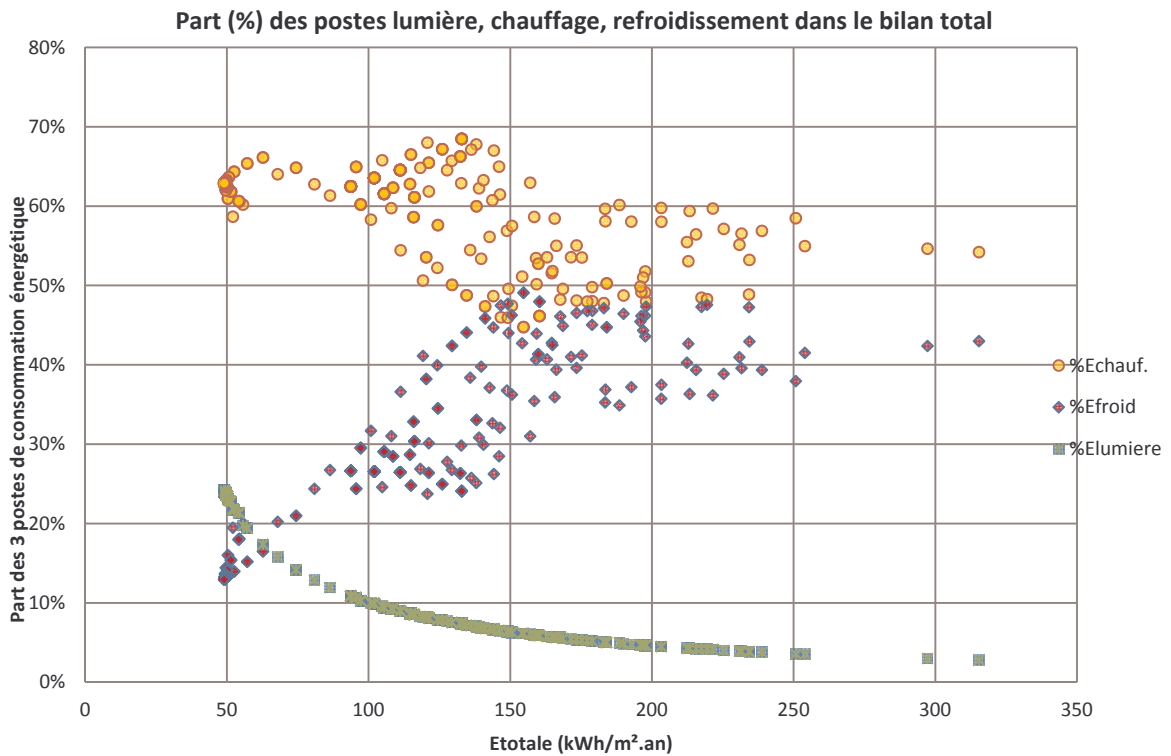
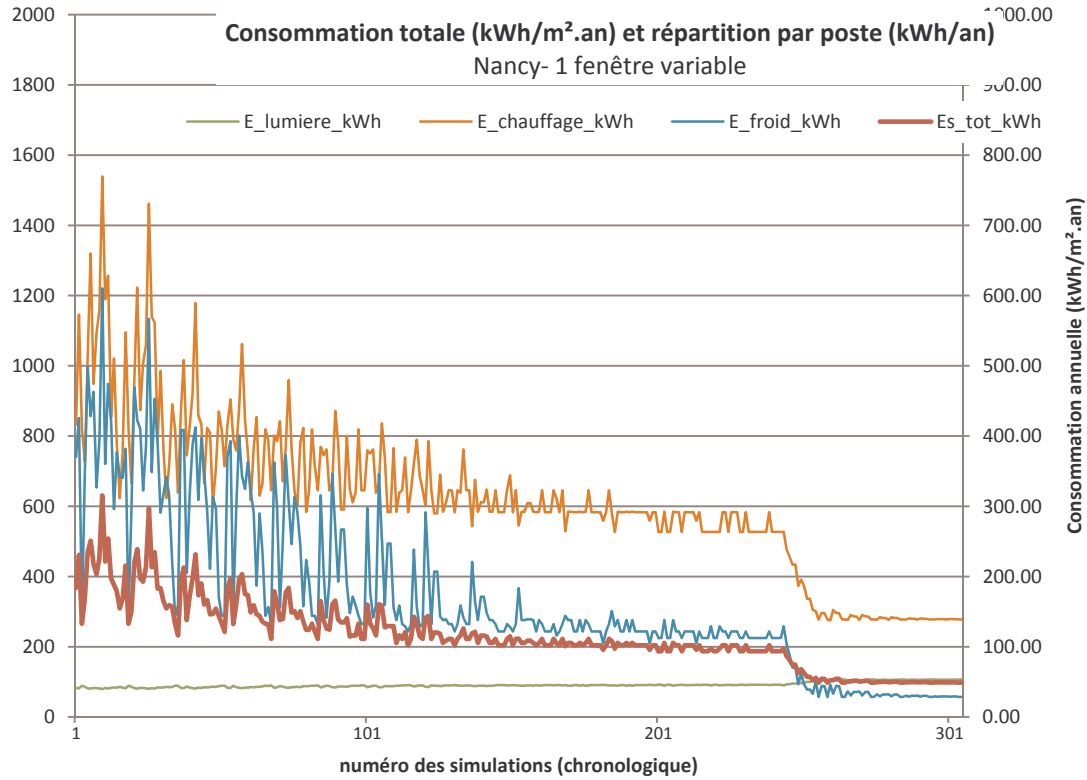
Montpellier : 308 simulations

| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|------|------|------|-------|
| max | 329.32 | 2.2% | 16.5% | 81.3% | 7.84 | 5.76 | 5.76 | 3.24 |
| min | 31.18 | 29.9% | 14.3% | 55.8% | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 0.64 |



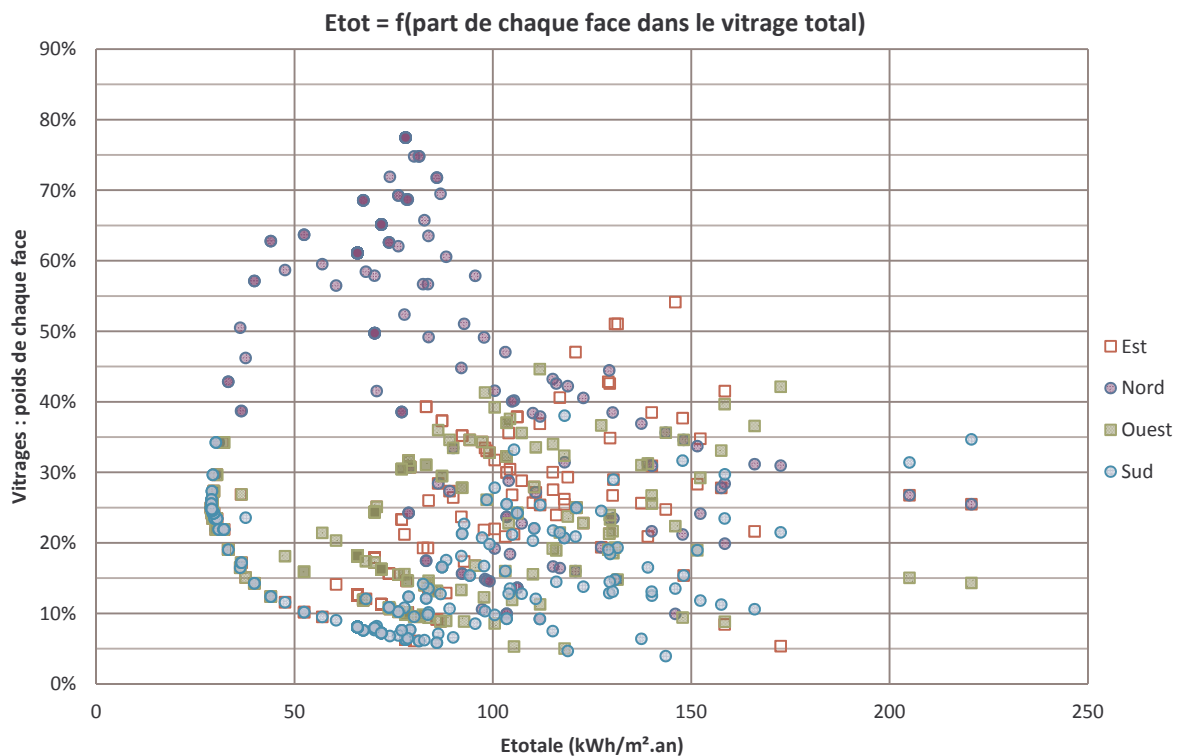
Nancy : 305 simulations

| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|------|------|------|-------|
| max | 315.41 | 2.8% | 54.2% | 43.0% | 7.84 | 5.76 | 5.76 | 3.24 |
| min | 49.04 | 24.2% | 62.9% | 12.9% | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 0.64 |

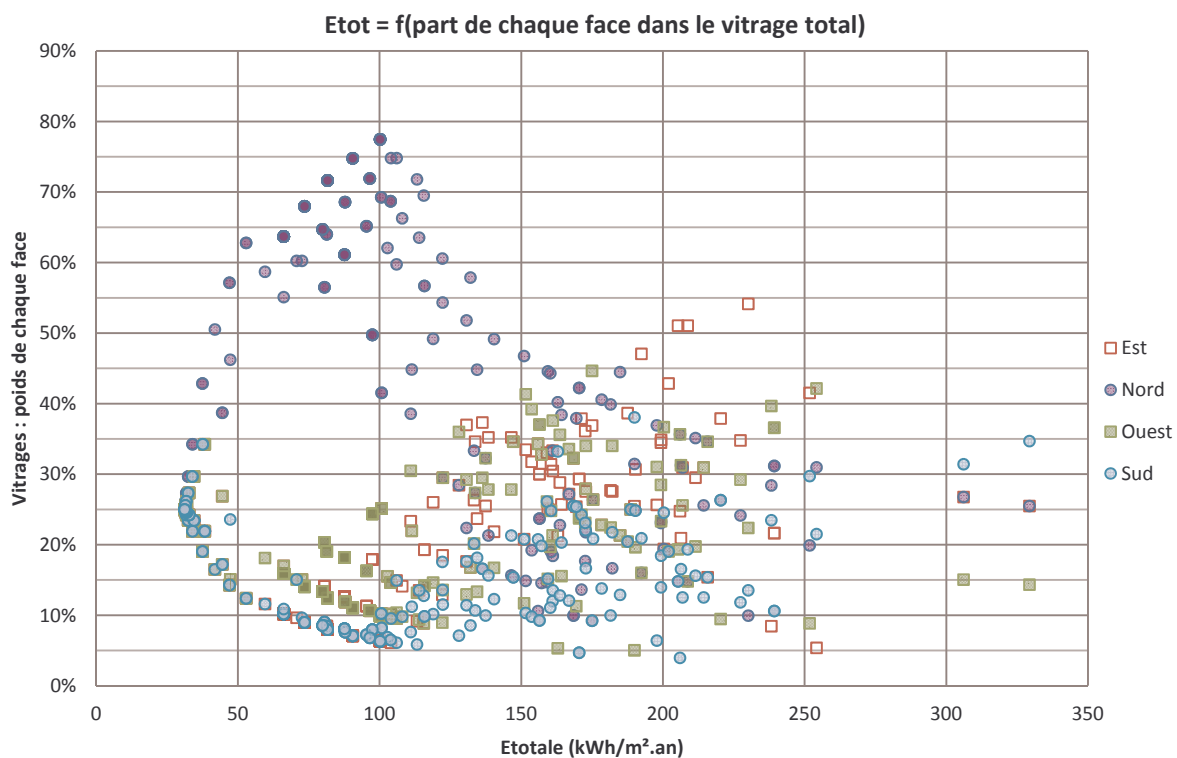


2. Répartition des vitrages

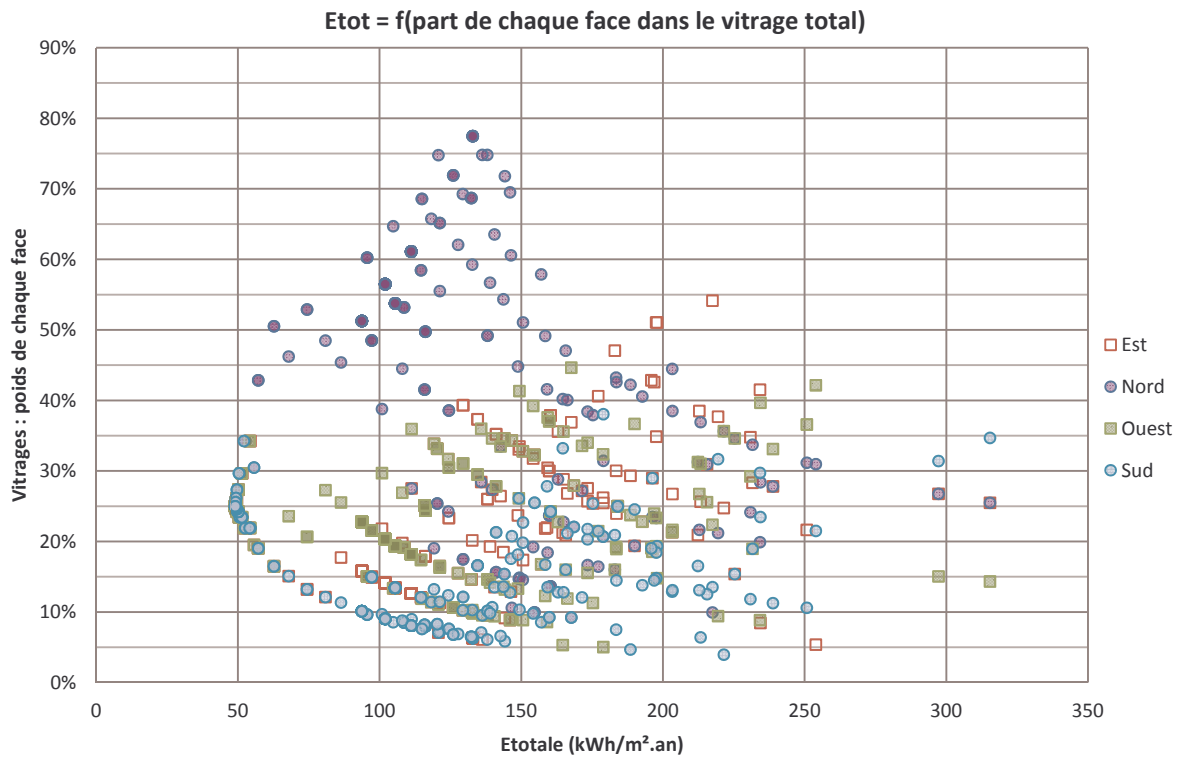
Brest



Montpellier

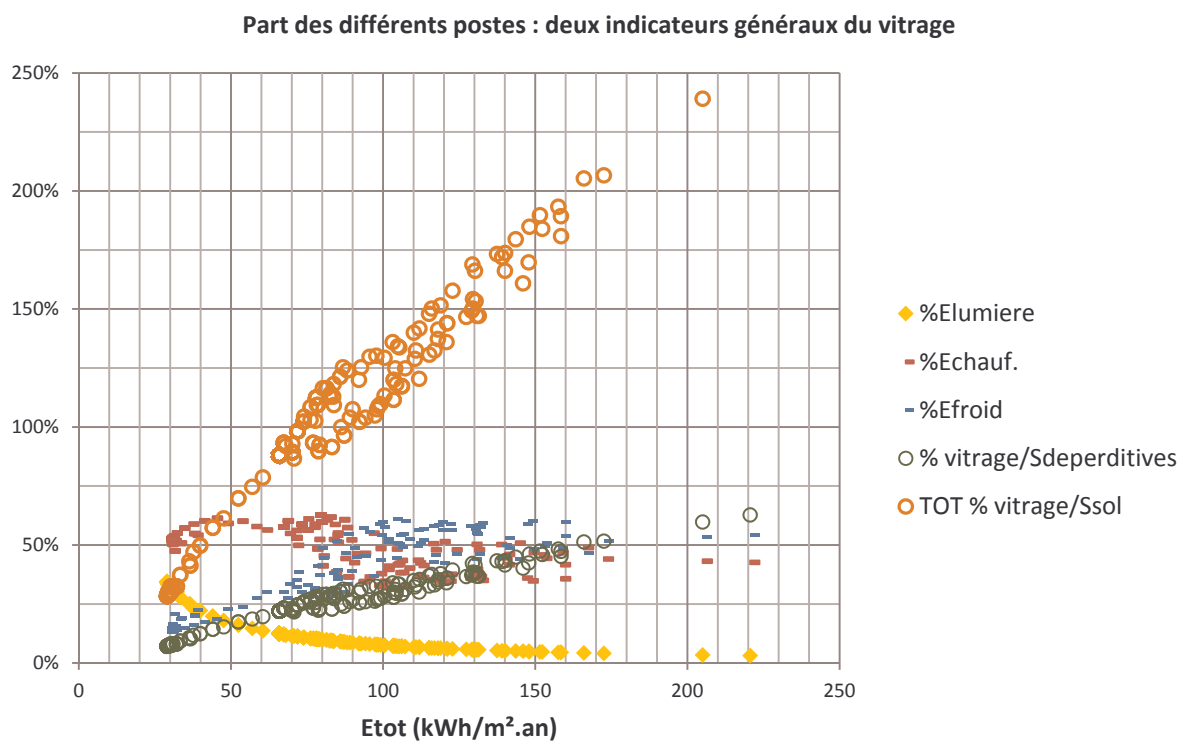


Nancy



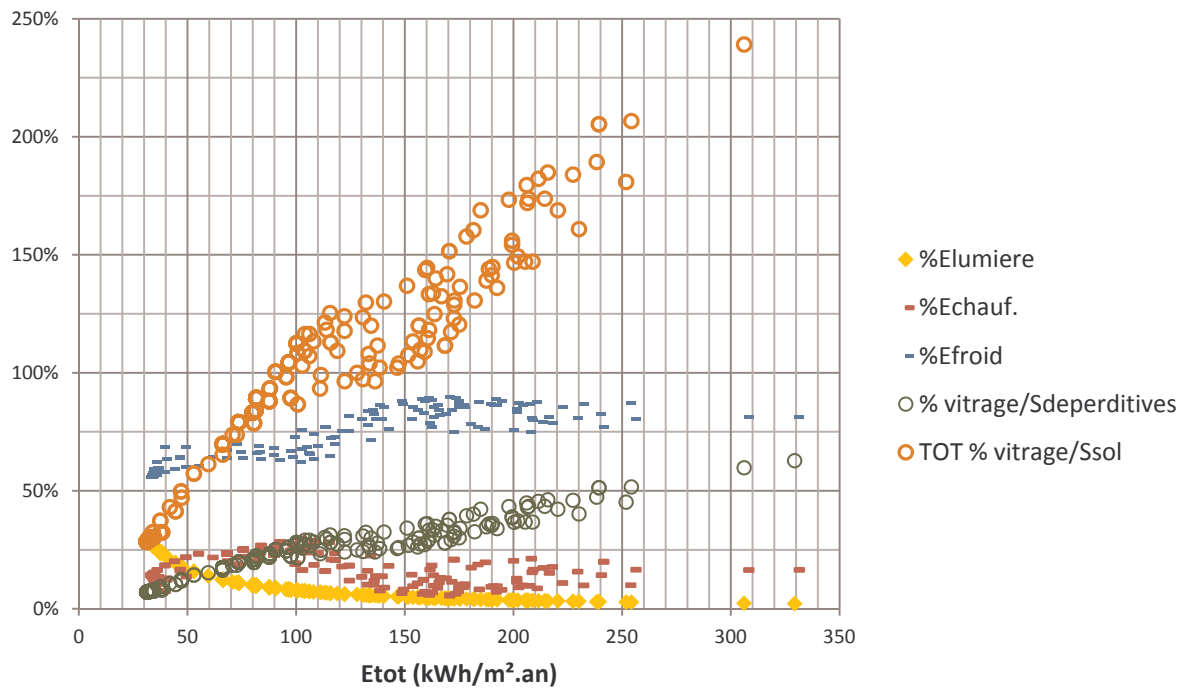
3. Consommations et vitrages

Brest



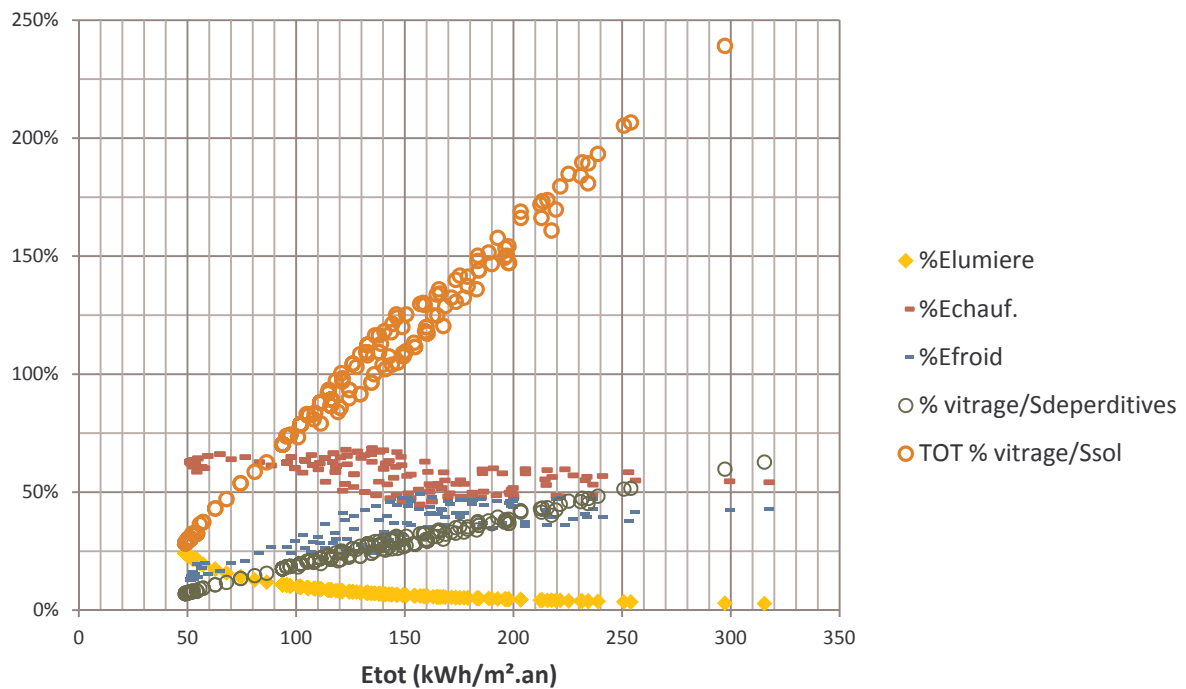
Montpellier

Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage

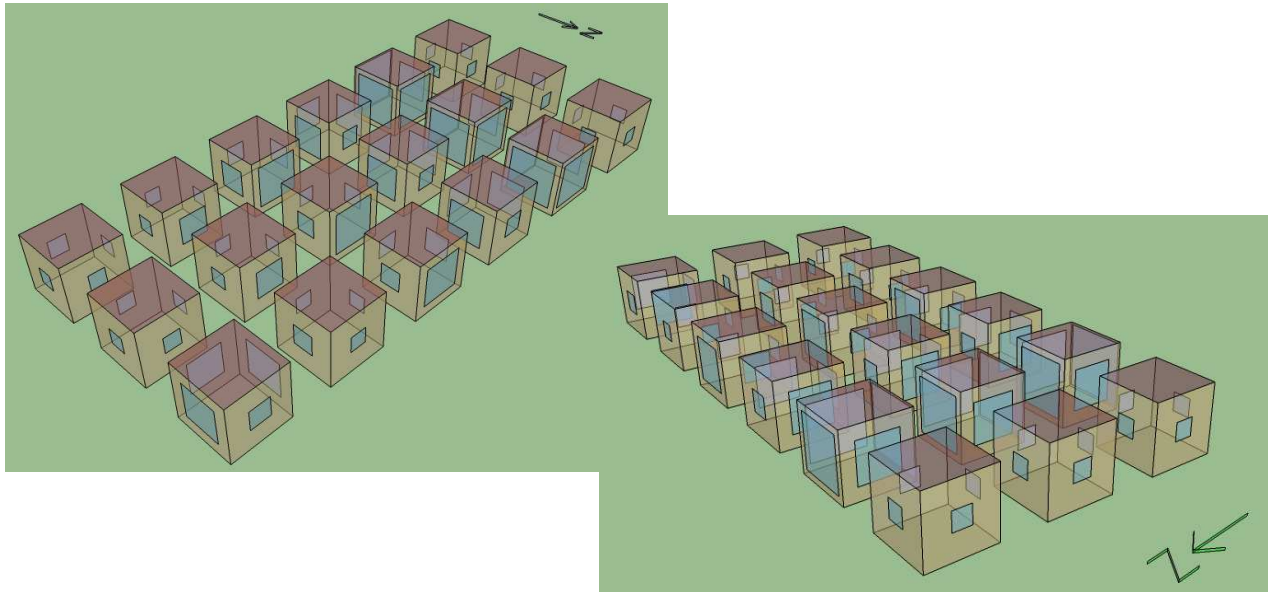


Nancy

Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage



4. Visualisations



5. Quelques conclusions

Pour Brest, la consommation de lumière est assez stable, celle de refroidissement plutôt réduite. L'algorithme cherche à réduire les charges de chauffage. Plus la part de rafraîchissement diminue, plus celle de la lumière augmente (et celle du chauffage dans une moindre mesure). Pour un même niveau de consommation, différentes options sont possibles. Pour Montpellier, le constat est le même, avec un besoin de refroidissement prédominant, et des besoins de chauffage quasi « neutralisés ». Dans le cas de Nancy, le chauffage a une part importante, mais le froid n'est faible que sur le dernier palier, où il ne pèse plus qu'un peu plus de 10%, lumière et chauffage augmentant.

La part respective de chaque face dans le vitrage est somme toute assez variable pour les trois sites. L'algorithme semble chercher à vitrer le Nord. Les consommations globales les plus faibles sont obtenues en équilibrant la part de chaque face. Les deux indicateurs généraux de vitrage suggèrent une baisse linéaire du ratio surface vitrée sur surface au sol et surface vitrée sur surface déperditive (hors toit). Le premier est proche des 30%, et le second sous 10% dans les 3 cas.

Nous avons mené, sans avoir le temps de les analyser, des séries de simulations, avec 2 fenêtres par face. De manière générale, il serait en effet intéressant de multiplier les baies par face (avec parcimonie, afin de ne pas ralentir les calculs notamment). Cela permettrait une approche plus fine du captage lumière/chaaleur. D'autre part, dans notre test, les grandes baies vont nécessairement de bas en haut. Or, prévoir des bandeaux de lumière, éviter les baies sous une certaine hauteur (sous laquelle il n'y a plus de gains, mais que des déperditions), etc. assureraient de bons résultats.

4.1.2. Variante 2 : dimensionnement des protections solaires

Cette variante reprend exactement le même modèle, en ajoutant une loggia (auvent+flancs). Leur profondeur est une variable propre à chaque loggia. Elle prend au maximum la même dimension que la hauteur de la fenêtre, et au minimum 10% de cette hauteur.

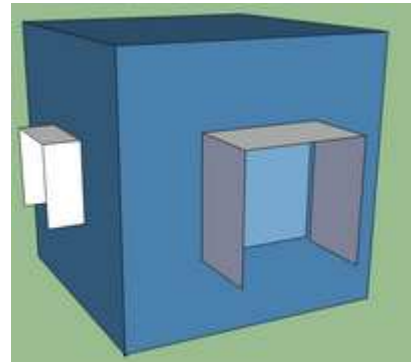
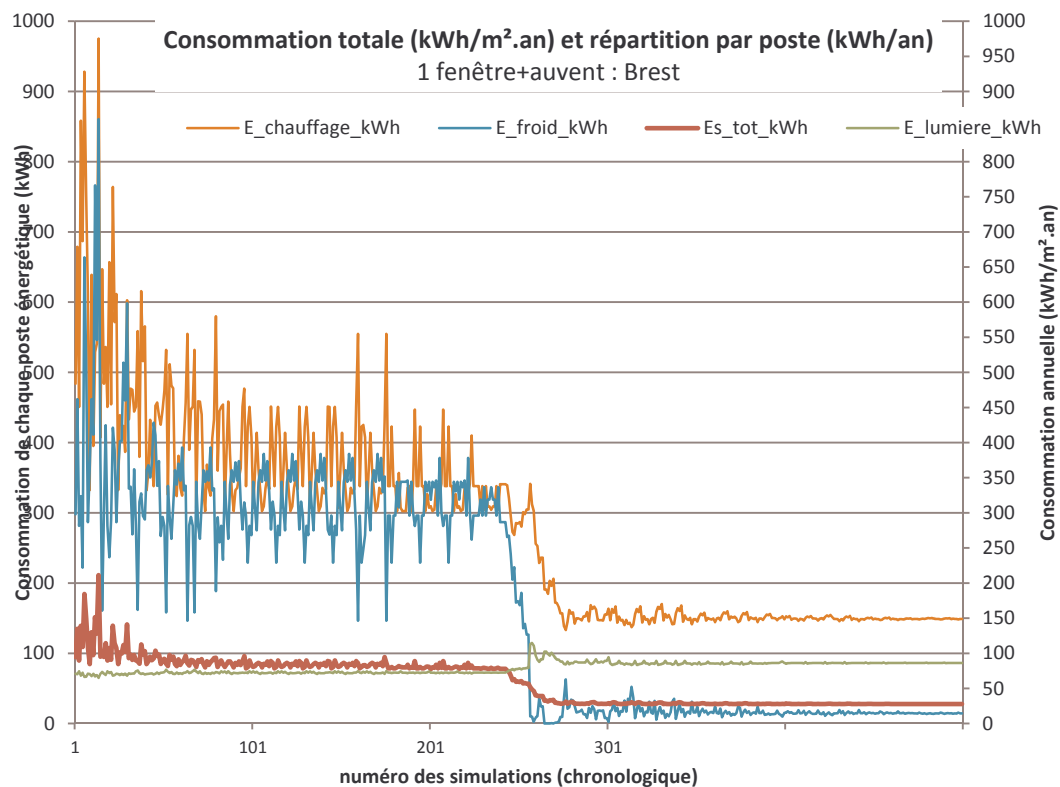


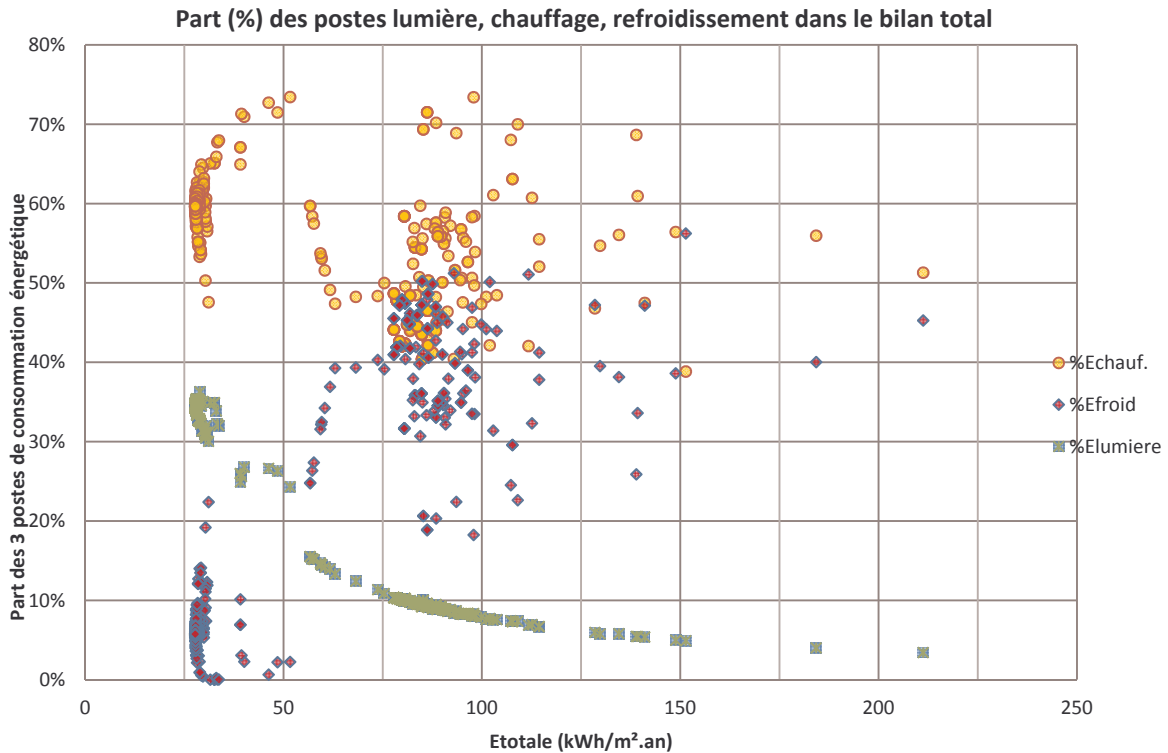
Figure 61 : Modèle avec loggia

1. Vue générale des consommations

Brest : 500 simulations

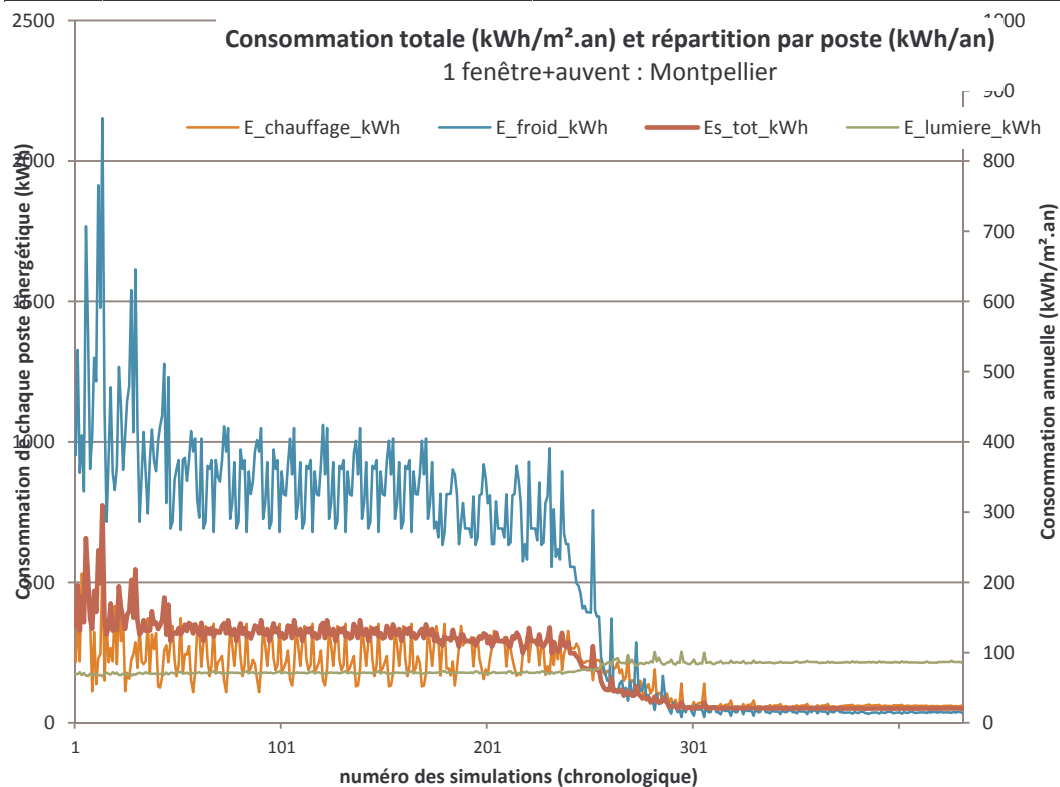
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | | Profondeur loggia/Hfen | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|--------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Sud | Nord | Est | Ouest |
| Max | 211.22 | 3% | 51% | 45% | 87.1% | 28.4% | 75.1% | 75.1% | 14.3% | 33.3% | 14.3% | 11.1% |
| Min | 27.74 | 35% | 60% | 6% | 14.7% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 14.3% | 9.1% | 9.5% | 100.0% |

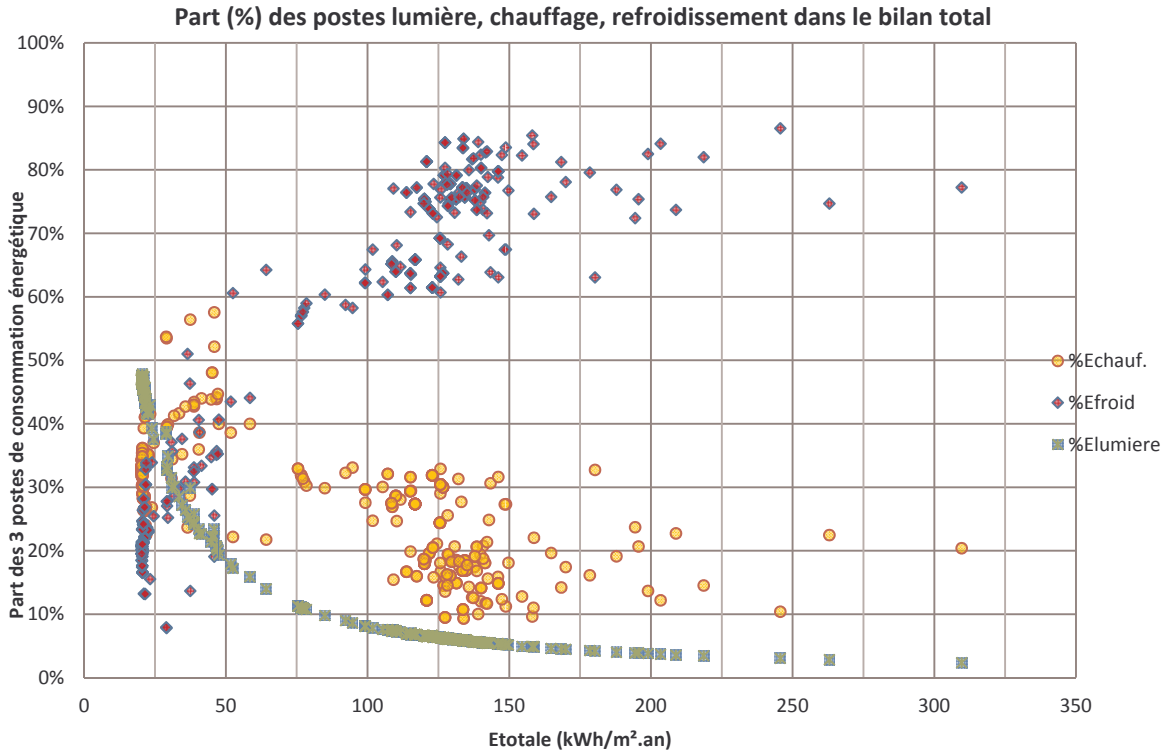




Montpellier : 431 simulations

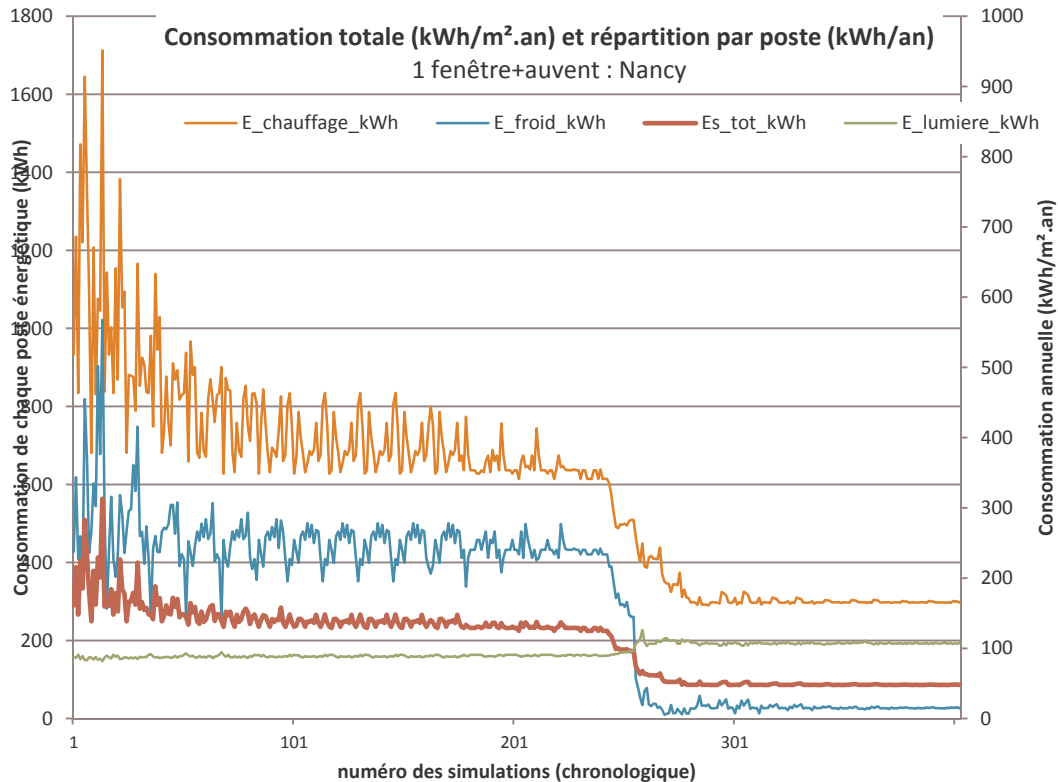
| | Consommations | | | | % vitrage parface | | | | Profondeur loggia/Hfen | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|-------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|--------|--------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Sud | Nord | Est | Ouest |
| Max | 309.65 | 2.4% | 20.4% | 77.2% | 87.1% | 28.4% | 75.1% | 75.1% | 14.3% | 33.3% | 14.3% | 11.1% |
| Min | 20.30 | 47.0% | 32.9% | 20.1% | 15.7% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 33.3% | 11.9% | 100.0% | 100.0% |

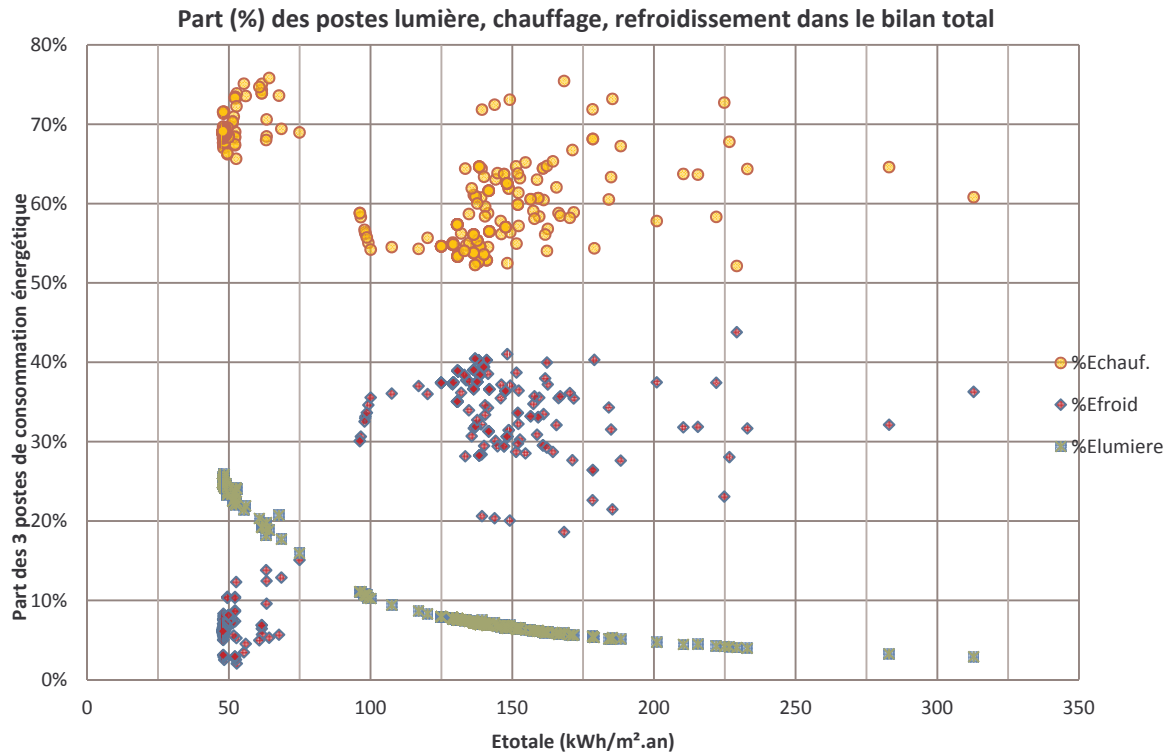




Nancy : 445 simulations

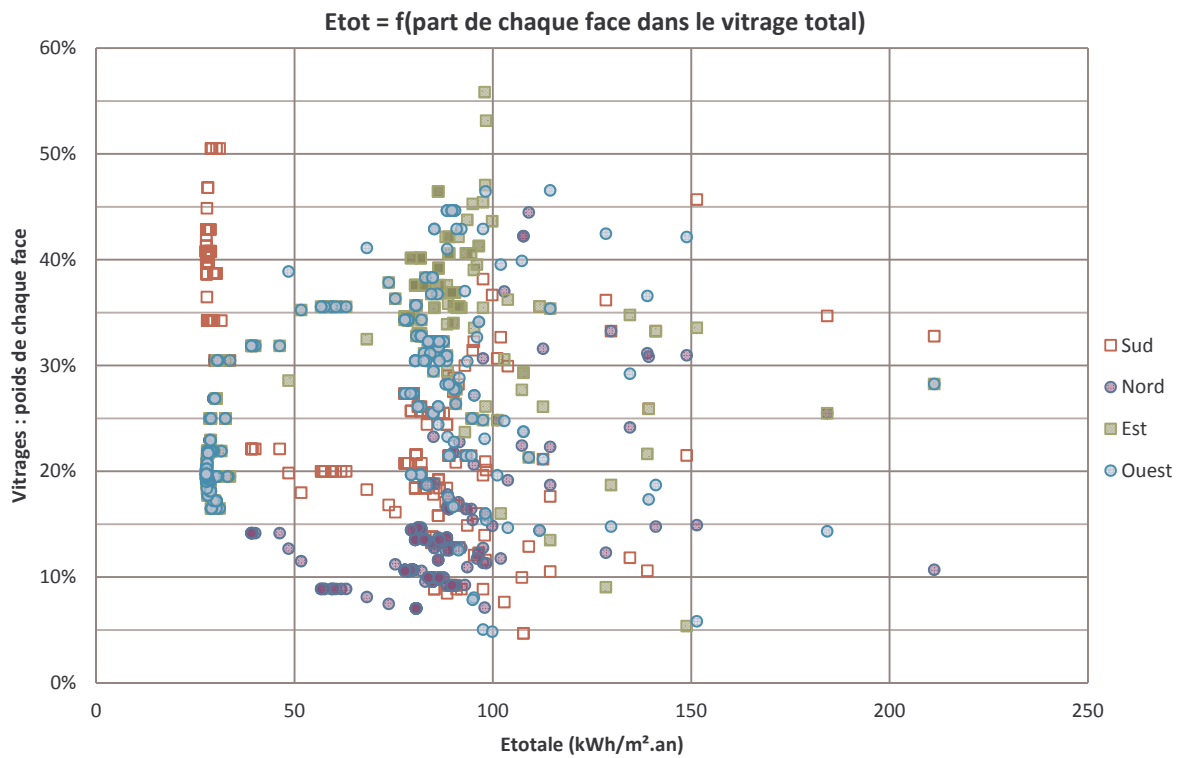
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | | Profondeur loggia/Hfen | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Sud | Nord | Est | Ouest |
| Max | 312.82 | 0.03 | 0.61 | 0.36 | 87.1% | 28.4% | 75.1% | 75.1% | 14.3% | 33.3% | 14.3% | 11.1% |
| Min | 47.89 | 0.25 | 0.69 | 0.06 | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 11.8% | 11.1% | 33.3% | 9.1% |



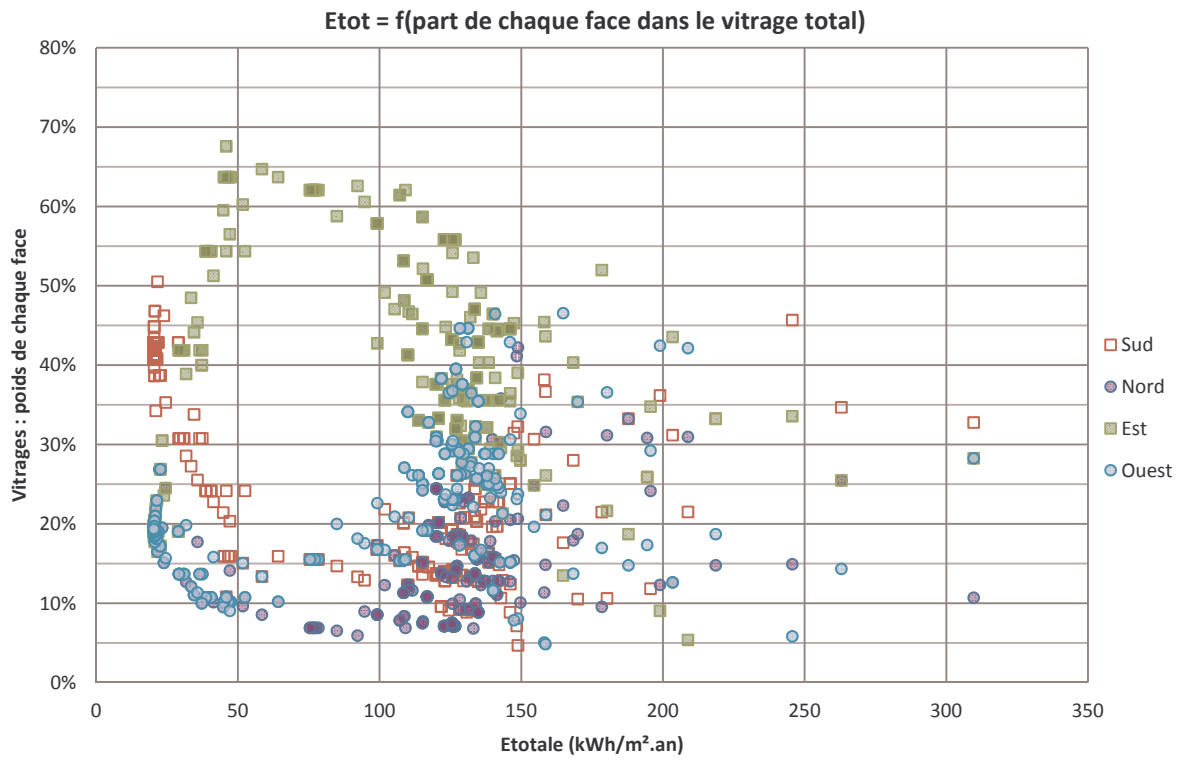


2. Répartition des vitrages

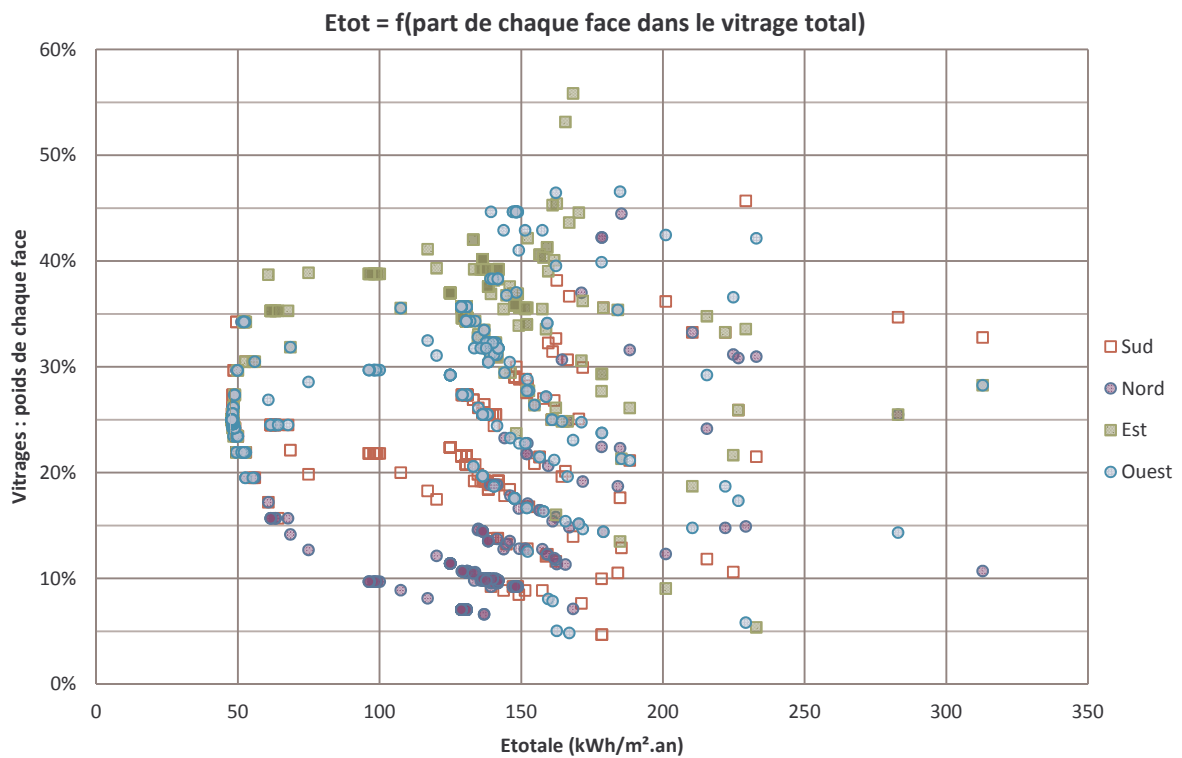
Brest



Montpellier

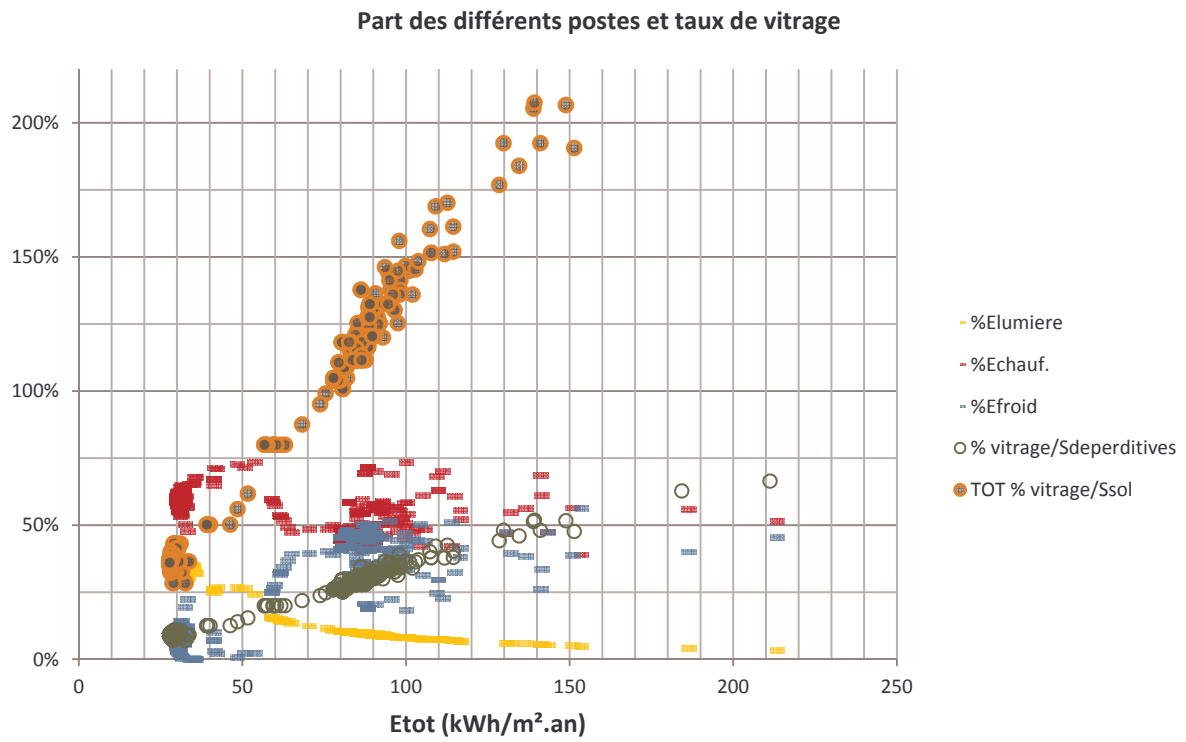


Nancy

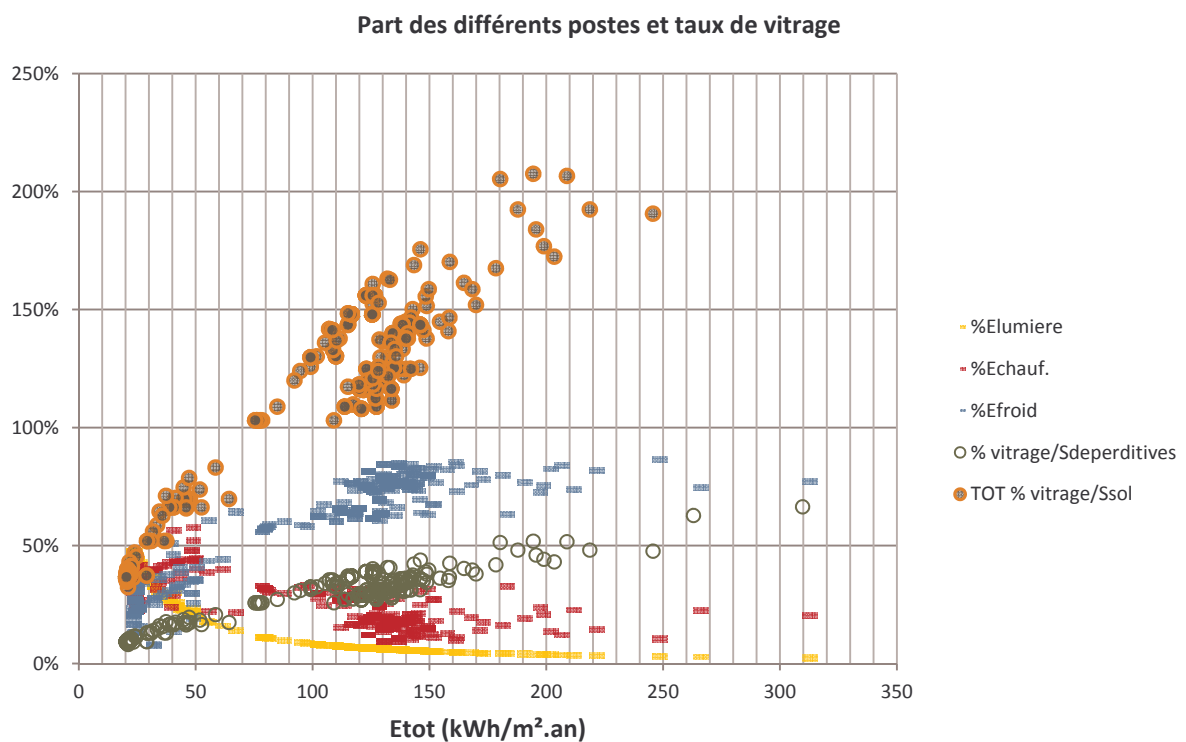


3. Consommations et vitrages

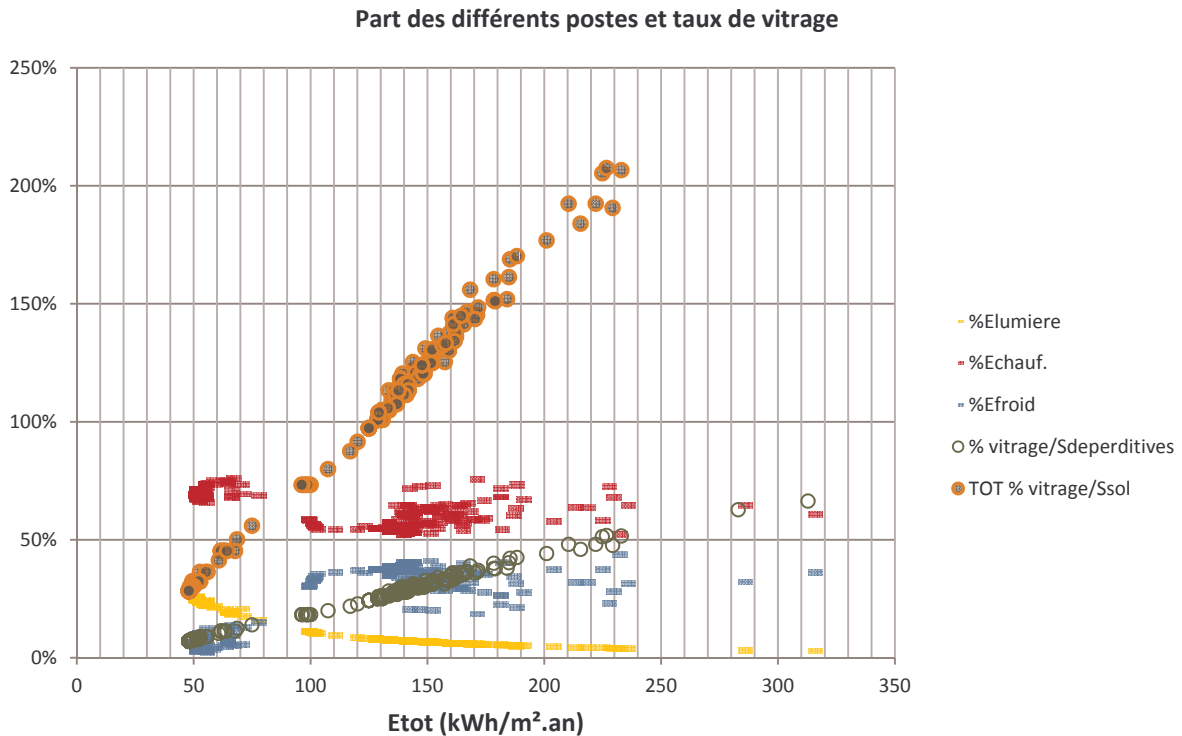
Brest



Montpellier



Nancy



4. Quelques conclusions

L'ajout de protections solaires, tel que nous l'avons fait, permet une légère baisse à Brest et Nancy, mais c'est à Montpellier que l'on note une diminution de 10 kWh/m².an. On observe en réalité que ces protections solaires ont un effet bénéfique global... sauf sur la lumière, dont le niveau de consommation augmente. En effet, nous n'avons pas paramétré des protections solaires particulièrement adaptées. Il serait donc pertinent de développer une approche plus fine de tels dispositifs, afin que les gains sur les consommations de rafraîchissement ne soient pas tout ou partie « compensés » par des dépenses en électricité. A Montpellier le constat est le même, mais la réduction en absolu et en relatif de la part de refroidissement additionnée à un chauffage faible génère une bonne performance. Reste à savoir si cela semble convenable au concepteur, qui irait vers moins de lumière naturelle de cette manière. Cependant, notons que de bonnes performances sont aussi atteintes avec un équilibre des parts de chaque poste énergétique.

A Nancy, la part de froid diminue, celle de lumière augmente légèrement et celle de chauffage augmente (augmentation probablement due à un surdimensionnement des protections solaires empêchant le rayonnement solaire d'hiver de passer en quantité suffisante).

Enfin, les vitrages représentent 25 à 50% de la surface au sol pour les deux premiers sites, et 25% pour le dernier.

Globalement, on remarque au dernier palier qu'atteindre un même niveau de consommation peut se faire par différentes stratégies (aboutissant à des parts variables de trois postes de consommation). Si cela sonne comme une évidence, il est toutefois intéressant de l'observer pour les trois climats.

L'exploration des solutions de dimensionnement ne semble pas très satisfaisante. Il aurait été plus judicieux de ne pas faire varier les vitrages dans un premier temps, afin de laisser, seules, les protections solaires « trouver » le compromis lumière/chauffage/rafraîchissement.

Nous savons qu'EnergyPlus permet de modéliser différents types de protections solaires, et d'en régler le contrôle. A la lumière de ce simple test, il est à penser qu'une approche moins « triviale » du dimensionnement des protections solaires semble nécessaire. L'approche des protections solaires s'est limitée à des loggias. Il s'agit maintenant de diversifier la palette de techniques disponibles.

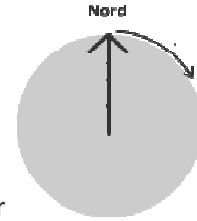
La question des baies mériterait une approche plus fine entre moitié haute et moitié basse des parois, ou encore entre partie gauche et partie droite. Ici, nous souhaitons avoir une baie se déformant proportionnellement par rapport à sa taille initiale. Mais, de fait, les larges baies sont aussi celles qui vont de bas en haut, alors qu'il est aisé d'imaginer qu'en-dessous d'un mètre du sol, les apports de lumière et de chaleur sont moins importants que les déperditions.

D'autre part, la question des surchauffes est à traiter de manière spécifique. Nous voyons tout au long des expérimentations menées que les solutions moins optimales regroupent très souvent des configurations pour lesquelles les parts chauffage et lumière sont très faibles en proportion du refroidissement. Aussi, il est facile d'imaginer que des solutions « basse consommation » se trouve dans cet échantillon de population-solutions.

4.2. Série de tests 2 : orientation et gabarit

4.2.1. Variante 1 : variation de l'orientation

La variation d'orientation est simple à paramétrer. Dans le fichier d'entrée d'EnergyPlus, dans la classe *Building* est définie cette orientation. Il suffit donc de la remplacer par %azimut% (par exemple), celui-ci étant défini dans le fichier *command.txt* pour GenOpt ainsi : `Parameter{ Name= azimut; Min = 0; Ini = 0; Max = 90; Step= 10;}`

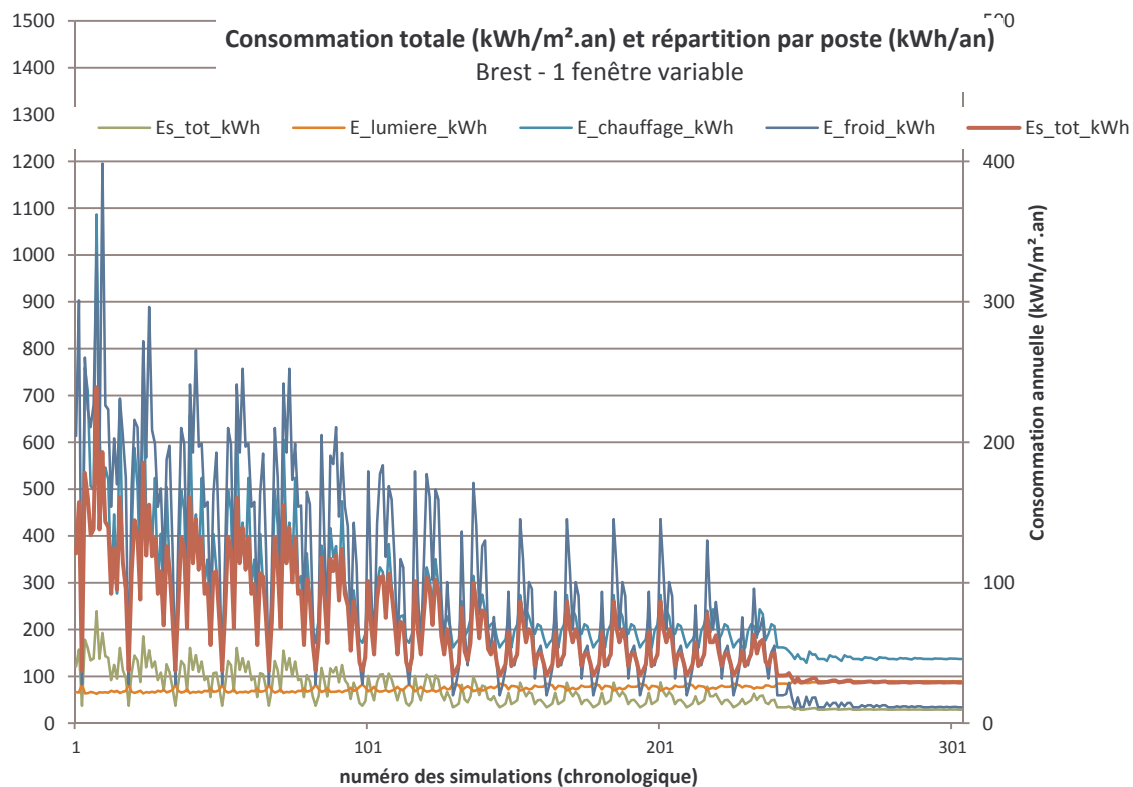


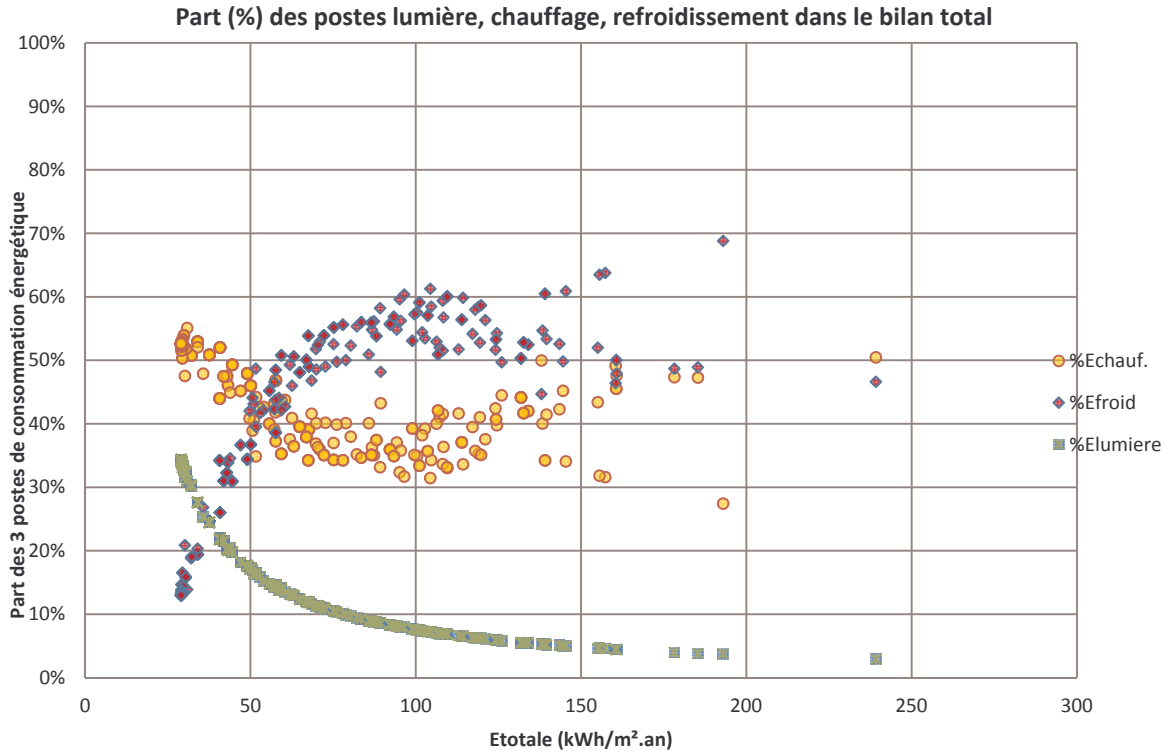
L'orientation varie donc de 0 à 90° (dans le sens des aiguilles d'une montre), avec un pas de variation de 10°. NB : un azimut de 0° signifie aucune rotation, et donc orientation inchangée des 4 faces.

1. Vue générale des consommations

Brest : 304 simulations

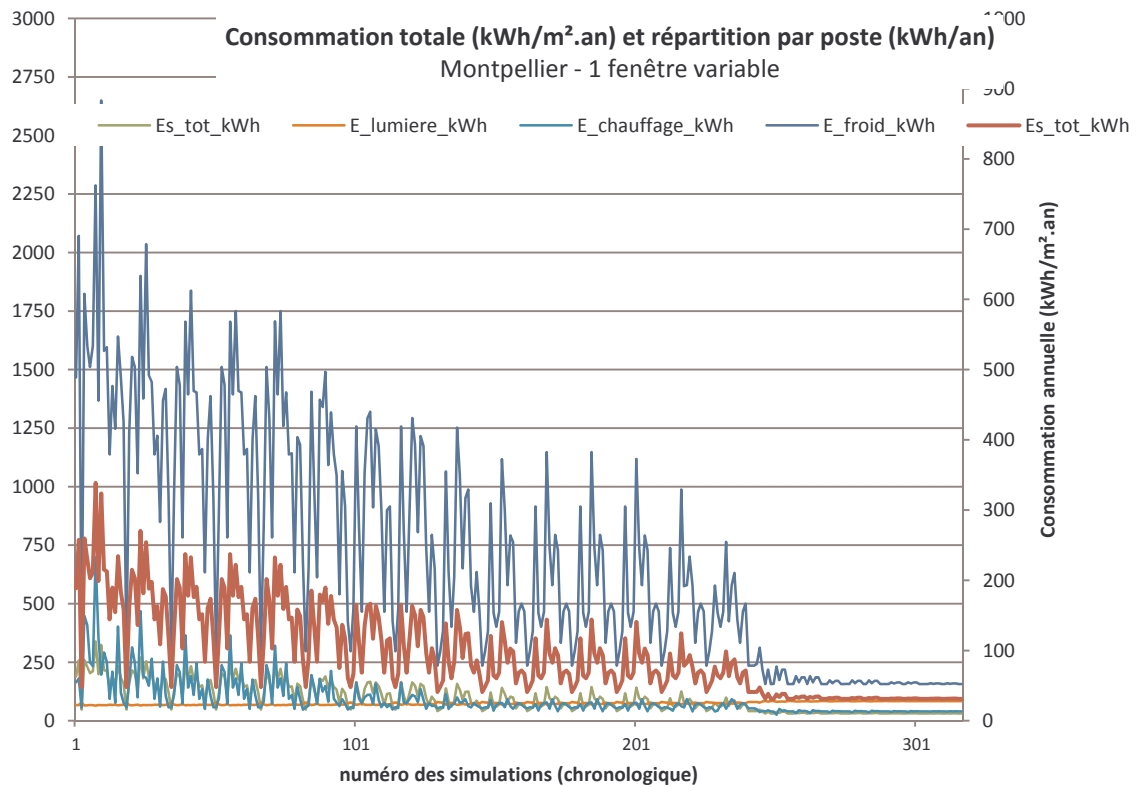
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
| max | 239.15 | 2.9% | 50.5% | 46.6% | 64.0% | 87.1% | 64.0% | 64.0% |
| min | 28.98 | 34.4% | 52.6% | 13.0% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 7.1% |

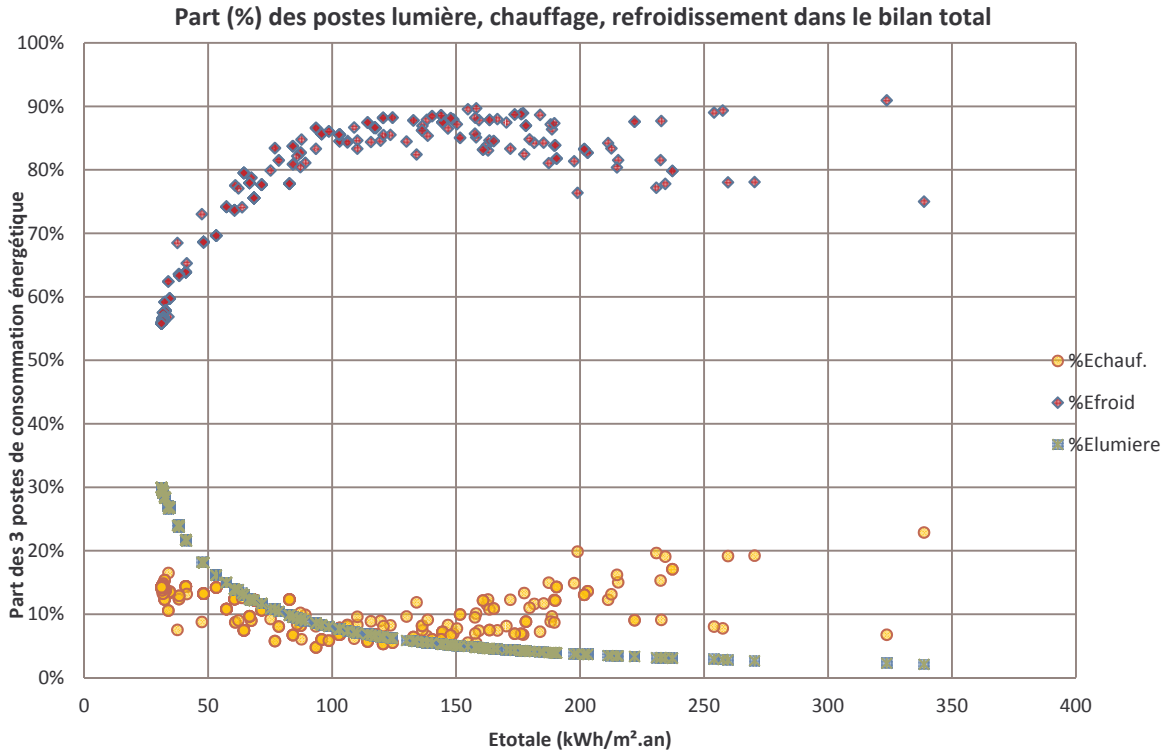




Montpellier : 317 simulations

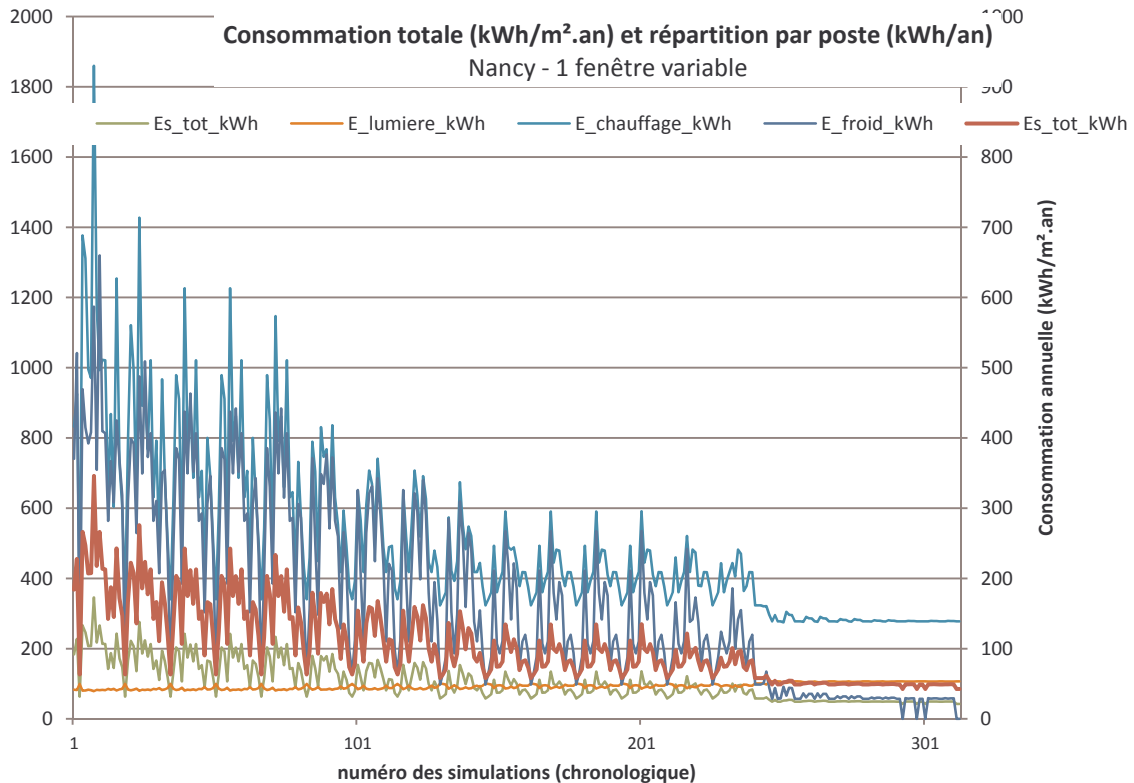
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
| max | 338.70 | 2.1% | 22.9% | 75.0% | 64.0% | 87.1% | 64.0% | 64.0% |
| min | 31.18 | 29.9% | 14.3% | 55.8% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 7.1% |

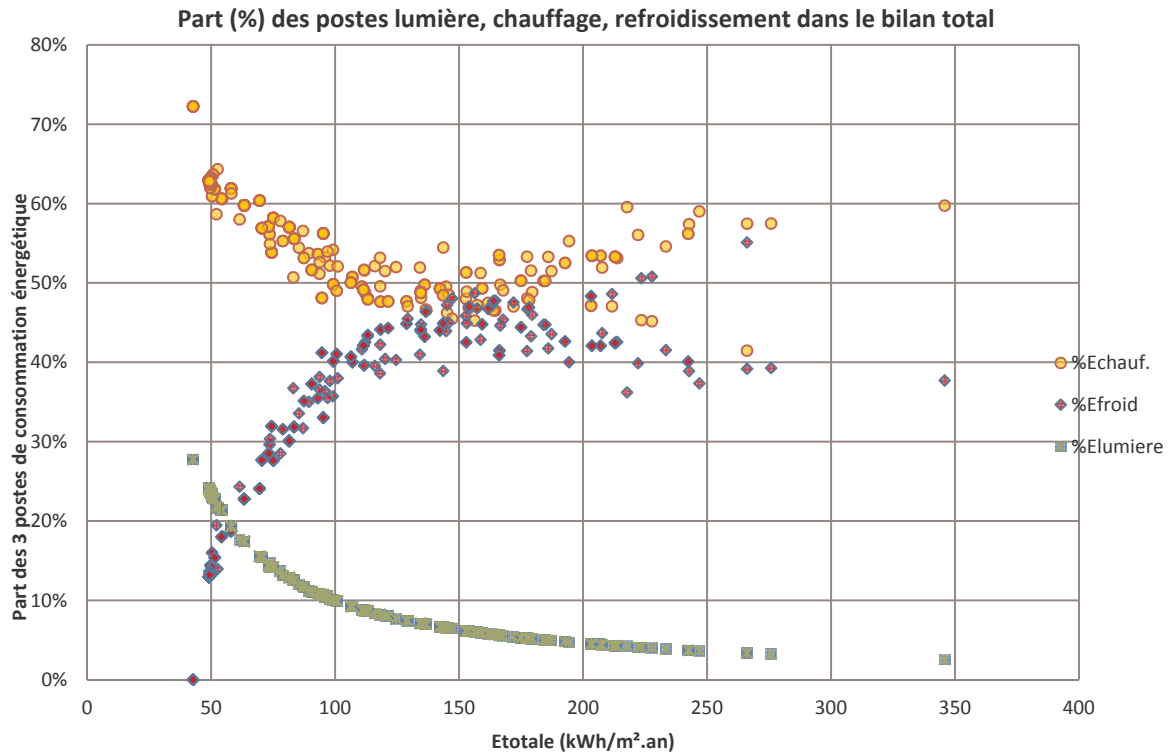




Nancy : 313 simulations

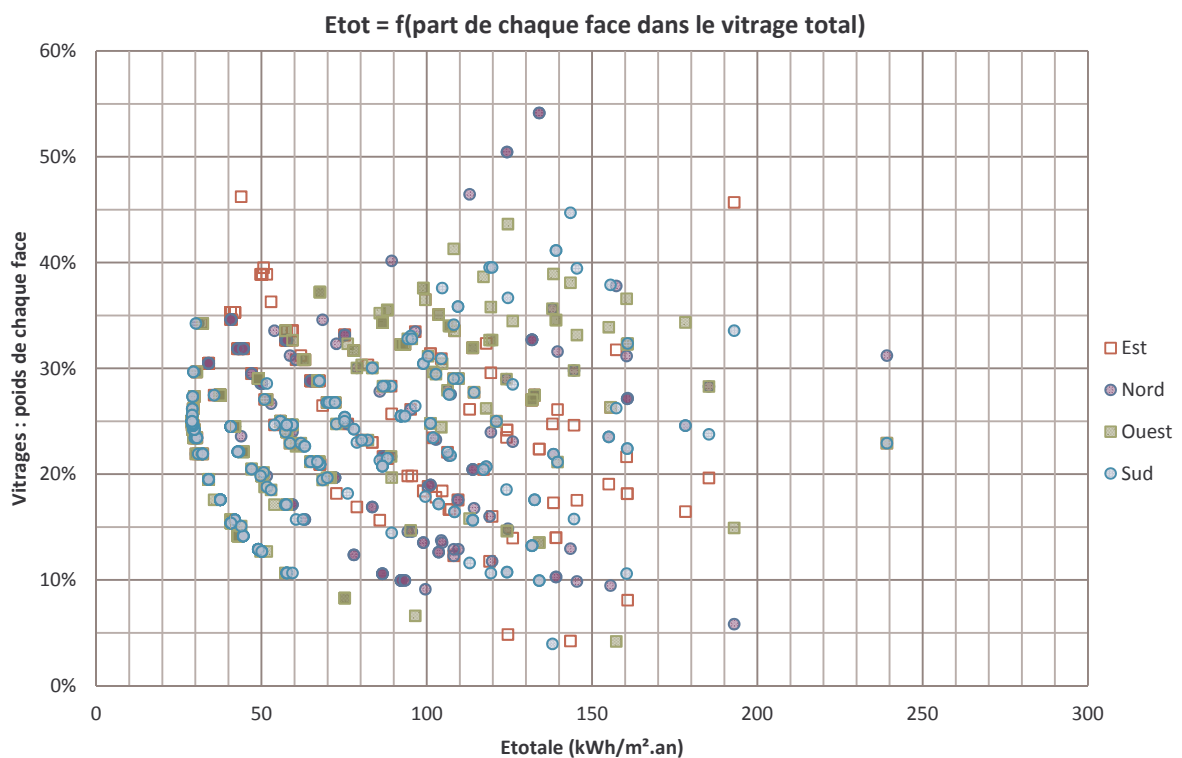
| | Consommations | | | | % vitrage par face | | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|--------------------|-------|-------|-------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest |
| max | 345.81 | 2.5% | 59.7% | 37.7% | 64.0% | 87.1% | 64.0% | 64.0% |
| min | 49.04 | 24.2% | 62.9% | 12.9% | 7.1% | 7.1% | 7.1% | 7.1% |



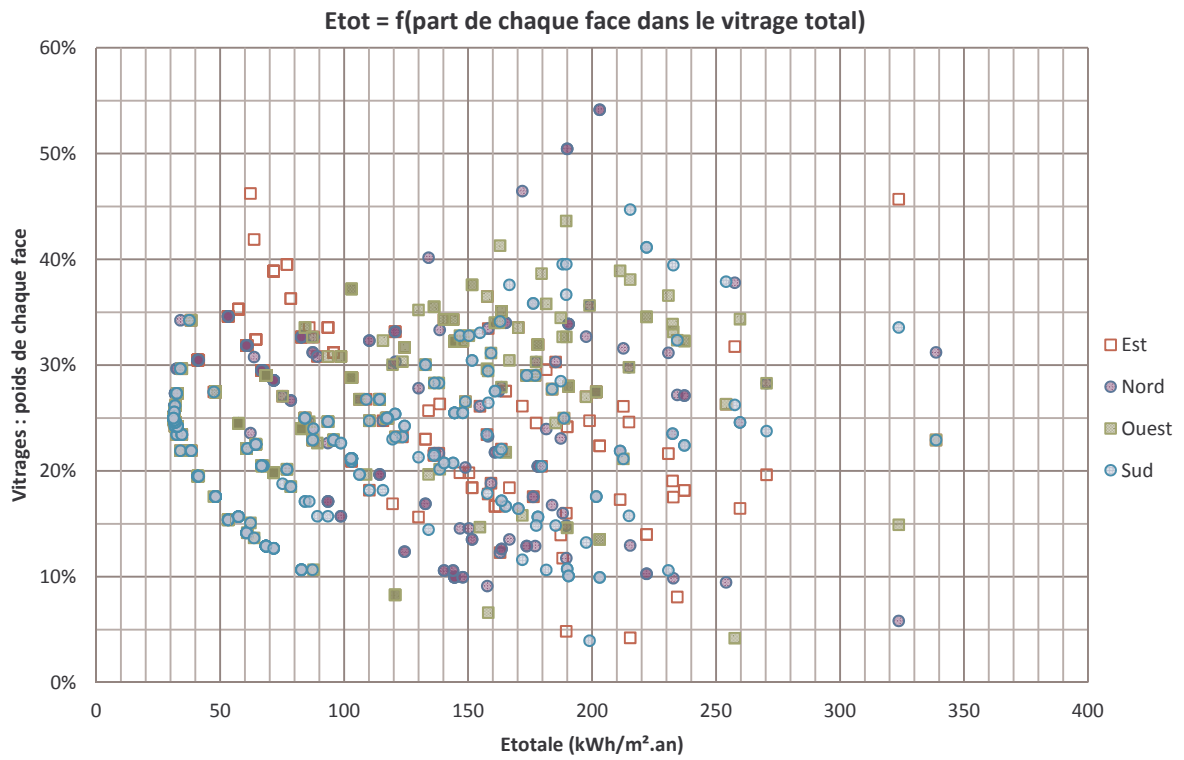


2. Répartition des vitrages

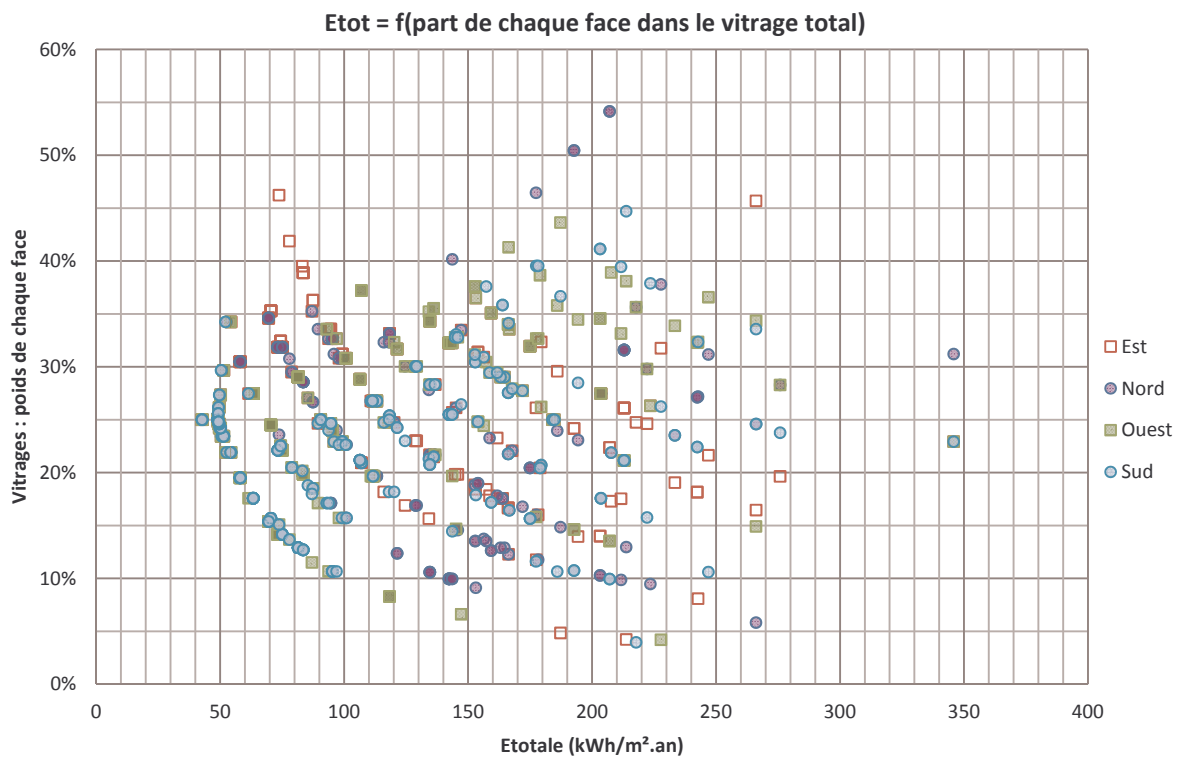
Brest



Montpellier

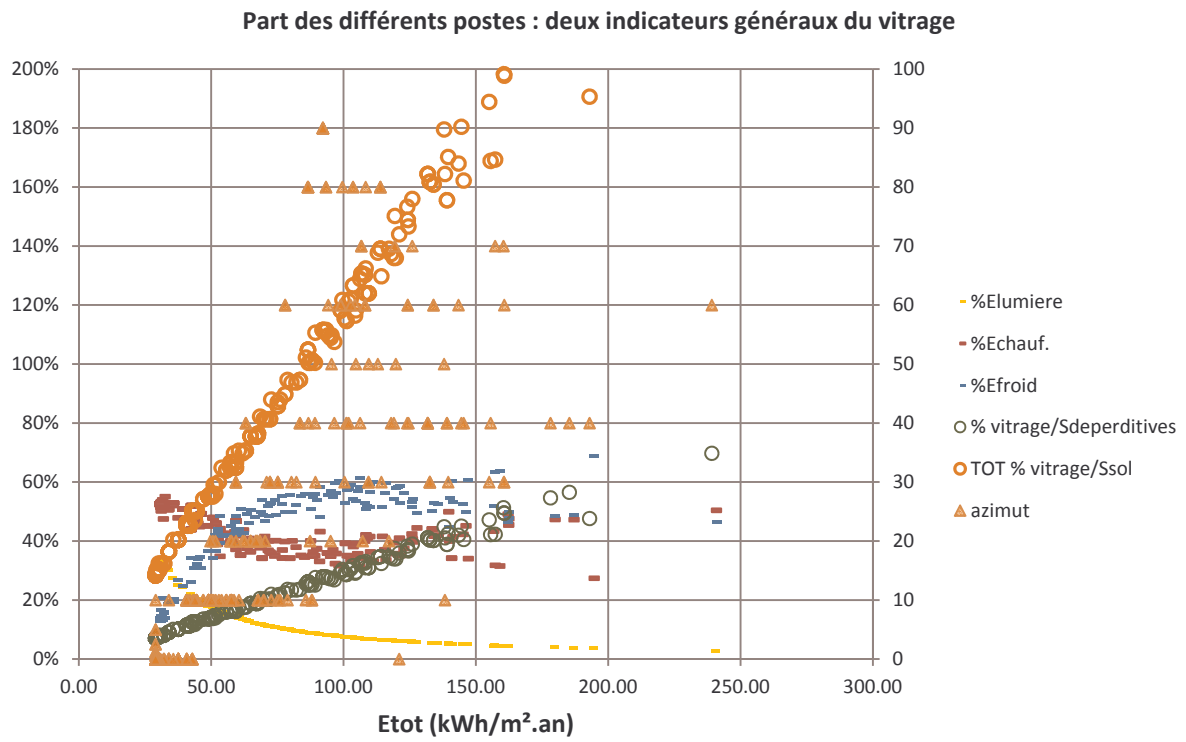


Nancy



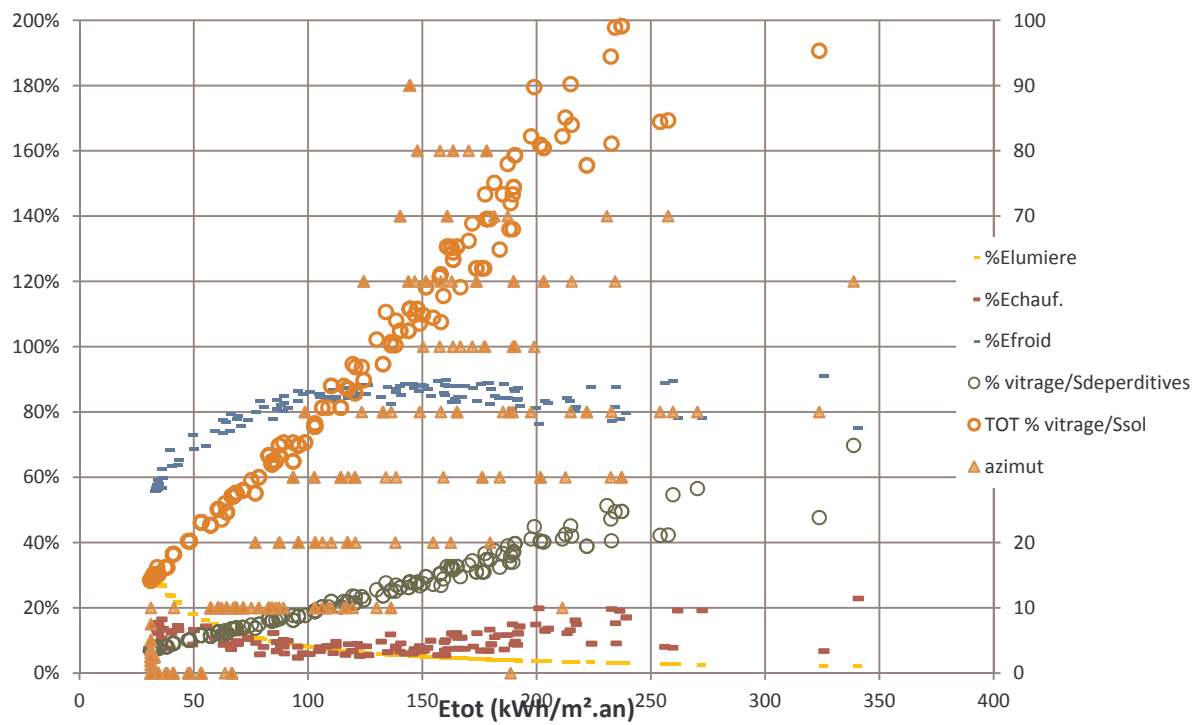
3. Consommations, vitrages et orientation

Brest



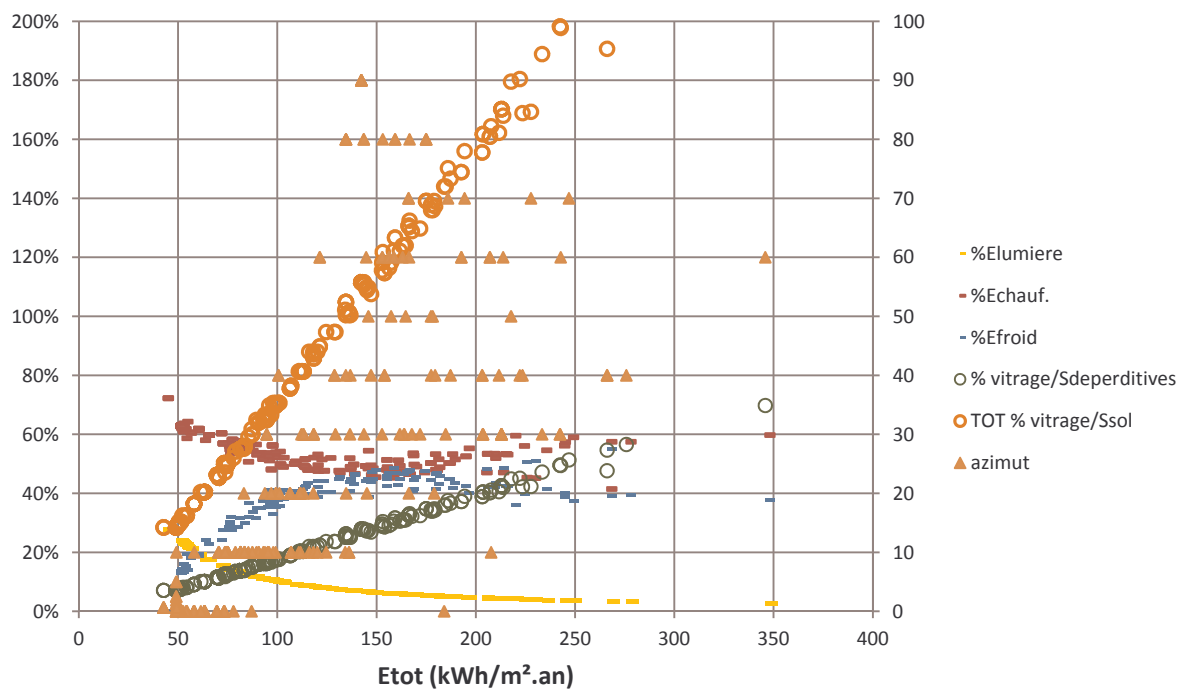
Montpellier

Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage



Nancy

Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage



4. Conclusion

La différence des résultats de cette séquence avec ceux du test 1 / variante 1 ne relève pas tant des valeurs des consommations que de leur répartition. En fait, cette variation d'orientation offre des solutions comparables, mais différentes, et accroît la diversité des solutions. On observe dans les trois cas qu'il s'agit de réduire la part de refroidissement. Ne pas orienter plein Sud trouve des solutions équivalentes en performance à bien des options de la série de test 1 (notamment jusqu'à 45°). Mais on observe aussi une tendance à la diminution en s'approchant du Sud. Enfin, il serait intéressant de ne pas initialiser à 0°, mais surtout de coupler avec d'autres variables (nous ébauchons cette option au 3.4).

5. Visualisations

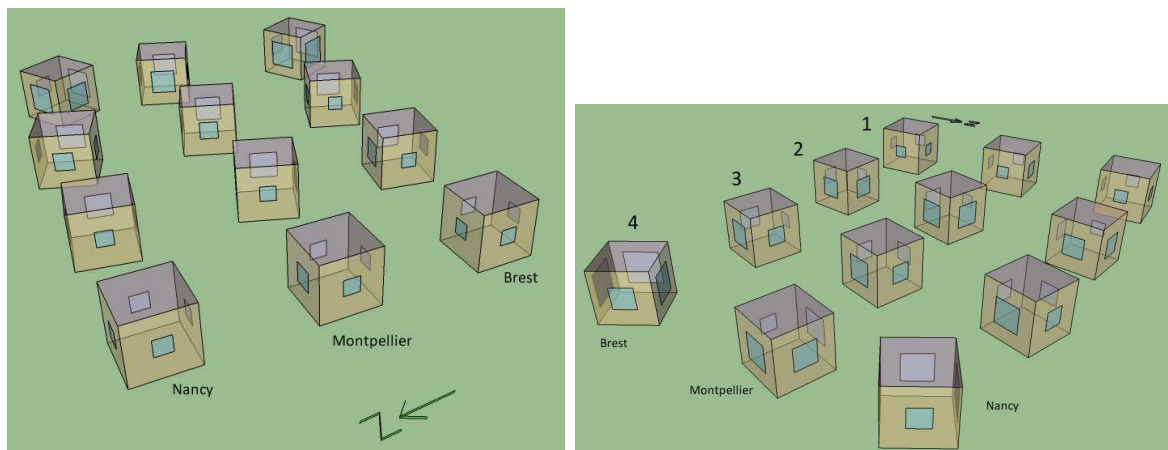


Figure 62 : Exemples avec diverses orientations

| | | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid |
|-------------|---|------------|-----------|----------|---------|
| Brest | 1 | 28.98 | 34.4% | 52.6% | 13.0% |
| | 2 | 43.18 | 20.0% | 46.1% | 33.9% |
| | 3 | 51.59 | 16.4% | 34.9% | 48.7% |
| | 4 | 104.38 | 7.3% | 31.5% | 61.3% |
| Montpellier | 1 | 33.97 | 26.6% | 16.5% | 56.9% |
| | 2 | 87.61 | 9.2% | 6.1% | 84.8% |
| | 3 | 76.90 | 10.8% | 5.8% | 83.4% |
| | 4 | 87.20 | 9.3% | 10.2% | 80.4% |
| Nancy | 1 | 42.69 | 27.7% | 72.3% | 0.0% |
| | 2 | 73.56 | 14.2% | 56.1% | 29.6% |
| | 3 | 83.13 | 12.5% | 50.7% | 36.7% |
| | 4 | 121.35 | 8.0% | 47.7% | 44.3% |

4.2.2. Variante 2 : variation du gabarit

La variation de gabarit se fait, indépendamment, selon l'axe Y (profondeur Nord-Sud) et l'axe X (largeur Est-Ouest).

Largeur et profondeur peuvent varier de 3 à 12 m, avec un pas de 1 m.

La variabilité des baies reste la même. Les baies restent donc centrées, et suivent les déformations selon X et Y.

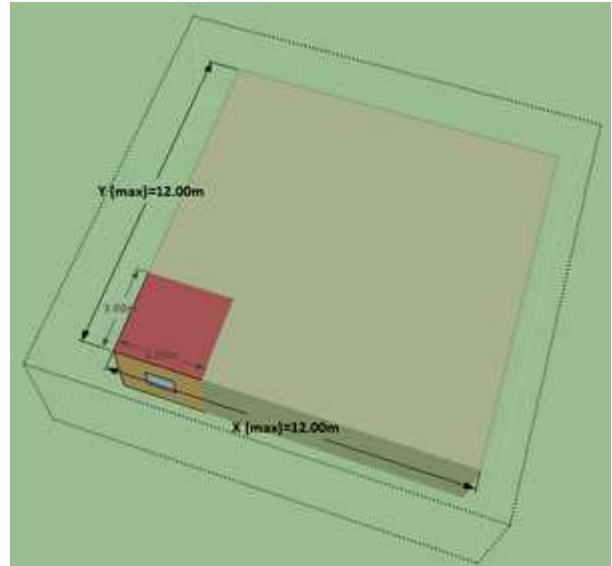
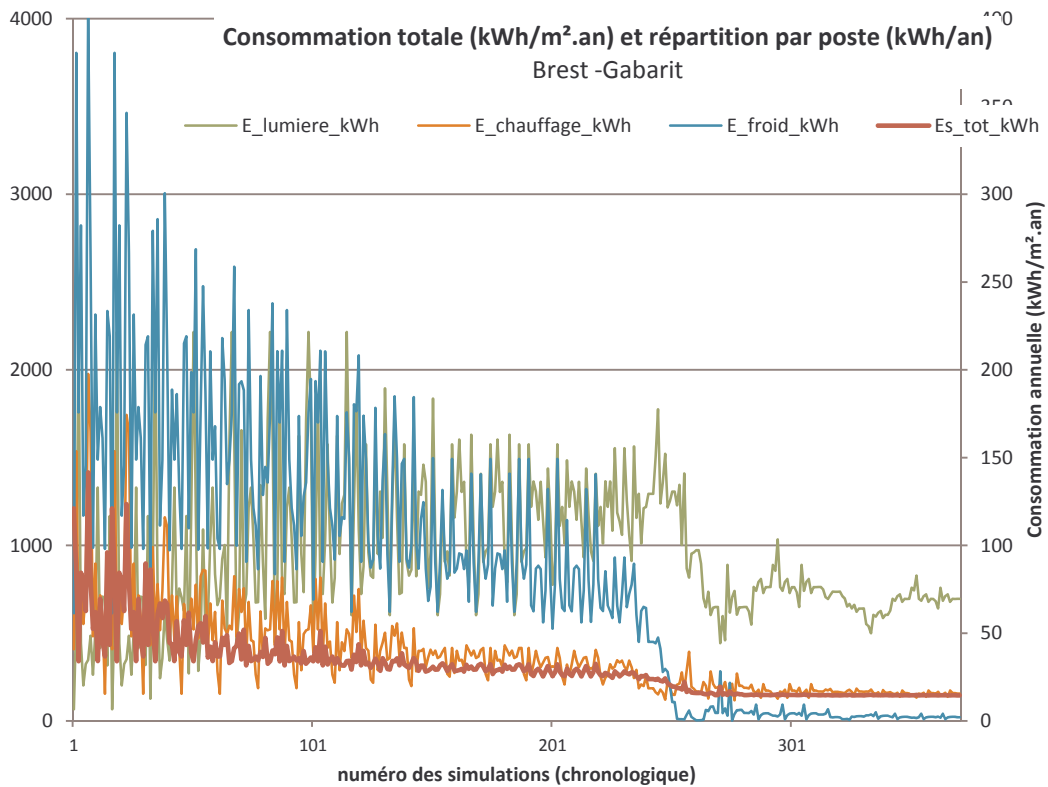


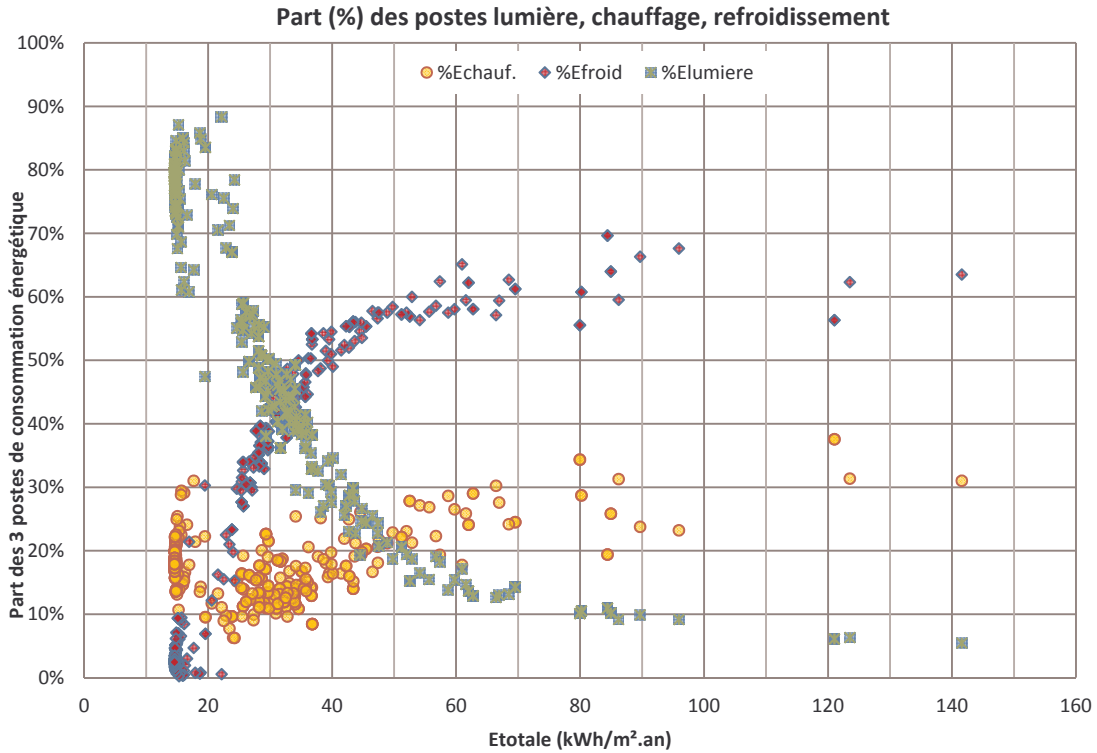
Figure 63 : Principe du changement de gabarit

1. Vue générale des consommations

Brest : 411 simulations

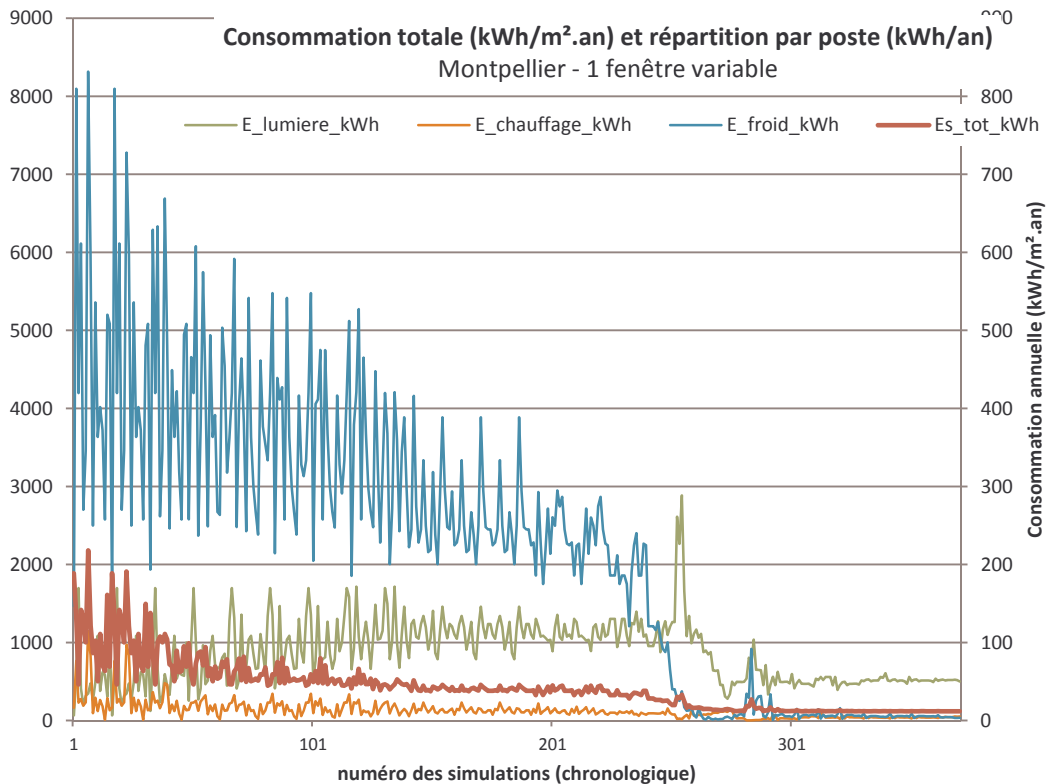
| | consommations | | | | % vitrée de la face | | | | Gométrie | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|---------------------|-------|-------|-------|-----------|------|---------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Compacité | X/Y | Surface |
| Max | 141.57 | 5.5% | 31.0% | 63.5% | 95.6% | 64.0% | 64.0% | 31.4% | 0.96 | 1.80 | 45.00 |
| Min | 14.57 | 79.7% | 17.9% | 2.5% | 10.2% | 4.2% | 2.6% | 2.6% | 0.90 | 2.40 | 60.00 |

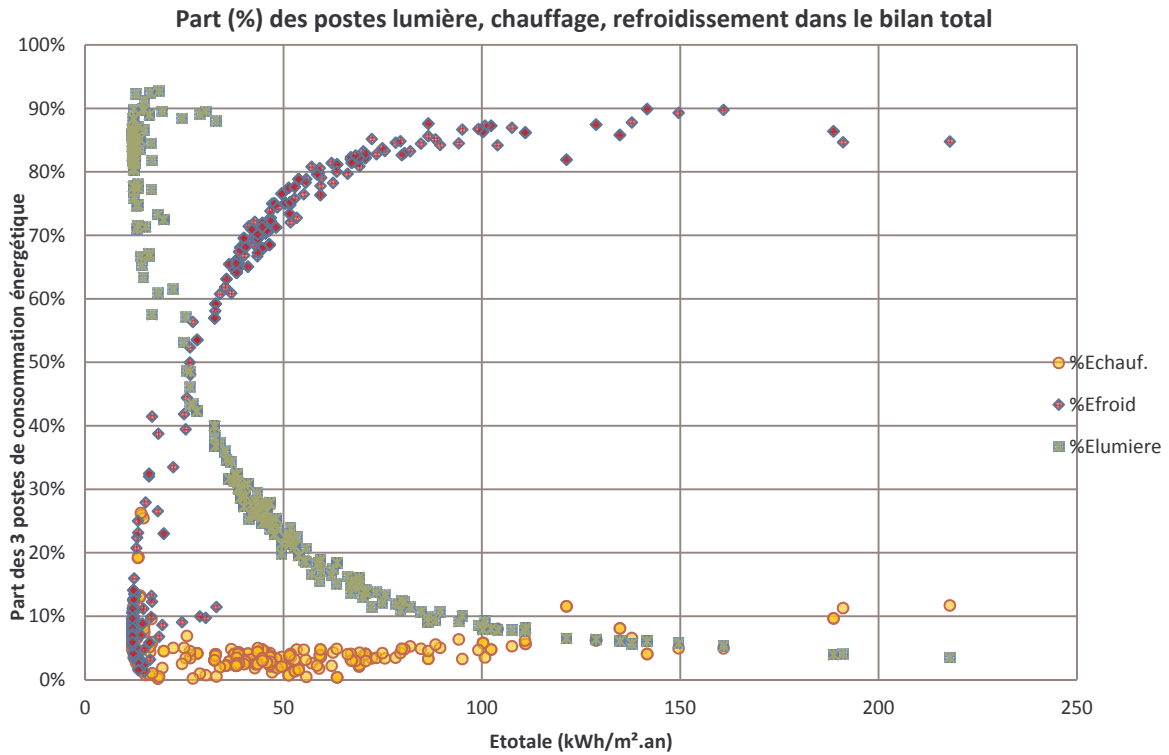




Montpellier : 419 simulations

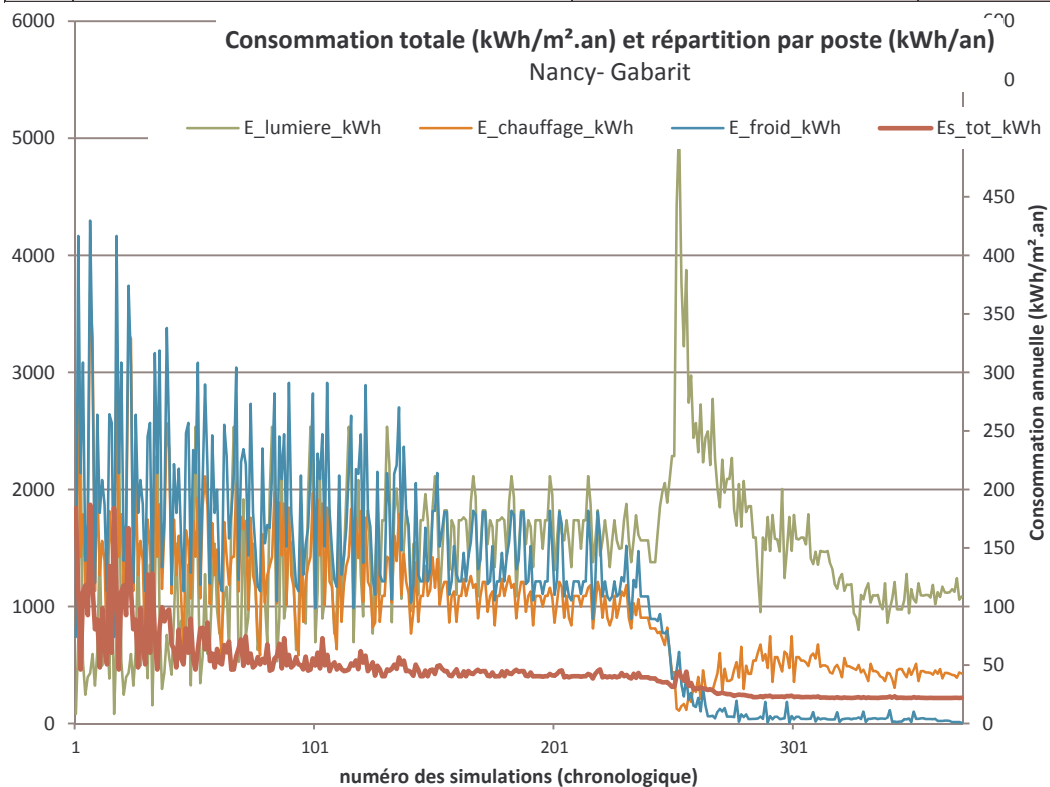
| | consommations | | | | % vitrée de la face | | | | Géométrie | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|---------------------|-------|-------|-------|-----------|------|---------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Compacité | X/Y | Surface |
| Max | 217.93 | 3.5% | 11.7% | 84.8% | 95.6% | 64.0% | 64.0% | 31.4% | 0.96 | 1.80 | 45.00 |
| Min | 11.85 | 83.6% | 8.1% | 8.3% | 5.7% | 4.2% | 4.0% | 4.0% | 1.00 | 3.00 | 48.00 |

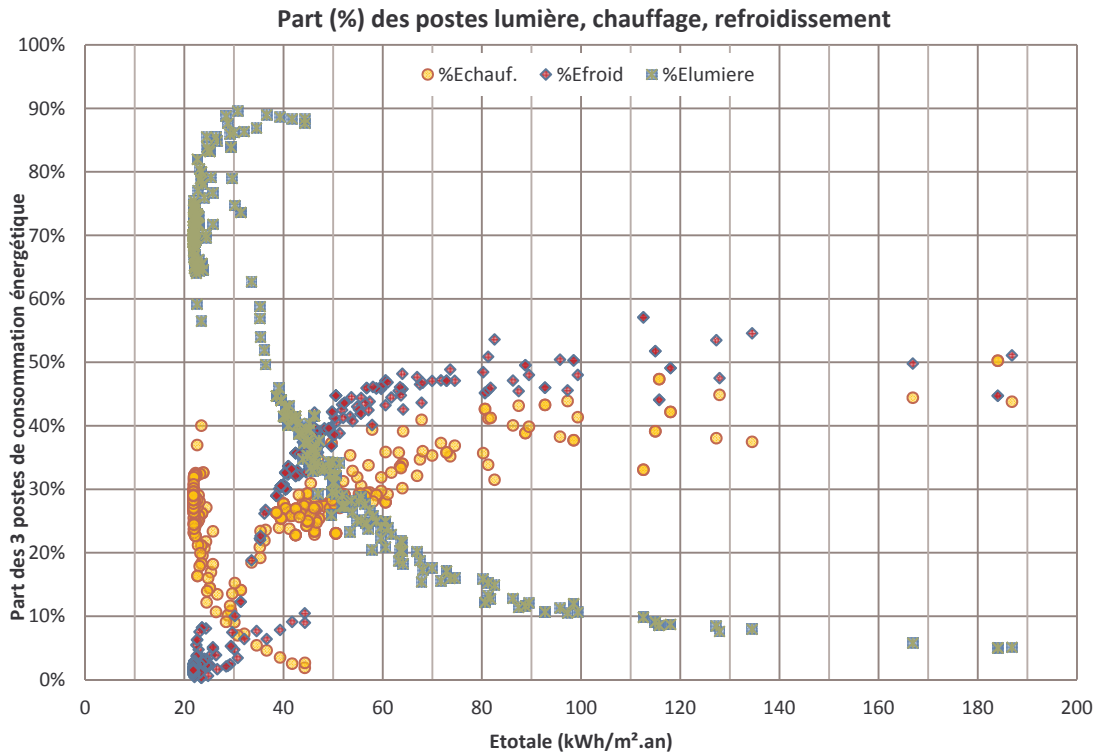




Nancy : 448 simulations

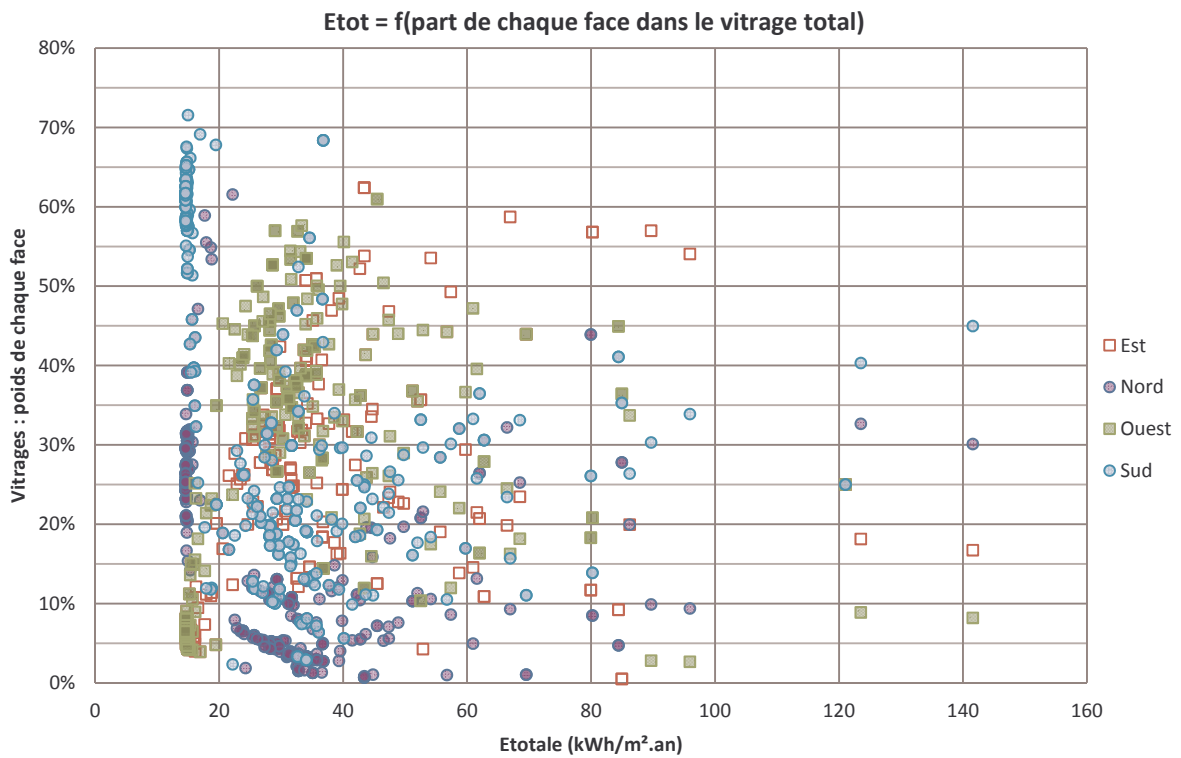
| | consommations | | | | % vitrée de la face | | | | Gométrie | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|---------------------|-------|-------|-------|-----------|------|---------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Compacité | X/Y | Surface |
| Max | 186.88 | 5.1% | 43.8% | 51.1% | 95.6% | 64.0% | 64.0% | 31.4% | 0.96 | 1.80 | 45.00 |
| Min | 21.80 | 70.2% | 28.3% | 1.5% | 10.2% | 4.2% | 1.9% | 1.9% | 0.84 | 2.04 | 70.50 |



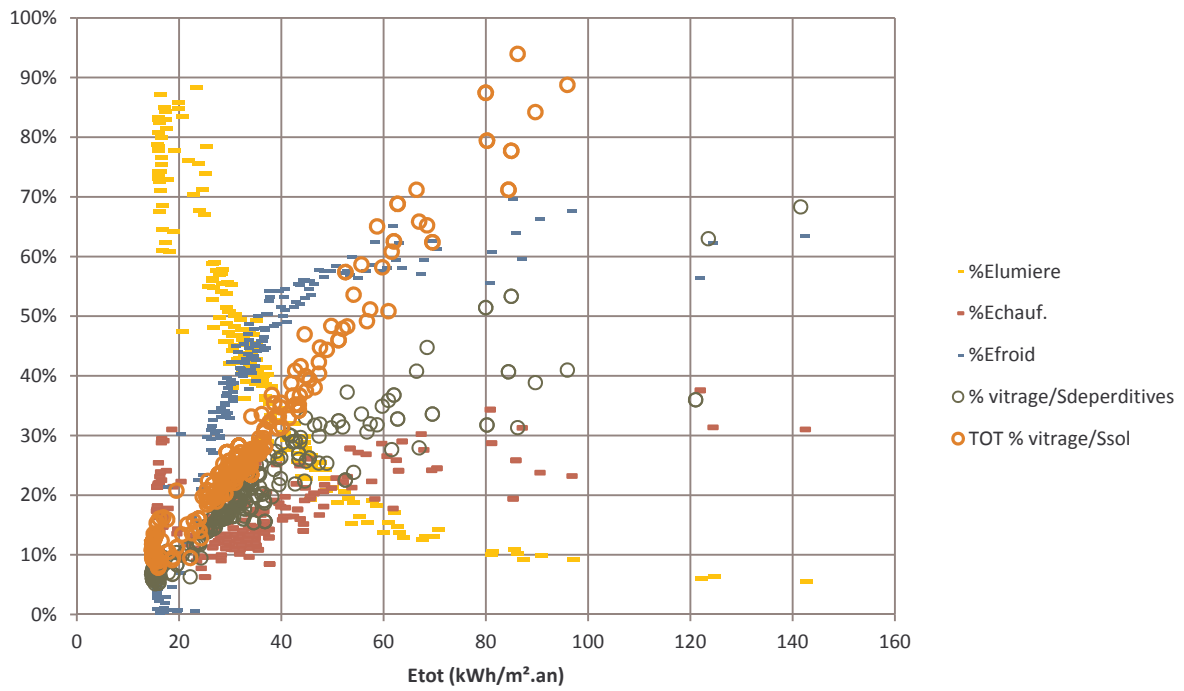


2. Répartition des vitrages

Brest

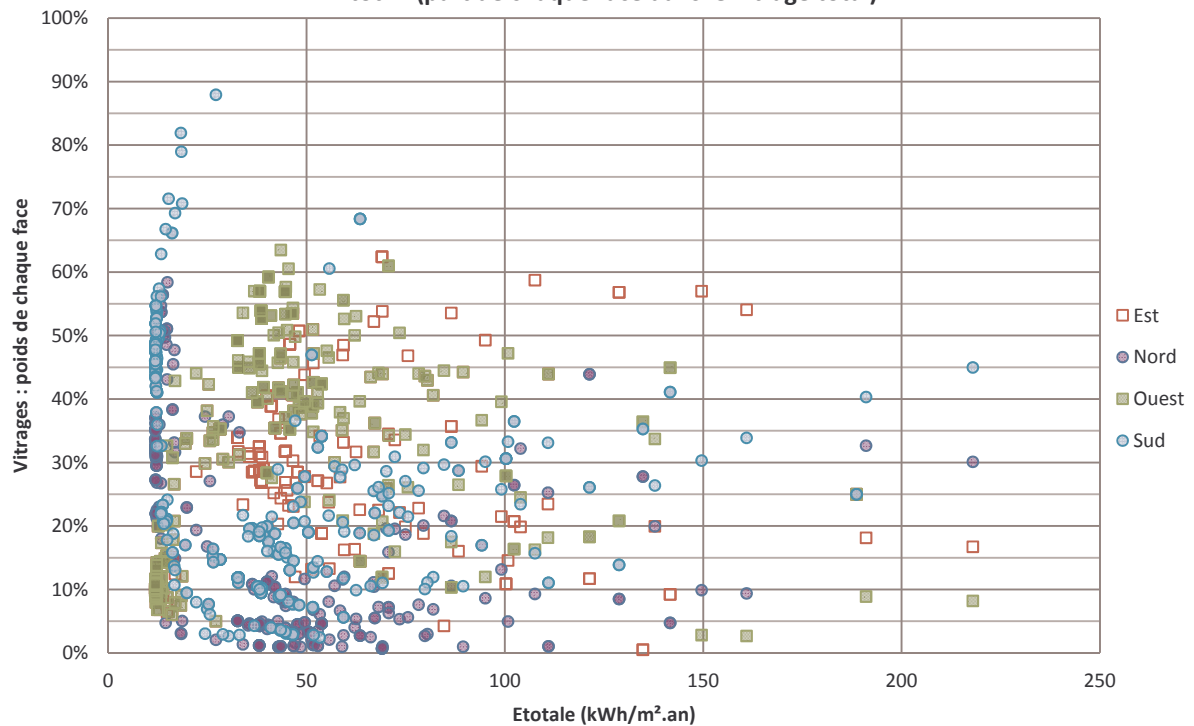


Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage

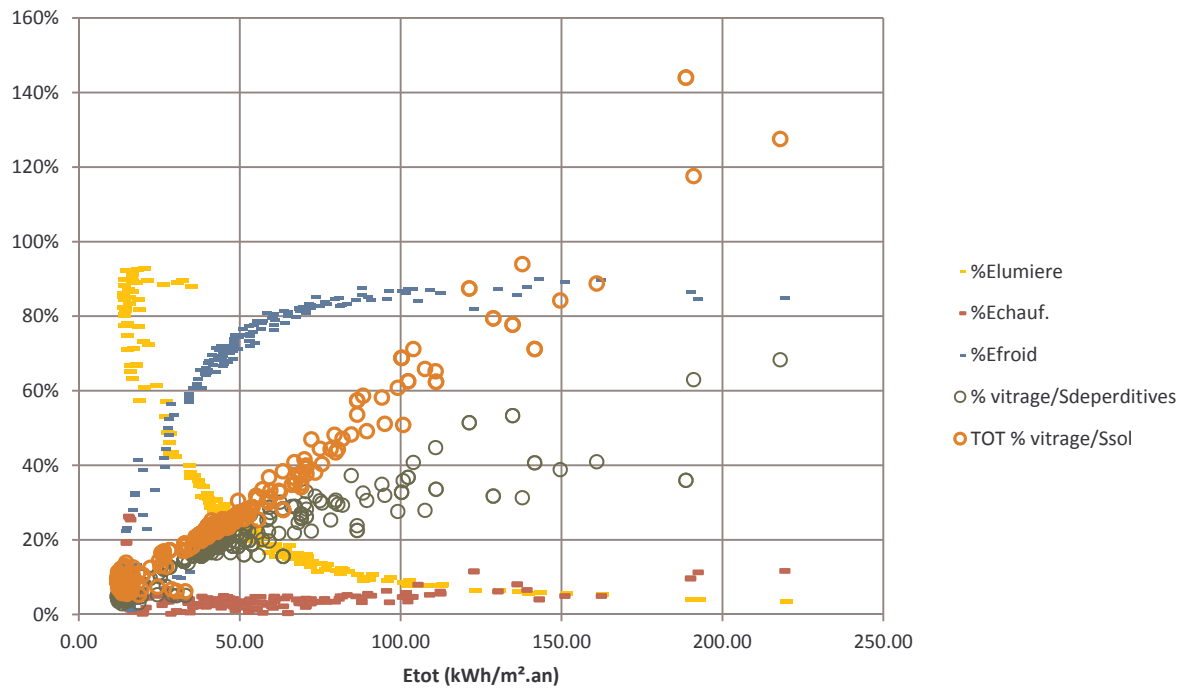


Montpellier

Etot = f(part de chaque face dans le vitrage total)

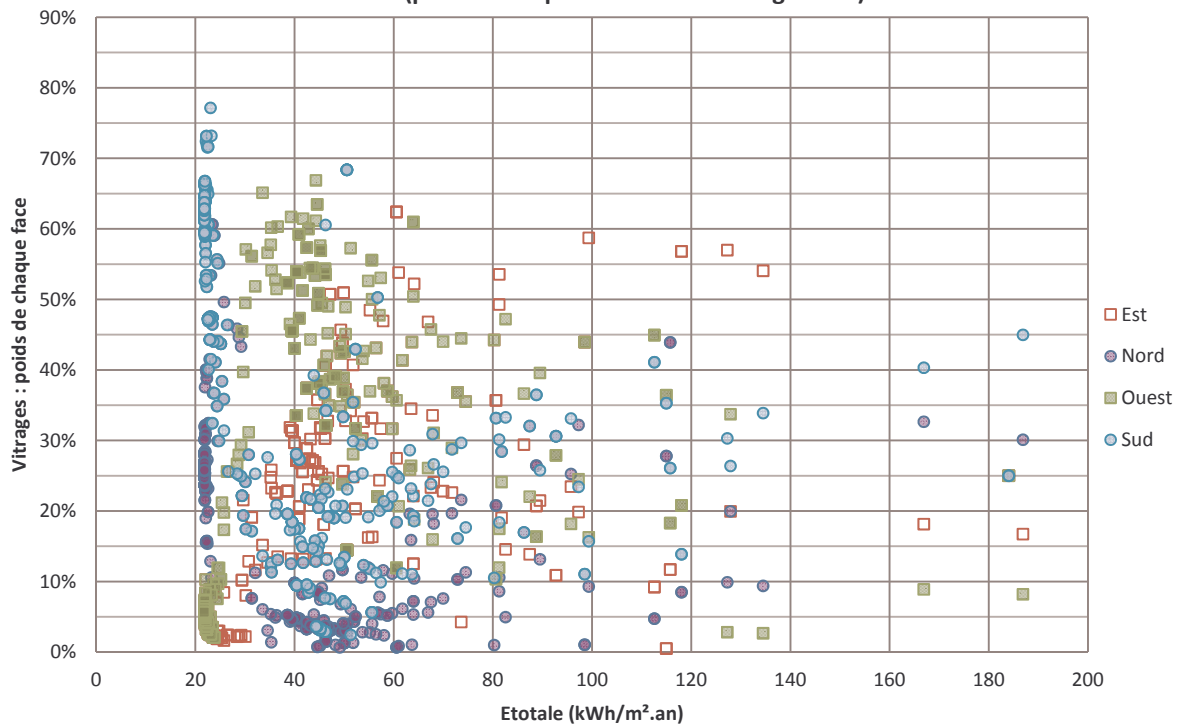


Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage

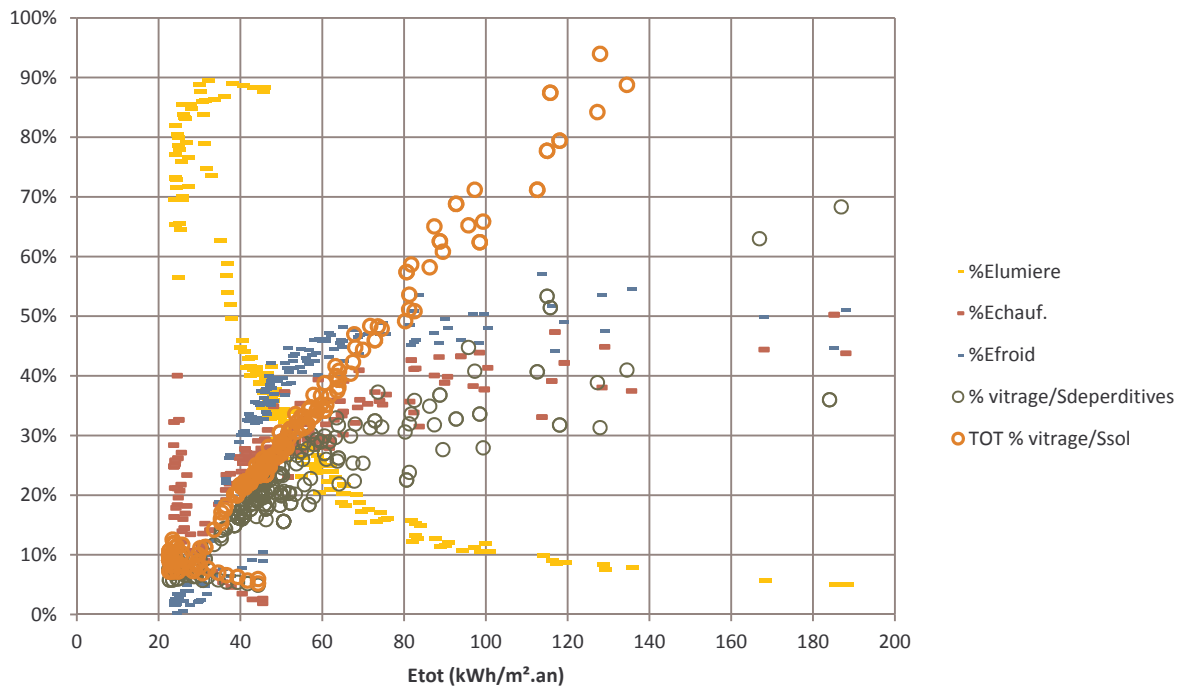


Nancy

Etot = f(part de chaque face dans le vitrage total)



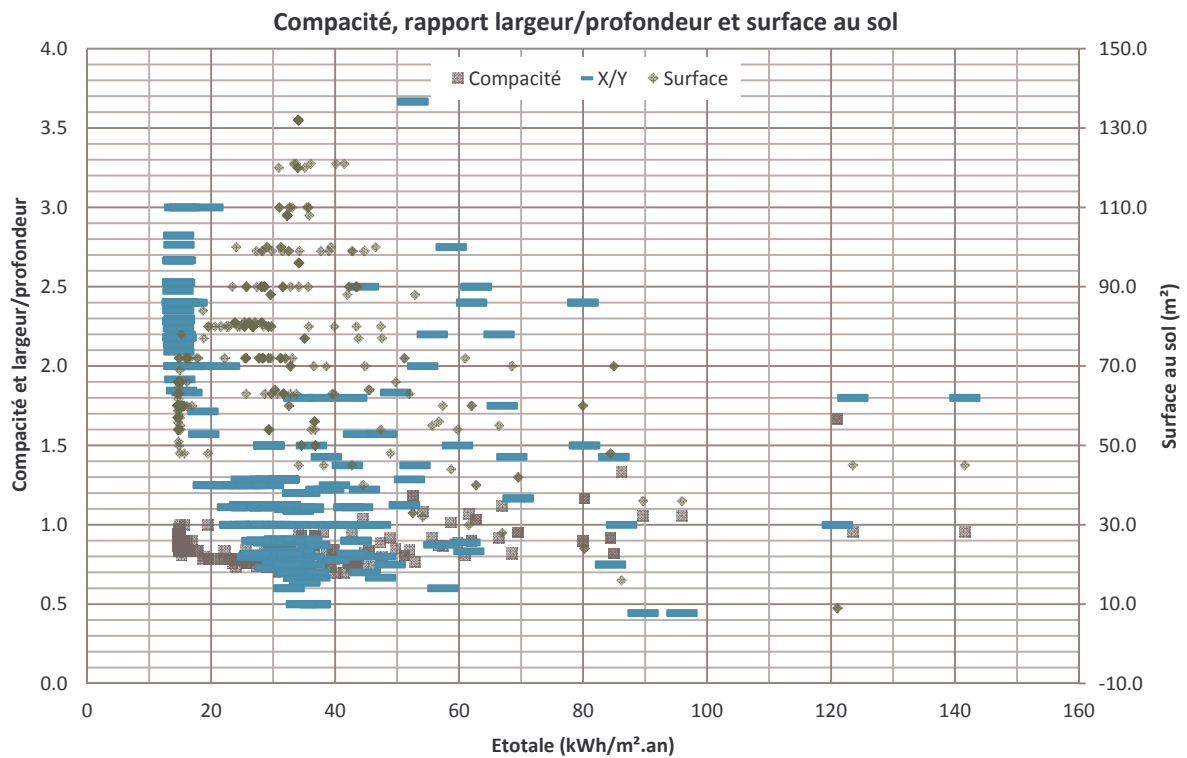
Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage



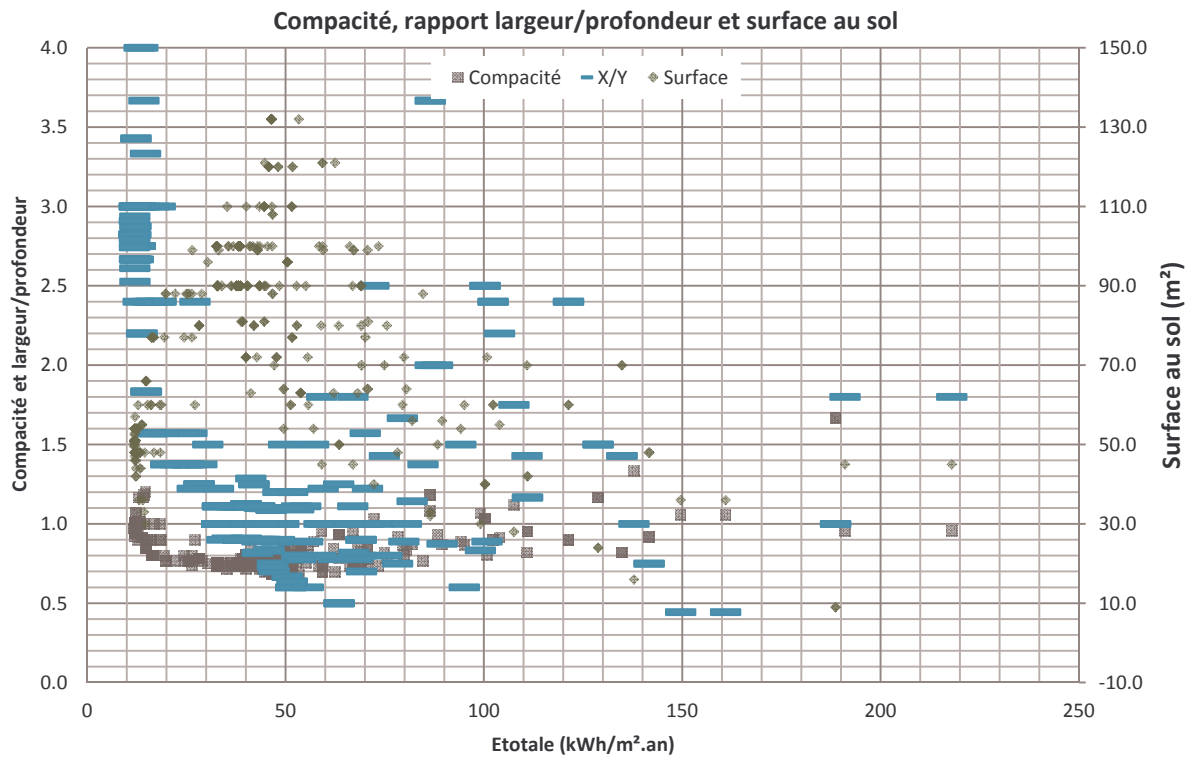
3. Compacité

Nb : la compacité est la somme des surfaces déperditives sur le volume.

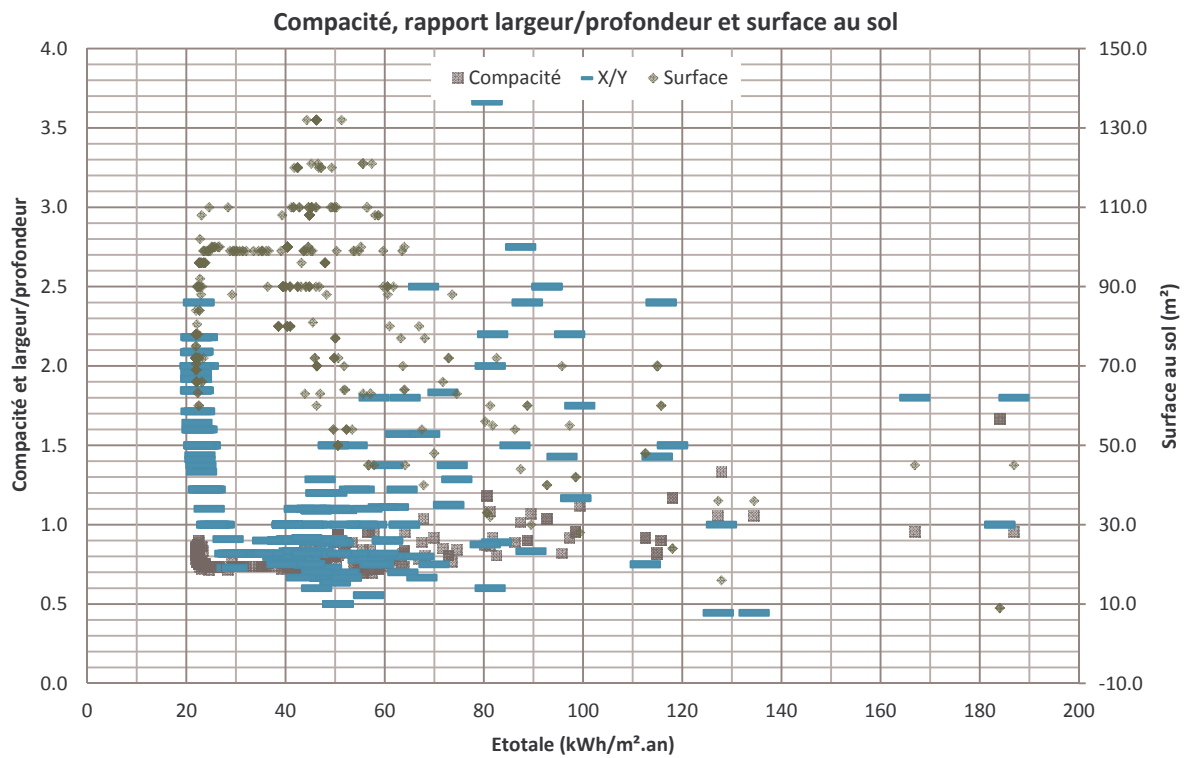
Brest



Montpellier



Nancy



4. *Mots de conclusion*

La variation de gabarit amène dans tous les cas à des possibilités de baisse des consommations, notamment des charges de chauffage et de refroidissement (très forte pour Montpellier et Brest, moins concernant le chauffage à Nancy). La part lumière a un poids plus important, puisque largeur et profondeur du volume augmentent. La part chauffage est presque toujours sous 1/3 pour Brest et Nancy, et 1/10^{ème} pour Montpellier. Charges de lumière et de refroidissement semblent plus corrélées dans leur évolution. Dans les trois cas les bonnes solutions sont trouvées au détriment de la lumière naturelle, mais l'algorithme trouve de bonnes solutions qui ont moins d'1/3 de part lumière.

Nous observons également que la contribution relative de chaque face, concernant les vitrages, peut être très variable.

Nous n'avons pas pu intégrer de dispositifs de captage de lumière, tels que les conduits solaires dans ces séries de simulation, mais l'ayant testé sur des cas isolés, il est à penser que des solutions plus généreuses en lumière naturelle et bien moins énergivores puissent être trouvées.

On observe que les coefficients de compacité sont entre 0.8 et 1 en moyenne, soit légèrement supérieur à ce qui est communément recommandé. Enfin, les surfaces supérieures à 45 m² sont privilégiées (pour les « meilleures » solutions : jusqu'à 60 m² à Montpellier, 70 m² à Brest et 100 m² à Nancy), avec des rapports largeur sur profondeur variés.

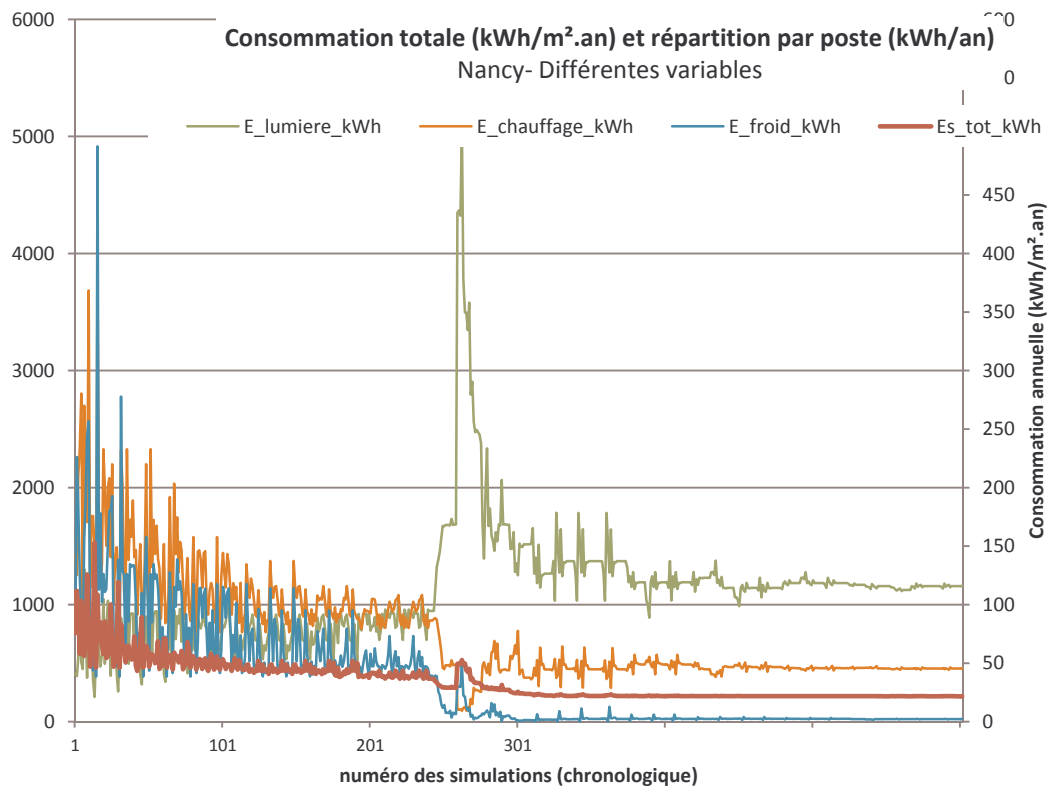
4.3. Combinaison de 4 types de variables : exemple de Nancy

Enfin, nous avons mené une séquence de simulations, exclusivement pour le climat de Nancy, portant sur l'ensemble des types de variables testées jusqu'à présent, hors protection solaire : dimension des baies, orientation et gabarit.

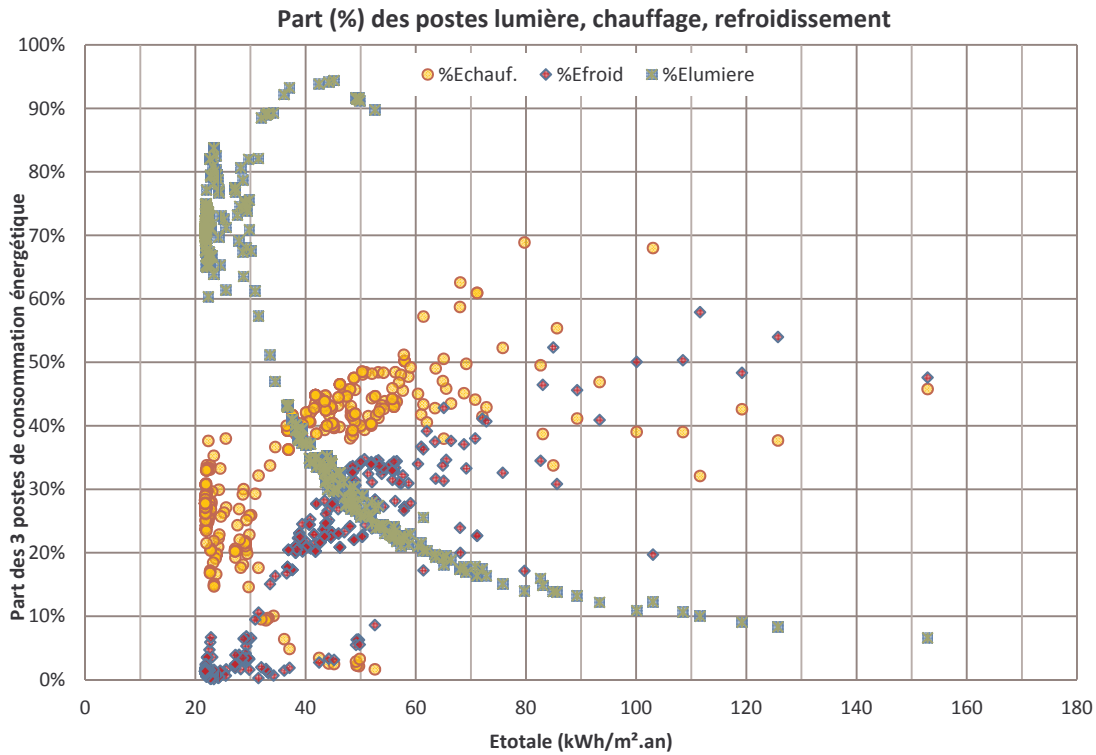
4.3.1. Vue générale des résultats

602 simulations

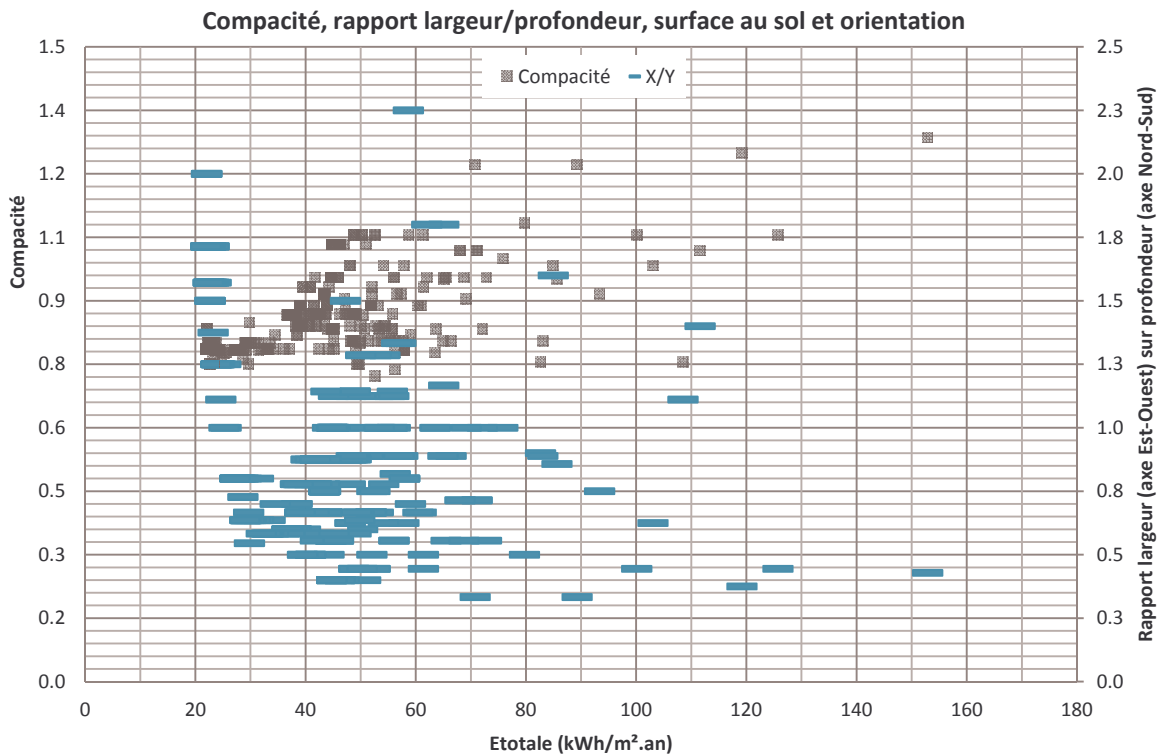
| | consommations | | | | % vitrée de la face | | | | Gométrie | | |
|-----|---------------|-----------|----------|---------|---------------------|-------|-------|-------|-----------|------|---------|
| | Es_tot_kWh | %Elumiere | %Echauf. | %Efroid | Sud | Nord | Est | Ouest | Compacité | X/Y | Surface |
| Max | 152.88 | 0.07 | 0.46 | 0.48 | 44.4% | 36.0% | 64.0% | 13.8% | 1.29 | 0.43 | 21.00 |
| Min | 21.79 | 0.71 | 0.28 | 0.01 | 11.3% | 4.9% | 1.6% | 1.6% | 0.82 | 1.92 | 75.00 |



On observe un « long » palier autour de 20 kWh/m².an. Les charges de froid sont quasi nulles, celles de chauffage stable et peu élevées, celles de lumière plus importantes et plus variables.

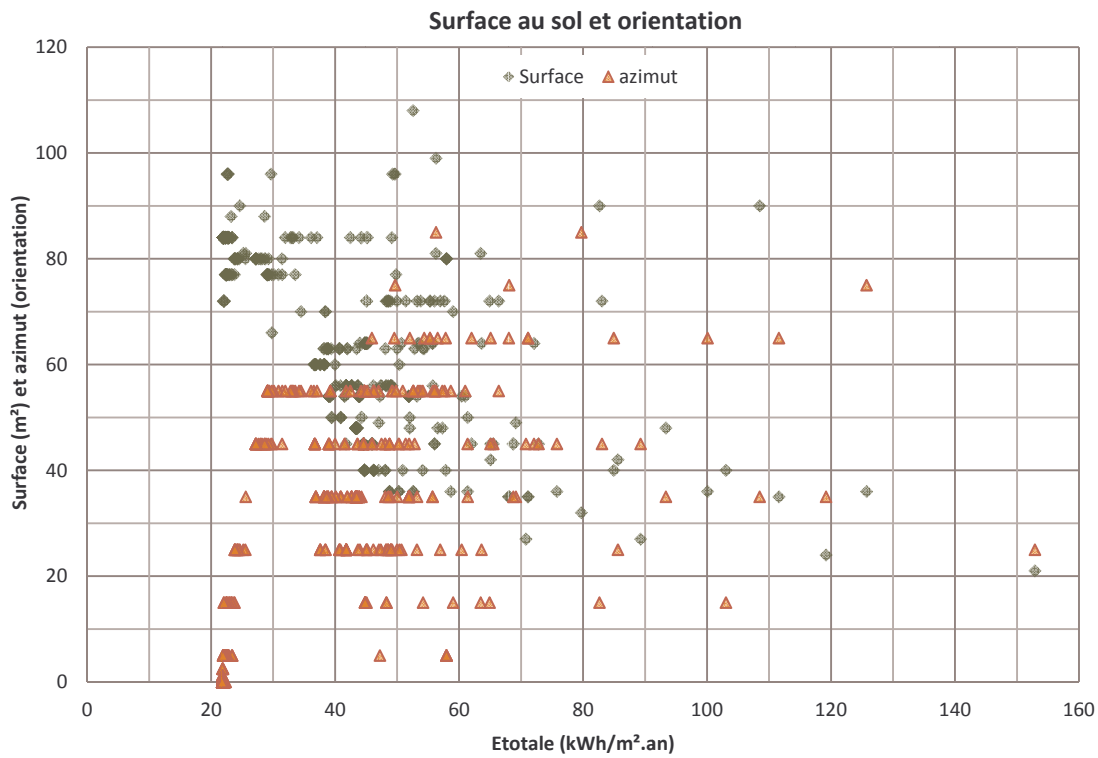


De bonnes solutions sont obtenues avec un équilibre des trois postes (en moyenne 30 à 40% chaque). La lumière, dans les cas « optimaux » représente plus de 2/3 des consommations annuelles.

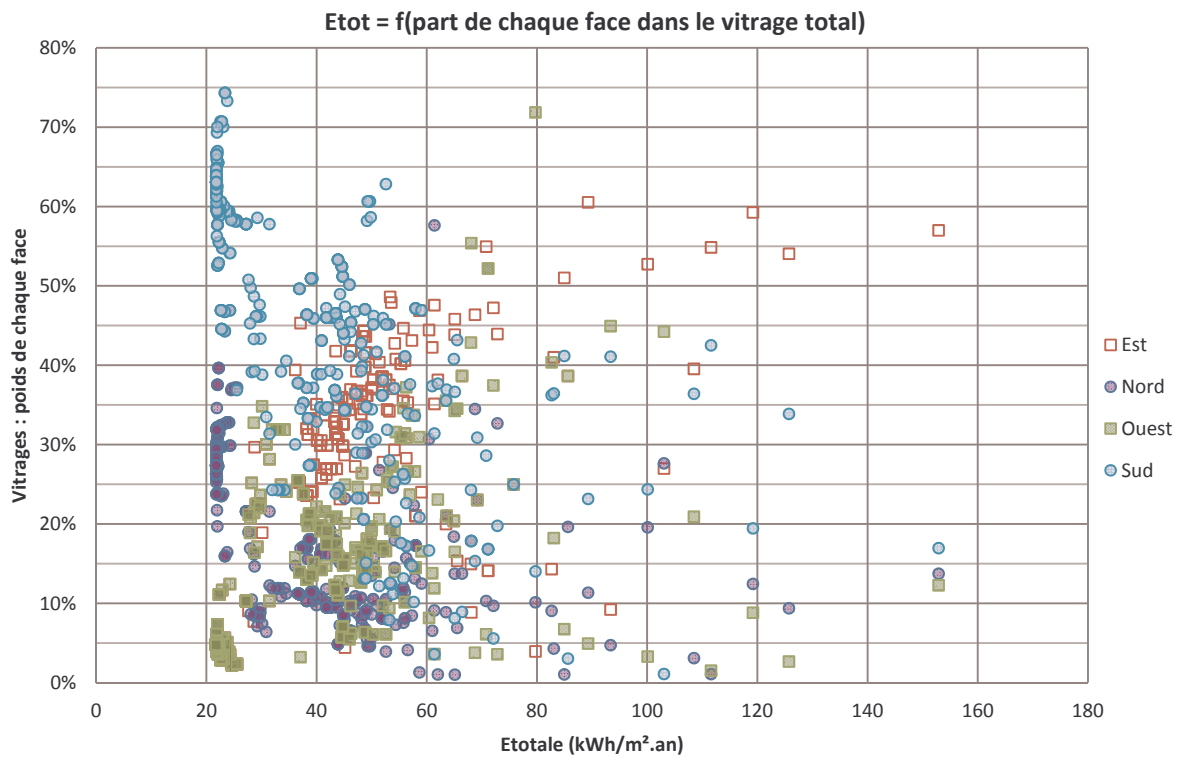


Une compacité de 0.8 donne les meilleurs résultats (conditions non suffisante). Les meilleurs cas correspondent à une largeur 2 fois plus importante que la profondeur, mais dans beaucoup de cas le

volume est allongé selon l'axe Nord-Sud. Les surfaces « intéressantes » vont de 40 à 80 m². L'orientation ne joue pas un rôle prépondérant, variant jusqu'à 55° sans engendrer de détérioration de la consommation annuelle au m².

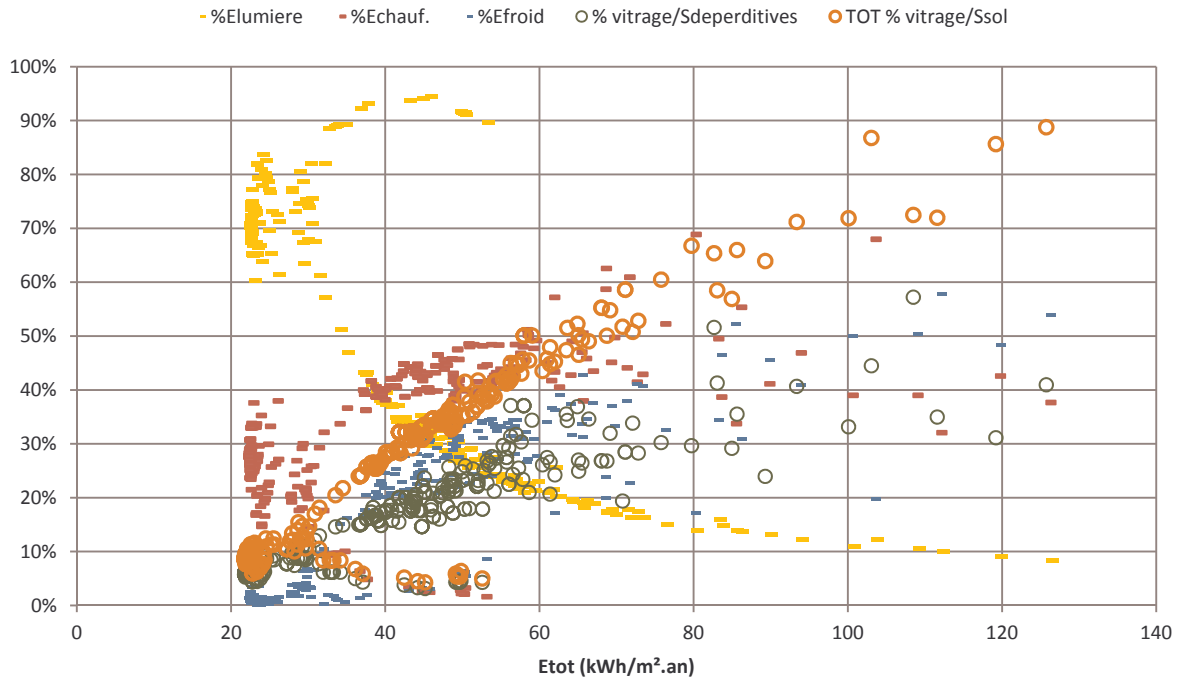


Vitrages



Grand nombre de compositions de vitrages possible. Le Sud est privilégié, mais n'oublions pas qu'il « tourne » dans ce cas.

Part des différents postes : deux indicateurs généraux du vitrage



La surface de vitrage par rapport à la surface au sol est de 5 à 12%.

Sur cet exemple, on voit que la combinaison de variables de différentes natures permet, sur le contexte climatique le moins favorable jusqu'à présent, de réduire considérablement les consommations énergétiques. La majorité des cas correspondent à 20 à 60 kWh/m².an pour trois postes énergétiques. D'autre part, ici aussi on constate qu'une diversité de solutions permet d'obtenir de résultats. On sent bien la complexité des interactions entre les différentes composantes d'un bâtiment, mais on constate également la variété de réponses possibles et globalement comparables.

4.3.2. Visualisation de quelques résultats

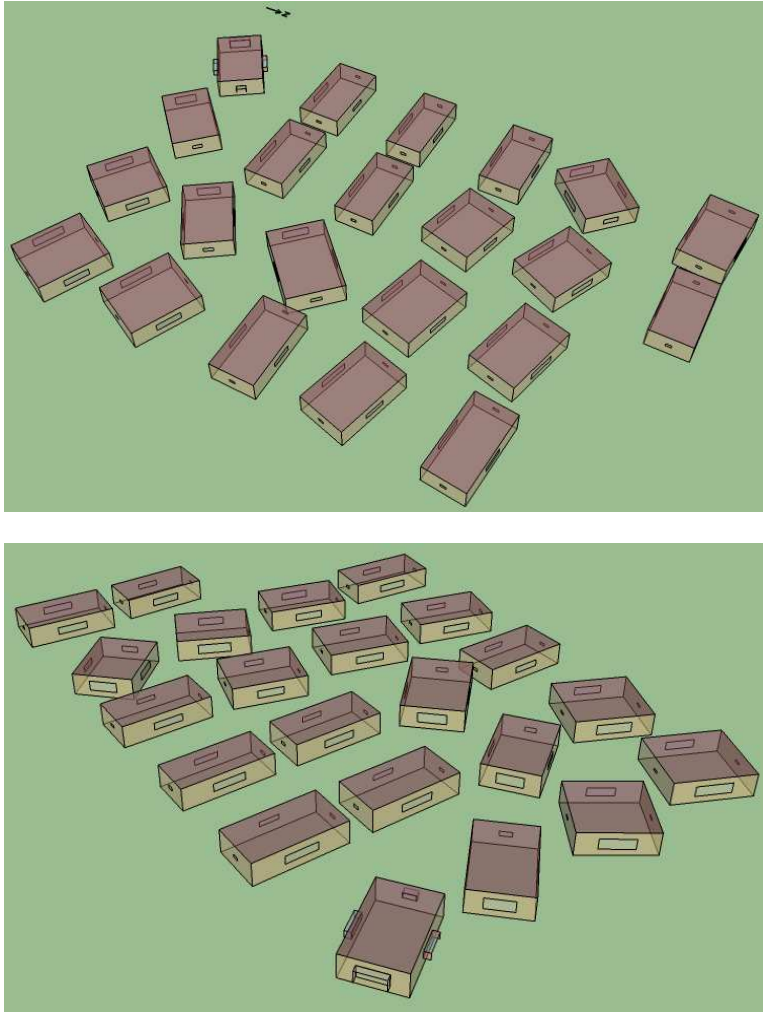


Figure 64 : Solutions < 30 kWh/m².an

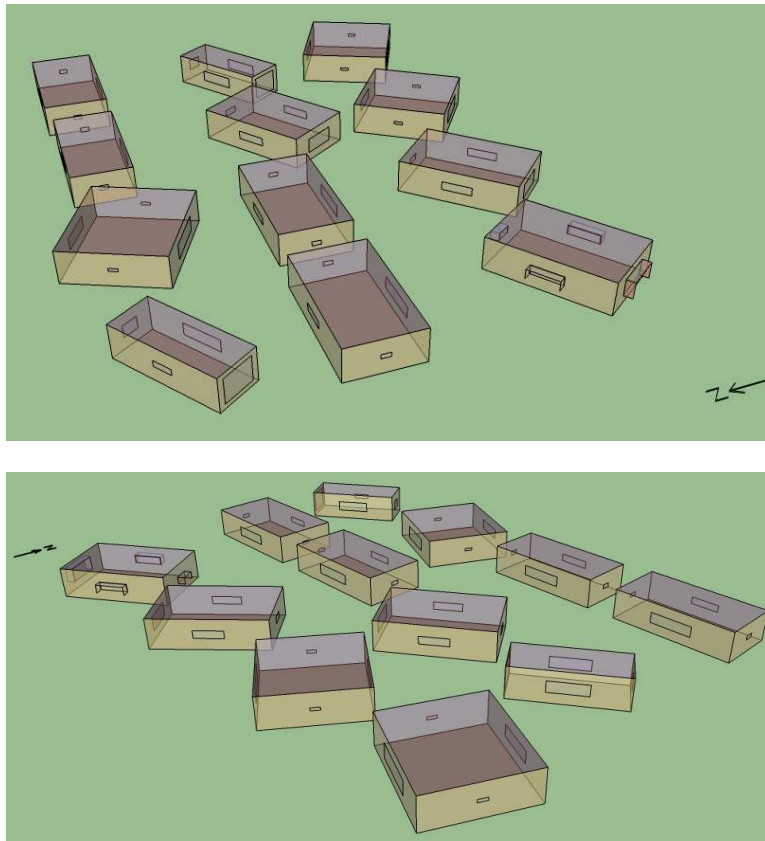


Figure 65 : variété de solutions

4.4. Série de tests 3 : impact des caractéristiques des matériaux

Ce chapitre ne traite que des parois opaques. En raison d'un problème technique d'évaluation de la part lumière (interne à l'interaction GenOpt/EnergyPlus), les résultats des séquences de simulation sur les parois vitrées ont été faussés. Le laps de temps restant étant trop juste, il a été décidé de ne pas les relancer.

4.4.1. Présentation de l'expérimentation – éléments techniques

1. Modèle :

- Géométrie : telle que décrite au 3.1. (cube de 3 m de côté, les 4 faces verticales orientées selon les 4 directions cardinales)
- 1 vitrage fixe de 1.05*1.05 m par face (centré sur chaque face, soit 0.9 m de part et d'autre, en largeur et en hauteur) ; modèle simplifié : $U_g=1.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; $g=0.65$; $TL=0.8$
- Occupation : de 8h à 20h (365 jours/an)
- Températures de consigne : comprises entre 19°C et 27°C toute l'année, de 8h à 20h
- Ventilation naturelle nocturne l'été :
 - o Du 15 mars au 1^{er} juin : 5 vol/h (de 20h à 8h)
 - o Du 1^{er} juin au 30 septembre : 12 vol./h (de 20h à 8h)

2. Variables et paramètres

Cette série de simulations cherche à appréhender l'importance et le rôle joué par l'inertie d'absorption des bâtiments et l'isolation des parois. Nous considérons donc 6 parois distinctes les unes des autres, isolées par l'extérieur, la masse se trouvant côté intérieur. Il s'agit donc de 6 parois composées de 2 matériaux, chaque face ayant 2 matériaux variables indépendants des 5 autres.

3. Isolant variable

Nous faisons varier le coefficient de transmission surfacique U ($W/m^2.K$) de l'isolant de 0.1 à 1.1 $W/m^2.K$ (0.1 étant très performant), avec une incrémentation de 0.05, soit 20 valeurs possibles. Dans EnergyPlus, on peut définir l'épaisseur e d'une couche (m) et sa conductivité thermique λ ($W/m.K$). Puisque $U = \lambda/e$, nous avons fixé l'épaisseur à 40 cm et faisons varier λ de 0.04 à 0.42 $W/m.K$, avec un incrément de 0.02. Dans le fichier *command.txt* pour GenOpt, nous définissons ce paramètre pour chaque paroi. Exemple pour le sol (le U initial de chaque paroi est fixé à 0.15 $W/m^2.K$, tel que suggéré par le standard « passif ») :

```
Parameter{ Name=lambda_sol;Min=0.04;Ini=0.06;Max=0.42;Step=0.02;}
```

Dans le fichier *_template.idf*, nous remplaçons la valeur fixe de la conductivité par `%lambda_sol%` :

```
Isolant_sol,    !- Name
MediumRough,   !- Roughness
0.4,           !- Thickness {m}
%lambda_sol%;  !- Conductivity {W/m-K}
```

4. Masse thermique

Côté intérieur, nous prenons pour matériau minéral de départ la terre crue, dont nous faisons varier l'épaisseur de 1 à 31 cm, avec un incrément de 2 cm. Dans *command.txt* :

```
Parameter{ Name=ep_masse_sol;Min=0.01;Ini=0.01;Max=0.31;Step=0.02;}
```

Puis dans le fichier *template* :

```
Mineral_sol, !- Name
Rough,       !- Roughness
%ep_masse_sol%, !- Thickness {m}
0.635,       !- Conductivity {W/m-K}
1450,        !- Density {kg/m3}
850,         !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,         !- Thermal Absorptance
0.7,         !- Solar Absorptance
0.7;         !- Visible Absorptance
```

5. Paramètres mesurés

Nous ne cherchons évidemment à mesurer que les effets de ces variations de matériaux sur les charges de chauffage et de refroidissement. Nous limitons donc la fonction-objectif à la somme de ces deux postes de consommation. Dans le fichier *optWinXP.ini* pour GenOpt :

```
ObjectiveFunctionLocation
{
  Name1    = E_tot_kWh_m2;
  Function1 = "divide(add(%E_chauffage_kWh%, %E_froid_kWh%),9.0)"; // kWh/m²
  Name2    = E_chauffage_kWh;
  Function2 = "divide(%E_chauffage_J%, 3600000)";
  Name3    = E_froid_kWh;
  Function3 = "divide(%E_froid_J%, 3600000)"; // passage de J à kWh
  Name4    = E_chauffage_J;
  Delimiter4 = "186,";
  Name5    = E_froid_J;
  Delimiter5 = "237,";
}
```

4.4.2. Résultats : synthèse

Brest : 497 simulations

Voici les résultats extrêmes et la valeur initiale de la consommation annuelle, et la part de chaque poste, puis les U et épaisseurs correspondant :

| valeur | E_tot_kWh_m² | % chauffage | % refroidissement |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| <i>initiale</i> | 29.7 | 12.1% | 87.9% |
| <i>min</i> | 4.1 | 0.0% | 100.0% |
| <i>max</i> | 36.0 | 99.3% | 0.7% |

| valeur | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
|-----------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| <i>initiale</i> | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| <i>min</i> | 0.35 | 0.25 | 0.35 | 0.2 | 0.35 | 0.35 |
| <i>max</i> | 0.5 | 0.75 | 0.35 | 0.9 | 0.8 | 0.75 |
| | ep_masse_sud | ep_masse_nord | ep_masse_est | ep_masse_ouest | ep_masse_toit | ep_masse_sol |
| <i>initiale</i> | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| <i>min</i> | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| <i>max</i> | 0.09 | 0.17 | 0.05 | 0.19 | 0.07 | 0.25 |

La seule variation des 2 paramètres matériaux permet de divisé par 7 la consommation totale. La valeur maximale correspond à des besoins en chauffage nuls.

Les U des parois sont plus élevés que ceux du label passif : 0.35 W/m².K, sauf à l'Ouest et au Nord, où l'isolant est plus résistant (ou plus épais). Les gains se font sur la masse intérieure, sur les 6 parois : de 9 à 13 cm.

Montpellier : 497 simulations

| <i>valeur</i> | E_tot_kWh_m² | % chauffage | % refroidissement |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------|
| <i>initiale</i> | 53.2 | 0.6% | 99.4% |
| <i>min</i> | 3.9 | 100.0% | 0.0% |
| <i>max</i> | 53.2 | 0.6% | 99.4% |

| <i>valeur</i> | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
|-----------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| <i>initiale</i> | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| <i>min</i> | 0.7 | 0.45 | 0.4 | 0.2 | 0.45 | 0.8 |
| <i>max</i> | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| | ep_masse_sud | ep_masse_nord | ep_masse_est | ep_masse_ouest | ep_masse_toit | ep_masse_sol |
| <i>initiale</i> | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| <i>min</i> | 0.21 | 0.21 | 0.15 | 0.21 | 0.27 | 0.25 |
| <i>max</i> | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

Ici, la configuration initiale est la plus mauvaise. Une nouvelle composition des parois la divise par 15. La masse intérieure est cruciale pour obtenir ces résultats, avec plus de 20 cm en moyenne sur chaque face.

Nancy : 524 simulations

| <i>valeur</i> | E_tot_kWh_m² | % chauffage | % refroidissement |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------|
| <i>initiale</i> | 39.9 | 30.7% | 69.3% |
| <i>min</i> | 7.7 | 0.0% | 100.0% |
| <i>max</i> | 71.5 | 94.4% | 5.6% |

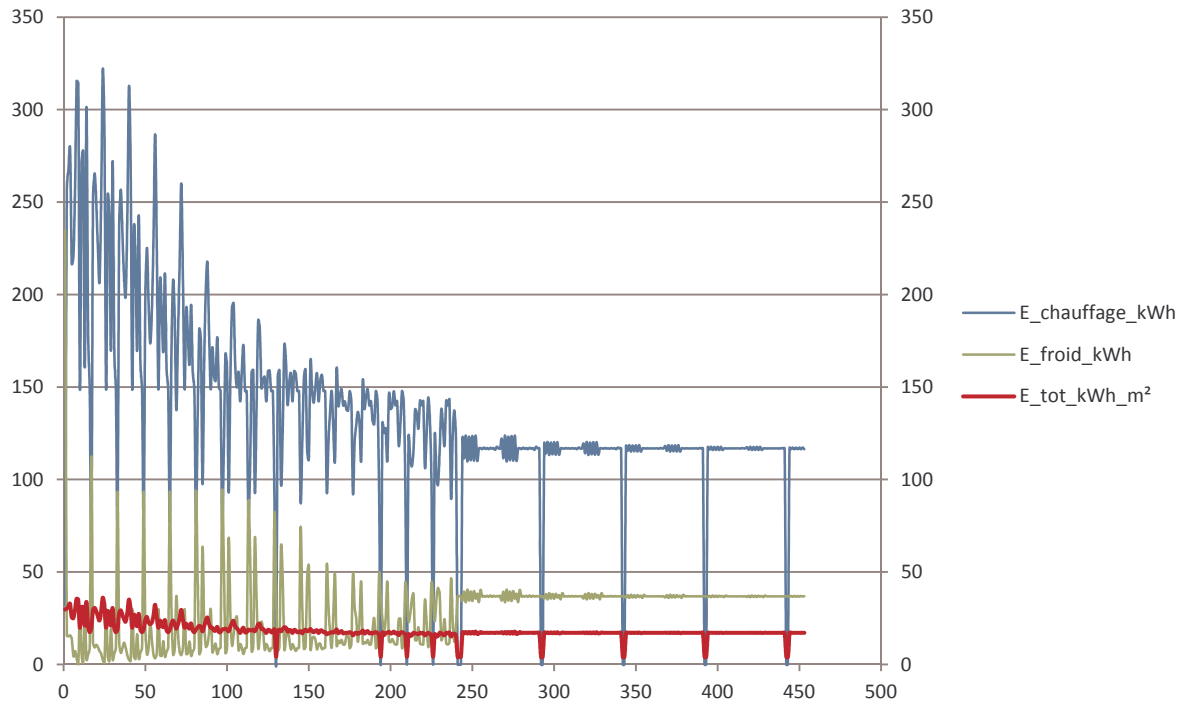
| <i>valeur</i> | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
|-----------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| <i>initiale</i> | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| <i>min</i> | 0.3 | 0.35 | 0.2 | 0.15 | 0.25 | 0.4 |
| <i>max</i> | 0.5 | 0.75 | 0.35 | 0.9 | 0.8 | 0.75 |
| | ep_masse_sud | ep_masse_nord | ep_masse_est | ep_masse_ouest | ep_masse_toit | ep_masse_sol |
| <i>initiale</i> | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| <i>min</i> | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.135 | 0.17 |
| <i>max</i> | 0.09 | 0.17 | 0.05 | 0.19 | 0.07 | 0.25 |

Le jeu sur les matériaux permet de diviser par 5 les consommations du cas initial. Dans ce climat continental, un juste milieu isolant/masse est à préconiser. Les performances d'isolation des parois restent un élément déterminant.

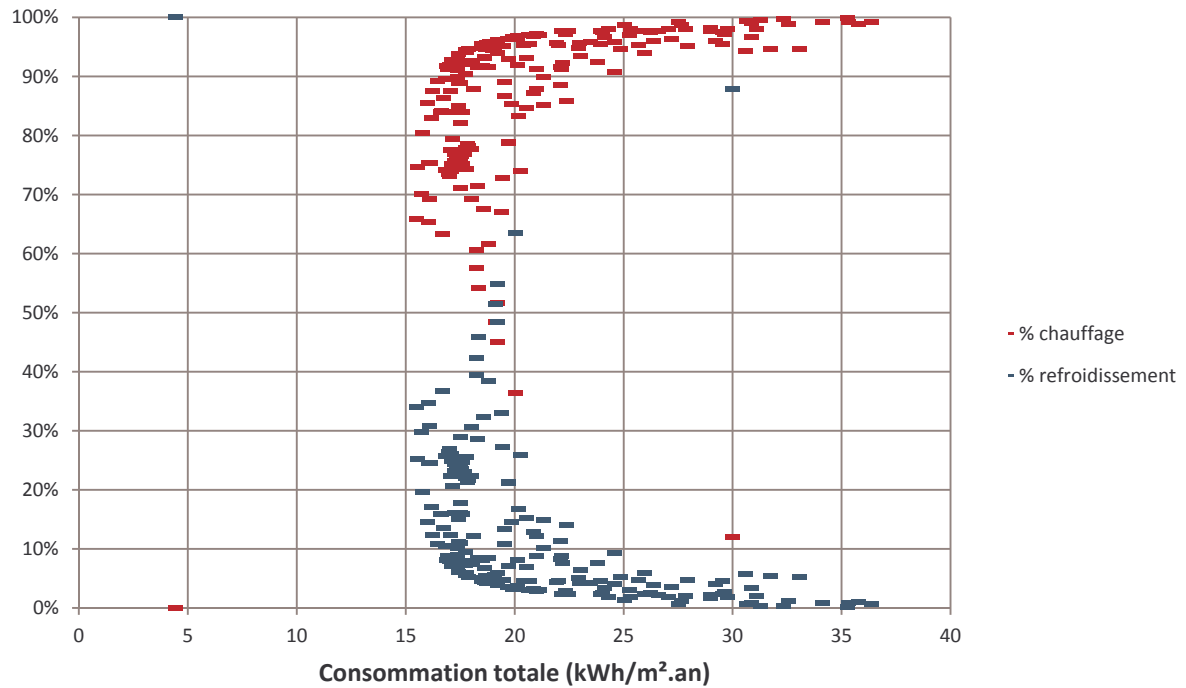
4.4.3. Vue globale des consommations

Brest

Consommations : globale (kWh/m².an) et par poste (kWh/an) au fil des simulations



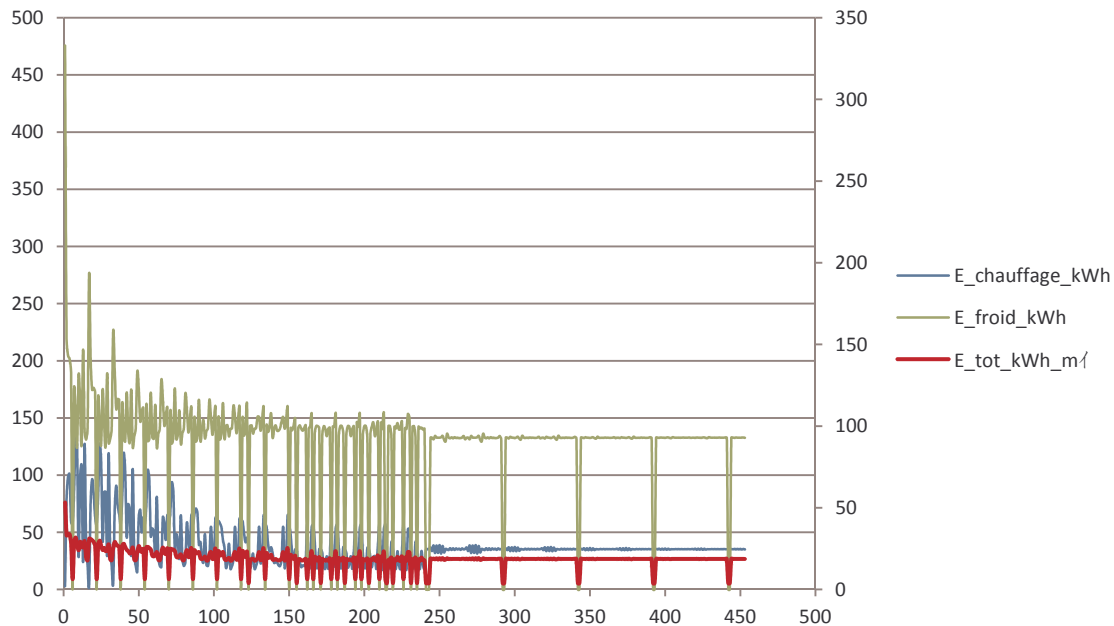
Répartition des deux postes énergétiques (%)



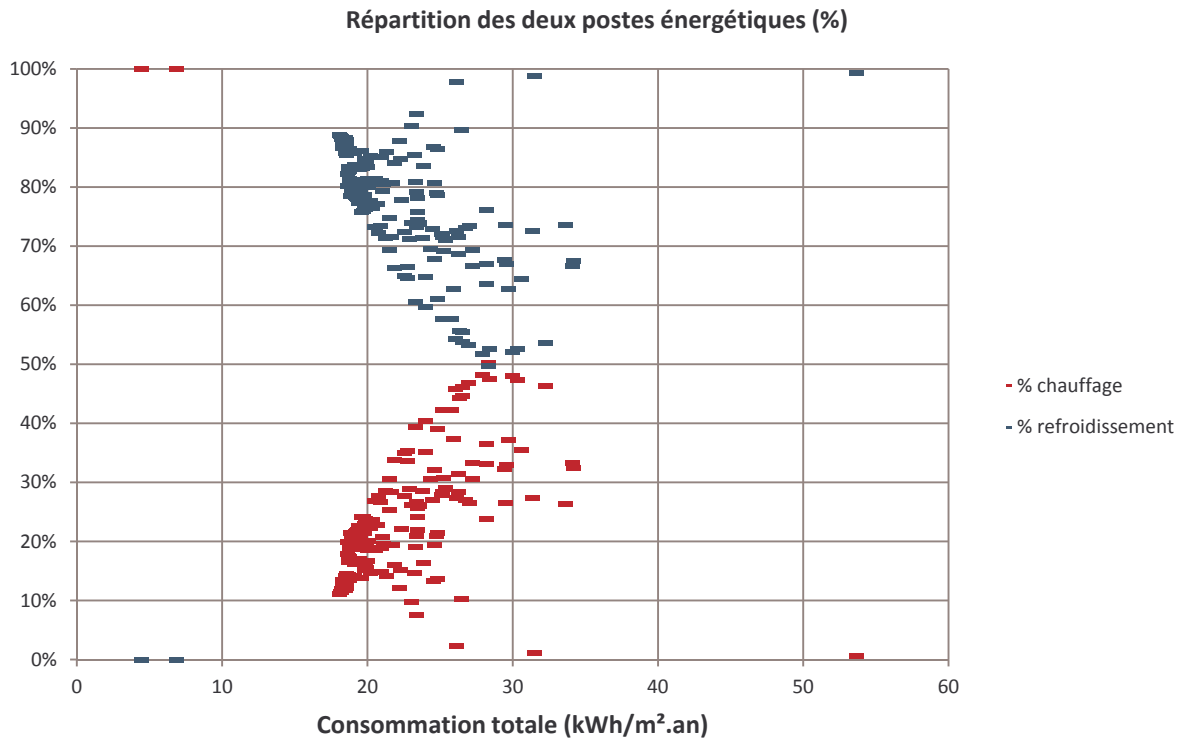
Le chauffage constitue, dans l'immense majorité des cas, le poste à réduire, représentant plus de 60% des dépenses énergétiques. On constate que la diminution globale des consommations passe (dans le traitement fait par l'algorithme) par un ré-équilibrage des postes chauffage/refroidissement. La configuration la moins énergivore neutralise d'ailleurs les dépenses liées au chauffage.

Montpellier

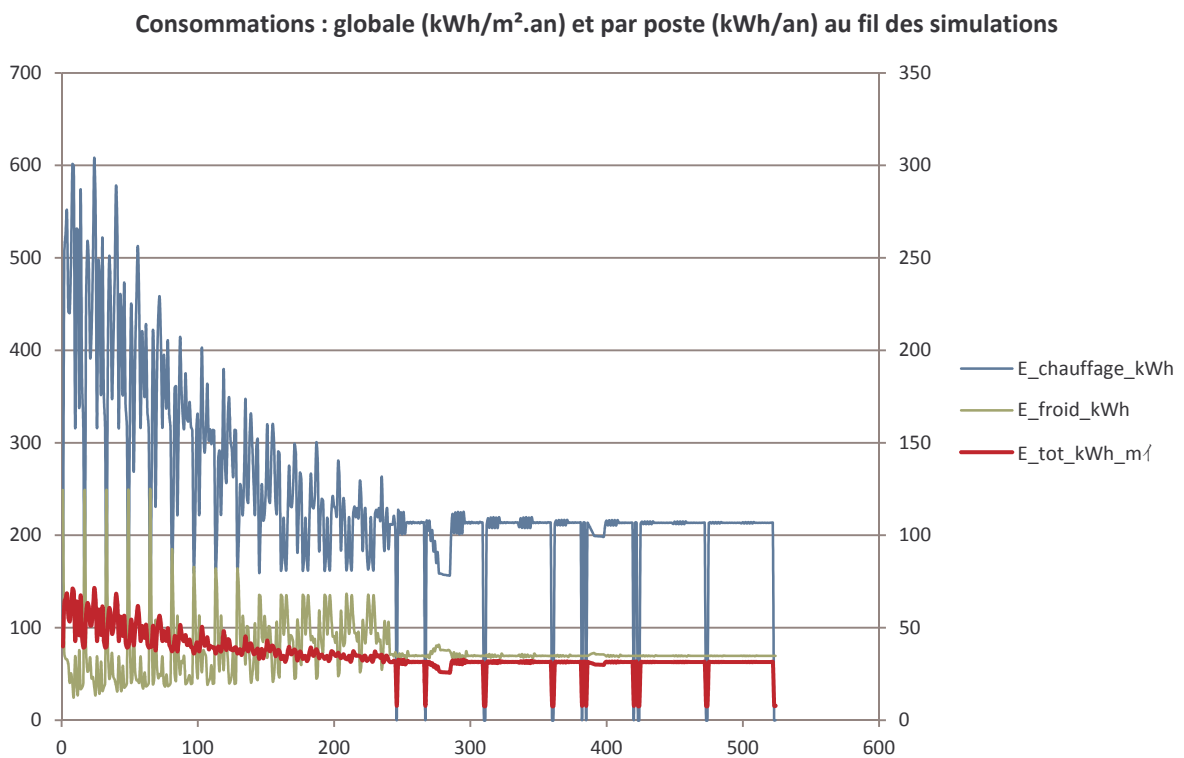
Consommations : globale (kWh/m².an) et par poste (kWh/an) au fil des simulations

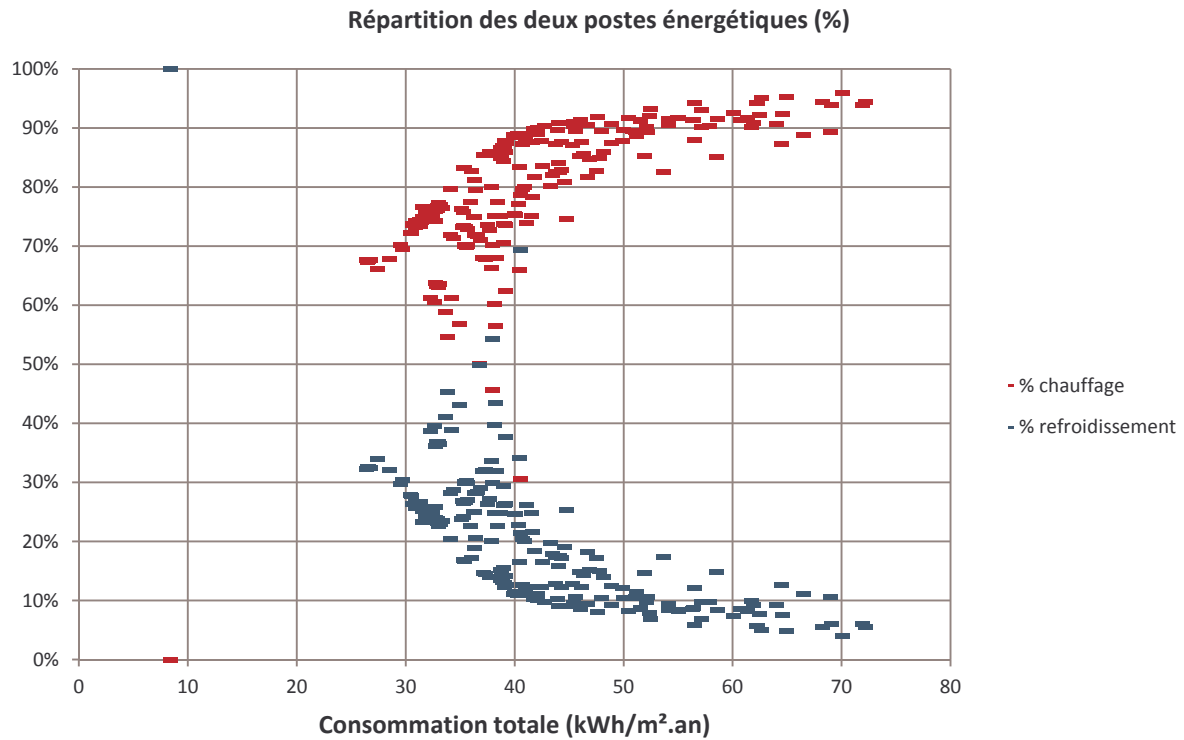


Dans ce climat plus chaud, les consommations énergétiques sont globalement assez faibles, la part liée au refroidissement étant prééminente. L'algorithme parvient à réduire la consommation d'énergie en réduisant les consommations de chauffage.



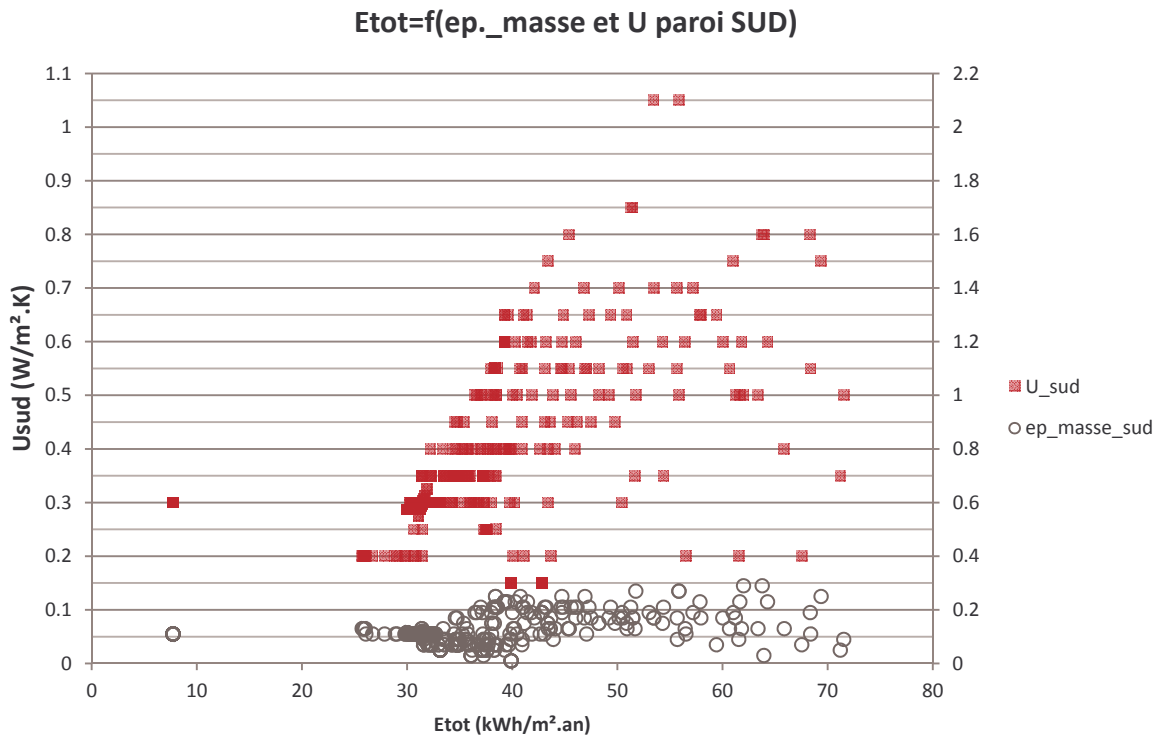
Nancy



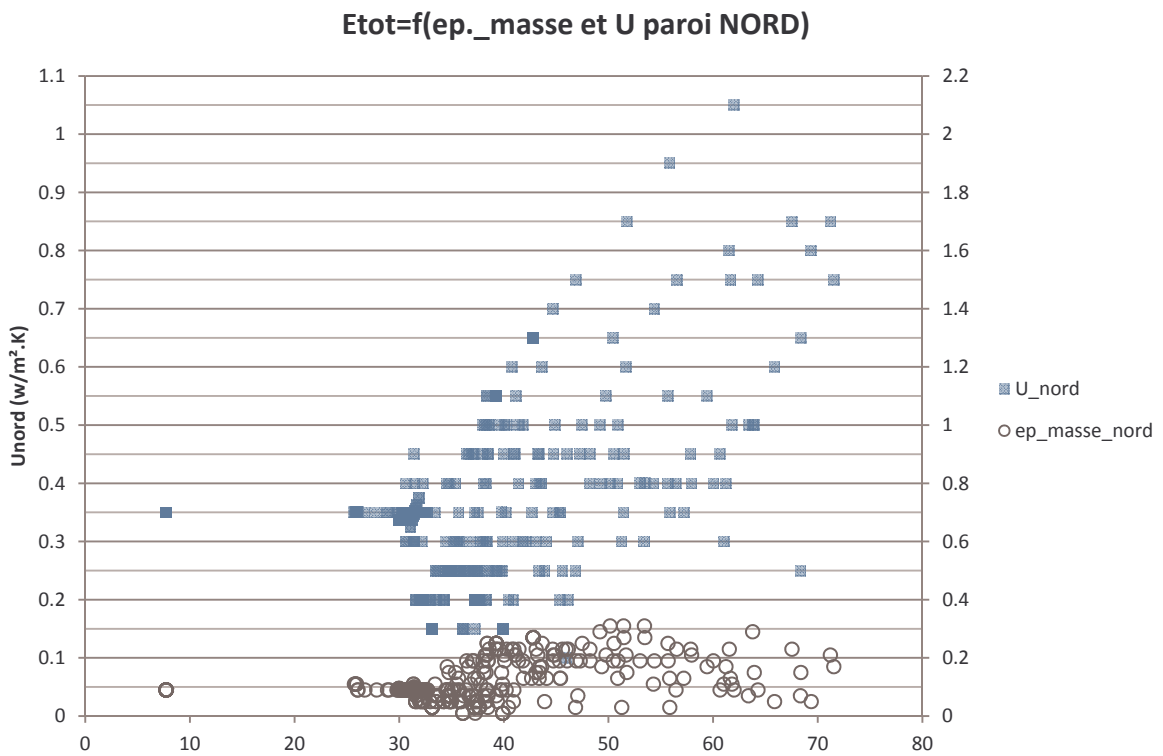


4.4.4. Isolation et masse par face : exemple sur Nancy

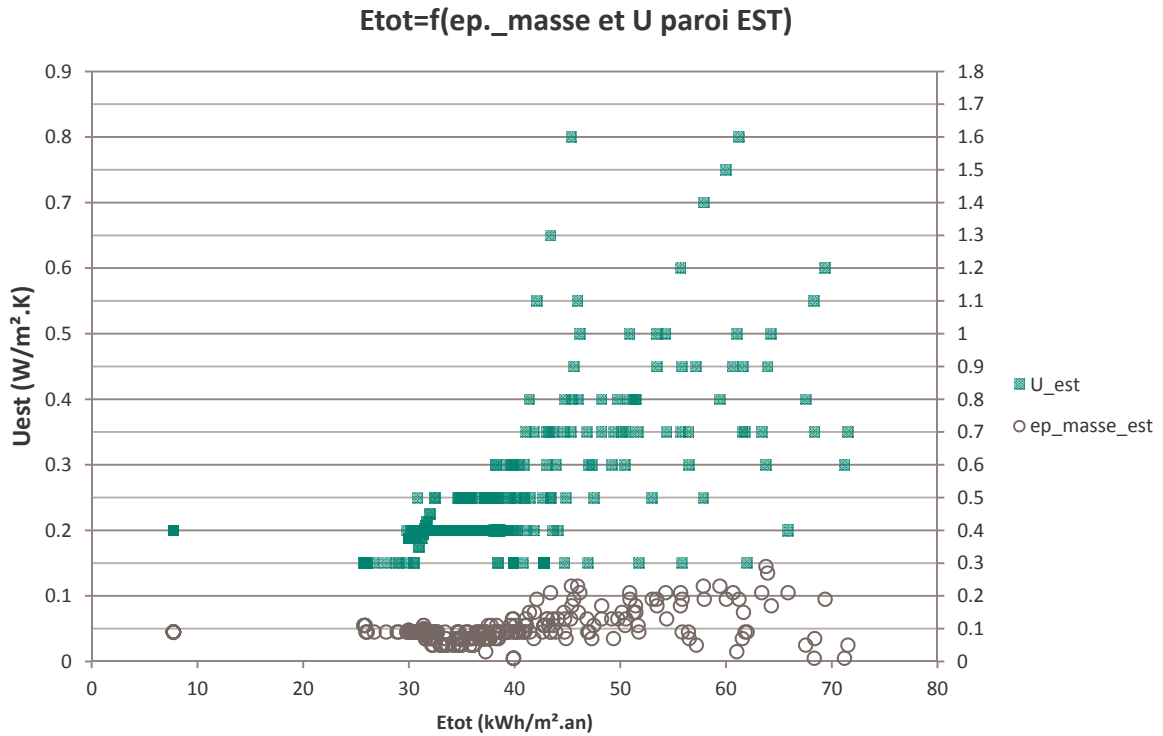
Avant toute chose, précisons que l'interaction combinée des 6 faces avec l'environnement extérieur, puis au sein du volume intérieur résulte d'une mécanique complexe. Il serait cavalier de juger de l'impact sur l'énergie totale de la composition de la paroi de l'une de ces faces, indépendamment des autres. C'est l'équilibre entre la part isolante extérieure et la part « captante » intérieure de chaque paroi qui mène à une réduction progressive des consommations, par ce simple jeu sur les matériaux.



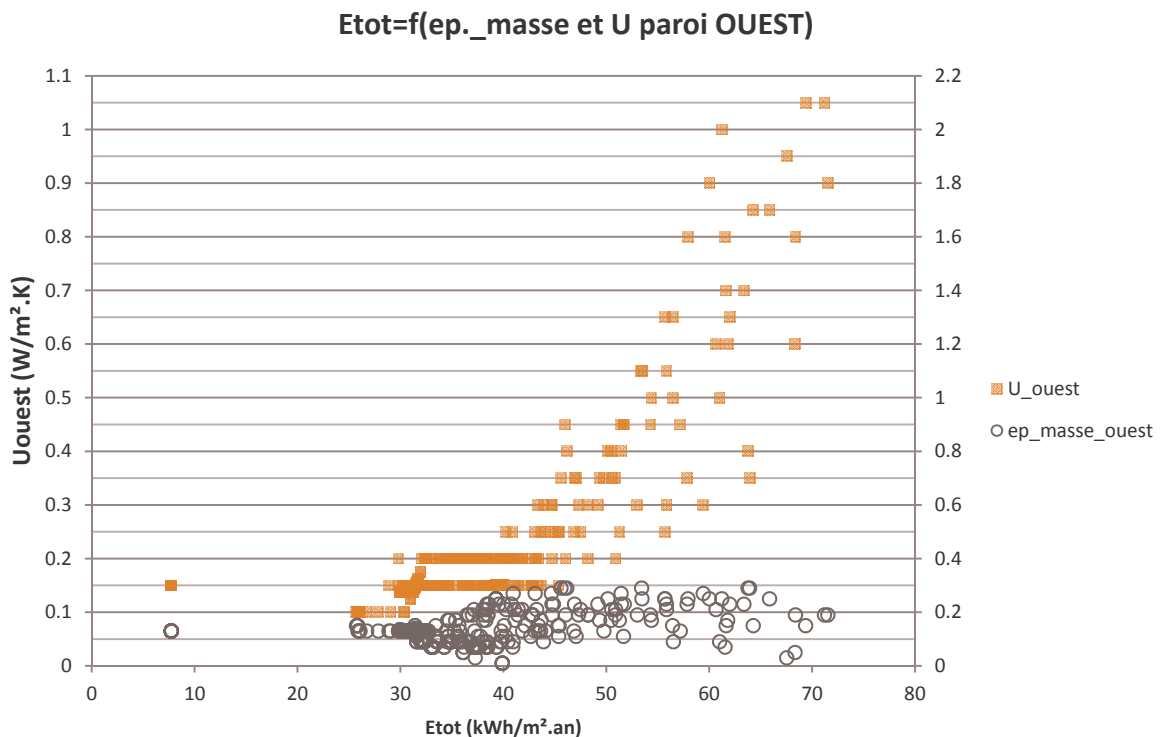
La bonne performance globale du bâtiment est ici conditionnée à une bonne isolation Sud (U de 0.2 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, éventuellement 0.3). La masse avoisine 10 cm.



Au Nord, un U de 0.35 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ associé à une masse de 10 cm est dans l'ensemble plus favorable qu'une isolation plus forte.

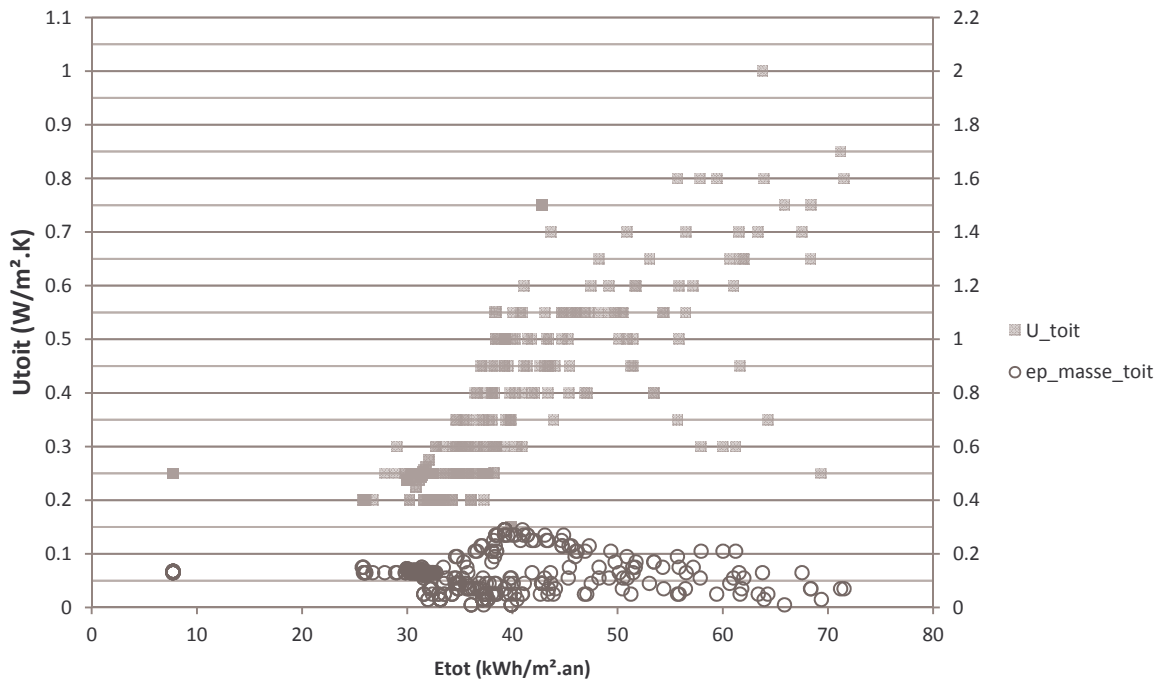


A l'Est, si la masse est la même, un U plus faible est exigé (du même niveau que le label passif).

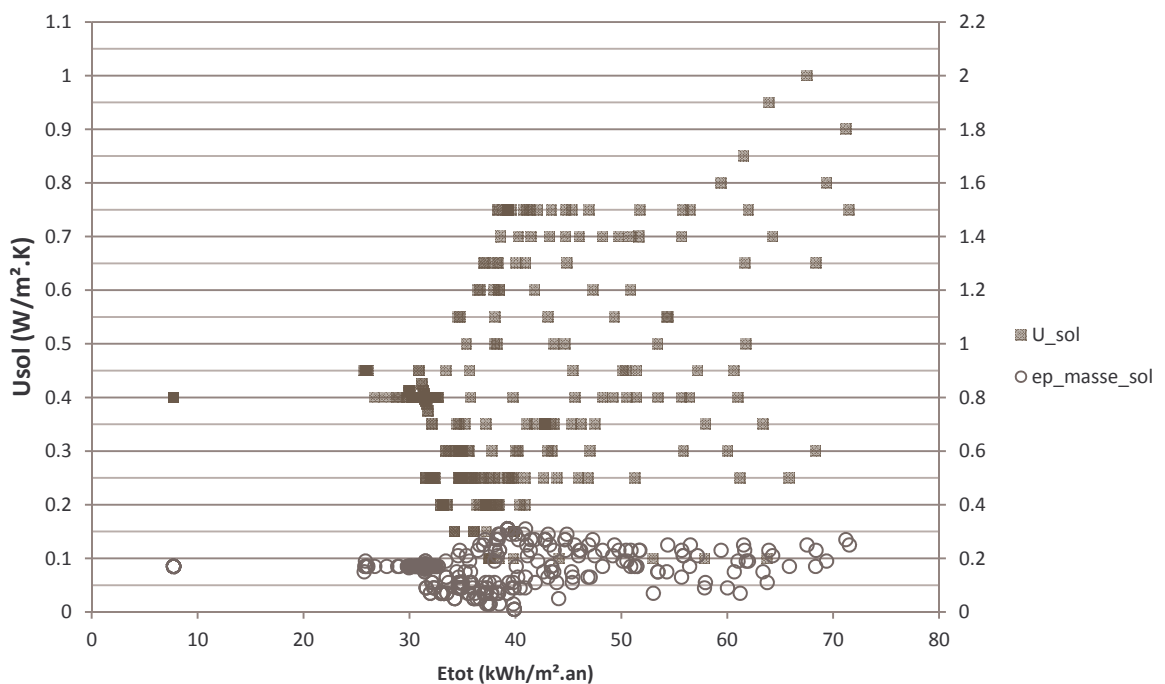


A l'Ouest la tendance est la même qu'à l'Est du point de vue isolation. La masse avoisine 15 cm.

Etot=f(ep._masse et U paroi TOIT)



Etot=f(ep._masse et U paroi SOL)



Au niveau du sol, enfin, l'isolation est plus secondaire que la présence importante de masse (Usol autour de 0.4 W/m².K pour 20 cm de passe).

4.4.5. Conclusions pour Nancy

En climat continental, la forte isolation globale participe à la protection de l'intérieur du bâtiment vis-à-vis des hivers froids et des étés chauds. L'isolation représente en moyen 60% de l'épaisseur des parois, hormis au sol, qui compte 60% de masse. Cette masse, notamment, profite au captage de l'énergie et à sa diffusion progressive et atténuée.

Considérant une dernière fois un isolant comme la ouate de cellulose, nous obtenons :

| | | | | | | |
|-----------------------|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| Mur initial | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
| ouate de cellulose | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| épaisseur paroi | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| Mur performant | U_sud | U_nord | U_est | U_ouest | U_toit | U_sol |
| ouate de cellulose | 14 | 12.0 | 21 | 28 | 16.8 | 10.5 |
| épaisseur paroi | 25 | 21.0 | 30 | 41 | 30.3 | 27.5 |

4.4.6. Conclusions générales sur l'expérimentation sur les matériaux opaques

Les solutions générées par l'algorithme répondent bien aux exigences climatiques liées à chaque site. Du climat océanique au climat continental en passant par un climat chaud, les options et tendances sont différentes, privilégiant tantôt la masse (Montpellier), tantôt l'isolation (Nancy) ou un équilibre entre les deux (Brest).

On voit aussi qu'il est pertinent de différencier les parois selon leur orientation, chacune jouant un rôle particulier dans la protection ou la captation vis-à-vis du climat extérieur. Ce type de considération n'est, par ailleurs, pas nécessairement synonyme de complication sur chantier. On constate le potentiel d'économie matière et d'économie financière d'étudier plus finement la composition des parois. Evidemment, la différenciation selon l'orientation dépendra aussi de la taille et de la localisation des vitrages (en plus de leurs caractéristiques).

Plus généralement, il est intéressant de constater sur ces expérimentations simples le potentiel de gains énergétiques (ou de non-dépense) qu'apporte l'analyse du rapport isolant/masse. D'autant plus que ces gains ne font pas nécessairement par l'ajout d'épaisseur, et qu'ils peuvent être obtenus par une réelle variété d'options.

4.5. Influence de la position des baies

1. Présentation du modèle

Ce modèle est assez complexe. Il vise à tester l'influence de la position des baies sur chaque face donnant sur l'environnement extérieur. Partant d'un cube, il y a donc 5 faces potentiellement exposées au soleil et au vent. L'idée est aussi de voir quelles potentialités de composition de façade l'algorithme permettrait éventuellement de trouver. L'objectif est avant tout visuel.

Le principe est de diviser ces 5 parois en un maillage carré. Nous sommes partis d'un cube de 6.4 m de côté, divisé en 36 carrés de 1 m* 1 m (5 cm séparent les carrés les uns des autres). Maille est soit un vitrage, soit une surface opaque.

Définition dans EnergyPlus

Comme nous l'avons vu dans la partie 2, une fenêtre est un objet (*Window*), défini par différents champs (nom unique, nom de la composition, point de départ, largeur, hauteur...). Une dimension nulle ne peut être interprétée par le programme, qui ne peut démarrer la simulation. Il est par ailleurs plus complexe de créer une nouvelle fenêtre ou d'en supprimer une, puisque cela consiste à créer/supprimer un objet défini dans le fichier texte d'entrée.

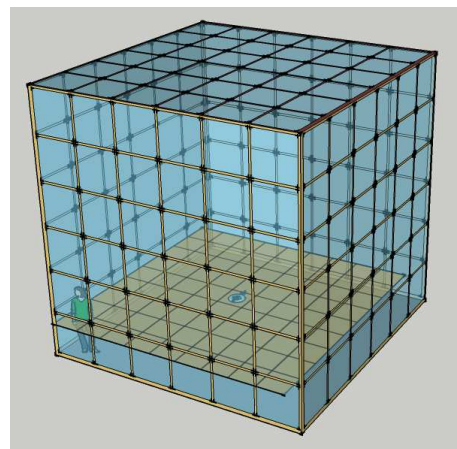


Figure 66 : Lubicube et carte d'éclairément

EnergyPlus n'acceptant pas la définition d'une fenêtre aux dimensions nulles, nous avons opté pour une solution simple : la définir « très » petite. Pour cela, il est nécessaire de vérifier que, à l'échelle d'une année (période de simulation pour toutes les séries d'expérimentations réalisées), un cube sans fenêtres et un cube avec 180 « petites » fenêtres (36 fenêtres sur 5 faces) ont une dépense énergétique comparable (chauffage, refroidissement et lumière).

| | 180 "petites" fenêtres | 0 fenêtre | 0/180 fenêtres |
|-----------------|------------------------|-----------|----------------|
| Chauffage | 3054.67 | 3888.86 | 1.27 |
| Refroidissement | 18246.75 | 16623.14 | 0.91 |
| Lumière | 1643.86 | 1643.86 | 1.00 |
| Total | 22945.28 | 22155.86 | 0.97 |

Nous relevons des différences entre les charges de chauffage et de refroidissement des deux modèles. Toutefois, la différence totale est très faible. Rappelons par ailleurs que cette comparaison est faite sur le modèle le plus « extrême », avec 180 fenêtres. Dans la majeure partie des cas, le nombre de « petites » fenêtres est plus faible. Enfin, cette série d'expérimentation ne s'est faite que sur la période de chauffe, et non sur l'année entière, rendant plus acceptables encore ces différences.

Tous les réglages sont identiques au socle commun des simulations. Seule la période de simulation change. Elle n'est appliquée qu'à la saison de chauffe (du 15 octobre au 30 avril). Nous revenons sur ce choix en fin de section.

Définition dans GenOpt

Dans le fichier *command.txt*, nous définissons les 180 paramètres, de la même manière :

```
Parameter{
  Name= DimFen_Sud1;
  Min = 0.001;
  Ini = 0.001;
  Max = 1;
  Step= 0.999;
}
```

Un *Parameter* correspond à une variable indépendante, c'est-à-dire chaque maille carrée (180 au total). Nous les distinguons les uns des autres en indiquant l'orientation et un chiffre, (les mailles peuvent prendre, indépendamment les unes des autres, deux valeurs : 0.001 ou 1) :

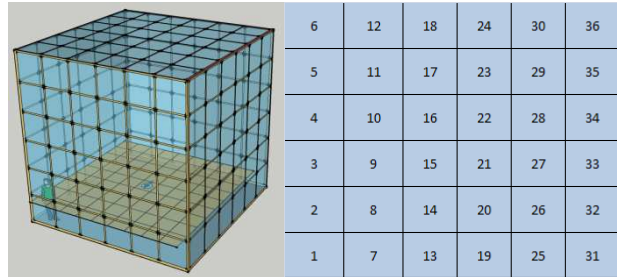


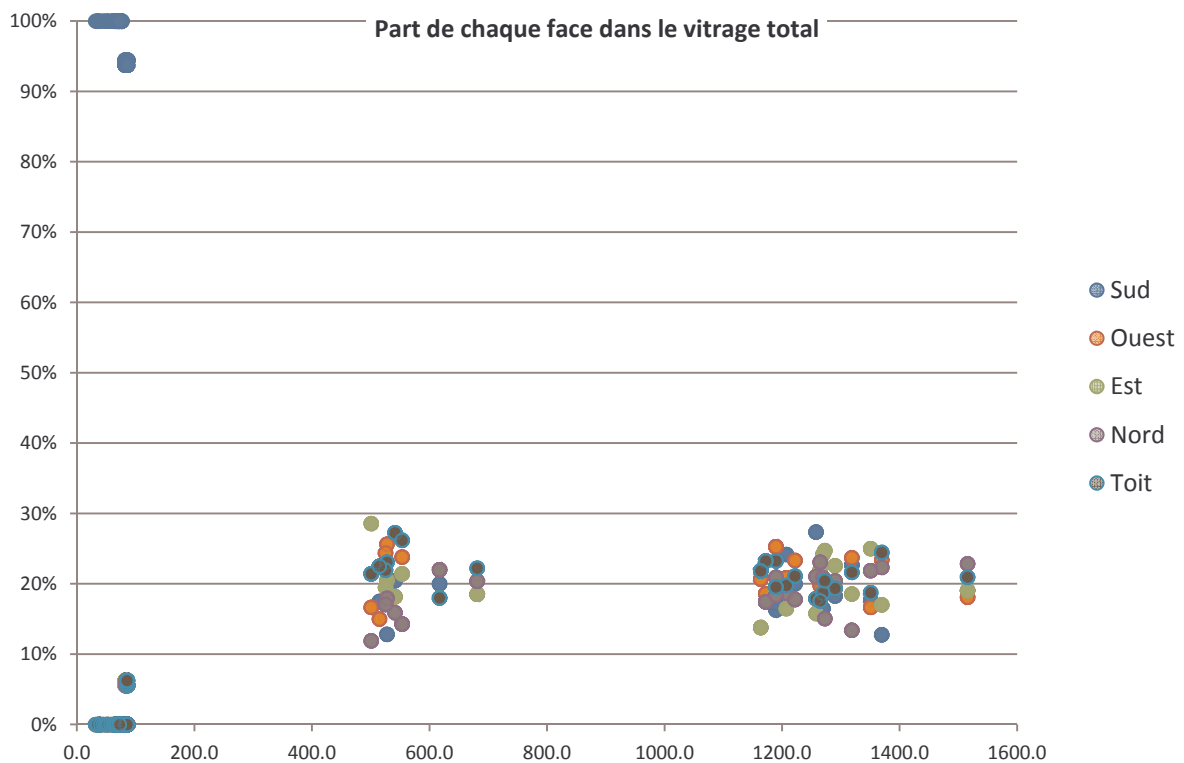
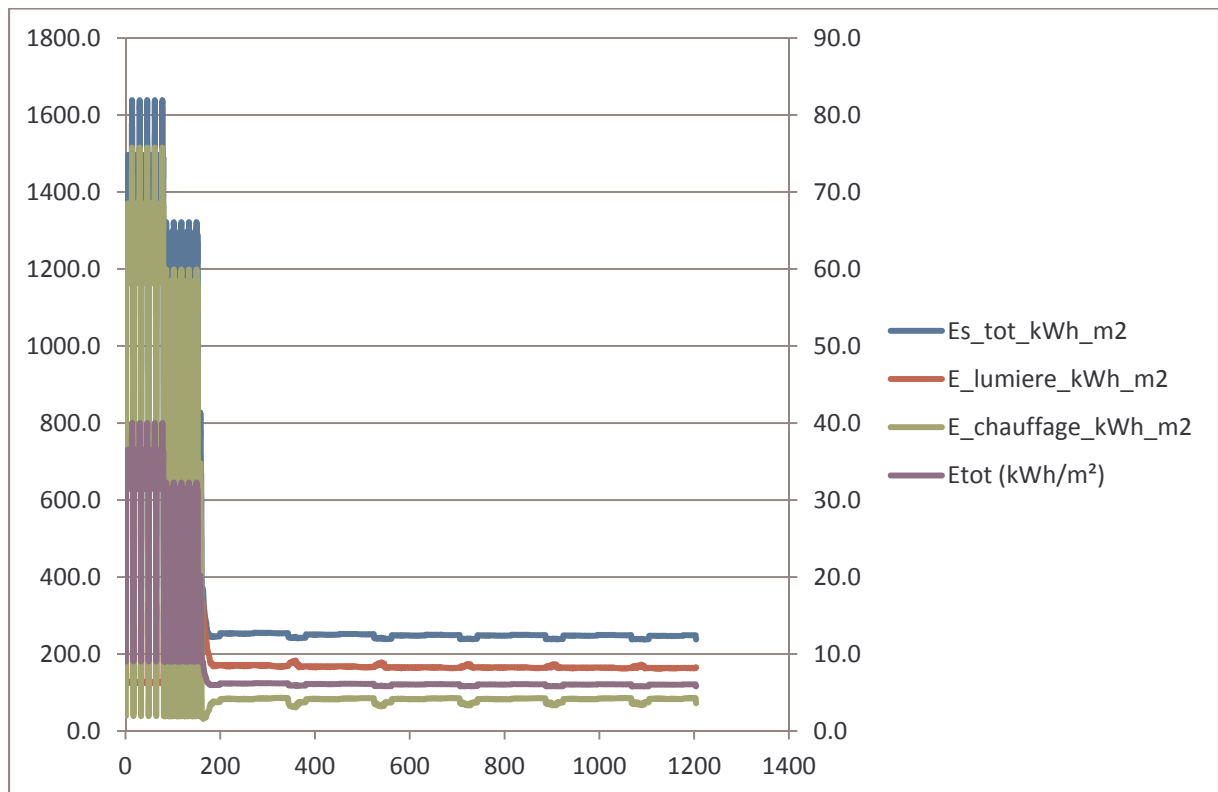
Figure 67 : Maillage du lumicube

Améliorations

Une autre approche avait été envisagée. Elle permettait de définir la présence ou non d'une fenêtre, et ainsi un gain de temps et de précision. Elle consistait à définir des variables discrètes, se basant sur la syntaxe du fichier d'entrée d'EnergyPlus. Les « ! » ouvrent des commentaires dans ce fichier .idf et « Window » définit chacune des fenêtres. Nous avons défini une variable par fenêtre possible, qui est considérée comme telle si le *Parameter* prend la valeur « Window », ou bien n'est pas prise en compte, étant assimilé à un commentaire, si on lui attribue la valeur « ! ». Au-delà du fait que la définition de paramètres discrets empêche l'utilisation de l'algorithme GPS de Hooke and Jeeves, et donc l'hybride PSO/HJ, nous avons été confronté au problème de changement d'identifiant des composantes de la fonction-objectif. En effet, la création ou la suppression d'objets actualise le fichier .eso et, ce faisant, bouleverse la définition de la *fitness*.

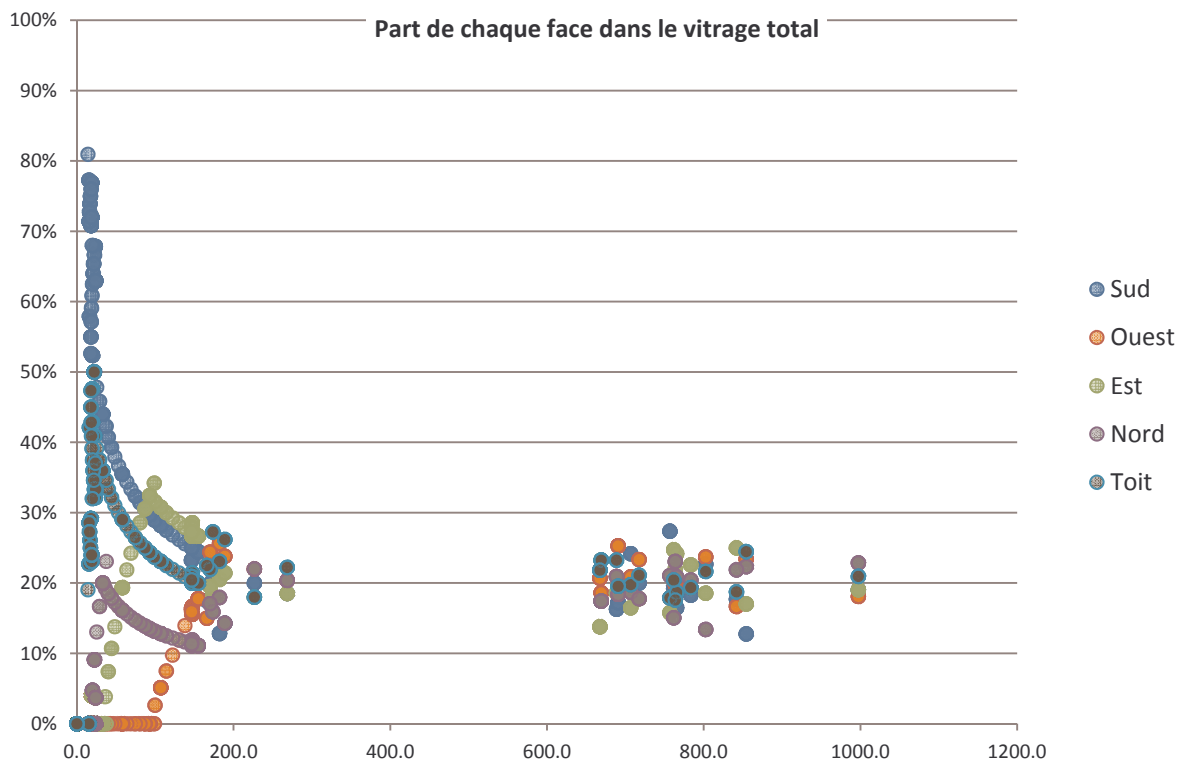
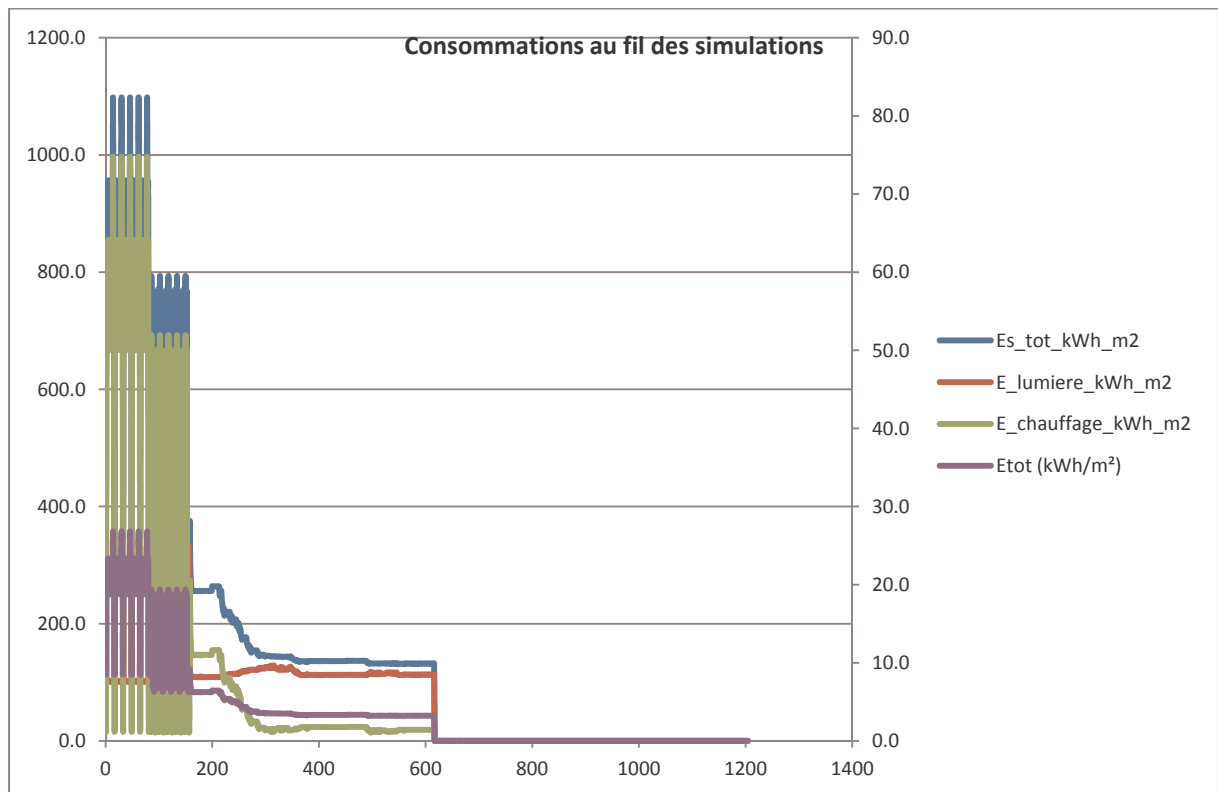
2. Expérimentations pour Brest

1200 simulations



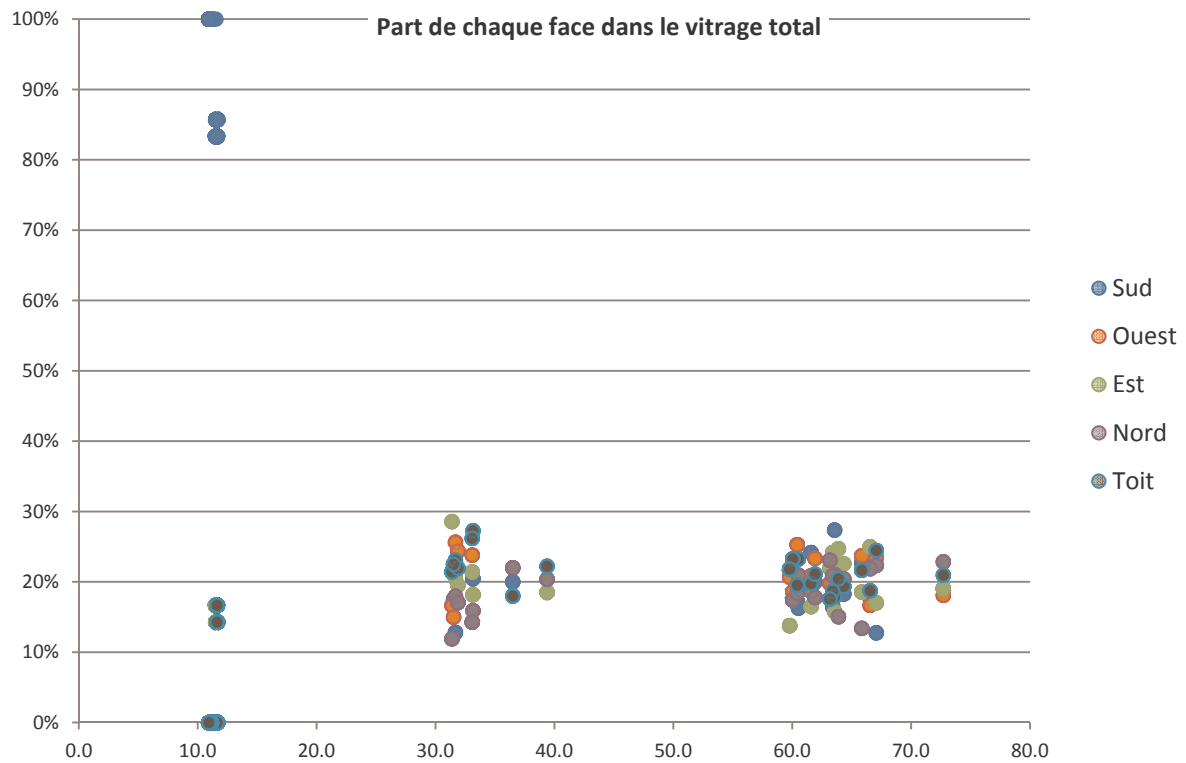
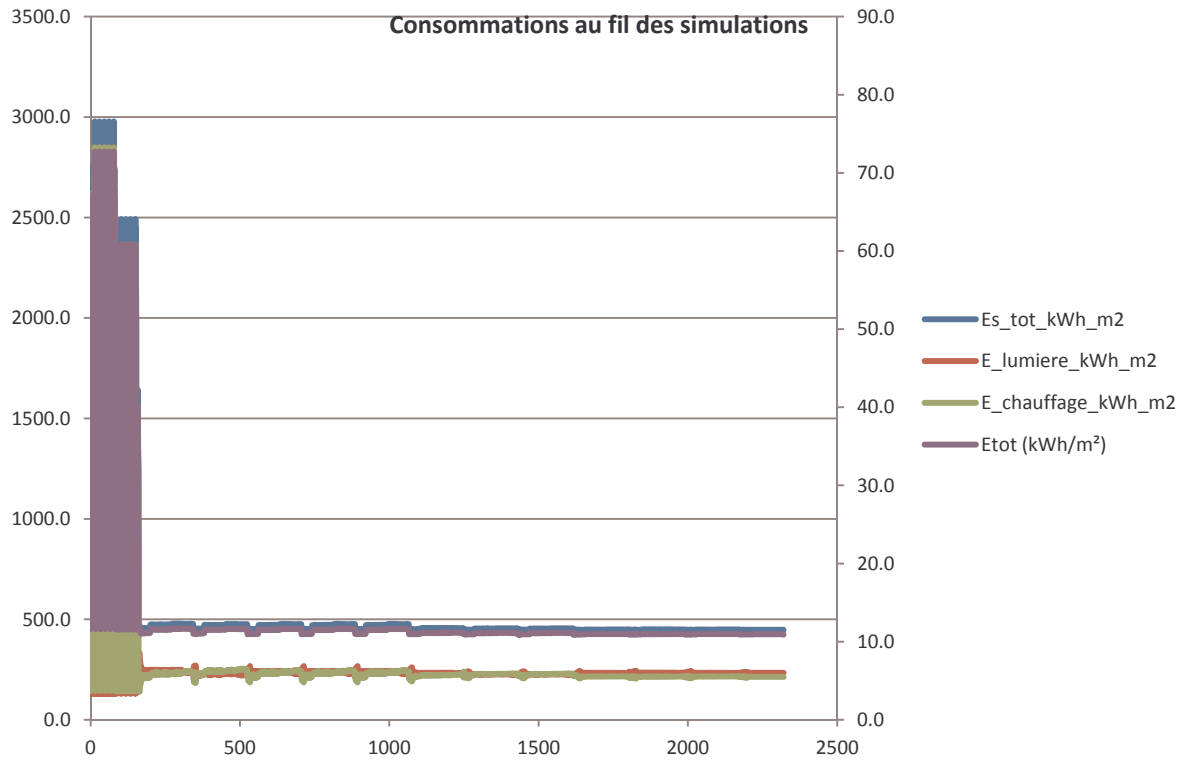
3. Expérimentations pour Montpellier

616 simulations



4. Expérimentations pour Nancy

2320 simulations



5. Visualisation

Voici une série de sélection pour Brest.



Figure 68 : Lumicube, Brest, vue Sud-Est

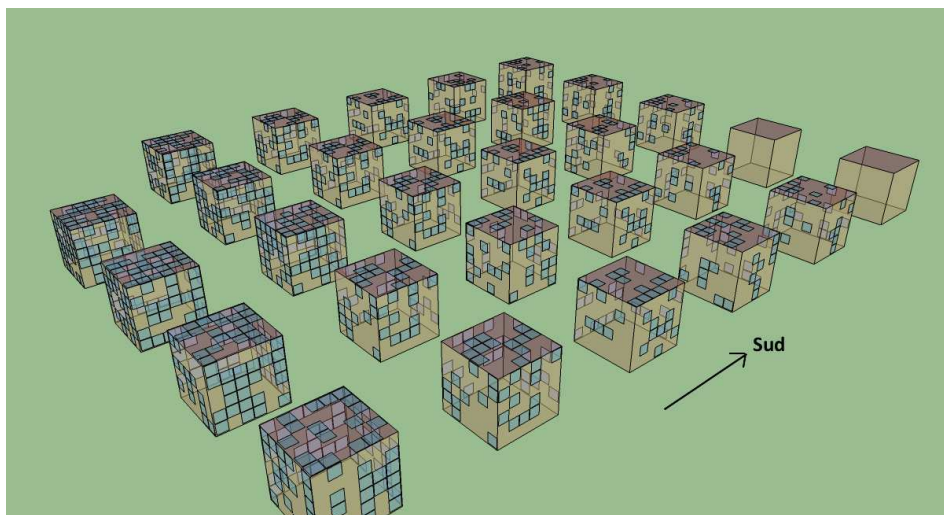


Figure 69 : Lumicube, Brest, vue Nord-Ouest

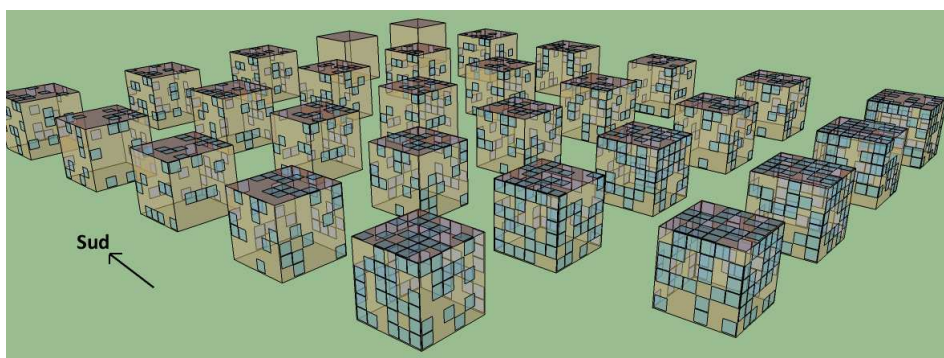


Figure 70 : Brest, vue Nord-Est

5. Bibliographie

a. Lumière et thermique

Amra C., Deumié C., *Diffusion de la lumière par les surfaces et les volumes*, Techniques de l'Ingénieur, 2009

Audibert P., *Les énergies du Soleil*, Points, Inédit Sciences, Editions du Seuil, Paris, 1978

Bertolo L. et Bourges B., *Données climatiques utilisées dans le bâtiment*, Techniques de l'Ingénieur, 1992

Bodart M., *Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment selon des critères physiques, écologiques et économiques, pour un meilleur confort visuel et thermique*, Thèse de doctorat, UCL, Avril 2002

Bouvier F., Courret G., Paule B., *Éclairage naturel*, Techniques de l'Ingénieur, 2008

Brun A., Spitz C., Würtz E., *Analyse du comportement de différents codes de calcul dans le cas de bâtiments à haute efficacité énergétique*, IXème Colloque Inter-universitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, 18-20 mai 2009, Lille , 2009

Chaabouni S., Bignon J.C., Halin G., *Supporting Ambience Design with Visual References*, MAP-CRAI-ENSAN, 2008

Chlela F., *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie*, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2008

Clarke J.A., Hand J.W., Janak M., *Daylight performance: daylight quality and control of energy consumption*, Chapter in Daylight Performance of Buildings, James and James, London, 1999

Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique,

Commissariat Général au Développement Durable, *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2010*, Octobre 2010 ; www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr, consulté le 25 août 2011

Commissariat Général au Développement Durable, *Chiffres clés du climat par partie - Édition 2011*, juin 2010 ; www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr, consulté le 25 août 2011

Courgey S., Oliva J.P., *La conception bioclimatique*, Terre Vivante, 2006

Courret G., Paule B., *Dispositifs d'éclairage naturel*, Techniques de l'ingénieur, 2010

Depecker P., Inard C., *Lois fondamentales en génie climatique*, Techniques de l'Ingénieur, 1996

Doya M., *Investigating changes in façades' energy balance according to coating optical properties*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Flory-Celini C., *Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant*, Thèse de doctorat, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008

Guarracino G., *Génie climatique dans le bâtiment - Thermique du bâtiment*, Techniques de l'Ingénieur, 2001

Gratia E., Herde (de)A., *Thermique des immeubles de bureaux*, UCL, Presses Universitaires de Louvain, Louvain, Belgique, 2006

Herde (de)A., Reiter S., *L'éclairage naturel des bâtiments*, Presses universitaires de Louvain, Louvain, 2004

Herde (de) A., Liebard A., *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, Observ'eR, 2004

Huetz-Aubert M., Klarsfeld S., Dianous (de) P., *Rayonnement thermique des matériaux semi-transparents*, Techniques de l'Ingénieur, 1995

Hurpy I., *Effets de serres : Conception Et Construction Des Serres Bioclimatiques*, Edisud/PYC-Editions, Aix-en-Provence, 1981

Izard J.L., *Soleil et architecture : contrôle d'ensoleillement par formes architecturales*, ed. Techniques de l'ingénieur, 2010

Lavigne P., Fernandez P., *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes*, Editions Le Moniteur, Paris, 2009

Lefèbvre G., *Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse*, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, 1994.

Lefèbvre G., *Comportement thermique dynamique des parois planes*, Ed. Techniques Ingénieur, 1994

Marin P., Bignon J.-C., Lequay H., *Outil évolutionnaire d'aide à la conception architecturale créative*, CAADFutures09, Montreal, Canada, 2009

Marin P., Bignon J.-C., Lequay H., *Paramètres environnementaux et mécanismes de conception évolutionnaire*, SCAN09, Nancy, France, 14 et 15 mai 2009

Mazria E., *Le guide solaire de l'énergie solaire passive*, Editions Parenthèses, Roquevaire, 1981

O'Brien W., *The development of a solar house design tool*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Peuportier B., *Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique*, Journée thématique IBPSA France, La Rochelle, 2005

Salomon T., *Du gâchis à l'intelligence. Le bon usage de l'électricité*, pp. 69-70, Les Cahiers de Global Chance (en coédition avec l'association négaWatt), n°27, janvier 2010

Tittlein P., *Environnement de simulation adapté à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*, Thèse de doctorat, Université de Savoie, 2008

Tittlein P., Wurtz E., Achard G., *Bâtiments à forte efficacité énergétique : Etat de l'art et réalisations envisagées au sein de l'Institut National de l'Energie Solaire*, IBPSA, Ile de la Réunion, 2006

Włodarczyk D., *A simple method of determining the influence of the overhang on window solar gains*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Wright, j., Mourshed M., *Geometric optimization of fenestration*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Wurtz F., Thiers S. et al., *Couplage d'un modèle thermique issu de COMFIE avec un chauffage régulé électriquement pour une simulation temporelle hybride à pas variable*, IBPSA, Moret-sur-Loing, France, 2011

Wurtz E., Riederer P., Rusaouen G., Palomo del Barrio E., Albaric M., DYNASIMUL : Projet ANR-06-PBAT-004-01, Rapport scientifique final, 2010

Météo

Crawley D., *Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings?*, ASHRAE TRANSACTIONS 104 Part 2, 1998

Struck C. and al., *On selecting weather data sets to estimate a building design's robustness to climate variations*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Programmes de simulation

Björzell N. et al., *Ida Indoor Climate And Energy*, Building Simulation 99, Kyoto, Japon, 1999

Clarke J A, *Energy simulation in building design*, Adam Hilger, Bristol and Boston, 1985

Crawley D., Hand J., Kummert M., Griffith B., *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*, Washington, DC: U S Department of Energy ; Glasgow, Scotland, UK : University of Strathclyde ; Madison, WI : University of Wisconsin, 2005 ; http://gundog.lbl.gov/dirpubs/2005/05_compare.pdf

Crawley D., Lawrie L., Pedersen C. O., Liesen R. J., Fisher D. E., Strand R. K., Taylor R. D., Buhl F., Winkelmann F., Huang J., Erdem E., *Beyond Blast and DOE-2 : EnergyPlus, a new-generation energy simulation program*, 1998

Ellis P., Torcellini P., Crawley D., *Energy design plugin, an Energyplus plugin for Sketchup*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, 2008

Ellis et al., *Simulation Of Tubular Daylighting Devices And Daylighting Shelves In Energyplus*, 2005,

Feist W., Pfluger R., Kaufmann B., Schnieders J., Kah O., *Passive House Planning Package 2004/2007*, Passive House Institute Darmstadt, 2004/2007

Judkoff R., Neymark J., *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, 1995

Judkoff, R., and J. Neymark. *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, 1995

Judkoff, R., and J. Neymark., *Home Energy Rating System Building Energy Simulation Test (HERS BESTEST)*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, 1995

Judkoff, R., Neymark, J., *IEA SHC Task 34 / ECBCS Annex 43, Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools. Annex Document*, Paris, France: International Energy Agency: Solar Heating and Cooling Programme, and Energy Conservation in Buildings and Community Systems, 2004

Judkoff R., *Testing and validation of building energy simulation tools*, NREL, 2002

Lawrence Berkeley National Laboratory, *EnergyPlus engineering reference; The reference to EnergyPlus calculations*, 881 p., 2010

Noel J., Roux J.-J., Virgone J., *Présentation et perspectives du logiciel CoDyBa*, Journée thématique SFT-IBPSA, La Rochelle, 31 mars 2005

Noel J., Roux J.-J., Schneider P. S., *CoDyBa, a design tool for buildings performance simulation*, Building Simulation 2001, Rio de Janeiro, Brazil, 2001

Pedersen C. O., Fisher D. E., Liesen R. J., Strand R. K., Taylor R. D., *EnergyPlus: the merger of Blast And DOE-2*, Proc. of Building Simulation '97 IBPSA, Prague, September 8-10, 1997

Salomon T., Mikolasek T., Peuportier.B., *Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie*, Journée thématique SFT-IBPSA, La Rochelle, 31 mars 2005

Strachan P, Kokogiannakis G and Macdonald I. (2008). "History and Development of Validation with the ESP-r Simulation Program", Building and Environment, Volume 43

Wurtz E., Thiers S., *Couplage d'un modèle thermique issu de COMFIE avec un chauffage régulé électriquement pour une simulation temporelle hybride à pas variable*, IBPSA, Moret-sur-Loing, France, 2011

b. Approches évolutionnaires

Autin B., *Les métaheuristiques en optimisation combinatoire*, Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, PARIS, 2006

Baldwin J. M., *Un nouveau facteur en évolution*, 1896

Bateson, *Lettre à Alan Sedgwick* (datée du 18 avril 1905), 1905

Box, G. E. P., *Evolutionary operation : A method for increasing industrial productivity*, Applied Statistics, 6, 81–101, 1957

Bryn I. et P. A. Schiefloe, *Atrium models for the analysis of thermal comfort and energy use*, A report of task 12 Building Energy Analysis and Design Tools for Solar Applications. Project A.3 Atrium Model Development., International Energy Agency, S. H. a. C. program, 1996

Calas G., *Optimisation par essaim de particules*, Ecole Pour l'Informatique et les Techniques Avancées, 2009

Caldas, L. G., Norford, L. K., A genetic algorithm tool for design optimization, Proceedings of ACADIA '99, Salt Lake City, USA, 1999

Caldas, L. G., Norford, L. K., Energy design optimization using a genetic algorithm, Automation in Construction Special Issue, 2000

Caldas L., *An evolution-based generative design system: using adaptation to shape architectural form*, Thèse de Doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 2001

Caldas, L.G. et L.K. Norford, *Architectural constraints in a generative design system : interpreting energy consumption levels*, Proceedings of building simulation IBPSA, Rio de Janeiro, 2001

Caldas L. G., Norford L. K., *Genetic Algorithms for Optimization of Building Envelopes and the Design and Control of HVAC Systems*, J. Sol. Energy Eng. Volume 125, Issue 3, 343 (9 pages) doi:10.1115/1.1591803, 2003

Caldas L. G., 2006, GENE_ARCH : An Evolution-Based Generative Design System for Sustainable Architecture, in Intelligent Computing in Engineering and Architecture

Christensen C. et al., *BEopt: Software for Identifying Optimal Building Designs on the Path to Zero Net Energy*, ISES 2005 Solar World Congress Orlando, Florida August 6–12, 2005

Chang, C.F., Wong, J.J., Chiou, J.P., & Su, C.T., *Robust searching hybrid differential evolution method for optimal reactive power planning in large-scale distribution systems*, Electric Power Systems Research, 77(5-6), 430–437, 2007

Collette Y., Siarry P., *Optimisation multiobjectif*, 2002

- Crawley D., *Automated multivariate optimization tool for energy analysis*, Simbuild, 2006
- Eberhart, R. C., and Kennedy, J., *A new optimizer using particle swarm theory*, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 39-43. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995
- Fasoulaki, *Integrated design : a generative multi-performative design approach*, Thèse de doctorat, MIT, 2008
- Feigenbaum E. A., Feldman J., *Computers and Thought*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1963
- Feoktistov V., *Differential Evolution: In Search of Solutions*, Springer, 2006
- Flager, F. et al, 2008. *Multidisciplinary Process Integration and Design Optimization of a Classroom Building*, ITcon Vol. 0, Stanford University, 2008
- Fogel L.J., Owens A.J., Walsh M.J., *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, NewYork, JohnWiley, 1966
- Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989
- Hansen N., Ostermeier A., Gawelczyk A., *On the adaptation of arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies : the generating set adaptation*, in Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms, pp 57–64, Morgan Kaufmann, 1995
- Hansen N., Müller S., Koumoutsakos P., *Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES)*, Evolution Computation, 11(1), 2003
- Hansen N., Ostermeier A., *Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies*, Evolutionary Computation, 9(2) : p159–195, 2001
- Hegron G., *Conception architecturale et modélisation déclarative*, CERMA, 2002
- Holland J.H. , *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975
- Hooke R., Jeeves T. A., *Direct search solution of numerical and statistical problems*, Journal of the Association for Computing Machinery, 8, 212–229, 1961
- Jacquetot G., *Méthode générique pour l'optimisation d'agencement géométrique et fonctionnel*, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 2010
- Jakubiec J. A., Reinhart C. F., *DIVA-FOR-RHINO 2.0: Environmental parametric modeling in Rhinoceros/Grasshopper using Radiance, Daysim and EnergyPlus*, submitted to Building Simulation 2011, Sydney, Australia, 2011

Koza J.R., *Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs*, MIT Press, Massachusetts, 1994

Kämpf J., Robinson D., Wetter M., *A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus*, Journal of Building Performance Simulation, 3(2):103-120, 2010

Kayo G., *Application Multi-Objective Genetic Algorithm For Optimal Design Method Of Distributed Energy System*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Kayo G., *Study on optimal energy system design for apartment house using genetic algorithms*, proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Lagios K, J Niemasz and C F Reinhart, *animated Building Performance Simulation (ABPS) - Linking Rhinoceros/Grasshopper with Radiance/Daysim*, Proceedings of SimBuild 2010, New York City, 2010

Lamarck J.B., *Philosophie zoologique*, 1809

Luersen M.A., *GBNM : Un Algorithme d'Optimisation par Recherche Directe - Application à la Conception de Monopalmes de Nage*, Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, 2004

Marin P., *Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010

Marsault X., *État de l'art des méthodes informatiques évolutives*, Projet ANR, Ec-Co-Gen, MAP-ARIA, 2011

Moscato P., *On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts : Towards Memetic Algorithms*, Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826, 1989

Mühlenbein, H. Paaß G., *From recombination of genes to the estimation of distribution I. Binary parameters*, Lectures Notes in Computer Science 1141: Parallel Problem Solving from Nature, tome PPSN IV, pages 178--187, 1996

Nelder J. A., Mead R., *A simplex method for function minimization*, The Computer Journal, 7, 308–313, 1965

OPTISOL, Project PREBAT, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Centre Energétique et Procédés – Mines ParisTech, Girus, Ademe, 2008

Ooka R. and al., *Assisted calibration in building simulation—algorithm description and case studies*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Palonen M., *A genetic algorithm for optimization of building envelope and HVAC system parameters*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Pernodet F., Lahmidi H., Michel P., *Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment*, IBPSA Conference, Glasgow, Ecosse, July 27-30, 2009

Pernodet, *Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment*, Proceedings of building simulation IBPSA, Glasgow, 2009

Rechenberg I., *Evolution strategie : Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien des Biologischen Evolution*. Fromman-Hozlboog Verlag, Stuttgart, 1972

Reinhart C. F., *Lightswitch-2002: A Model for Manual and Automated Control of Electric Lighting and Blinds*, Solar Energy 77 (1): 15-28, 2004

Reinhart C. F., Lagios K., Niemasz J., Jakubiec A., *DIVA for Rhino Version 2.0.*, 2011, <http://www.diva-for-rhino.com/>

Powell M. J. D. , *An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives*, The Computer Journal, 7, 155–162, 1964

Rennard J.P., *Introduction aux Algorithmes Génétiques*, www.rennard.org, avril 2000, consulté le 13 août 2011

Rutten D., *Evolutionary Principles applied to Problem Solving*, <http://www.grasshopper3d.com>, mis en ligne le 25 sept. 2010, consulté le 13 août 2011

Spendley W., Hext G. R., Himsworth F. R., *Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation*, Technometrics, 4, 441–461, 1962

Storn R., Price K., *Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces*, 1997

Torres S.L., Sakamoto Y., *Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm*, Proceedings of building simulation IBPSA, BEIJING, 2007

Turkkan, N., 2006. GenetikSolver V4.1, Real-Coded Genetic Algorithm, Algorithm proposed by Moncton University, Canada (<http://www0.umoncton.ca/turk/logic.htm>)

Vitte T., *Le froid solaire pas dessiccation appliqué au bâtiment : proposition d'une stratégie de régulation du système*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2007

Ward, G.J., *The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System*, Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques, Orlando, 1994

Wetter M., Design optimization with GenOpt, Building Energy Simulation, User News. Lawrence Berkeley National Laboratory, Vol. 21, Sept./Oct. 2000, 2000

Wetter M., Wright J., *A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization*, Elsevier, 2004

Wetter M., *BuildOpt : a new building energy simulation program that is built on smooth models*, Technical Report LBNL-54657, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2004

Wetter M., *GenOpt 3.0 : Users's manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010

Wolpert D.H., Macready W.G., *No Free Lunch Theorems for Search*, Technical Report SFI-TR-95-02-010, Santa Fe Institute, 1995

Zhang Y., *'Parallel' EnergyPlus and the development of a parametric analysis tool*, Proceedings of IBPSA, 27–30 July 2009, Glasgow, Ecosse, 2009

c. Quelques sources Internet utilisées

www.agence-nationale-recherche.fr

<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm

<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>

www.crai.archi.fr

www.daysim.com

<http://www.diva-for-rhino.com/index.html>

<http://eccogen.crai.archi.fr/wordpress/>

<http://energyplus.helpserve.com> et <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>.

www.energieplus-lesite.be

www.fiabitat.com

www.global-chance.org

www.ibpsa.org

<http://www.iea-shc.org/>

www.lri.fr/~hansen/cmaesintro.html

<http://meteonorm.com/>

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/projets/irc/daysim.html>

www.oikos-ecoconstruction.com

<http://openstudio.nrel.gov/>

www.radsite.lbl.gov/radiance/

<http://rt2012-leguide.com>

www.sketchup.google.com

Table des illustrations

| | |
|---|----|
| Figure 1: Guide de l'énergie solaire passive. (Mazria, 1981)..... | 18 |
| Figure 2 : ensemble du spectre électro-magnétique | 19 |
| Figure 3 : position relative du soleil au cours d'une année..... | 19 |
| Figure 4 : illustration de 4 grandeurs photométriques (www.energieplus-lesite.be) | 20 |
| Figure 6 : photométrie et états de brillance (Paule et Courret, 2010)..... | 21 |
| Figure 5 : Distribution spectrale normalisée de la lumière du jour et de ses composantes par ciel serein (Paule et Courret, 2010) | 21 |
| Figure 7 : Deux modèles de ciel (source : Tutorial de DaySim 3.0) | 22 |
| Figure 8 : Cheminée de lumière réalisée à Genève, en Suisse : FLJ de 3% (Paule et Courret, 2010).... | 23 |
| Figure 9 : Schéma de fonctionnement d'un lightshelf (Paule et Courret, 2010)..... | 23 |
| Figure 10 : Différents types de protections solaires extérieures (Izard, 2010)..... | 24 |
| Figure 11 : enveloppe et performances énergétique (Lefèbre, 1994) | 27 |
| Figure 12 : Mazria, 1981..... | 30 |
| Figure 13 : échanges radiatifs entre un bâtiment et son environnement et dans les volumes intérieurs (http://www.energieplus-lesite.be) | 31 |
| Figure 14 : Besoins énergétiques du bâtiment..... | 33 |
| Figure 15 : Classification générale des méthodes d'optimisation (Jacquenot, 2010, d'après Collette et Starry, 2002) | 39 |
| Figure 16 : Croisements et mutations (Rutten, 2010)..... | 41 |
| Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un AG (Jacquenot, 2010) | 43 |
| Figure 18 : Minima locaux et minimum global d'une fonction à une variable (Luersen, 2004) | 47 |
| Figure 19 : Fonction multimodale à deux variables (Luersen, 2004) | 47 |
| Figure 20 : aperçu de la barre d'outil OpenStudio dans Google SketchUp..... | 54 |
| Figure 21 : principes de base d'EnergyPlus | 55 |
| Figure 22 : interface IDFEditor | 56 |
| Figure 23 : principe d'héritage | 57 |
| Figure 24 : IDFEditor, zones et surfaces | 57 |
| Figure 25 : IDFEditor, matériaux..... | 59 |
| Figure 26 : IDFEditor, masques solaires | 61 |
| Figure 27 : réflexion du bâtiment sur son environnement extérieur..... | 61 |
| Figure 28 : réflexion du rayonnement extérieur | 62 |
| Figure 29 : réflexion spéculaire | 62 |
| Figure 30 : ombres portées | 62 |
| Figure 31 : Prise en compte de l'éclairage naturel (Paule et al., 2010)..... | 63 |
| Figure 32 : IDFEditor, classe "Daylighting" | 64 |
| Figure 33 : IDFEditor, dispositifs de captage solaire | 65 |
| Figure 34 : Protections solaires sous EnergyPlus | 65 |
| Figure 35 : IDFEditor, convection de surface | 66 |
| Figure 36 : IDFEditor, mouvements d'air - méthodes simplifiées | 67 |
| Figure 37 : IDFEditor, <i>outputs</i> | 70 |
| Figure 38 : Variables continues et discrètes..... | 72 |
| Figure 39 : Outils de simulation pour GenOpt | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figure 40 : Banc de poissons (http://bellacha.canalblog.com) | 74 |
| Figure 42 : Schéma simplifié de l'interaction des 4 fichiers de GenOpt..... | 77 |
| Figure 41 : interface de GenOpt | 77 |
| Figure 43 : Schéma de principe de l'environnement logiciel | 78 |
| Figure 44 : Interface de GenOpt durant l'optimisation | 84 |
| Figure 45 : structure du fichier de sortie de GenOpt | 84 |
| Figure 46 : interface du programme de post-traitement..... | 85 |
| Figure 47 : "chaîne" de modélisation | 86 |
| Figure 48 : série de test 1 - Exemples de variation des dimensions des baies (vue Sud)..... | 98 |
| Figure 49 : Test 1, variante 1 | 101 |
| Figure 50 : Modèle avec loggia..... | 102 |
| Figure 51 : Exemples avec diverses orientations | 109 |
| Figure 52 : Principe du changement de gabarit | 109 |
| Figure 53 : Solutions < 30 kWh/m ² .an | 117 |
| Figure 54 : variété de solutions | 118 |
| Figure 55 : Lumicube et carte d'éclairement..... | 127 |
| Figure 56 : Maillage du lumicube | 128 |
| Figure 57 : Lumicube, Brest, vue Sud-Est | 129 |
| Figure 58 : Lumicube, Brest, vue Nord-Ouest | 129 |
| Figure 59 : Brest, vue Nord-Est..... | 129 |