

Rapport de PR

Réalisation d'un outil d'évaluation de la radiosité

Thibaut VERMEULEN
GSU05

Encadrement : Benoît Beckers et Eduard Antaluca
Dans le cadre du parcours recherche

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 1 |
| 1 Transfert radiatif et méthode de la radiosité : principe et méthodes de modélisation | 2 |
| 1.1 Transfert radiatif | 2 |
| 1.2 Méthode de la radiosité | 4 |
| 1.2.1 Principe et équations | 5 |
| 1.2.2 Discrétisation du problème | 5 |
| 1.3 Méthodes numériques d'évaluation de la radiosité | 7 |
| 1.3.1 Monte Carlo sur un échantillonnage stratifié associé à la radiosité | 7 |
| 1.3.2 Calcul analytique associé à la radiosité | 8 |
| 2 Création d'un modèle simple pour l'évaluation de la radiosité | 10 |
| 2.1 Cahier des charges et choix constitutifs | 10 |
| 2.2 Définition du modèle Streetrad | 11 |
| 2.2.1 Géométrie | 11 |
| 2.2.2 Paramètres | 12 |
| 2.2.3 Problématiques associées | 12 |
| 3 Implantation du modèle | 14 |
| 3.1 Organisation générale de l'application | 14 |
| 3.2 Méthodes de calcul | 15 |
| 3.2.1 Maillage | 15 |
| 3.2.2 Facteur de Forme | 16 |
| 3.2.3 Calcul de la partie du mur éclairée | 20 |
| 3.2.4 Calcul du rayonnement réfléchi par le mur extérieur sur chaque maille de la pièce | 20 |
| 3.2.5 Application des équations de la radiosité | 21 |
| 3.2.6 Capteurs | 21 |
| 3.3 Essai de simulation | 22 |
| 3.3.1 Paramètres en entrée | 22 |
| 3.3.2 Résultats | 23 |
| 4 Perspectives | 27 |
| 4.1 Amélioration du modèle | 27 |
| 4.2 Amélioration de la prise en main | 27 |
| Conclusion | 28 |
| Annexe : code du modèle Streetrad | 29 |
| .1 Fonction mère : Calcul global | 30 |
| .2 Fonction maillage | 32 |
| .3 Fonction calculff (calcul des facteurs de forme) | 37 |
| .4 Fonction C13 (formule analytique de facteur de forme) | 52 |
| .5 Fonction C14 (formule analytique de facteur de forme) | 52 |
| .6 Fonction C15 (formule analytique de facteur de forme) | 53 |

| | | |
|-----|---|----|
| .7 | Fonction calculmur (calcul de la partie éclairée du mur) | 53 |
| .8 | Fonction sirrsimple (calcul de la puissance du rayonnement direct du soleil) | 54 |
| .9 | Fonction calculsourcehauteur (calcul de la réflexion du mur extérieur sur les mailles des la pièce) | 54 |
| .10 | Fonction irphauteur (test d'intersection d'un rayon avec une maille) | 55 |
| .11 | Fonction calculrad (résolution de l'équation de radiosité) | 56 |
| .12 | Fonction capteurpointanalytique | 56 |
| .13 | Fonction B3 (formule analytique de facteur de forme pour le capteur) | 62 |
| .14 | Fonction B4 (formule analytique de facteur de forme pour le capteur) | 62 |
| .15 | Fonction plotage (traçage des graphiques) | 62 |

Bibliographie **65**

Introduction

Dans un milieu urbain, l'impact du soleil est primordial. Le flux radiatif qu'il émet associé aux positions qu'il prend dans le ciel a de tout temps été un critère important dans les architectures locales à travers le monde. De fait, on connaît le soleil pour deux effets vitaux : son rayonnement énergétique qui nous chauffe, et dont on essaiera de profiter au maximum en hiver, et de se protéger en été ; son rayonnement lumineux – rayonnement énergétique dans une bande particulière de longueurs d'onde – qui nous est également nécessaire, mais peut aussi éblouir.

Prévoir l'effet du soleil a de nombreux intérêts, que ce soit pour garantir une lumière suffisante en ville ou à travers certaines fenêtres, ou pour calculer un gisement solaire pour des panneaux thermiques ou photovoltaïques. Et au-delà des aspects purement énergétiques, la modélisation du rayonnement intéresse depuis quelques temps non seulement ceux qui travaillent à l'échelle de la ville, mais aussi dans le secteur de l'infographie, puisque le réalisme d'un rendu et, plus généralement, la lisibilité d'une image, dépend essentiellement de la manière dont la lumière est prise en compte.

Dans ce rapport sont d'abord exposées quelques notions de bases en transfert radiatif, ainsi que la manière de les calculer en utilisant la méthode de la radiosité (chapitre 1), puis le cas d'étude choisi pour être simulé numériquement dans l'optique de pouvoir être utilisé par des étudiants de GSU est présenté (chapitre 2), enfin une description de l'implantation sous Matlab® est décrite (chapitre 3).

Chapitre 1

Transfert radiatif et méthode de la radiosité : principe et méthodes de modélisation

Ce chapitre a pour objectif de présenter succinctement ce qu'est l'énergie radiative puis comment il est possible de la calculer en utilisant la théorie de la radiosité et les méthodes numériques associées. La terminologie concernant la radiosité sera définie ici pour l'ensemble du rapport en empruntant celle utilisée par F.X. Sillon et C. Puech dans leur ouvrage [SP94].

1.1 Transfert radiatif

Définition

Le transfert radiatif est l'énergie échangée entre deux corps sous forme d'ondes électromagnétiques. Le flux de puissance (en W/m^2) émis dépend de plusieurs paramètres :

- La température : plus elle est élevée, plus le corps émettra d'énergie par rayonnement ;
- La longueur d'onde : l'émission se fait selon un spectre de longueurs d'onde. Ce spectre dépend notamment de la température du corps. On appelle corps noir un objet dont le spectre d'émission ne dépend que de la température ;
- La direction d'émission : le rayonnement émis est plus important perpendiculairement à la surface d'émission ;
- L'émissivité : valeur comprise entre 0 et 1, elle représente l'énergie rayonnée par un corps par rapport à l'énergie rayonné par un corps noir (cas idéal) à la même température.

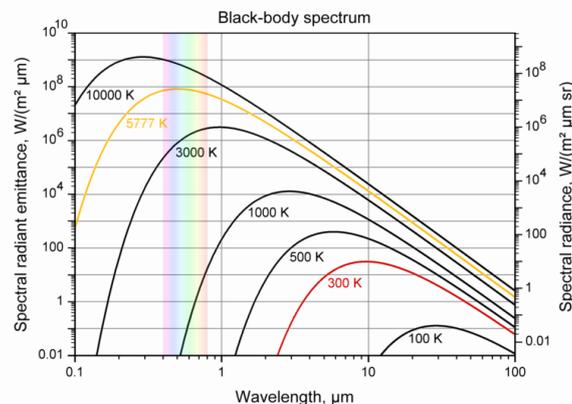


FIGURE 1.1 – Intensité de flux en fonction du spectre émis et de la température d'un corps noir (source : Sch sur wikipedia.org)

Comportement des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques ont des comportements propres devant être pris en compte dans le calcul de rayonnement :

- propagation : une onde électromagnétique dans un milieu homogène et isotrope (dont les propriétés ne varient pas en fonction de la direction de l'onde) se propage en ligne droite ;
- réflexion : lorsqu'une onde rencontre un objet, une partie de l'énergie est réfléchie, c'est à dire qu'elle est renvoyée dans une ou plusieurs directions à partir du point d'impact sur l'objet. La réflexion d'un rayon électromagnétique peut s'accompagner d'une modification du spectre électromagnétique et d'une variation entre l'énergie incidente et l'énergie réfléchie ;
- réfraction : lorsqu'une onde change d'un milieu de propagation pour un autre milieu de propriétés différentes (en passant de l'air au verre par exemple), elle est réfractée, c'est à dire que sa direction est déviée. C'est l'effet de déformation que l'on peut constater en regardant à travers un verre.

Rayonnement courtes longueurs d'ondes et grandes longueurs d'ondes

Le flux de rayonnement émis sur l'ensemble du spectre électromagnétique par notre environnement est généralement décomposé en deux bandes de longueurs d'ondes [Bou09] :

- d'une part ce qui provient du soleil, du ciel et, dans une moindre mesure, de l'ensemble des sources lumineuses, et qui émet dans le domaine des courtes longueurs d'ondes ($0,38 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$), notamment dans le spectre du visible ($0,38 \mu\text{m}$ à $0,76 \mu\text{m}$) ;
- l'ensemble des corps terrestres, de faible température (environ 25°C ou 300K), qui émettent dans le domaine des infrarouges, de grandes longueurs d'onde ($3 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$).

Les transferts radiatifs en ondes courtes peuvent être calculés statiquement, à un instant donné, à partir de sources lumineuses fixées : il suffit pour obtenir la valeur des flux échangés de modéliser le comportement du rayonnement (réflexion, réfraction, ...) en provenance des sources connues. Les transferts radiatifs dans le domaine des grandes ondes, en revanche, ne peuvent être appréhendés que dynamiquement car les corps émetteurs et récepteurs sont les mêmes : une paroi émettra un flux de rayonnement dans les infrarouge du fait de sa température, et recevra également de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge des autres parois, ce qui augmentera sa température, et donc le flux émis...

Par chance, le domaine des courtes longueurs d'onde et grandes longueurs d'onde sont assez bien délimités avec une séparation aux alentours de $3\mu\text{m}$, l'énergie radiative présente dans un environnement moyen toutes sources confondues étant très faible pour cette longueur d'onde. Ceci permet de séparer le calcul des échanges radiatifs en deux calculs distincts additionnables.

Réflexion diffuse, réflexion spéculaire

La réflexion des ondes électromagnétiques lors d'une intersection avec une paroi opaque se fait selon deux composantes :

- une composante spéculaire : les rayons qui touchent une surface dans une certaine direction sont renvoyés avec un angle symétrique par rapport à la normale à la surface touchée au point de contact. Ce type de réflexion est typiquement celui des miroirs et est particulièrement important en imagerie pour les reflets des sources lumineuses ;
- une composante diffuse : les rayons qui touchent une surface sont renvoyés dans toutes les directions. Ce type de réflexion apparaît dès que la surface présente une rugosité (la surface est alors un ensemble de surfaces microscopiques dirigées dans des directions différentes, impliquant des rayons réfléchis dans des directions multiples).

Bon nombre de surfaces ont une réflexion diffuse directionnelle, c'est à dire une réflexion dans toutes les directions, mais avec une composante plus importante dans certaines directions.

Grandeurs utilisées

Deux approches existent dans le calcul des transferts radiatifs : les grandeurs utilisées peuvent être intégrées sur l'ensemble du spectre électromagnétiques du rayonnement, ou bien être intégrées sur la bande de longueurs d'onde visibles par l'homme, en tenant compte de la sensibilité de l'oeil. Ainsi, il existe deux séries de variables analogues, l'une dans le cas général, l'autre plus spécifiquement adaptée à l'étude de la lumière pour l'homme.

Quelques variables générales employées :

| | |
|-----------------------------|------------------------|
| Flux radiatif (W) | Flux lumineux (lm) |
| Radiosité (W/m^2 émis) | Éclairement (lux) |
| Irradiance (W/m^2 reçus) | (ou illuminance) |
| Radiance ($W/(m^2.sr)$) | Luminance (cd/m^2) |

Par la suite de ce rapport, nous ne nous intéresseront qu'aux grandeurs générales. Les grandeurs associées à la lumière sont généralement utilisées en imagerie ou dans le bâtiment pour évaluer l'accès à la lumière dans une construction.

1.2 Méthode de la radiosité

Il existe de nombreuses méthodes permettant de modéliser les échanges radiatifs. Chacune a son domaine d'application, ses qualités et ses défauts. En introduction à ce chapitre, deux familles très représentées dans la littératures sont succinctement présentées : le lancer de rayon et la méthode de la radiosité.

La méthode de lancer de rayons consiste à suivre le chemin emprunté par des rayons électromagnétiques. Le calcul débute au niveau de l'oeil de l'observateur d'une scène, d'où des rayons sont lancés dans un ensemble de directions (généralement aléatoires). Un test d'intersection est ensuite effectué entre chacun de ces rayons et les objets de la scène, puis des nouveaux lancers de rayons sont effectués aux points d'impacts des rayons, en tenant compte des propriétés des matériaux rencontrés (énergie réfléchie, direction de réflexion, etc.). Cette méthode permet de prendre en compte les effets de réfraction de la lumière (par exemple dans le cas d'une scène comprenant verres et bouteilles), le comportement d'un rayon au point d'intersection dépendant alors des propriétés de réfraction du matériau rencontré. Cette méthode est également particulièrement pratique pour le calcul des réflexions spéculaires pour lesquelles, encore une fois, il est possible de connaître le comportement du rayon. En revanche, elle n'est pas adaptée à un calcul des réflexions diffuses, celles-ci nécessitant un temps de calcul important du fait du nombre de rayons à lancer (dans toutes les directions) à chaque nouvelle intersection. Enfin, la méthode du lancer de rayon est dite dépendante de l'emplacement de l'utilisateur, car les rayons sont envoyés à partir de l'oeil. Par conséquent, à chaque changement de position de l'observateur, le calcul est entièrement à recommencer.

Une seconde méthode –qui sera développée plus en avant dans ce rapport– repose sur le calcul de la radiosité (flux surfacique émis par chaque surface (W/m^2)). Celle-ci consiste à évaluer l'effet des réflexions diffuses uniquement en résolvant un système d'équations impliquant tous les objets d'une scène. La prise en compte des réflexions spéculaires n'est pas directement possible par cette méthode. Celle-ci est en revanche indépendante de la position de l'observateur éventuel : le calcul est général sur toute la scène, avec en sortie le flux radiatif émis sur chaque surface élémentaire de la scène.

Les logiciels de rendu 3D utilisent généralement à minima des lancers de rayons probabilistes et déterministes (c'est le cas du logiciel Radiance®), ou bien une méthode hybride lancer de rayon-radiosité (c'est le cas de Autodesk 3D Studio Max®). Dans le cas de notre étude, nous prendrons l'hypothèse de parois n'effectuant que de la réflexion diffuse, avec pour objectif d'avoir un résultat de puissance émise sur chacune des mailles de la scène; nous utiliserons pour ce faire la méthode de la radiosité. Cette dernière est de plus indépendante de la position de l'observateur, nécessitant de ce fait un unique calcul pour un résultat global (il faudrait pour le lancer de rayon effectuer un lancer de base par point d'intérêt, ce qui prendrait un temps de calcul considérable pour connaître les flux émis/reçus sur chaque surface d'une scène). Une TX précédente à *a fortiori* déjà porté sur un sujet similaire en utilisant une méthode de lancer de rayons [Dub10].

1.2.1 Principe et équations

Avant de passer à l'équation de la radiosité à proprement parler, il est important d'introduire la notion d'angle solide de laquelle elle dépend. L'angle solide est l'extension en trois dimensions de la notion d'angle entre deux droites. Calculé à partir d'un point –comme en deux dimensions– il vaut le rapport entre la surface projeté d'un objet sur une sphère centrée sur le point d'intérêt, sur le rayon au carré de la sphère (voir figure). Son unité est le stéradian (*sr*) et un angle solide représentant l'ensemble de la sphère de projection d'un point vaut $4\pi sr$.

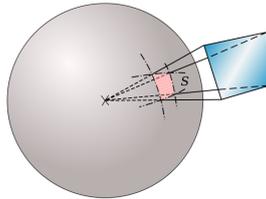


FIGURE 1.2 – Angle solide (Christophe Dang Ngoc Chan sur wikipedia.org)

La méthode de la radiosité repose sur la résolution de l'équation introduite par Kajiyama [Kaj86], écrite dans l'ouvrage de Sillion et Puech [SP94] sous la forme :

$$B(x) = E(x) + \int_{\Omega} L_i(x, \theta, \phi) \cos\theta d\omega$$

avec :

| | |
|------------------------|--|
| $B(x)$ | la puissance émise au point x de l'espace (W/m^2) |
| $E(x)$ | la puissance émise initialement par le point x (terme source, en W/m^2) |
| $L_i(x, \theta, \phi)$ | l'énergie incidente au point x depuis l'angle solide déterminé par les angles θ et ϕ . |
| Ω | l'ensemble des directions (θ, ϕ) de la demi-sphère |
| $d\omega$ | l'angle solide élémentaire (<i>sr</i>) |

Le terme $\int_{\Omega} L_i(x, \theta, \phi) \cos\theta d\omega$ présent dans le second terme de l'équation représente le flux réfléchi à partir de la somme des flux reçu par le point. De ce fait, tous les points de l'espace sont interdépendants. En même temps, puisque chaque point possède des angles solides différents vers l'ensemble des objets d'une scène, il vient que la radiosité est différente en tout point de la scène. Le passage à une résolution numérique de l'équation de radiosité nécessite dès lors de discrétiser le problème afin d'arriver à une écriture matricielle d'un système d'équations à résoudre.

1.2.2 Discrétisation du problème

La première étape dans le traitement numérique du calcul de la radiosité est le maillage de la scène. Chacune des mailles représente un élément de surface élémentaire sur lequel la puissance reçue et émise sera considérée constante.

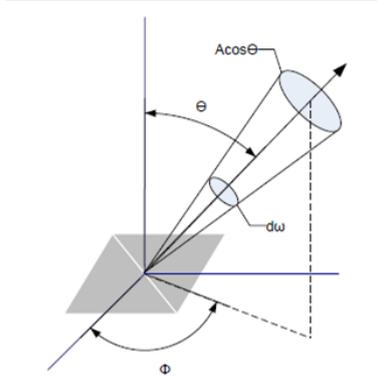


FIGURE 1.3 – Angle solide selon la direction (θ, Φ) (source : wikipedia.org)

L'angle solide à partir d'un point vers une surface se ramène alors à la notion de facteur de forme ou facteur de vue, qui représente la fraction du flux émis par une surface source atteignant la surface cible. Le facteur de forme tient compte de la manière dont sont disposées les surfaces ainsi que de la visibilité entre celles-ci. Pour deux surfaces P_i et P_j , d'aires respectives A_i et A_j , le facteur de forme de la maille i vers la maille j se calcule par la relation :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{x \in P_i} \int_{y \in P_j} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} V(x, y) dy dx$$

Avec :

- P_i et P_j la maille source et la maille cible
- A_i l'aire de la maille P_i
- θ_1 (resp. θ_2) l'angle entre la normale à la maille P_i au point x (resp. P_j au point y) et la droite passant par x et y
- r la longueur du segment entre les points x et y
- $V(x, y)$ la fonction de visibilité valant 1 si x et y se voient, 0 sinon.

A noter que le facteur de forme de la maille P_i à la maille P_j , est lié au facteur de forme de la maille P_j à la maille P_i par la relation $F_{ij}A_i = F_{ji}A_j$, ce qui donne le résultat intéressant pour deux mailles d'aires égales $F_{ij} = F_{ji}$.

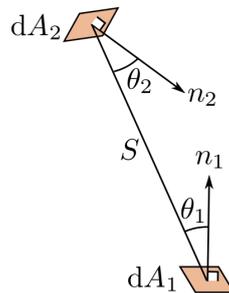


FIGURE 1.4 – Facteur de forme entre deux surfaces différentielles (source : Pmg sur wikipedia.org)

L'équation de la radiosité du précédent paragraphe appliquée au problème fraîchement discrétisé ressemble à présent à :

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j$$

avec :

- B_i la puissance émise par la maille P_i ou radiosité de la maille P_i (W/m^2). Ce terme prend en compte à la fois le terme initialement émis et l'effet des réflexions
- E_i la puissance initialement émise par la maille P_i
- ρ_i le coefficient de réflexion de la maille P_i , c'est à dire la fraction de l'énergie reçue que renvoie la maille (valeur sans unité comprise entre 0 et 1).
- N le nombre de mailles dont se compose la scène
- F_{ij} le facteur de forme entre la maille P_i et la maille P_j .

La résolution de l'équation de radiosité nécessite préalablement de connaître le terme source E_i (connu si la source émet directement ou calculée si par exemple la réflexion issue de la réflexion du flux solaire incident en fait partie), la réflexivité ρ_i qui est généralement connue car l'une des caractéristiques des matériaux, et la matrice des facteurs de forme F_{ij} , nécessairement calculée car dépendante de la scène étudiée.

1.3 Méthodes numériques d'évaluation de la radiosité

Le principal problème pour l'obtention de la solution de l'équation de radiosité réside dans le calcul de la matrice des facteurs de forme, car c'est celui qui nécessite le plus de temps de calcul. En effet, une fois obtenue la matrice des facteurs de forme pour chaque maille de la scène vers toutes les autres mailles, l'obtention des autres termes est assez directe. L'inversion de la matrice dans la résolution du calcul est l'autre grosse étape. Pour les dimensions du problème évalué dans ce rapport (maximum 5000 mailles), l'inversion de la matrice ne demande jamais une fraction du temps de calcul total suffisamment conséquente pour justifier l'utilisation de méthodes itératives. A noter cependant que la matrice à inverser est à diagonale strictement dominante, rendant une méthode itérative de Gauss-Seidel nécessairement convergente [SP94]. Ceci peut être utile pour des cas comportant un nombre de mailles plus important, pour lesquels l'inversion directe s'avère très coûteuse. Un autre problème qui ne sera pas développé dans ce rapport car il n'a pas été rencontré dans le projet, est le stockage de la matrice des facteurs de forme, dont le nombre vaut le carré du nombre de mailles.

Il importe désormais de se pencher plus en avant sur le calcul de la matrice des facteurs de forme. Il existe différentes méthodes d'évaluation des facteurs de forme, dont les résultats varieront beaucoup au niveau de leur précision, du temps de calcul nécessaire, et de la souplesse dans l'adaptation à des scènes compliquées comportant des obstacles. Les deux méthodes utilisées au cours de la PR sont présentées ici succinctement avec leurs avantages et inconvénients. D'autres méthodes utilisées en infographie ou dans le calcul des transferts radiatifs en milieu urbain comme celles basées sur le principe de l'analogie de Nusselt [Nus28] (avec une projection sur un héli-cube [SP94] ou sur une hémisphère [BMB11]) ou les méthodes semi-analytiques par intégration de contour [Gro99] ne seront pas présentées dans ce rapport.

1.3.1 Monte Carlo sur un échantillonnage stratifié associé à la radiosité

Monte Carlo

Monte Carlo est l'appellation d'un ensemble de méthodes basées sur une approche probabiliste (le nom se référant aux jeux de ladite ville). Ce type de calcul a de nombreuses utilisations, dont l'une des principales, utilisée en physique, est l'approximation d'intégrales.

Pour expliquer le fonctionnement de la méthode de Monte Carlo, appliquons son fonctionnement à notre étude. Le facteur de forme à partir d'une maille peut être approché par l'angle solide au point central de la surface différentielle. Cet angle solide présente pour son calcul plusieurs difficultés – notamment la forme et l'inclinaison des mailles ainsi que la visibilité des mailles entre elles – faisant qu'il n'est que très rarement possible de connaître sa valeur par le calcul analytique.

Une méthode de Monte Carlo quelque peu brutale consiste à lancer des rayons aléatoirement dans la demi-sphère autour du vecteur normal de la maille source, et de d'évaluer pour chaque rayon l'intersection avec chaque maille. Un compteur somme le nombre de fois qu'un rayon touche une maille cible. Si un rayon touche plusieurs mailles, seul le compteur de celle dont la distance avec la maille source est la plus faible est incrémenté. Le facteur de forme d'une maille P_i à une maille P_j est considéré comme le rapport du nombre de rayons ayant touché la maille P_j sur le nombre de rayons lancés.

Dans le cas de notre problème, la complexité algorithmique du calcul de la matrice des facteurs de forme est d'ordre $O(n^2)$ sur le nombre de mailles + $O(m)$ sur le nombre de rayons tirés, soit globalement un ordre $O(n^3)$, impliquant des temps de calcul très rapidement important.

Stratification des échantillons pour l'application d'une méthode de Monte Carlo

Afin de réduire ce temps de calcul, les leviers sont soit le nombre de mailles du domaine, soit le nombre de rayons tirés par maille. Pour ce qui est du nombre de mailles, il abaisserait la précision de la solution, et un nombre de maille est toujours nécessaire pour espérer avoir une certaine pertinence dans les résultats. Il ne reste plus alors qu'à rendre possible de limiter le nombre de rayons tirés, tout en gardant une pertinence sur les rayons aléatoirement tirés.

Pour ce faire, on fait appel à un échantillonnage stratifié de la demi-sphère représentant les directions possible du tir de rayon, en divisant cette demi sphère en autant d'échantillons que de rayons lancés. Tous les échantillons représentent la même valeur élémentaire de facteur de forme. Dès lors, le lancer se fait aléatoirement pour chacun des rayons dans la surface élémentaire de chacun des échantillons, permettant de garder l'intérêt d'une méthode pseudo-aléatoire avec un nombre limité de rayons. Des méthodes permettent actuellement d'effectuer numériquement une division de la demi-sphère de manière à avoir des échantillons de facteurs de forme égaux [BB].

Avantages et inconvénients

La méthode de Monte Carlo appliqué au calcul des facteurs de forme permet d'avoir un calcul souple, permettant d'évaluer les facteurs de forme quelque soit la scène. En effet, la question de la visibilité, un des principaux problèmes dans le calcul des facteurs de forme, est gérée directement.

L'inconvénient majeur d'une telle méthode est son temps de calcul, qui sera nécessairement très important car très dépendant du nombre de mailles et de rayons lancés.

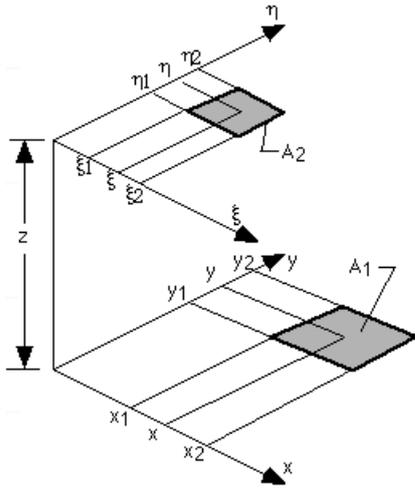
L'autre inconvénient d'une méthode probabiliste est sa précision, qu'il est néanmoins possible d'évaluer par un calcul reproduit sur un même échantillon. L'incertitude sur les mesures est alors calculée empiriquement.

1.3.2 Calcul analytique associé à la radiosité

Réaliser le calcul analytique d'un facteur de forme revient à utiliser une formule connue des facteurs de forme pour des cas types. Ces formules ont déjà fait l'objet de recherches, et un catalogue des formule analytiques des facteurs de forme est disponible [SH01]. Du fait de la complexité du calcul intégral définissant les facteurs de forme, les formules analytiques donnant des résultats exacts ou presque sont peu nombreuses.

Il est également possible pour certaines dispositions de mailles de calculer le facteur de forme par combinaison de facteurs de forme élémentaires [SP94]. Cette méthode n'est pas développées ici mais nous y reviendront au paragraphe 3.2.2, la méthode analytique ayant été retenue pour l'implantation de notre projet.

En termes d'avantages et d'inconvénients, la méthode analytique vient se placer à l'opposé de la méthode par lancer de rayon. En effet, le principal avantage de cette méthode est que l'on obtient des résultats précis et rapides (si peu de compositions sont nécessaires, le calcul est quasi-immédiat),



$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left(\begin{array}{l} (y - \eta) \left[(x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{\left[(x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ + (x - \xi) \left[(y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{\left[(y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ - \frac{z^2}{2} \ln \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2 \right] \end{array} \right)$$

FIGURE 1.5 – Exemple de formule analytique (source : <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>)

car le nombre de calculs à effectuer est au maximum de n^2 où n est le nombre de mailles, voire $n^2/2$ si on obtient la moitié des facteurs de forme grâce à la relation de réciprocité (l'aire des mailles est nécessairement connue car toutes les dimensions des mailles sont connues pour réaliser le calcul analytique des facteurs de forme).

Le désavantage majeur d'une telle méthode est son manque de souplesse. Il est nécessaire pour cette méthode de pouvoir se rapprocher de cas élémentaires, soit en connaissant la disposition des mailles, soit en la retrouvant par des tests. Il est également impossible de réaliser des tests de visibilité entre deux mailles à partir du calcul analytique entre deux mailles par la seule méthode du calcul analytique basé sur des cas types. Ce qui signifie que celle-ci doit soit s'hybrider avec une méthode permettant de déterminer la visibilité entre deux mailles si on veut modéliser une scène pouvant présenter des obstacles entre différentes surfaces.

Chapitre 2

Création d'un modèle simple pour l'évaluation de la radiosité

2.1 Cahier des charges et choix constitutifs

L'objectif du projet est de réaliser une application sur Matlab®, permettant de modéliser les échanges radiatifs de manière efficace dans le but d'être utilisé à des fins pédagogiques, par les étudiants de GSU. Pour cela, la première contrainte du projet est de pouvoir effectuer des calculs pertinents, permettant de se faire une idée de la manière dont s'opèrent les transferts radiatifs, pour un temps de calcul limité (l'application doit pouvoir servir à faire des essais en TP, et il est dès lors exclus de ne pouvoir lancer qu'un calcul par heure...).

Quelques hypothèses sont venues en amont afin de cadrer le projet dans des limites réalisables dans le cadre de cette PR.

Tout d'abord, a été choisi de se fixer sur un calcul concernant uniquement les ondes courtes, en prenant l'hypothèse de surfaces opaques ne réfléchissant que de manière diffuse. Ceci permet de se limiter à un calcul matriciel : la résolution de l'équation de radiosité pour les ondes courtes.

Le temps de calcul étant très rapidement important dans ce genre de modélisation – car un minimum de mailles sont requises pour une pertinence dans l'étude –, la méthode de calcul employée devait être choisie conséquemment. Un premier essai a été effectué en début de semestre basé sur un algorithme de lancer de rayon en utilisant la Méthode de Monte Carlo sur des échantillonnages stratifiés. Cette méthode, certes quelque peu brutale, mais très souple quant à la scène étudiée s'est avérée très (trop) coûteuse en temps de calcul. Pour cette raison, il a été décidé de se baser sur un algorithme de résolution analytique qui garantirait des temps de résolution supportable par des étudiants. Un tel algorithme implique cependant deux conséquences majeures pour le projet : toutes les mailles devront les unes par rapport aux autres être des représentations de "cas types" de facteurs de forme dont les formules analytiques de calcul des facteurs de forme sont disponibles dans la littérature et les mailles dont on calculera les facteurs de forme analytiquement devront nécessairement être entièrement visibles entre elles, si bien qu'il est impossible de disposer des obstacles à loisir sur la scène. Enfin les parois de la scène seront supposées grises, la prise en compte des couleurs pouvant se faire ce qui nécessite toutefois de réaliser trois fois les calculs (en se basant sur un système RGB de décomposition des couleurs). Ainsi, le passage des W/m^2 aux lux se fait par simple application d'une constante à la fin de l'étude.

Le projet ainsi délimité, la scène devait nécessairement avoir une géométrie simple pour pouvoir satisfaire à la fois le cahier des charges tout en se pliant aux contraintes apparues suite aux hypothèses et choix successifs.

2.2 Définition du modèle Streetrad

2.2.1 Géométrie

Le cas qui a été choisi avec l'équipe encadrante suite à discussions, représente une scène simple permettant de simuler les échanges radiatifs dans un milieu urbain.

La scène est composée d'une pièce vide rectangulaire comportant une unique fenêtre orientée au Nord, faisant face à une paroi réfléchissante, représentant une rangée d'immeuble, située parallèlement à la fenêtre de l'autre côté d'une rue. Seule la pièce est maillée, et l'analyse des résultats obtenus par le calcul de radiosité concerne uniquement l'intérieur de cette enceinte.

On considère que le soleil ne passe jamais par la fenêtre, par exemple en ne concentrant l'utilisation du logiciel que sur le calcul sur les heures de bureau type (9h-17h), ce qui évite d'avoir un soleil dans la moitié nord de la voûte céleste (au printemps et en été à l'heure du lever et du coucher de soleil pour la latitude de Compiègne). Le soleil se réduit donc à une source d'énergie ponctuelle caractérisée par sa hauteur solaire (angle que font les rayons du soleil avec un plan horizontal) et sa puissance d'émission qui est calculée à partir de la hauteur et de l'azimut solaire et des caractéristiques du lieu du test (latitude, altitude) [DB06].

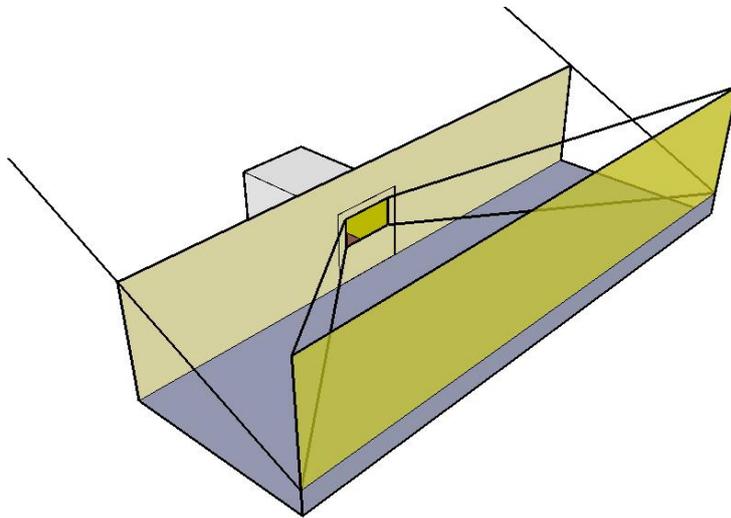


FIGURE 2.1 – Modèle Streetrad : effet du soleil

Le soleil éclaire donc uniquement le mur réfléchissant qui devient à son tour source de radiations pour l'ensemble de la pièce. Ce mur ne rentre pas dans le calcul des réflexions ultérieures pour éviter d'avoir à mailler sa surface, car alors la paroi comportant la fenêtre serait un obstacle à l'intervisibilité absolue de l'ensemble des mailles, rendant impossible le calcul analytique. Un calcul permet dans notre cas de déterminer la hauteur de l'ombre que cause notre pièce – dont la façade comportant la fenêtre se prolonge latéralement sur la même distance que la longueur de la paroi réfléchissante – et une seule maille rectangulaire permet dès lors de représenter la partie éclairée du mur réfléchissant sur lequel l'énergie reçue sera supposée constante.

2.2.2 Paramètres

Les paramètres modifiables de la scène sont :

- Pour la pièce : – L : la longueur de la pièce (dimension dans l'axe x) ;
– l : la largeur de la pièce (dimension dans l'axe y) ;
– h : la hauteur de la pièce (dimension dans l'axe z) ;
– lf : largeur de la fenêtre (note : la fenêtre est nécessairement située sur la face contenue dans le plan d'équation $x = L$) ;
– hf : hauteur de la fenêtre ;
– lpf : distance entre le côté gauche de la fenêtre et le bord gauche de la paroi la contenant ;
– hpf : distance entre le bas de la fenêtre et le plancher de la pièce ;
– R_i : les coefficients de réflexion de chacun des 6 murs de la pièce.

- Pour la scène : – d : distance du mur réflecteur à la paroi contenant la fenêtre (largeur de la rue) ;
– h_{mur} : la hauteur du mur réflecteur ;
– l_{mur} : la largeur du mur réflecteur (longueur de la rue ; une longue rue infinie peut être préférable pour obtenir des résultats plus simple à analyser) ;
– R_{mur} : le coefficient de réflexion du mur ;
– h_{masque} : la hauteur du masque, c'est à dire l'extension verticale dans le prolongement de la face contenant la fenêtre, pouvant être interprété par des étages au dessus de la pièce considérée ;
– h_{sol} : la hauteur solaire (en degrés).
- Pour la modélisation : – c : la longueur du côté d'une maille carrée avec laquelle sera maillée la pièce.

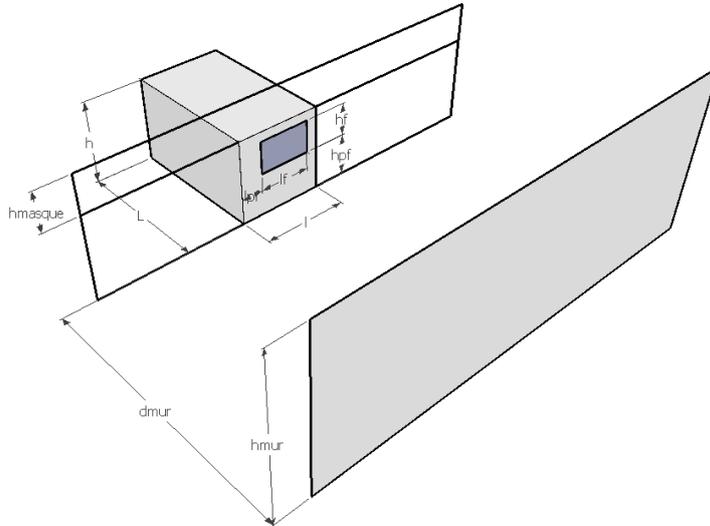


FIGURE 2.2 – Modèle Streerad : paramètres

2.2.3 Problématiques associées

Le projet est destiné à être utilisé par des étudiants, et doit, pour ce faire, être didactique dans son utilisation associée à une problématique de travail pertinente.

Le principal but que doit pouvoir satisfaire le cas d'étude est de se familiariser avec le comportement des transferts radiatifs. Pour cela, l'application créée devra d'une part générer des graphiques représentant les valeurs sur les mailles, d'autre part permettre de prendre des mesures en certains points. C'est pourquoi des capteurs analytiques sont également inclus dans le projet, ils permettent

de connaître l'énergie reçue par un point de l'espace dirigé vers le plafond de la pièce.

Une problématique associée au modèle est de rechercher pour une pièce donnée, avec un nombre d'étages donné, les caractéristiques du mur (distance, hauteur, réflexion) permettant de maximiser l'énergie reçue en un point, ou permettant de calculer le nombre d'heure par années pour lesquelles le flux sur un capteur dépasse un certain seuil. Cette seconde problématique est difficilement réalisable avec un petit pas de temps dans le cadre d'un TD car le temps de calcul est trop important (supérieur à 15 minutes) ; en revanche, il est tout à fait imaginable de ne sélectionner que certaines caractéristiques sur la position du soleil pour certains jours et heures types, afin de faire une simple comparaison rapide et de pouvoir tester plusieurs dispositions du mur.

Chapitre 3

Implantation du modèle

Dans ce chapitre, sont déroulés les principaux algorithmes utilisés pour réaliser le modèle sus-défini. Le code Matlab® correspondant est présent en annexe.

3.1 Organisation générale de l'application

L'organisation générale de l'application est globalement commune aux différentes approches de la méthode de la radiosité, utilisée notamment en infographie [Sil04]

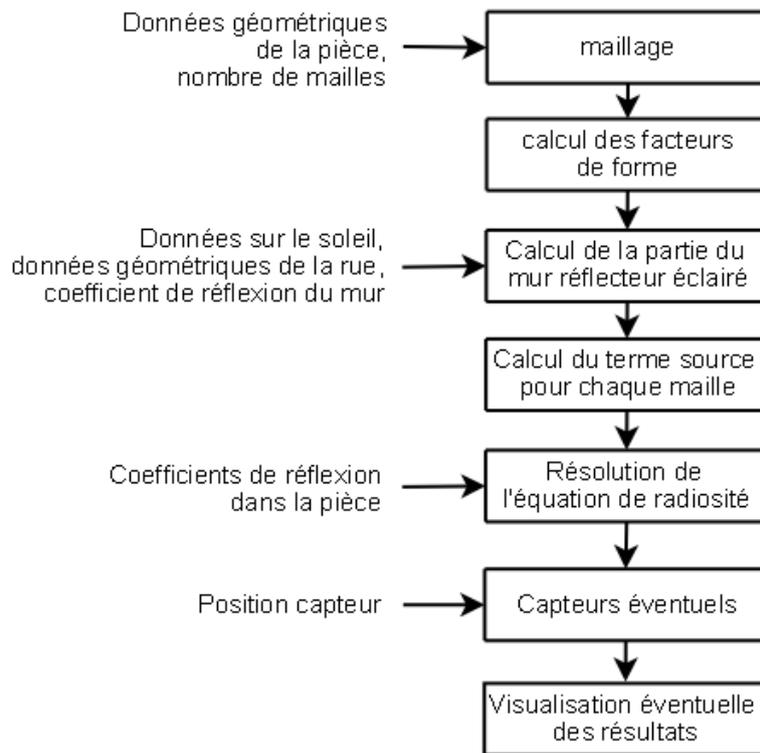


FIGURE 3.1 – Organisation générale de l'implantation

Bien que dans la version actuelle du code, toutes les informations sont renseignées en amont et sont utilisées au fur et à mesure dans le programme, l'utilisation décalée de certaines données permet de modifier les paramètres en entrée tout en conservant les résultats de certains calculs antérieurs. Pour donner un exemple, si on souhaite réaliser l'intégration d'une puissance reçue sur un capteur pendant une journée, le paramètre à modifier à plusieurs reprises est la hauteur solaire et la puissance du rayonnement. Pour cela, le maillage ainsi que le calcul des facteurs de forme n'ont à être calculés qu'une seule fois, et la boucle vient débiter au niveau de l'acquisition des nouvelles données. Ainsi,

modifier la position d'un capteur demandera un nombre limité de calculs, tandis que la modification de la taille de la pièce demandera de remettre à jour l'ensemble des résultats intermédiaires.

3.2 Méthodes de calcul

3.2.1 Maillage

Dans l'optique d'une construction de la matrice des facteurs de forme reposant sur des calculs analytiques uniquement, la construction du maillage joue un rôle primordial : il est nécessaire de savoir où est chaque maille pour savoir dans quel cas de figure de calcul analytique de facteur de forme chaque paire de mailles se trouve. A cette étape du modèle, les données en entrées utilisées sont :

- la longueur L de la pièce ;
- la largeur l de la pièce ;
- la hauteur h de la pièce ;
- la hauteur h_f de la fenêtre ;
- la largeur l_f de la fenêtre ;
- la hauteur h_{pf} de la position du bas de la fenêtre ;
- la position latérale l_{pf} de la fenêtre par rapport au bord de la paroi (en $y=0$)
- la longueur c du côté des mailles choisies carrés afin de simplifier les calculs avec des aires égales (la relation de réciprocité dans le calcul des facteurs de forme devient directe). Les dimensions de la pièces doivent tenir compte de cette valeur pour garantir un nombre entier de mailles dans chaque dimension.

La première étape dans la construction du maillage consiste à numéroter les faces de la pièce de 1 à 6 de la manière suivante :

- Face 1 : dans le plan $z = 0$
- Face 2 : dans le plan $z = h$
- Face 3 : dans le plan $y = 0$
- Face 4 : dans le plan $y = l$
- Face 5 : dans le plan $x = 0$
- Face 6 : dans le plan $x = L$ (la face 6 est celle portant la fenêtre)

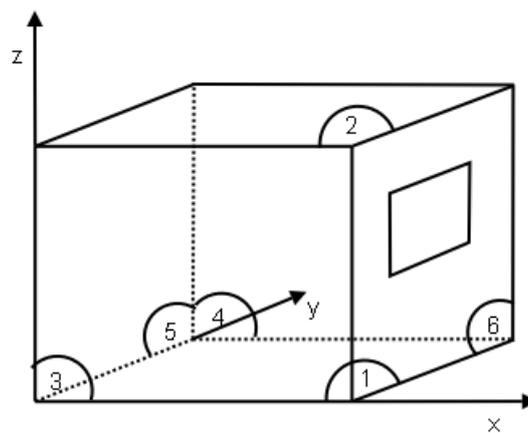


FIGURE 3.2 – Numérotation des faces de la pièce

La seconde étape consiste à numéroter l'ensemble des points du maillage. Le choix a été fait de n'utiliser que des mailles carrées de côté c , ceci permettant de faciliter le calcul des facteurs de forme. La taille de la pièce doit nécessairement être entrée comme un multiple de c . Un vecteur des coordonnées des différents points du maillage est construit en suivant l'ordre suivant :

- la face 1 est numérotée en commençant par le point $(0, 0, 0)$, puis en effectuant des rangées orientées dans le sens des $x > 0$. Ceci revient par exemple à numéroté dans l'ordre pour une face 1 de $2c \times c$ $(0, 0, 0)$, $(c, 0, 0)$, $(2c, 0, 0)$, $(0, c, 0)$, $(c, c, 0)$, $(2c, c, 0)$. Une fois numéroté l'ensemble de la face 1, la face 2 est numérotée de la même manière ;
- la face 3 est numérotée par rangées dans le sens des $x > 0$ en commençant à la seconde rangée de points (c'est à dire au point $(0, 0, c)$, le point $(0, 0, 0)$ étant déjà numéroté), et en finissant à la rangée $z = (n - 1)c$ où $h = nc$. La face 4 est numérotée de la même manière par la suite ;
- la face 5 est numérotée par rangées dans le sens de $y > 0$ en commençant à la seconde rangée verticale et au second élément horizontalement (c'est à dire au point $(0, c, c)$, et en finissant la rangée à l'avant dernier point, et l'ensemble des rangées à l'avant dernière rangée. La face 6 est ensuite numérotée de même, les points au niveau de la fenêtre compris.

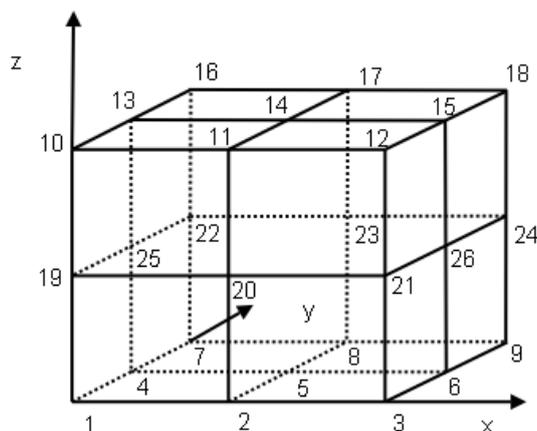


FIGURE 3.3 – Exemple de numérotation des points pour un cube $2c \times 2c \times 2c$

Dans un troisième temps la numérotation des mailles est effectuée en créant un vecteur des connectivités entre les points créés auparavant. La création des mailles est effectuée d'une manière analogue à celle de création des points : on considère pour cela les faces dans l'ordre de 1 à 6.

Deux vecteurs reprenant les propriétés du maillage sont enregistrés, afin d'être utilisés dans les fonctions ultérieures :

- Nm (dans le code) enregistre le nombre de mailles dans chaque direction de la pièce ($Nm = (L/c, l/c, h/c)$);
- debutm (dans le code) enregistre le numéro de la première maille pour chaque face.

Enfin, les mailles des fenêtres sont enregistrées dans un vecteur. Ainsi, au moment du calcul, il suffira de retirer les lignes et les colonnes correspondant aux mailles au niveau de la fenêtre.

3.2.2 Facteur de Forme

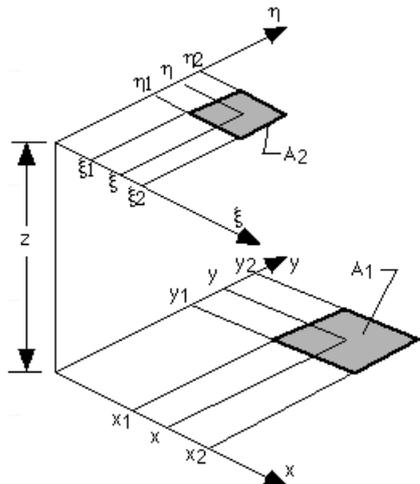
La fonction de calcul des facteurs de forme (FF) est une des plus lourde en temps de calcul. Elle repose sur l'énumération de l'ensemble des cas en présence auquel sont assignés les résultats de formules analytiques.

Le remplissage de la matrice des facteurs de forme se fait selon la procédure suivante : on sépare dans un premier temps en cas généraux utilisant des formules analytiques élémentaires distinctes (mailles sur des parois parallèles, sur des parois perpendiculaires sur une même rangée, etc.). Ensuite, on calcule pour chacun des cas généraux une matrice comportant les résultats pour toutes les configurations différentes du cas général. Enfin on remplit la matrice des facteurs de forme en assignant le résultat du cas correspondant à chaque paire de mailles. Les mailles étant, dans notre modèle, toutes de surfaces égales, on obtient de la formule $F_{ij}A_i = F_{ji}A_i$ la relation $F_{ij} = F_{ji}$ permettant de remplir les deux coefficients correspondants en même temps dans la matrice.

Les formules élémentaires de facteurs de forme ont déjà fait l'objet de recherches importantes, et un catalogue des formules est disponible [SH01]. Les fonctions de calcul des facteurs de forme élémentaires sont dans le code représentés sous le nom dont il figurent dans le catalogue de l'université de Texas sur internet (<http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>).

Cas A : mailles sur des plans parallèles

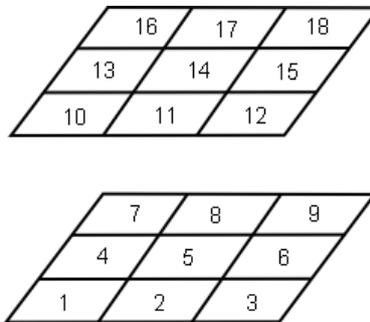
Ce cas s'emploie pour le calcul des FF respectivement entre les mailles des faces 1 et 2, 3 et celles des faces 4, 5 et 6. On utilise la formule analytique définie ci-dessous :



$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{k=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left(\begin{aligned} & (y - \eta) \left[(x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{\left[(x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & + (x - \xi) \left[(y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{\left[(y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & - \frac{z^2}{2} \ln \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2 \right] \end{aligned} \right)$$

FIGURE 3.4 – Formule C13 (source : <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>)



Cette formule permet de calculer directement l'ensemble des configurations possibles. Si on considère le cas ci-dessus, le nombre de facteurs de forme différents est de 6 : F_{1-10} , F_{1-11} , F_{1-12} , F_{1-14} , F_{1-15} , F_{1-18} , et l'écart le plus grand entre deux mailles est de 3×3 . Il y aura donc 6 résultats à calculer avant d'attribuer les résultats à chaque couple de facteurs de forme en fonction de leur disposition.

Dans le cas général, chaque configuration de deux mailles apparaît 8 fois (non forcément distinctes) pour chaque maille émettrice. Par exemple si on prend le cas d'un décalage de 2 cases dans une direction et 3 cases dans la deuxième direction, on retrouve, pour le maillage ci-dessus et en prenant la maille 1 pour maille émettrice, ce cas en F_{1-15} et F_{1-17} , et il est aisé de s'imaginer que dans les 3 autres quarts entourant la maille 1, on aurait retrouvé les 6 autres mailles cibles avec lesquelles le facteur de forme aurait été similaire.

L'algorithme pour attribuer les facteurs de forme entre deux mailles est le suivant :

Boucle sur les mailles sources

Boucle sur les configurations possibles (définies par le décalage entre les mailles dans les deux directions)

- Calcul pour la configuration courante des 8 positions théoriques des mailles cibles
- Pour chaque position test si les deux valeurs de décalages à partir de la mailles sources ne font pas sortir la maille cible théorique du maillage
- Si la maille cible est dans le maillage on remplit la matrice des FF aux lignes et colonnes concernant ces deux mailles

Fin de boucle sur les configurations possibles

Fin de boucle sur les mailles sources

Cas B : mailles sur des faces perpendiculaires sur une même rangée ou sur une rangée à côté

Ces cas sont à séparer des autres cas présentant des décalages plus importants entre les 2 mailles, car la formule élémentaire à utiliser est différente. On utilise ici la formule suivante :

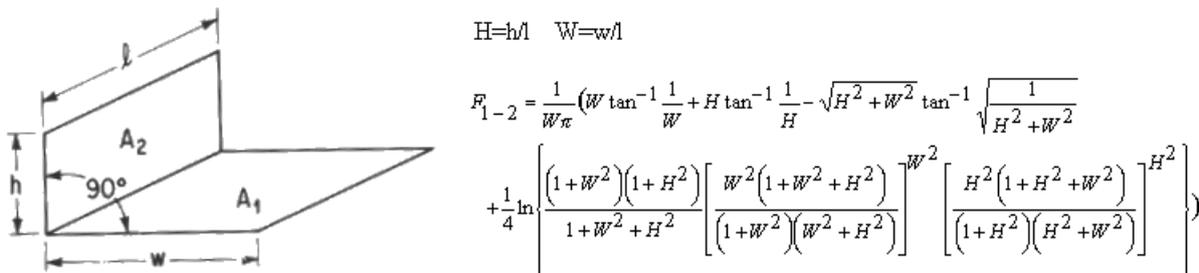
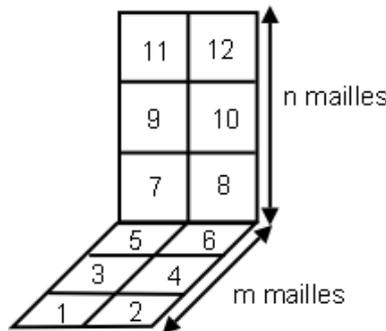


FIGURE 3.5 – Formule C14 (source : <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>)



Dans ce cas, la formule ne permet pas de calculer l'ensemble des configurations, et il est nécessaire d'effectuer des combinaisons de calculs afin d'obtenir les résultats des FF. Se référer à la figure ci-dessus pour les exemples ; on note C14(h,w,l) la fonction C14 codée correspondant à la formule analytique pour les trois paramètres h, w, et l tels que définis plus haut.

Combinaisons pour deux mailles sur une même rangée :

| Exemple | Formule codée |
|------------|---|
| F_{5-7} | $C14(1, 1, 1)$ |
| F_{5-11} | $C14(n, 1, 1) - C14(n - 1, 1, 1)$ |
| F_{1-11} | $m[C14(n, m, 1) - C14(n - 1, m, 1)] - (m - 1)[C14(n, m - 1, 1) - C14(n - 1, m - 1, 1)]$ |

Combinaisons pour deux mailles sur deux rangées juxtaposées :

| Exemple | Formule codée |
|------------|---|
| F_{5-8} | $C14(1, 1, 2) - C14(1, 1, 1)$ |
| F_{5-12} | $C14(n, 1, 2) - C14(n - 1, 1, 2) - [C14(n, 1, 1) - C14(n - 1, 1, 1)]$ |
| F_{1-12} | $m[C14(n, m, 2) - C14(n - 1, m, 2) - [C14(n, m, 1) - C14(n - 1, m, 1)]] - (m - 1)[C14(n, m - 1, 2) - C14(n - 1, m - 1, 2) - [C14(n, m - 1, 1) - C14(n - 1, m - 1, 1)]]$ |

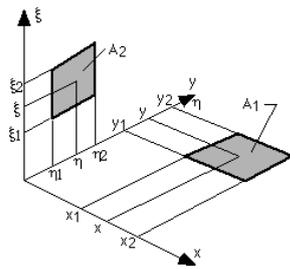
L'algorithme utilisé pour remplir la matrice des FF est le suivant :

Boucle sur la rangée sur laquelle se situe la maille source
 Boucle sur le décalage m de la maille source sur la rangée
 Boucle sur le décalage n de la maille cible
 - Calcul des numéros des mailles sources et cibles
 - Remplissage de la matrice des FF aux lignes correspondantes avec le résultat du calcul déterminé par les paramètres des boucles
 Fin de la boucle sur le décalage n
 Fin de la boucle sur le décalage m
 Fin de la boucle sur la rangée de la maille source

Cas C : mailles sur des faces perpendiculaires avec un décalage > 2

Le décalage se définit comme la distance entre les rangées de la maille source et de la maille cible. Un décalage $d = 1$ signifie que les deux mailles sont sur une même rangée. Un décalage de $d = 2$ signifie que les deux mailles sont sur des rangées juxtaposées ; et ainsi de suite.

Le calcul des facteurs de forme dans le cas C utilise la formule C15 :

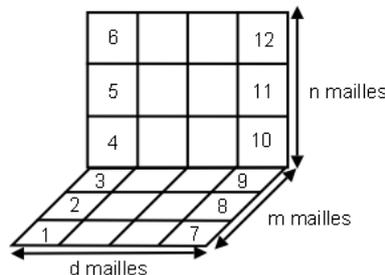


$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \left[(-1)^{i+j+k+l} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l) \right]$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ (y - \eta)(x^2 + \xi^2)^{1/2} \tan^{-1}(K) - \frac{1}{4} \left[(x^2 + \xi^2) \ln(1 + K^2) - (y - \eta)^2 \ln \left(1 + \frac{1}{K^2} \right) \right] \right\}$$

where $K \equiv (y - \eta) / (x^2 + \xi^2)^{1/2}$

FIGURE 3.6 – Formule C15 (source : <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>)



La formule C15 permet d'obtenir directement un résultat de facteur de forme pour l'ensemble des configurations, à l'exclusion du cas où les deux mailles ont une arête en commun (cas F_{3-10} du schéma). Pour ce dernier cas, on ne peut utiliser que la formule C14 avec laquelle le calcul à effectuer est récursif car le calcul pour un décalage d donné dépend du calcul pour un décalage $d - 1$ et ainsi de suite. Pour éviter de recalculer à chaque fois les résultats, les valeurs des facteurs de forme utiles pour le calcul sont enregistrées au fur et à mesure.

L'algorithme utilisé dans ce dernier cas pour remplir la matrice des FF est similaire à celui utilisé dans le cas B, avec une boucle supplémentaire sur le décalage d entre deux rangées de mailles.

3.2.3 Calcul de la partie du mur éclairée

On prend dans notre modèle l'hypothèse d'un mur infini. Complétée par l'hypothèse que le soleil ne passe jamais dans la moitié Nord du cadran, cela signifie que sur le périmètre de notre étude, la partie du mur éclairée est considérée comme un bandeau, sans les effets que l'on obtiendrait aux bordures du mur réflecteur pour un soleil n'étant pas plein sud n'apparaissent pas. Ceci permet de se limiter à un soleil plein sud uniquement, dont l'unique paramètre est la hauteur solaire. Le calcul de la partie éclairée du mur réflecteur revient dès lors à calculer la hauteur de l'ombre sur celui-ci par la formule :

$$h_{\text{ombre}} = \min(h_{\text{mur}}; \max(0; h + h_{\text{masque}} - d_{\text{mur}} \tan(h_{\text{sol}} \frac{\pi}{180})))$$

La puissance du rayonnement reçu sur la maille rectangulaire éclairée est ensuite calculée en fonction de la hauteur solaire [DB06].

3.2.4 Calcul du rayonnement réfléchi par le mur extérieur sur chaque maille de la pièce

La partie éclairée du mur réflecteur définie par une maille rectangulaire est considérée comme la source de rayonnement pour les mailles situées à l'intérieur de la pièce. L'équation globale de la radiosité concernant à la fois le mur extérieur et les mailles de la pièce s'écrit :

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j + \rho_i F_{im} B_m$$

Avec F_{im} le facteur de forme entre la maille P_i et le mur et B_m la radiosité du mur exprimée par la relation similaire :

$$B_m = E_m + \rho_m \sum_{j=1}^N F_{mj} B_j + \rho_m F_{mm} B_m$$

Dans cette équation, $F_{mm} = 0$ puisque le mur extérieur est plan, et $F_{mj} B_j = 0, j = 1, \dots, N$ selon l'hypothèse que l'effet de la radiosité à l'intérieur de la pièce sur le mur extérieur est négligeable. Nous avons donc $B_m = E_m$ où E_m représente dans notre cas la réflexion du flux solaire par le mur.

Le terme $\rho_i F_{im} B_m$ dans l'équation de la radiosité appliquée à la maille P_i vaut donc $\rho_i F_{im} E_m$. L'étape suivante consiste à calculer le facteur de forme F_{im} .

On peut tout d'abord remarquer que le facteur de forme entre une maille et le mur réflecteur est nécessairement inférieur ou égal au facteur de forme entre cette même maille et la fenêtre. Or ce facteur de forme vaut $F_{if} = (1 - \sum_{j=1}^N F_{ij})$ puisque la somme des facteurs de forme depuis une surface vaut 1. On peut utiliser cette dernière formule car les facteurs de forme sont calculés analytiquement, avec une erreur minimale.

On définit ensuite le facteur de forme d'une maille P_i au mur réflecteur par le produit du facteur de forme F_{if} par la probabilité qu'un rayon lancé aléatoirement depuis la maille à travers la fenêtre touche le mur. Afin de calculer cette probabilité, un lancer de rayon simple est effectué : la hauteur de la fenêtre est divisée en un nombre choisi de points. Chacun de ces points représente une direction prise par un rayon lancé (le mur étant infini latéralement, il n'est pas utile de faire varier latéralement la position des points sur la fenêtre). Chaque rayon est ensuite l'objet d'un test d'intersection avec le mur éclairé. La portion des rayons lancés qui touche le mur est considérée comme la probabilité recherchée

$$F_{i-mur} = F_{if} \frac{n_r}{n_l}$$

Où n_l est le nombre de rayons lancés et n_r est le nombre de rayons reçu par le mur. Un tel lancer de rayons se fait selon l'hypothèse nécessaire que chacun des rayons lancé représente la même quantité

élémentaire de facteur de forme. L'erreur commise sur cette hypothèse n'a pas pour l'instant été évaluée.

Puisqu'aucune des mailles de la pièce n'émet de rayonnement ($E_i = 0$), le résultat de l'équation de radiosité sur une maille de la pièce est donné par :

$$B_i = \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j + \rho_i F_{if} \frac{n_r}{n_l} E_m$$

3.2.5 Application des équations de la radiosité

L'application des équations de la radiosité revient à résoudre le système :

$$B_i = \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j + \rho_i F_{if} \frac{n_r}{n_l} E_m$$

Soit, en terme de calcul matriciel

$$B = M^{-1} E$$

avec :

$$E_i = \rho_i F_{if} \frac{n_r}{n_l} E_m \text{ et } M_{ij} = \delta_{ij} - \rho_i F_{ij}$$

Où δ_{ij} est le symbole de kronecker, valant 1 si $i = j$ et 0 sinon.

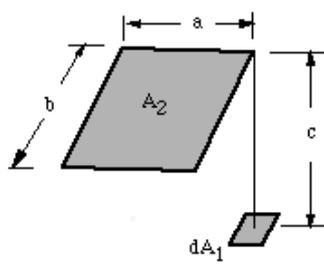
Pour notre application, le soin est laissé à Matlab® d'inverser la matrice M . Ceci demande en effet un temps de calcul raisonnable pour un nombre de maille limité à 1000 ou 2000 mailles (moins de 10 secondes), mais la fonction devient rapidement plus coûteuse. On peut noter que la matrice à inverser est identique pour un maillage donné, quelques soient les conditions d'ensoleillement, donc dans le cas d'un calcul venant modifier à plusieurs reprises les conditions de soleil par exemple, sans modifier le maillage, le calcul d'inversion n'a alors à être effectué qu'une seule fois.

3.2.6 Capteurs

Calculer l'énergie arrivant sur un point nécessite de calculer les facteurs de forme entre ce point (représenté par une surface différentielle orientée), et le reste de la scène. Les capteurs utilisent donc des techniques similaires au calcul des facteurs de forme entre les surfaces de la pièce.

Afin d'éviter de compliquer le calcul des facteurs de forme, la position du capteur est arrondie à la position la plus proche correspondant à une position du maillage de la pièce dans les 3 dimensions, et le capteur est toujours disposé horizontalement, orienté vers le haut. Les formules élémentaires ensuite utilisées sont :

- Pour les facteurs de forme avec les mailles du plafond :

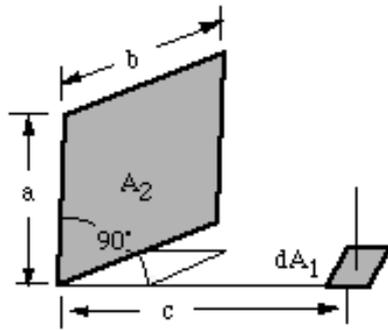


$A = a/c; B = b/c$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{A}{(1+A^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{B}{(1+A^2)^{1/2}} \right] \right] \\ & + \left[\frac{B}{(1+B^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{A}{(1+B^2)^{1/2}} \right] \right] \end{aligned} \right\}$$

FIGURE 3.7 – Formule B3 (source : <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>)

- Pour les facteurs de forme avec les parois verticales (le calcul est effectué à partir sur les mailles situées à une hauteur supérieure ou égale à la position du capteur) :



$$A=a/b; C=c/b; Y=(A^2+C^2)^{1/2}$$

$$F_{dA1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{C} \right) - \frac{C}{Y} \tan^{-1} \left(\frac{1}{Y} \right) \right]$$

FIGURE 3.8 – Formule B4 (source : <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>)

La composante du flux reçu par le capteur provenant de la réflexion du mur à travers la fenêtre est calculée par la même méthode que le calcul du flux reçu du fait de la réflexion du mur par chacune des mailles, en lançant des rayons à travers la fenêtre à différentes hauteurs, et en effectuant des tests d'intersection entre les rayons et le mur éclairé.

Une fois obtenu l'ensemble des facteurs de forme avec les mailles de la pièce et le mur réflecteur, le calcul est direct, car le calcul de radiosité donne des résultats en terme d'énergie émise. Le résultat est alors donné par :

$$\Phi_r = \vec{B} \cdot \vec{F} + F_{capt-mur} R_{mur} P_{murrecu}$$

Où Φ_r est le flux reçu par le capteur, \vec{B} est la solution de l'équation de radiosité calculée précédemment sur l'ensemble des mailles de la pièce, \vec{F} est le vecteur des facteurs de forme du capteur aux mailles de la pièce, $F_{capt-mur}$ est le facteur de forme du capteur au mur réflecteur, R_{mur} est le coefficient de réflexion du mur et $P_{murrecu}$ est la puissance reçue par le mur depuis le soleil.

3.3 Essai de simulation

Dans cette partie, une simulation réalisée avec l'application est présentée. Le cas choisi est une pièce de 15 m^2 (5x3). Le mur réflecteur et la pièce sont séparés d'une rue d'une largeur de 8 m. La scène est éclairée par un soleil supposé plein sud, avec une hauteur solaire de 40° correspondant environ à un soleil de midi à Compiègne le 21 mars, et l'ensemble des parois est de teinte moyennement claire (réflexivité = 0,4)

3.3.1 Paramètres en entrée

Paramètres de la pièce :

| Grandeur | Valeur |
|---|---------------|
| Longueur | 5 m |
| Largeur | 3 m |
| Hauteur | 3 m |
| Largeur de la fenêtre | 2,2 m |
| Hauteur de la fenêtre | 1,4 m |
| Largeur de la position de la fenêtre | 0,4 m |
| Hauteur de la position de la fenêtre | 1 m |
| Longueur du côté d'une maille | 0,2 m |
| Nombre de mailles (avec mailles de fenêtre) | 1950 |
| Nombre de mailles (sans mailles de fenêtre) | 1885 |
| Réflexivité (toutes faces de la pièce) | 0,4 |
| Position du capteur | (2,4;1,4;1,2) |

Paramètres de la rue :

| | |
|---|-------|
| Distance du mur à la pièce | 8 m |
| Hauteur du mur | 7 m |
| Longueur du mur (théoriquement infinie) | 200 m |
| hauteur du masque au dessus de la pièce | 4 m |
| Réflexivité du mur | 0,4 |
| Hauteur solaire | 40° |

3.3.2 Résultats

Facteurs de forme

Pour ce qui est des facteurs de forme, on peut vérifier la cohérence globale de la matrice créée. En additionnant l'ensemble des facteurs de forme depuis une maille en prenant en compte également les mailles des fenêtres (maillage d'un pavé), on obtient bien $\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$ avec une erreur de l'ordre de 10^{-14} , soit une somme d'erreurs machine, et ce quelque soit la maille choisie.

On vérifie également ce résultat dans la matrice des facteurs de forme sans les lignes et colonnes des mailles de la fenêtre pour les mailles de la face portant la fenêtre (face 6), qui sont les seules à avoir uniquement des facteurs de forme avec les autres mailles de la pièce (elles ne voient pas la fenêtre).

Calcul de la partie éclairée du mur et du flux qu'il réfléchit sur chaque maille

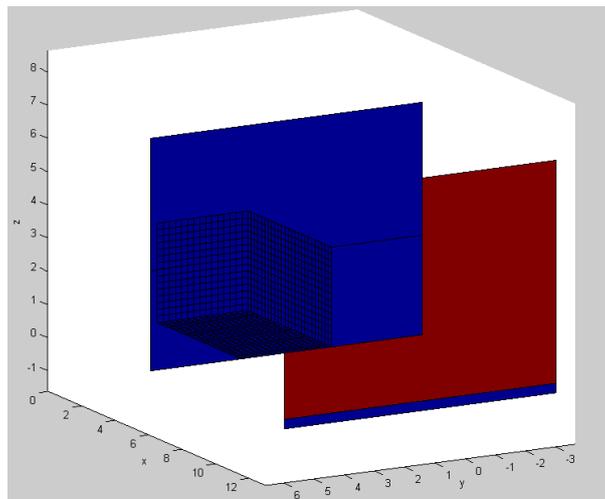


FIGURE 3.9 – Délimitation de la partie éclairée

Les caractéristiques de la rue et la hauteur solaire donnent pour résultat un mur quasi-entièrement éclairé avec une très légère ombre en bas du mur.

La puissance de rayonnement du soleil reçue sur la paroi est calculée à $658,86W/m^2$. La puissance émise par le mur par réflexion est de $263,55W/m^2$.

Le calcul du terme provenant de la réflexion du mur extérieur sur les mailles dépend du facteur de forme entre chacune des maille et le mur réflecteur, et notamment, dans un premier temps, du facteur de forme entre chacune des mailles et la fenêtre.

Au niveau des résultats, la plus forte puissance reçue est concentrée sur les faces 3 et 4, au niveau de la fenêtre, avant de décroître en allant vers le fond et le bas de la pièce. Les maxima sont situés à ces endroits car ce sont ces mailles qui ont le plus grand facteur de forme avec la fenêtre (0,0983

pour la maille ayant la plus forte puissance reçue contre 0,0298 pour une maille centrée en face de la fenêtre sur le mur du fond), et qui de plus voient principalement le mur éclairé à travers la fenêtre.

On peut enfin remarquer le saut de puissance constaté entre le rayonnement émis par le mur réflecteur et celui émis par les mailles de la pièce (facteur 25 environ), ce qui s'explique d'une part par des facteurs de forme entre les mailles de la pièce et la fenêtre qui ne dépassent pas 0,1 (après quoi il faut encore voir le mur), d'autre part par le fait que le terme concernant la réflexion du mur extérieur sur le maillage prend également en compte les coefficients de réflexion des surfaces de la pièce (0,4).

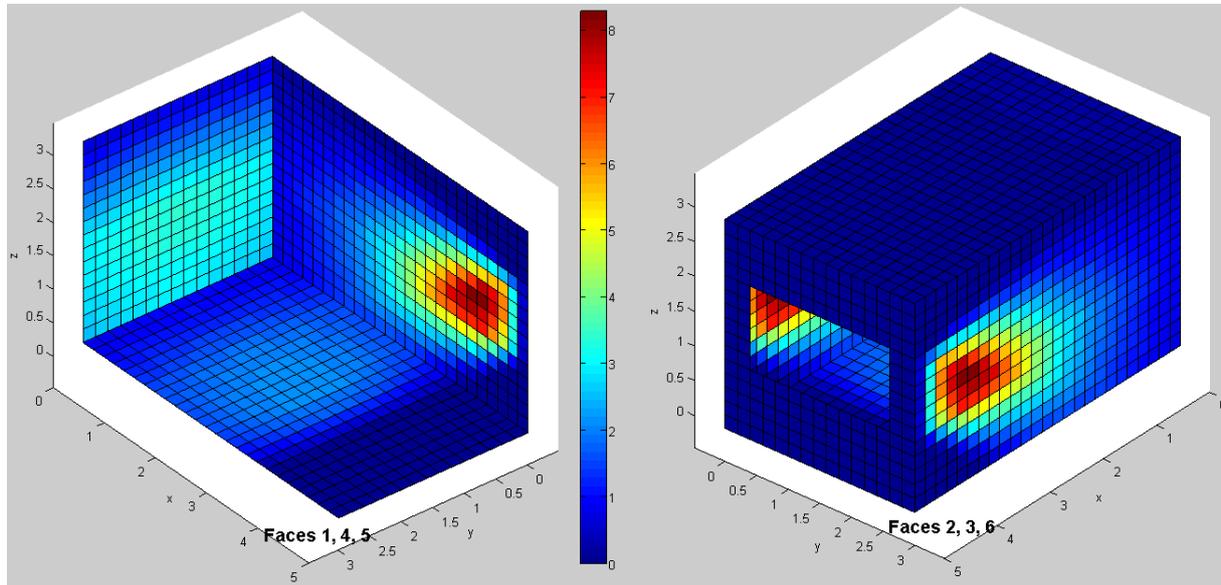


FIGURE 3.10 – Terme source sur le maillage de la pièce

Résultats des réflexions internes

Les mailles de la pièce n'émettant pas de flux de rayonnement à l'état initial, au flux issu de la réflexion du mur ne vient s'ajouter que les flux issus des réflexions internes à la pièce, pour donner les valeurs de radiosité sur l'ensemble des mailles. Pour ce terme, on obtient les résultats présents sur la figure ci-dessous. On observe les réflexions sont les plus importantes :

- Sur les faces latérales et le plancher en bordure avec la face arrière, du fait de facteurs de forme importants avec celle-ci (jusqu'à 0,46 pour une maille située contre la face du fond au milieu de la hauteur de la pièce) dont la plupart des mailles présentent des termes sources non négligeables (autour de $3 W/m^2$) ;
- Sur le plafond. Cette surface n'a pas (ou peu) de terme source, en revanche elle est entourée de faces émettrices (plancher, faces latérales et arrière) justifiant un facteur de forme avec l'ensemble de celles-ci, et donc un flux reçu important ;
- Sur la face tenant la fenêtre en bordure de la fenêtre. Les mailles concernées sont d'une part face à la surface arrière (plus la maille sera proche du centre de la face de la fenêtre, plus le facteur de forme avec la face arrière sera importante), d'autre part, elles sont proches des mailles sur les faces latérales présentant les maxima des termes sources (facteurs de forme importants).

A l'opposé, les coins sont les moins touchés par les réflexions. En effet une maille de coin a un facteur de forme de 0,2 avec chacune des 2 autres mailles du coin. Si aucune de ces mailles n'a de terme source, les réflexions n'auront pas beaucoup d'effets sur leur radiosité.

Dans l'ensemble, cette réflexion interne se fait à un ordre de grandeur divisé par un facteur 10 par rapport à la radiosité engendrée par la réflexion du mur extérieur seule.

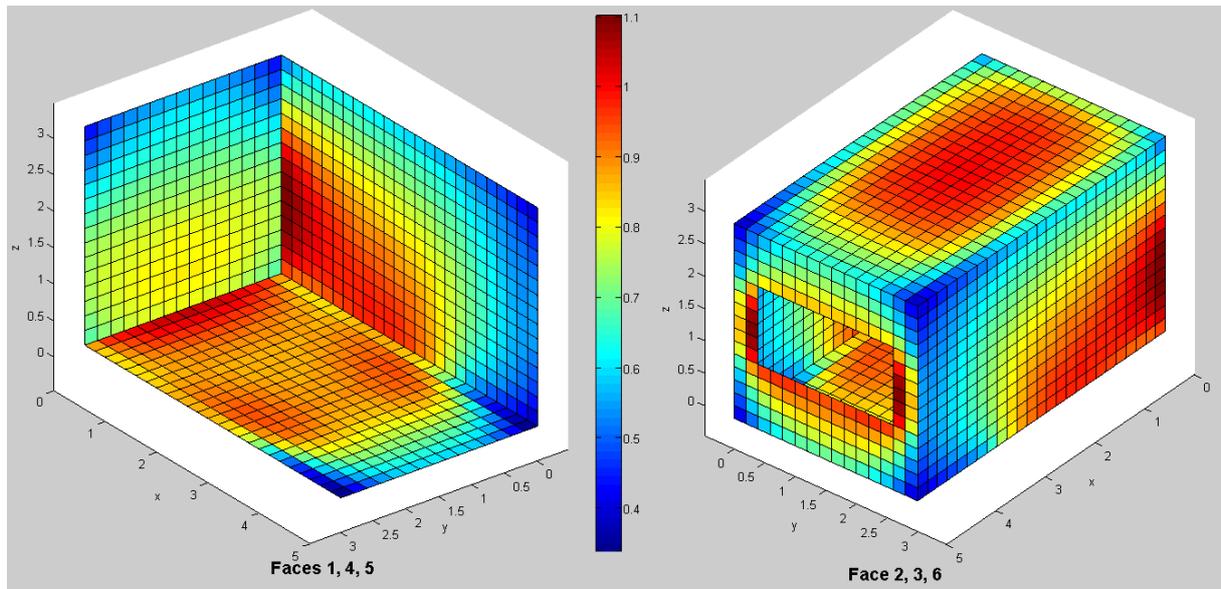


FIGURE 3.11 – Terme de réflexion interne de l'équation de la radiosité

Résultats globaux, capteur

Quelques résultats de radiosité :

| Paroi concernée | Radiosité (W/m^2) | | |
|---------------------------|-----------------------|------|------|
| Mur réflecteur | 263,5459 | | |
| | min | max | moy |
| Face 1 (plancher) | 0,34 | 3,06 | 1,90 |
| Face 2 (plafond) | 0,40 | 1,12 | 0,86 |
| Face 3 (latérale) | 0,40 | 8,91 | 2,60 |
| Face 4 (latérale) | 0,40 | 8,91 | 2,60 |
| Face 5 (arrière) | 1,12 | 4,15 | 3,15 |
| Face 6 (avant, fenêtre) | 0,41 | 1,10 | 0,75 |
| Capteur (puissance reçue) | 2,65 | | |

Si les maxima sont situés sur les faces latérales (faces 3 et 4), proches des fenêtres, la face du fond (face 5) présente la valeur de minimum la plus élevée avec un écart limité entre minimum et maximum. La face 5, en face de la fenêtre, est au final la face la plus uniformément éclairée, avec la radiosité moyenne la plus élevée.

Pour ce qui est du capteur, si on considère l'échelle simplifiée $1W/m^2 = 110lux$, on obtient $291,5lux$ ce qui est inférieur aux $400lux$ garantissant un confort pour le travail et la lecture. A noter que le capteur est disposé à la hauteur d'une table, au milieu de la pièce, bien qu'il soit en face de la fenêtre. Ce capteur ne voit donc que peu le mur réflecteur qui est la source principale de radiations. Rapprocher le capteur de la fenêtre pourrait être une manière d'augmenter le flux reçu.

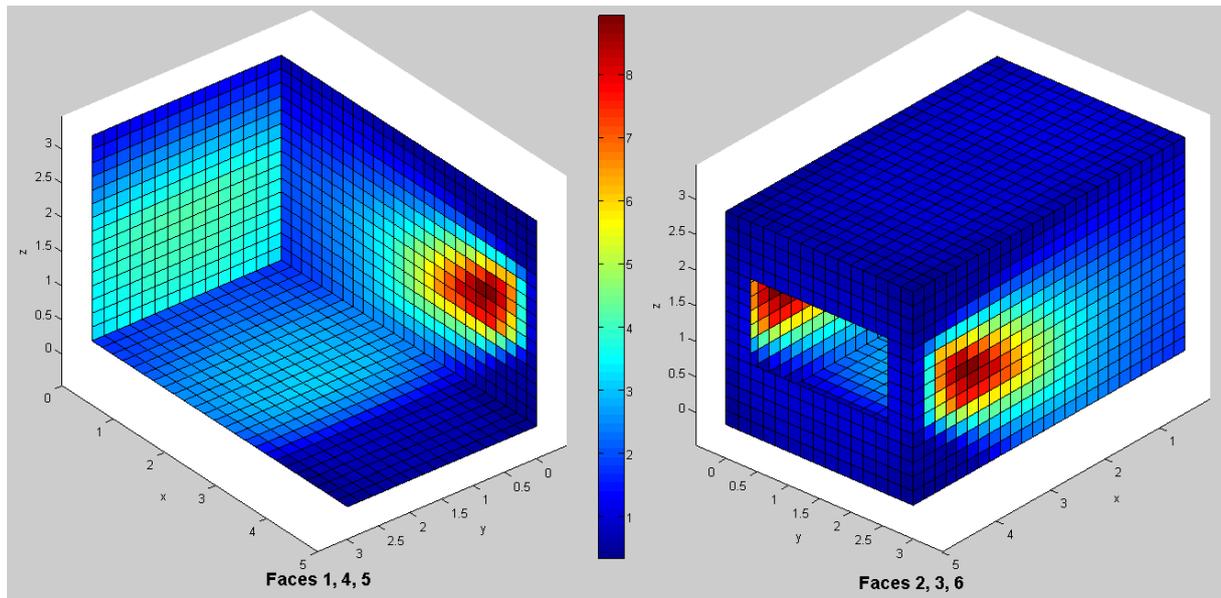


FIGURE 3.12 – Résultats globaux de l'équation de radiativité

Temps de calcul

| Fonction | Temps de calcul (s) |
|---|---------------------|
| Maillage | 0,08 |
| Calcul des facteurs de forme | 7,75 |
| Calcul sur le mur réflecteur | 0,02 |
| Calcul du terme source | 2,68 |
| Résolution de l'équation de radiativité | 5,64 |
| Résultats sur le capteur | 0,09 |
| Traçage des 3 graphiques | 3,10 |

Temps de calcul sur PC portable 1,66GHz, 0,99Go RAM, carte graphique Intel 945GM, Matlab 2010a.

Chapitre 4

Perspectives

4.1 Amélioration du modèle

Dans un premier temps, il est nécessaire de vérifier l'intégralité des formules utilisées dans l'application certaines formules peuvent ne pas être totalement correctes, et certaines hypothèses peuvent avoir pour conséquences des erreurs importantes qu'il convient de limiter.

Secondement, le modèle ne prend actuellement pas en compte les radiations du ciel. Il serait intéressant de pouvoir avoir un modèle permettant d'une part de tester des modèles de ciel, d'autre part de pouvoir se placer dans la situation d'un soleil empiétant au Nord. Ceci impliquerait de mieux prendre en compte les flux en provenance et à destination de toutes les parois composant la rue. Le nouveau modèle pourrait par exemple se décomposer en deux étapes de calculs : l'une au niveau de la rue seulement, où les facteurs de forme peuvent être connus analytiquement, puis l'autre à l'intérieur de la pièce. Un tel calcul en deux phases permettrait de ne pas (trop) affecter le coût de calcul, car toutes les mailles dans chacun des calculs restent visibles entre elles. Il s'agira dans ce calcul d'évaluer l'erreur commise dans la résolution de la simulation. A noter que l'erreur dans le cas actuel pourrait être potentiellement non négligeable du fait de l'hypothèse de non-réflexion de l'intérieur avec l'extérieur de la pièce et de la non prise en compte de la rue qui peut jouer un rôle dans l'énergie reçue par les mailles à l'intérieur.

Il pourrait enfin être intéressant et légitime de considérer le facteur solaire du vitrage, que ce soit en choisissant des propriétés communes aux deux sens de la fenêtre (rayonnement intérieur vers extérieur ou extérieur vers intérieur), ou avec des propriétés différentes.

4.2 Amélioration de la prise en main

Il ne faut pas oublier que le but premier est que les fonctions Matlab® servent aux étudiants dans un cadre pédagogique. Puisqu'il est fort possible qu'une grande part des étudiants concernés soient des néophytes de Matlab®, une interface lisible pourrait être préférée à l'enchaînement des fonctions présentes dans l'état actuel, et dont les paramètres en entrée, bien que tous localisés dans la même fonction mère, ne sont pas tous au même endroit, mais plutôt à côté des fonctions les utilisant.

Enfin un guide d'utilisation informant sur la manipulation du logiciel, ses possibilités, ses limites, voire son fonctionnement détaillé pourrait être utile si le projet venait à changer de main, et de manière plus globale, afin d'aider à l'utilisation des fonctions.

Conclusion

Le phénomène physique de transfert radiatif est relativement bien connu. Les équations gouvernant les échanges entre deux corps sont formalisées dans la littérature depuis un certain temps. En revanche, la modélisation numérique de ce phénomène est loin d'être évidente. De nombreuses approches existent et toutes ont leurs forces et leurs faiblesses. Certains nécessitent des hypothèses préalables importantes (réflexions diffuses uniquement dans le cas de la méthode de la radiosité), d'autres donnent des résultats plus ou moins précis, avec des temps de calcul très variables d'une méthode à l'autre.

Dans cette PR, deux méthodes d'évaluation de la radiosité ont été testées avec l'objectif d'avoir une application fonctionnelle pouvant être utilisée pertinemment par des étudiants. Si ces deux méthodes – dont seule celle effectuant le calcul des facteurs de forme analytiquement aura été finalement utilisée dans la dernière version –, sont des méthodes brutes, peu sophistiquées et peu optimisées elles ont au moins l'intérêt d'être assez intuitives, réalisant une introduction intéressante à la fois au phénomènes physiques et aux moyens de le modéliser.

L'application qui aura été implantée semble de premier abord fournir des résultats cohérents, cependant, il manque pour finaliser le projet une phase de validation, dans laquelle il serait question de calculer l'incertitude due aux approximations faites et de tester l'application dans différents cas de figure, avec différents nombres de mailles. Les briques utilisées dans un tel modèle sont aisément remplaçables sans changer l'architecture globale de la simulation et de nombreuses améliorations peuvent encore être apportées au modèle, notamment en accord avec le contexte pédagogique dans lequel il sera utilisé.

Annexe :
Code du modèle Streetrad

.1 Fonction mère : Calcul global

```
    clc
clear all
close all

% Etablissement du maillage
% -----

tic

%créer une fonction de saisie avec les conditions de sécurité
% Nmaille=input('Nombre de mailles : ');
%
% h=input('hauteur de la pièce : ');
% L=input('longueur de la pièce : ');
% l=input('largeur de la pièce (face avec fenêtre) : ');
%
% lf=input('largeur de la fenêtre : ');
% hf=input('hauteur de la fenêtre : ');
% hpf=input('hauteur de la position de la fenêtre : ');
%NOTE : fenêtre sur la paroi en x=L, de dimensions l*h

h=3; %hauteur de la pièce
L=5; %Longueur de la pièce
l=3; %largeur de la pièce

lf=2.2; %largeur de fenêtre
lpf=-.4; %largeur du mur entre la fenêtre et la paroi en x=0
hf=1.2; %hauteur de fenêtre
hpf=1; %hauteur de la position de la fenêtre

c=0.2; %Nombre de mailles sur le cube

%*****
[Co, Co2, Pt, Nm, h, L, l, c, Nmaille, NmailleSF, debutm, vectf, hmf, lmf, hf, lf, hpmf, lpmf, hpf, lpf]=...
maillage(h,L,l,lf,hf,hpf,lpf,c);
%Co(Nmaille*4): matrice des coordonnées des mailles de la pièce sans fenêtre
%Co2(Nmaille*4): matrice des coordonnées de mailles sans les mailles de la fenêtre
%Pt(nombre de points*3): matrice des coordonnées de points
%Nm(3*1): nombre de mailles dans chaque dimension de la pièce
%NmailleSF : mailles sans tenir compte de la fenêtre (nombre de mailles +
%mailles au niveau de la fenêtre)
%c : longueur du côté d'une maille (carrée)
%debutm (7*1): numéro de la maille commençant la numérotation sur chaque face
%vectf(nb de maille*1): numéro des mailles au niveau de la fenêtre
%*****
time.maillage=toc;

% Calcul du facteur de forme
% -----

tic

%*****
[FF,FF2]=calculff(Nm,h, L, l, c,NmailleSF,debutm,vectf);
%FF(NmailleSF*NmailleSF) : matrice des facteurs de forme de la pièce sans
%tenir compte de la fenêtre
%FF2(Nmaille*Nmaille) : matrice des facteurs de forme sans mailles de fenêtre
%*****
time.calculff=toc;

% Calcul du mur éclairé/eteint
% -----
```

```

tic

hsol=40; %hauteur solaire en degrés
hmur=7; %hauteur du mur réfléchissant en m
lmur=200; %largeur du mur réfléchissant en m (doit être quasi infinie)
dmur=8; %distance du mur à la pièce (paroi avec fenêtre)
Rmur=.4; %coef de reflexivité du mur
hmasque=4; %

%*****
[Ptmur, Comur0, ComurE, Ptmasque, Comasque, Imur]=calculmur(h, l, L, hsol, hmur, lmur, dmur, hmasque);
%Comasque : connectivité des mailles du masque
%ComurE : connectivité des mailles éclairées du mur
%Comur0 : connectivité des mailles ombragées du mur
%Imur : puissance réfléchi par le mur
%Ptmasque : coordonnées des points du masque
%Ptmur : coordonnées des points du mur réflecteur
%*****

time.calculmur=toc;

% Calcul du vecteur de source (émission des paroi éclairées par
% réflexion)
% -----
tic

% Rface : coefficient de réflexion des parois (faces 1 à 6)
Rfaces=[.4 .4 .4 .4 .4 .4];
N=50;

% [E, svect]=calculsource(FF2, vectf, hmf, lmf, debutm, Pt, Co, Ptmur, ComurE, Imur, Rmur, Rfaces);
[E, svect]=calculsourcehauteur(FF2, hf, hpf, lf, lpf, debutm, Pt, Co, Ptmur, ComurE, Imur, Rmur, Rfaces,
N);

time.calculsource=toc;

% Calcul de la sol de l'eq de radiosité
% -----

tic

%*****
[B]=calculrad(FF2,E, debutm, Rfaces);
%B : solution de l'équation de radiosité
%*****
time.calculrad=toc;

% Calcul de la sol de l'énergie reçue sur un capteur
% -----

tic

% capteur point (par Monte Carlo stratifié)
%-----

% Pcapteur = [1 1 1]; %position du capteur (voire pour conditions de sécurités pour le garantir dans la
pièce)
% normalcapteur = [1 1 1]; %normal montrant la direction du capteur
% Nraycapteur = 2*Nmaille; %nombre de rayons lancés pour le calcul de la solution
%
% for i=1:6
% [Bcapt]=capteurpoint(Pt, Co2, Ptmur, ComurE, Rmur, Rfaces, B, Imur, Pcapteur, normalcapteur, Nraycapteur,

```

```

debutm)
end
% time.capturpoint=toc;

% capteur point analytique
%-----
%direction du capteur vers le haut
tic

Pcapteur = [2.4 1.4 1.2]; %position du capteur (voire pour conditions de sécurités pour le garantir dans
la pièce)
Bcapta(1)=capteurpointanalytique(Pt, Co2, Ptmur, ComurE, Rmur, Rfaces, B, Imur, Pcapteur, debutm, c, Nm,
NmailleSF, vectf, hf, lf, hpf, lpf, N);
%
% Pcapteur = [1 1 1]; %position du capteur (voire pour conditions de sécurités pour le garantir dans la
pièce)
time.capturpointanalytique=toc;

% Plotage
% ----
% figure 1 : radiosité issue de la reflexion du mur seule
% figure 2 : radiosité issue de la reflexion du mur + reflexion interne
% figure 3 : radiosité issue de la reflexion interne seule (figure 2-figure 1)
% figure 4 : valeur de radiosité aux points définis par les capteurs plan
tic

plotage(Co2,Pt, Nmaille, Ptmur,Comur0, ComurE, Ptmisque,Comasque, E, Imur, B)
% plotcapteurplan(L, l, h, hf, lf, hpf, lpf, Bcapptplan, pcaptplan)

time.plotage=toc;
time
%*****

```

.2 Fonction maillage

```

function [Co, Co2, Pt, Nm, h, L, l, c, Nmaille, NmailleSF, debutm, vectf, hmf, lmf, hf, lf, hpmf,
lpmf, hpf, lpf]=...
maillage(h,L,l,lf,hf,hpf,lpf,c)

%definition des numéros des faces
%1: z=0
%2: z=h
%3: y=0
%4: y=1
%5: x=0
%6: x=L (fenêtre)

%*****

% S=2*l*L+2*h*L+2*h*l;
%
% Smaille=S/Nmaille;
%
% c=sqrt(Smaille);
%
% c=c-mod(c,0.01);
%
% h=c*round(h/c);
% L=c*round(L/c);
% l=c*round(l/c);
% lf=c*round(lf/c);
% hf=c*round(hf/c);
% hpf=c*round(hpf/c);

```

```

% lpf=c*round(lpf/c);

Smaille=c*c;
Nmaille=(2*h*L+2*L*1+2*h*1-hf*lf)/Smaille;
Nmaille=round(Nmaille);
NmailleSF=(2*h*L+2*L*1+2*h*1)/Smaille; %Nombre de maille du pavé sans fenêtre
NmailleSF=round(NmailleSF);

Nm=[round(L/c) round(l/c) round(h/c)]; %nombre de maille dans chaque direction

hmf=hf/c;
hmf=round(hmf); %Nombre vectical de mailles de la fenêtre
lmf=lf/c; %Nombre horizontal de mailles de la fenêtre
lmf=round(lmf);

hpmf=hp/c; %nombre de mailles sous la fenêtre
hpmf=round(hpmf);
lpmf=lp/c; %nombre de mailles sur le côté de la fenêtre (début côté x=0)
lpmf=round(lpmf);

%*****
%definition des numéros des faces
%1: z=0
%2: z=h
%3: y=0
%4: y=1
%5: x=0
%6: x=L (fenêtre)

%*****
%Matrice des points*****
%*****

%initialisation variables.
%*****
Pt=zeros(2*((Nm(1)+1)*(Nm(2)+Nm(3))+(Nm(2)-1)*(Nm(3)-1))-((lf/c-1)*((hf/c)-1)),3);

% debutp : vecteur des numéros de pt début de chaque face
debutp=1; %face 1
debutp=[debutp
debutp(1)+(Nm(1)+1)*(Nm(2)+1)]; %face 2
debutp=[debutp
debutp(2)+(Nm(1)+1)*(Nm(2)+1)]; %face 3
debutp=[debutp
debutp(3)+(Nm(1)+1)*(Nm(3)-1)]; %face 4
debutp=[debutp
debutp(4)+(Nm(1)+1)*(Nm(3)-1)]; %face 5
debutp=[debutp
debutp(5)+(Nm(2)-1)*(Nm(3)-1)]; %face 6

%face 1 et 2
%*****
Ptcompte=1; % Compte le nombre point

for j=0:Nm(2) % création des points sur la face 1 et 2
    for i=0:Nm(1)

        Pt(Ptcompte,:)=i*c j*c 0]; % face 1
        Pt(Ptcompte+debutp(2)-1,:)=i*c j*c h]; %face 2

        Ptcompte=Ptcompte+1;
    end
end

%face 3 et 4

```

```

%*****
Ptcompte=0;

for j=1:Nm(3)-1
    for i=0:Nm(1)

        Pt(Ptcompte+debutp(3),:)= [i*c 0 j*c]; %face 3
        Pt(Ptcompte+debutp(4),:)= [i*c 1 j*c]; %face 4

        Ptcompte=Ptcompte+1;
    end
end

%face 5 et 6 (Oh et puis tant pis, on fait des points partout...)
%*****
Ptcompte=0;

for j=1:Nm(3)-1
    for i=1:Nm(2)-1

        Pt(Ptcompte+debutp(5),:)= [0 i*c j*c]; %face 5
        Pt(Ptcompte+debutp(6),:)= [1 i*c j*c]; %face 6
        Ptcompte=Ptcompte+1;

    end
end

%*****
%Matrice des Co des mailles*****
%*****

%initialisation variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%debutm : vecteur des numéros de début de chaque face

Co=zeros(Nmaille,4);
debutm=1; %face 1
debutm=[debutm
debutm(1)+Nm(1)*Nm(2)]; %face 2
debutm=[debutm
debutm(2)+Nm(1)*Nm(2)]; %face 3
debutm=[debutm
debutm(3)+Nm(1)*Nm(3)]; %face 4
debutm=[debutm
debutm(4)+Nm(1)*Nm(3)]; %face 5
debutm=[debutm
debutm(5)+Nm(2)*Nm(3)]; %face 6
debutm=[debutm
debutm(6)+Nm(2)*Nm(3)]; %nombre de mailles+1

% faces 1 et 2
%*****
Mcompte=0;

for j=1:Nm(2)
    for i=1:Nm(1)

        Co(Mcompte+debutm(2),:)= [debutp(2)+(j-1)*(Nm(1)+1)+i-1  debutp(2)+j*(Nm(1)+1)+i-1 ...
        debutp(2)+j*(Nm(1)+1)+i  debutp(2)+(j-1)*(Nm(1)+1)+i]; %face 2

        Mcompte=Mcompte+1;
        Co(Mcompte,:)= [(j-1)*(Nm(1)+1)+i  j*(Nm(1)+1)+i  j*(Nm(1)+1)+i+1  (j-1)*(Nm(1)+1)+i+1]; %face 1
    end
end

```

```

%faces 3 et 4
%*****
Mcompte=0;

%Aux limites (bordure avec les face z=0 et z=h
for i=1:Nm(1)
    Co(Mcompte+debutm(3),:)= [debutp(1)+i-1 debutp(1)+i ...
        debutp(3)+i debutp(3)+i-1]; %face 3 1ère rangée

    Co(Mcompte+debutm(4)-Nm(1),:)= [debutp(4)-(Nm(1)+1)+i-1 debutp(4)-(Nm(1)+1)+i ...
        debutp(2)+i debutp(2)+i-1]; %face 3 dernière rangée

    Co(Mcompte+debutm(4),:)= [debutp(2)-(Nm(1)+1)+i-1 debutp(2)-(Nm(1)+1)+i ...
        debutp(4)+i debutp(4)+i-1]; %face 4 1ère rangée

    Co(Mcompte+debutm(5)-Nm(1),:)= [debutp(5)-(Nm(1)+1)+i-1 debutp(5)-(Nm(1)+1)+i ...
        debutp(3)-(Nm(1)+1)+i debutp(3)-(Nm(1)+1)+i-1]; %face 4 dernière rangée

    Mcompte=Mcompte+1;
end

%Entre les limites
for j=1:Nm(3)-2
    for i=1:Nm(1)

        Co(Mcompte+debutm(3),:)= [debutp(3)+(j-1)*(Nm(1)+1)+i-1 debutp(3)+(j-1)*(Nm(1)+1)+i ...
            debutp(3)+j*(Nm(1)+1)+i debutp(3)+j*(Nm(1)+1)+i-1]; %face 3

        Co(Mcompte+debutm(4),:)= [debutp(4)+(j-1)*(Nm(1)+1)+i-1 debutp(4)+(j-1)*(Nm(1)+1)+i ...
            debutp(4)+j*(Nm(1)+1)+i debutp(4)+j*(Nm(1)+1)+i-1]; %face 4

        Mcompte=Mcompte+1;
    end
end

%face 5
%*****
Mcompte=0;

%Aux limites (première et dernière ligne)*****

%Coins gauche (haut et bas)
Co(Mcompte+debutm(5),:)= [debutp(1) debutp(1)+Nm(1)+1 ...
    debutp(5) debutp(3)]; %Coin bas
Co(debutm(6)-Nm(2),:)= [debutp(2) debutp(2)+Nm(1)+1 ...
    debutp(6)-(Nm(2)-1) debutp(4)-(Nm(1)+1)]; %Coin haut
Mcompte=Mcompte+1;

%rangée du bas et du haut sans les coins
for i=1:Nm(2)-2
    Co(Mcompte+debutm(5),:)= [debutp(1)+i*(Nm(1)+1) debutp(1)+(i+1)*(Nm(1)+1) ...
        debutp(5)+i debutp(5)+i-1]; %face 5 1ère rangée

    Co(Mcompte+debutm(6)-Nm(2),:)= [debutp(2)+(i+1)*(Nm(1)+1) debutp(2)+i*(Nm(1)+1) ...
        debutp(6)-(Nm(2)-1)+i-1 debutp(6)-(Nm(2)-1)+i]; %face 5 dernière rangée

    Mcompte=Mcompte+1;
end

%Coin droit
Co(Mcompte+debutm(5),:)= [debutp(2)-2*(Nm(1)+1) debutp(2)-(Nm(1)+1) ...
    debutp(4) debutp(5)+Nm(2)-2]; %coin bas
Co(debutm(6)-1,:)= [debutp(3)-(Nm(1)+1) debutp(3)-2*(Nm(1)+1) ...

```

```

debutp(6)-1 debutp(5)-(Nm(1)+1)]; %Coin haut
Mcompte=Mcompte+1;

%Entre les limites + mailles gauche et droite*****

for j=1:Nm(3)-2

    Co(Mcompte+debutm(5),:)= [debutp(5)+(j-1)*(Nm(2)-1) debutp(5)+j*(Nm(2)-1) ...
    debutp(3)+j*(Nm(1)+1) debutp(3)+(j-1)*(Nm(1)+1)]; %première maille de chaque ligne

    Mcompte=Mcompte+1;

    for i=1:Nm(2)-2

        Co(Mcompte+debutm(5),:)= [debutp(5)+(j-1)*(Nm(2)-1)+i-1 debutp(5)+(j-1)*(Nm(2)-1)+i ...
        debutp(5)+j*(Nm(2)-1)+i debutp(5)+j*(Nm(2)-1)+i-1]; %centre face 5

        Mcompte=Mcompte+1;
    end

    Co(Mcompte+debutm(5),:)= [debutp(5)+(j+1)*(Nm(2)-1)-1 debutp(5)+j*(Nm(2)-1)-1 ...
    debutp(4)+(j-1)*(Nm(1)+1) debutp(4)+j*(Nm(1)+1)]; %dernière maille de chaque ligne

    Mcompte=Mcompte+1;
end

%face 6 (dur, dur, dur)
%*****

%*****
%Méthode simplifiée :
% On maille toutes la face 6 de la même manière que la face 5
% On enregistre les numéros des mailles de la fenêtre dans un vecteur
% On créé une nouvelle matrice de Co (2) en retirant les mailles aux
% niveaux des fenêtres de la matrice Co (1)

% Pour le plotage : on utilise (2)
% Pour le calcul : on utilise (1) puis on supprime les lignes et colonnes
% dont les numéros sont dans le vecteur des N° de maille de la fenêtre
%*****

Mcompte=0;

%Aux limites (première et dernière ligne)*****

%Coins gauche (haut et bas)
Co(Mcompte+debutm(6),:)= [debutp(1)+Nm(1) debutp(1)+2*Nm(1)+1 ...
debutp(6) debutp(3)+Nm(1)]; %Coin bas
Co(NmailleSF-(Nm(2)-1),:)= [debutp(4)-1 size(Pt,1)-(Nm(2)-2) ...
debutp(2)+2*Nm(1)+1 debutp(2)+Nm(1)]; %Coin haut
Mcompte=Mcompte+1;

%rangée du bas et du haut sans les coins
for i=1:Nm(2)-2
    Co(Mcompte+debutm(6),:)= [debutp(1)+Nm(1)+i*(Nm(1)+1) debutp(1)+Nm(1)+(i+1)*(Nm(1)+1) ...
    debutp(6)+i debutp(6)+i-1]; %face 6 1ère rangée

    Co(Mcompte+NmailleSF-(Nm(2)-1),:)= [size(Pt,1)-(Nm(2)-2)-1+i size(Pt,1)-(Nm(2)-2)+i ...
    debutp(2)+Nm(1)+(i+1)*(Nm(1)+1) debutp(2)+Nm(1)+i*(Nm(1)+1)]; %face 6 dernière rangée

    Mcompte=Mcompte+1;
end

%Coin droit
Co(Mcompte+debutm(6),:)= [debutp(2)-(Nm(1)+2) debutp(2)-1 ...

```

```

debutp(4)+Nm(1) debutp(6)+Nm(2)-2]; %coin bas
Co(NmailleSF,:)= [size(Pt,1) debutp(5)-1 ...
debutp(3)-1 debutp(3)-(Nm(1)+2)]; %Coin haut
Mcompte=Mcompte+1;

%Entre les limites + mailles gauche et droite*****

for j=1:Nm(3)-2

    Co(Mcompte+debutm(6),:)= [debutp(6)+(j-1)*(Nm(2)-1) debutp(6)+j*(Nm(2)-1) ...
    debutp(3)+Nm(1)+j*(Nm(1)+1) debutp(3)+Nm(1)+(j-1)*(Nm(1)+1)]; %première maille de chaque ligne

    Mcompte=Mcompte+1;

    for i=1:Nm(2)-2

        Co(Mcompte+debutm(6),:)= [debutp(6)+(j-1)*(Nm(2)-1)+i-1 debutp(6)+(j-1)*(Nm(2)-1)+i ...
        debutp(6)+j*(Nm(2)-1)+i debutp(6)+j*(Nm(2)-1)+i-1]; %centre face 5

        Mcompte=Mcompte+1;
    end

    Co(Mcompte+debutm(6),:)= [debutp(6)+(j+1)*(Nm(2)-1)-1 debutp(6)+j*(Nm(2)-1)-1 ...
    debutp(4)+Nm(1)+(j-1)*(Nm(1)+1) debutp(4)+Nm(1)+j*(Nm(1)+1)]; %dernière maille de chaque ligne

    Mcompte=Mcompte+1;
end

%Création vecteur des numéro de maille de fenêtre
%*****

vectf=zeros((hmf*lmf),1);
compteur=1;
k=debutm(6)+Nm(2)*hpmf-1; %k:nombre de mailles avant et sous la fenêtre

for j=1:hmf
    for i=1:lmf
        vectf(compteur)=k+lpmf+i+(j-1)*Nm(2);

        compteur=compteur+1;
    end
end

%Création de la Matrice Co2 avec fenêtre
%*****

Co2=Co;

for i=size(vectf):-1:1
    Co2(vectf(i),:)=[];
end

end

```

.3 Fonction calculff (calcul des facteurs de forme)

```

function [FF,FF2]=calculff(Nm,h, L, l, c, NmailleSF, debutm, vectf)

%---PRINCIPE GENERAL---
%Le calcul utilise les formules analytiques de facteurs de forme d'une
%surface finie à une surface finie des cas C13, C14 et C15 présents sur le
%site : http://www.me.utexas.edu/howell/

%NOTE : les fonctions sont appelées par les noms des cas du site.

```



```

for i=1:maxNm
    for j=1:min(minNm,i)
        x(1)=0;
        x(2)=c;
        y(1)=0;
        y(2)=c;
        n(1)=(i-1)*c;
        n(2)=i*c;
        e(1)=(j-1)*c;
        e(2)=j*c;
        z=h;
        M13(i,j)=C13(x,y,n,e,z);
    end
end

for k=1:(maxNm*minNm)
    r=mod(k-1,Nm(1));
    f=floor((k-.5)/Nm(1));
    for i=1:maxNm
        for j=1:min(minNm,i)

            if Nm(1)-(r+i)>=0
                if Nm(2)-(f+j)>=0
                    M=debutm(face)-1+k+(i-1)+(j-1)*Nm(1);
                    if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                        FF(k,M)=M13(i,j);
                        FF(M,k)=M13(i,j);
                    end
                end
            end
            if (f+1)-j>=0
                M=debutm(face)-1+k+(i-1)-(j-1)*Nm(1);
                if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                    FF(k,M)=M13(i,j);
                    FF(M,k)=M13(i,j);
                end
            end
        end
    end

    if Nm(1)-(r+j)>=0
        if Nm(2)-(f+i)>=0
            M=debutm(face)-1+k+(j-1)+(i-1)*Nm(1);
            if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                FF(k,M)=M13(i,j);
                FF(M,k)=M13(i,j);
            end
        end
    end
    if (f+1)-i>=0
        M=debutm(face)-1+k+(j-1)-(i-1)*Nm(1);
        if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
            FF(k,M)=M13(i,j);
            FF(M,k)=M13(i,j);
        end
    end
end

    if (r+1)-i>=0
        if Nm(2)-(f+j)>=0
            M=debutm(face)-1+k-(i-1)+(j-1)*Nm(1);
            if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                FF(k,M)=M13(i,j);
                FF(M,k)=M13(i,j);
            end
        end
    end
    if (f+1)-j>=0
        M=debutm(face)-1+k-(i-1)-(j-1)*Nm(1);

```



```

minNm=min(Nm(2),Nm(3));
maxNm=max(Nm(2),Nm(3));

M13=zeros(maxNm,minNm);

for i=1:maxNm
    for j=1:min(minNm,i)
        x(1)=0;
        x(2)=c;
        y(1)=0;
        y(2)=c;
        n(1)=(i-1)*c;
        n(2)=i*c;
        e(1)=(j-1)*c;
        e(2)=j*c;
        z=L;
        M13(i,j)=C13(x,y,n,e,z);
    end
end

for k=1:(maxNm*minNm)
    r=mod(k-1,Nm(2));
    f=floor((k-.5)/Nm(2));
    for i=1:maxNm
        for j=1:min(minNm,i)

            if Nm(2)-(r+i)>=0
                if Nm(3)-(f+j)>=0
                    M=debutm(face)-1+k+(i-1)+(j-1)*Nm(2);
                    if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                        FF(k+debutm(face)-1,M)=M13(i,j);
                        FF(M,k+debutm(face)-1)=M13(i,j);
                    end
                end
                if (f+1)-j>=0
                    M=debutm(face)-1+k+(i-1)-(j-1)*Nm(2);
                    if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                        FF(k+debutm(face)-1,M)=M13(i,j);
                        FF(M,k+debutm(face)-1)=M13(i,j);
                    end
                end
            end
            if Nm(2)-(r+j)>=0
                if Nm(3)-(f+i)>=0
                    M=debutm(face)-1+k+(j-1)+(i-1)*Nm(2);
                    if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                        FF(k+debutm(face)-1,M)=M13(i,j);
                        FF(M,k+debutm(face)-1)=M13(i,j);
                    end
                end
                if (f+1)-i>=0
                    M=debutm(face)-1+k+(j-1)-(i-1)*Nm(2);
                    if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                        FF(k+debutm(face)-1,M)=M13(i,j);
                        FF(M,k+debutm(face)-1)=M13(i,j);
                    end
                end
            end
            if (r+1)-i>=0
                if Nm(3)-(f+j)>=0
                    M=debutm(face)-1+k-(i-1)+(j-1)*Nm(2);
                    if M>=debutm(face) & M<=debutm(face+1)-1
                        FF(k+debutm(face)-1,M)=M13(i,j);
                        FF(M,k+debutm(face)-1)=M13(i,j);
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



```

end
end

%Remplissage de FF
% face 1 et 2 à 3, 4, 5 et 6
for k=1:Nm(1)*Nm(2)
    r=mod(k-1,Nm(1));
    f=floor((k-.5)/Nm(1));
    for i=1:Nm(3)

        %face 1 à 3
        P1=k; %point de la première face
        P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r; %point cible (deuxième face)
        FF(P1,P2)=M14a(max(f+1,i),min(f+1,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 2 à 3
        P1=k+debutm(2)-1;
        P2=debutm(4)-Nm(1)-(i-1)*Nm(1)+r;
        FF(P1,P2)=M14a(max(f+1,i),min(f+1,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 1 à 4
        P1=k;
        P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r;
        FF(P1,P2)=M14a(max(Nm(2)-f,i),min(Nm(2)-f,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 2 à 4
        P1=k+debutm(2)-1;
        P2=debutm(5)-Nm(1)-(i-1)*Nm(1)+r;
        FF(P1,P2)=M14a(max(Nm(2)-f,i),min(Nm(2)-f,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 1 à 5
        P1=k;
        P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f;
        FF(P1,P2)=M14a(max(r+1,i),min(r+1,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 2 à 5
        P1=k+debutm(2)-1;
        P2=debutm(6)-Nm(2)-(i-1)*Nm(2)+f;
        FF(P1,P2)=M14a(max(r+1,i),min(r+1,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 1 à 6
        P1=k;
        P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f;
        FF(P1,P2)=M14a(max(Nm(1)-r,i),min(Nm(1)-r,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

        %face 2 à 6
        P1=k+debutm(2)-1;
        P2=debutm(7)-Nm(2)-(i-1)*Nm(2)+f;
        FF(P1,P2)=M14a(max(Nm(1)-r,i),min(Nm(1)-r,i));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

    end
end

% face 3 et 4 à 5 et 6

for k=1:Nm(1)*Nm(3)
    r=mod(k-1,Nm(1));
    f=floor((k-.5)/Nm(1));

```

```

for i=1:Nm(2)

    %face 3 à 5
    P1=debutm(3)+k-1;
    P2=debutm(5)+f*Nm(2)+i-1;
    FF(P1,P2)=M14a(max(r+1,i),min(r+1,i));
    FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

    %face 3 à 6
    P1=debutm(3)+k-1;
    P2=debutm(6)+f*Nm(2)+i-1;
    FF(P1,P2)=M14a(max(Nm(1)-r,i),min(Nm(1)-r,i));
    FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

    %face 4 à 5
    P1=debutm(4)+k-1;
    P2=debutm(5)+f*Nm(2)+i-1;
    FF(P1,P2)=M14a(max(r+1,Nm(2)+1-i),min(r+1,Nm(2)+1-i));
    FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

    %face 4 à 6
    P1=debutm(4)+k-1;
    P2=debutm(6)+f*Nm(2)+i-1;
    FF(P1,P2)=M14a(max(Nm(1)-r,Nm(2)+1-i),min(Nm(1)-r,Nm(2)+1-i));
    FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

end
end

% CAS B*****
%*****

M14=zeros(oNm(3),oNm(2));
%Montage de la matrice des calculs
M14(1,1)=C14(1,1,2)-C14(1,1,1); %calcul du premier terme
for i=2:oNm(3)
    M14(i,1)=C14(i,1,2)-C14(i-1,1,2)-(C14(i,1,1)-C14(i-1,1,1));
end %Remplissage de la seconde colonne

for i=2:oNm(3) %Remplissage du reste de la matrice
    for j=2:min(oNm(2),i)

        M14(i,j)=j*(C14(i,j,2)-C14(i-1,j,2)-...
            (C14(i,j,1)-C14(i-1,j,1)))-...
            (j-1)*(C14(i,j-1,2)-C14(i-1,j-1,2)-(C14(i,j-1,1)-C14(i-1,j-1,1)));
    end
end

%Remplissage de FF
% Pour remplir, on boucle d'abord dans un sens de la première maille au
% nombre de maille par ligne-décalage (on remplit la rangée i vers i+1)
% puis on boucle dans l'autre sens, de décalage au nombre de maille (on
% remplit la rangée i vers i-1)

decalage=2; %décalage entre les 2 rangées

% face 1 et 2 à 3 et 4

for r=1:Nm(1)-decalage+1 %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
    for f=1:Nm(2)
        for i=1:Nm(3)

            %face 1 à 3
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;

```

```

FF(P1,P2)=M14(max(f,i),min(f,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 3
P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(f,Nm(3)-i+1),min(f,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 1 à 4
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(2)-f+1,i),min(Nm(2)-f+1,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 4
P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
end
end
end
for r=decalage:Nm(1) %remplissage à rebours
for f=1:Nm(2)
for i=1:Nm(3)

%face 1 à 3
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(f,i),min(f,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 3
P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(f,Nm(3)-i+1),min(f,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 1 à 4
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(2)-f+1,i),min(Nm(2)-f+1,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 4
P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
end
end
end
% face 1 et 2 à 5 et 6

for r=1:Nm(1) %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
for f=1:Nm(2)-decalage+1
for i=1:Nm(3)

%face 1 à 5
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(r,i),min(r,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 5

```

```

P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(r,Nm(3)-i+1),min(r,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 1 à 6
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 6
P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
end
end
for r=1:Nm(1) %boucle pour les calculs à rebours
for f=decalage:Nm(2)
for i=1:Nm(3)

%face 1 à 5
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(r,i),min(r,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 5
P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(r,Nm(3)-i+1),min(r,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 1 à 6
P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 6
P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
end
end
end

% face 3 et 4 à 5 et 6
for r=1:Nm(1) %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
for f=1:Nm(3)-decalage+1
for i=1:Nm(2)

%face 3 à 5
P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
P2=debutm(5)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
FF(P1,P2)=M14(max(r,i),min(r,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 4 à 5
P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
P2=debutm(5)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
FF(P1,P2)=M14(max(r,Nm(2)-i+1),min(r,Nm(2)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

```

```

    %face 3 à 6
    P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
    P2=debutm(6)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
    FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
    FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

    %face 4 à 6
    P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
    P2=debutm(6)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
    FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,Nm(2)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(2)-i+1));
    FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
end
end
end
for r=1:Nm(1) %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
    for f=decalage:Nm(3)
        for i=1:Nm(2)

            %face 3 à 5
            P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M14(max(r,i),min(r,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 4 à 5
            P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M14(max(r,Nm(2)-i+1),min(r,Nm(2)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 3 à 6
            P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 4 à 6
            P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M14(max(Nm(1)-r+1,Nm(2)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(2)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
        end
    end
end
end

% CAS C*****
%*****

%preM15 est un vecteur qui sert à calculer M15(1,1) pour chaque cas de
%décalage en enregistrant les résultats successif de M15(1,1)
preM15=zeros(oNm(3),oNm(3));
preM15(1,:)=M14a(:,1);
preM15(2,:)=M14(:,1);

for decalage=3:oNm(3)

    %Calcul de la matrice des FF analytiques pour un décalage fixé
    M15=zeros(oNm(3),oNm(2));

    %Calcul du cas M15(1,1)
    s=decalage*C14(c,c,decalage*c);
    s=s-decalage*preM15(1,1);
    for j=2:decalage-1
        s=s-2*(decalage-j+1)*preM15(j,1);
    end
end

```

```

M15(1,1)=s/2;
preM15(decalage,1)=M15(1,1);

%Calcul du reste de M15 pour le décalage
for i=2:oNm(3)
    for j=1:min(oNm(2),i)
        x=[(j-1)*c j*c];
        y=[0 c];
        n=[(decalage-1)*c decalage*c];
        e=[(i-1)*c i*c];
        M15(i,j)=C15(x,y,n,e);
    end
end

%*****
%Remplissage de la matrice des FF

% face 1 et 2 à 3 et 4

for r=1:Nm(1)-decalage+1 %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
    for f=1:Nm(2)
        for i=1:Nm(3)

            %face 1 à 3
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(f,i),min(f,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 2 à 3
            P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(f,Nm(3)-i+1),min(f,Nm(3)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 1 à 4
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(2)-f+1,i),min(Nm(2)-f+1,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 2 à 4
            P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
        end
    end
end
for r=decalage:Nm(1) %remplissage à rebours
    for f=1:Nm(2)
        for i=1:Nm(3)

            %face 1 à 3
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
            FF(P1,P2)=M15(max(f,i),min(f,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 2 à 3
            P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(3)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
            FF(P1,P2)=M15(max(f,Nm(3)-i+1),min(f,Nm(3)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 1 à 4

```

```

P1=r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
FF(P1,P2)=M15(max(Nm(2)-f+1,i),min(Nm(2)-f+1,i));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

%face 2 à 4
P1=debutm(2)-1+r+(f-1)*Nm(1);
P2=debutm(4)+(i-1)*Nm(1)+r-decalage;
FF(P1,P2)=M15(max(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(2)-f+1,Nm(3)-i+1));
FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
end
end
end

% face 1 et 2 à 5 et 6
for r=1:Nm(1) %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
    for f=1:Nm(2)-decalage+1
        for i=1:Nm(3)

            %face 1 à 5
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,i),min(r,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 2 à 5
            P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,Nm(3)-i+1),min(r,Nm(3)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 1 à 6
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 2 à 6
            P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f+decalage-2;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
        end
    end
end
for r=1:Nm(1) %boucle pour les calculs à rebours
    for f=decalage:Nm(2)
        for i=1:Nm(3)

            %face 1 à 5
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,i),min(r,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 2 à 5
            P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,Nm(3)-i+1),min(r,Nm(3)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 1 à 6
            P1=r+(f-1)*Nm(1);
            P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
        end
    end
end

```

```

        %face 2 à 6
        P1=debutm(2)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
        P2=debutm(6)+(i-1)*Nm(2)+f-decalage;
        FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(3)-i+1));
        FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
    end
end
end

% face 3 et 4 à 5 et 6

for r=1:Nm(1) %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
    for f=1:Nm(3)-decalage+1
        for i=1:Nm(2)

            %face 3 à 5
            P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,i),min(r,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 4 à 5
            P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,Nm(2)-i+1),min(r,Nm(2)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 3 à 6
            P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 4 à 6
            P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(decalage+f-2)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,Nm(2)-i+1),min(Nm(1)-r+1,Nm(2)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);
        end
    end
end
for r=1:Nm(1) %r numéro de la maille sur la rangée (=reste)
    for f=decalage:Nm(3)
        for i=1:Nm(2)

            %face 3 à 5
            P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,i),min(r,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 4 à 5
            P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(5)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(r,Nm(2)-i+1),min(r,Nm(2)-i+1));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 3 à 6
            P1=debutm(3)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;
            FF(P1,P2)=M15(max(Nm(1)-r+1,i),min(Nm(1)-r+1,i));
            FF(P2,P1)=FF(P1,P2);

            %face 4 à 6
            P1=debutm(4)+r+(f-1)*Nm(1)-1;
            P2=debutm(6)+(-decalage+f)*Nm(2)+i-1;

```



```

(1/4)*log(((1+W^2)*(1+H^2)/(1+H^2+W^2))*...
(W^2*(1+H^2+W^2)/((1+W^2)*(H^2+W^2)))^(W^2)*...
(H^2*(1+H^2+W^2)/((1+H^2)*(H^2+W^2)))^(H^2));
end

```

.6 Fonction C15 (formule analytique de facteur de forme)

```

function[FF]=C15(x, y, n, e)
%http://www.me.utexas.edu/howell/sectionc/C-15.html
%x,y,n,e vecteurs à deux coordonnées

FF=0;
for l=1:2
    for k=1:2
        for j=1:2
            for i=1:2
                FF=FF+(-1)^(i+k+j+1)*G(x(i),y(j),n(k),e(l));
            end
        end
    end
end

FF=(1/((x(2)-x(1))*(y(2)-y(1))))*FF;

end

function [g]=G(x, y, n, e)
K=(y-n)/(sqrt(x^2+e^2));

g=(1/(2*pi))*((y-n)*sqrt(x^2+e^2)*atan(K)-(1/4)*((x^2+e^2)*log(1+K^2)-(y-n)^2*log(1+1/K^2)));
end

```

.7 Fonction calculmur (calcul de la partie éclairée du mur)

```

function [Ptmur, Comur0, ComurE, Ptmisque, Comasque, Imur]=calculmur(h, l, L, hsol, hmur, lmur, dmur,
hmasque)
%Fonction qui calcule la disposition de la paroi de reflexion et la
%puissance réfléchie

xmur=L+dmur; %position en x du mur
ymur=(l-lmur)/2; %y de la position de début du mur
hombre=min([max([0 h+hmasque-dmur*tan(hsol*pi/180)]) h+hmasque]); %hauteur de l'ombre sur le mur

%Création des mailles éclairés et éteints

%Ptmur : coordonnées des points des mailles du mur
Ptmur=[xmur ymur 0;
xmur ymur+lmur 0;
xmur ymur hombre;
xmur ymur+lmur hombre;
xmur ymur hmur;
xmur ymur+lmur hmur];

Comur0=[1 2 4 3]; %Connectivités des mailles à l'Ombre
ComurE=[3 4 6 5]; %Connectivités des mailles éclairée

%Ptmisque : coordonnées des points des mailles du masque
Ptmisque=[L ymur 0;
L ymur h;
L 0 0;
L 0 h;
L 1 0;

```

```

L 1 h;
L ymur+lmur 0;
L ymur+lmur h;
L ymur h+hmasque;
L ymur+lmur h;
L ymur+lmur h+hmasque];

Comasque=[1 3 4 2;
5 7 8 6;
2 10 11 9]; %Connectivité des mailles du masque

alt=40; %altitude de la location
Imur= sirrsimple(alt,hsol); % fonction de calcul de l'énergie reçue du mur
end

```

.8 Fonction sirrsimple (calcul de la puissance du rayonnement direct du soleil)

```

function [Sp3] = sirrsimple(alt,hsol)
%Basé sur Duffie&Beckman_3ed 1.6.11
Gsc=1367; %W/m2 solar constant
tra=0.7; %transmittance atmospherique

teta=cos(pi*hsol/180);

pa=101.3*exp(-alt/8200); %pression atmospherique MPa
m= pa/101.3/teta; %nombre de masse optique

Sp1=Gsc*tra^m; %irradiance sur une surface perpendiculaire au beam
Sp3=Sp1*teta; %irradiance sur une surface inclinée à ta
end

```

.9 Fonction calculsourcehauteur (calcul de la réflexion du mur extérieur sur les mailles de la pièce)

```

function [E, svect]=calculsourcehauteur(FF2, hf, hpf, lf, lpf, debutm, Pt, Co, Ptmur, ComurE, Imur, Rmur, Rfaces, N)
%fonction qui calcule l'irradiation source de chaque face par lancer de
%rayon à travers la fenêtre (N rayons lancés sur un segment vertical de la
%fenêtre).
E=zeros(size(FF2,1),1);

for k=1:debutm(6)-1 %boucle sur les mailles
    s=0;
    r0=[(max([Pt(Co(k,1),1) Pt(Co(k,2),1) Pt(Co(k,3),1)])+min([Pt(Co(k,1),1) Pt(Co(k,2),1) Pt(Co(k,3),1)])))/2
    ...
    (max([Pt(Co(k,1),2) Pt(Co(k,2),2) Pt(Co(k,3),2)])+min([Pt(Co(k,1),2) Pt(Co(k,2),2) Pt(Co(k,3),2)])))/2
    ...
    (max([Pt(Co(k,1),3) Pt(Co(k,2),3) Pt(Co(k,3),3)])+min([Pt(Co(k,1),3) Pt(Co(k,2),3) Pt(Co(k,3),3)])))/2];

    for i=1:N %boucle sur les points de directions de la fenêtre
        r1=[Pt(Co(debutm(6)),1) lpf+lf/2 hpf+i*hf/N];
        %test d'intersection des rayons lancés par la fenêtre avec le
        %mur réflecteur
        s=s+irphauteur(r0,r1,Ptmur(ComurE(1,1),:),...
        Ptmur(ComurE(1,2),:),...
        Ptmur(ComurE(1,3),:));
    end
    E(k,1)=Imur* Rmur*(s/N)*(1-sum(FF2(k,:))); % montage du terme source
    svect(k)=s;
end

```

```

% ajout des coeficients de réflexion des parois
E(1:debutm(2)-1,:)=E(1:debutm(2)-1,:)*Rfaces(1);
E(debutm(2):debutm(3)-1,:)=E(debutm(2):debutm(3)-1,:)*Rfaces(2);
E(debutm(3):debutm(4)-1,:)=E(debutm(3):debutm(4)-1,:)*Rfaces(3);
E(debutm(4):debutm(5)-1,:)=E(debutm(4):debutm(5)-1,:)*Rfaces(4);
E(debutm(5):debutm(6)-1,:)=E(debutm(5):debutm(6)-1,:)*Rfaces(5);
E(debutm(6):size(FF2,1),:)=E(debutm(6):size(FF2,1),:)*Rfaces(6);
end

```

.10 Fonction irphauteur (test d'intersection d'un rayon avec une maille)

```

function [t1]=irphauteur(r0, r1, a, b, c)
%Fonction de test d'intesection d'un rayon avec une maille rectangulaire

%r0 : point source du lancer de rayon
%r1 : point de visée du rayon lancée
% a, b, c : trois des quatre points du rectangle avec lequel il faut tester
% l'intersection
% tolerance : tolérance pour l'intersection (éviter les erreur numériques)
tolerance=10^(-10);

t1=1;

A = a(2)*(b(3)-c(3))+b(2)*(c(3)-a(3))+c(2)*(a(3)-b(3));
B = a(3)*(b(1)-c(1))+b(3)*(c(1)-a(1))+c(3)*(a(1)-b(1));
C = a(1)*(b(2)-c(2))+b(1)*(c(2)-a(2))+c(1)*(a(2)-b(2));
D = -(A*a(1)+B*a(2)+C*a(3));
% D = a(1)*(b(2)*c(3)-c(2)*b(3))+b(1)*(c(2)*a(3)-a(2)*c(3))+c(1)*(a(2)*b(3)-b(2)*c(3));
% D=-D;

%A=A/sqrt(A^2+B^2+C^2);
%B=B/sqrt(A^2+B^2+C^2);
%C=C/sqrt(A^2+B^2+C^2);
%D=D/sqrt(A^2+B^2+C^2);

Xd = (r1(1)-r0(1))/sqrt((r1(1)-r0(1))^2+(r1(2)-r0(2))^2+(r1(3)-r0(3))^2);
Yd = (r1(2)-r0(2))/sqrt((r1(1)-r0(1))^2+(r1(2)-r0(2))^2+(r1(3)-r0(3))^2);
Zd = (r1(3)-r0(3))/sqrt((r1(1)-r0(1))^2+(r1(2)-r0(2))^2+(r1(3)-r0(3))^2);

vd = A*Xd+B*Yd+C*Zd;
tp=A*r0(1) + B*r0(2) + C*r0(3) + D;

if(abs(tp) < 10^-6)
t1=0;
ts=0;
return;
end

if(vd==0)
t1=0;
ts=0;
return;
end

v0 = -(A*r0(1)+B*r0(2)+C*r0(3)+D);
t=v0/vd;

if (t<0)
t1=0;
ts=0;
return;
end

```

```

P=r0+t*[Xd Yd Zd];

minx=min([a(1) b(1) c(1)])-tolerance;
maxx=max([a(1) b(1) c(1)])+tolerance;

if P(1)>maxx || P(1)<minx
tl=0;
return
end

minz=min([a(3) b(3) c(3)])-tolerance;
maxz=max([a(3) b(3) c(3)])+tolerance;

if P(3)>maxz || P(3)<minz
tl=0;
return
end
end

```

.11 Fonction calculrad (résolution de l'équation de radiosité)

```

function [B]=calculrad(FF2,E,debutm,Rfaces)
%Fonction de calcul de la solution à l'équation de radiosité (B)

B=zeros(size(FF2,1),1);

% ajout des coefficients de réflexion des parois
FF2(1:debutm(2)-1,:)=FF2(1:debutm(2)-1,:)*Rfaces(1);
FF2(debutm(2):debutm(3)-1,:)=FF2(debutm(2):debutm(3)-1,:)*Rfaces(2);
FF2(debutm(3):debutm(4)-1,:)=FF2(debutm(3):debutm(4)-1,:)*Rfaces(3);
FF2(debutm(4):debutm(5)-1,:)=FF2(debutm(4):debutm(5)-1,:)*Rfaces(4);
FF2(debutm(5):debutm(6)-1,:)=FF2(debutm(5):debutm(6)-1,:)*Rfaces(5);
FF2(debutm(6):size(FF2,1),:)=FF2(debutm(6):size(FF2,1),:)*Rfaces(6);

% Calcul de la solution de l'équation de radiosité
Aa=eye(size(FF2))-FF2;
B=Aa^-1*E;
end

```

.12 Fonction capteurpointanalytique

```

function [sol]=capteurpointanalytique(Pt, Co2, Ptmur, ComurE, Rmur, Rfaces, B, Imur, r0, debutm,
c, Nm, Nmaille, vectf, hf, lf, hpf, lpf, N)
% r0=c*round(r0/c); %la position du point est arrondie à sa position la plus proche par rapport au maillage

% soit on arrondie la position du capteur à une intersection de maille,
% soit on se complique la vie.
FF=zeros(Nmaille,1);

% -----
% Arrondi de la position du capteur-----
%-----
r0m=round(r0/c); %la position du point est arrondie à sa position la plus proche par rapport au maillage

r0=r0m*c;

a=[r0m(1) Nm(1)-r0m(1) r0m(2) Nm(2)-r0m(2)];
[maxNm,i]=max(a);
a(i)=[];
minNm=max(a);

```

```

%-----
%-----
%FF avec la paroi plafond
%-----
M3=zeros(maxNm,minNm);
M3(1,1)=B3(1,1,Nm(3)-rOm(3));

% Calcul des différents résultats analytiques nécessaires
for i=2:maxNm
    M3(i,1)=B3(1,i,Nm(3)-rOm(3))-B3(1,i-1,Nm(3)-rOm(3));
end

for i=2:maxNm
    for j=2:minNm
        M3(i,j)=B3(i,j,Nm(3)-rOm(3))-B3(i-1,j,Nm(3)-rOm(3))-B3(i,j-1,Nm(3)-rOm(3))+B3(i-1,j-1,Nm(3)-rOm(3));
    end
end

% assigne les facteurs de forme pour le plafond.
for i=1:maxNm
    for j=1:min(minNm,i)

        if Nm(1)-(rOm(1)+i)>=0
            if Nm(2)-(rOm(2)+j)>=0
                M=debutm(2)+(rOm(2)+j-1)*Nm(1)+(rOm(1)+i-1);
                if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                    FF(M)=M3(i,j);
                end
            end
            if rOm(2)-j>=0
                M=debutm(2)+(rOm(2)-j)*Nm(1)+(rOm(1)+i-1);
                if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                    FF(M)=M3(i,j);
                end
            end
        end

        if Nm(1)-(rOm(1)+j)>=0
            if Nm(2)-(rOm(2)+i)>=0
                M=debutm(2)+(rOm(2)+i-1)*Nm(1)+(rOm(1)+j-1);
                if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                    FF(M)=M3(i,j);
                end
            end
            if rOm(2)-i>=0
                M=debutm(2)+(rOm(2)-i)*Nm(1)+(rOm(1)+j-1);
                if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                    FF(M)=M3(i,j);
                end
            end
        end

        if rOm(1)-i>=0
            if Nm(2)-(rOm(2)+j)>=0
                M=debutm(2)+(rOm(2)+j-1)*Nm(1)+(rOm(1)-i);
                if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                    FF(M)=M3(i,j);
                end
            end
            if rOm(2)-j>=0
                M=debutm(2)+(rOm(2)-j)*Nm(1)+(rOm(1)-i);
                if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                    FF(M)=M3(i,j);
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

    if r0m(1)-j>=0
        if Nm(2)-(r0m(2)+j)>=0
            M=debutm(2)+(r0m(2)+i-1)*Nm(1)+(r0m(1)-j);
            if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
                FF(M)=M3(i,j);
            end
        end
    end
    if r0m(2)-j>=0
        M=debutm(2)+(r0m(2)-i)*Nm(1)+(r0m(1)-j);
        if M>=debutm(2) & M<=debutm(3)-1
            FF(M)=M3(i,j);
        end
    end
end
end

end

end

%-----
%FF avec les parois verticales
%-----

% Avec la face 3
% -----
%données générales pour le calcul sur la face----
face=3;
Nmdim1=Nm(3)-r0m(3); %nombre de mailles au dessus du capteur
Nmdim2=max([r0m(1) Nm(1)-r0m(1)]); %nombre maximum de maille d'un côté du capteur
Nmgauche=r0m(1); %Nombre de mailles à gauche de l'abscisse du capteur
Nmdroite=Nm(1)-r0m(1); %Nombre de mailles à droite de l'abscisse du capteur
Nmface=Nm(1); %Nombre de mailles dans la longueur de la face considérée
distance=r0m(2); %distance du capteur à la face de test
%-----

M4=zeros(maxNm, minNm);
M4(1,1)=B4(1,1,distance); %première valeur

for i=2:Nmdim1 %première colonne de valeurs
    M4(i,1)=B4(i,1,distance)-B4(i-1,1,distance);
end

for j=2:Nmdim2 %première ligne
    M4(1,j)=B4(1,j,distance)-B4(1,j-1,distance);
end

for i=2:Nmdim1 %reste de la matrice
    for j=2:Nmdim2
        M4(i,j)=B4(i,j,distance)-B4(i,j-1,distance)-B4(i-1,j,distance)+B4(i-1,j-1,distance);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à gauche de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmgauche
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+(Nmgauche+1-j);
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à droite de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmdroite
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+Nmgauche+j;
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end
end

```

```

%-----
% Avec la face 4
% -----
%données générales pour le calcul sur la face----
face=4;
Nmdim1=Nm(3)-r0m(3); %nombre de mailles au dessus du capteur
Nmdim2=max([r0m(1) Nm(1)-r0m(1)]); %nombre maximum de maille d'un côté du capteur
Nmgauche=r0m(1); %Nombre de mailles à gauche de l'abscisse du capteur
Nmdroite=Nm(1)-r0m(1); %Nombre de mailles à droite de l'abscisse du capteur
Nmface=Nm(1); %Nombre de mailles dans la longueur de la face considérée
distance=Nm(2)-r0m(2); %distance du capteur à la face de test
%-----

M4=zeros(maxNm, minNm);
M4(1,1)=B4(1,1,distance); %première valeur

for i=2:Nmdim1 %première colonne de valeurs
    M4(i,1)=B4(i,1,distance)-B4(i-1,1,distance);
end

for j=2:Nmdim2 %première ligne
    M4(1,j)=B4(1,j,distance)-B4(1,j-1,distance);
end

for i=2:Nmdim1 %reste de la matrice
    for j=2:Nmdim2
        M4(i,j)=B4(i,j,distance)-B4(i,j-1,distance)-B4(i-1,j,distance)+B4(i-1,j-1,distance);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à gauche de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmgauche
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+(Nmgauche+1-j);
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à droite de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmdroite
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+Nmgauche+j;
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end

%-----
% Avec la face 5
% -----
%données générales pour le calcul sur la face----
face=5;
Nmdim1=Nm(3)-r0m(3); %nombre de mailles au dessus du capteur
Nmdim2=max([r0m(2) Nm(2)-r0m(2)]); %nombre maximum de maille d'un côté du capteur
Nmgauche=r0m(2); %Nombre de mailles à gauche de l'abscisse du capteur
Nmdroite=Nm(2)-r0m(2); %Nombre de mailles à droite de l'abscisse du capteur
Nmface=Nm(2); %Nombre de mailles dans la longueur de la face considérée
distance=r0m(1); %distance du capteur à la face de test
%-----

M4=zeros(maxNm, minNm);
M4(1,1)=B4(1,1,distance); %première valeur

for i=2:Nmdim1 %première colonne de valeurs
    M4(i,1)=B4(i,1,distance)-B4(i-1,1,distance);
end

for j=2:Nmdim2 %première ligne
    M4(1,j)=B4(1,j,distance)-B4(1,j-1,distance);
end

```

```

end

for i=2:Nmdim1 %reste de la matrice
    for j=2:Nmdim2
        M4(i,j)=B4(i,j,distance)-B4(i,j-1,distance)-B4(i-1,j,distance)+B4(i-1,j-1,distance);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à gauche de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmgauche
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+(Nmgauche+1-j);
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à droite de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmdroite
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+Nmgauche+j;
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end

%-----
% Avec la face 6
% -----
%données générales pour le calcul sur la face----
face=6;
Nmdim1=Nm(3)-r0m(3); %nombre de mailles au dessus du capteur
Nmdim2=max([r0m(2) Nm(2)-r0m(2)]); %nombre maximum de maille d'un côté du capteur
Nmgauche=r0m(2); %Nombre de mailles à gauche de l'abscisse du capteur
Nmdroite=Nm(2)-r0m(2); %Nombre de mailles à droite de l'abscisse du capteur
Nmface=Nm(2); %Nombre de mailles dans la longueur de la face considérée
distance=Nm(1)-r0m(1); %distance du capteur à la face de test
%-----

M4=zeros(maxNm, minNm);
M4(1,1)=B4(1,1,distance); %première valeur

for i=2:Nmdim1 %première colonne de valeurs
    M4(i,1)=B4(i,1,distance)-B4(i-1,1,distance);
end

for j=2:Nmdim2 %première ligne
    M4(1,j)=B4(1,j,distance)-B4(1,j-1,distance);
end

for i=2:Nmdim1 %reste de la matrice
    for j=2:Nmdim2
        M4(i,j)=B4(i,j,distance)-B4(i,j-1,distance)-B4(i-1,j,distance)+B4(i-1,j-1,distance);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à gauche de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmgauche
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+(Nmgauche+1-j);
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end

%remplissage des facteurs de forme à droite de l'abscisse du capteur
for j=1:Nmdroite
    for i=1:Nmdim1
        M=debutm(face)-1+(i+r0m(3)-1)*Nmface+Nmgauche+j;
        FF(M)=M4(i,j);
    end
end
end

```

```

%-----
%-----
% Suppression des cases liées aux fenêtres
%-----

for i=size(vectf,1):-1:1;
    FF(vectf(i))=[];
end

%-----
%-----
% Lancer de rayon pour la visibilité du mur réflecteur par la maille
%-----

% 1-méthode par lancer dans les points du maillage de la fenêtre
% -----
% nraypdim=2; %division des mailles de fenêtre pour le nombre rayons lancés
% compteur=0;
% s=0;
% if hpf+hf>=r0(3)
    % for i=lpf:c/nraypdim:lpf+lf %position latérale des lancer de rayon
        % for j=r0(3):c/nraypdim:hpf+hf
            % r1=[Nm(1)*c i j];
            % s=s+irprectangle(r0,r1,Ptmur(ComurE(1,1),:),...
            % Ptmur(ComurE(1,2),:),...
            % Ptmur(ComurE(1,3),:));
            % compteur=compteur+1;
        end
    end
    % FFmur=(1-sum(FF))*s/compteur;
    %
else
    % FFmur=0;
end

% 2- méthode par lancer sur une ligne verticale (mur infini)
% -----

% Calcul du nombre de rayon à lancer au dessus de la hauteur du capteur
% N : nombre de rayons à lancer à travers la fenêtre
% Nr : nombre de rayons à lancer par la portion de fenêtre au dessus du capteur

Nr=max([0 min([N round(N*(hpf+hf-r0(3))/hf)])]);
if Nr>0
    s=0;
    for i=1:Nr
        r1=[Nm(1)*c (lpf*2+lf)/2 r0(3)+(i-1)*(hpf+hf-r0(3))/(Nr-1)]; % point indiquant la direction du
rayon
        s=s+irphauteur(r0,r1,Ptmur(ComurE(1,1),:),...
        Ptmur(ComurE(1,2),:),...
        Ptmur(ComurE(1,3),:));

        end
        FFmur=(1-sum(FF))*s/N;
    else
        FFmur=0;
    end

%-----
%-----
% calcul de radiosité sur le capteur
%-----
solr=dot(FF,B);

```

```

solmur=FFmur*Rmur*Imur;
sol=solr+solmur;
end

```

.13 Fonction B3 (formule analytique de facteur de forme pour le capteur)

```

function FF=B3(a,b,c)
% http://www.me.utexas.edu/howell/sectionb/B-3.html

A=a/c;
B=b/c;

FF=(1/(2*pi))*((A/sqrt(1+A^2))*atan(B/sqrt(1+A^2))+(B/sqrt(1+B^2))*atan(A/sqrt(1+B^2)));

end

```

.14 Fonction B4 (formule analytique de facteur de forme pour le capteur)

```

function [FF]=B4(a,b,c)
% http://www.me.utexas.edu/howell/sectionb/B-4.html

A=a/b;
C=c/b;
Y=sqrt(A^2+C^2);

FF=(1/(2*pi))*(atan(1/C)-(C/Y)*atan(1/Y));

end

```

.15 Fonction plotage (traçage des graphiques)

```

function plotage(Co2,Pt, Nmaille, Ptmur,Comur0, ComurE, Ptmisque, Comasque, E, Emur, B)

%---Figure 1; réflexion du mur réflecteur---
figure;hold on;
axis equal;
xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z')
title('radiosité issue de la reflexion du mur seule')

for i=1:Nmaille

    A=[Pt(Co2(i,1),1) Pt(Co2(i,1),2) Pt(Co2(i,1),3)
        Pt(Co2(i,2),1) Pt(Co2(i,2),2) Pt(Co2(i,2),3)
        Pt(Co2(i,3),1) Pt(Co2(i,3),2) Pt(Co2(i,3),3)
        Pt(Co2(i,4),1) Pt(Co2(i,4),2) Pt(Co2(i,4),3)];

    patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),E(i))
end %mailles de la pièce

A=[Ptmur(Comur0(1,1),1) Ptmur(Comur0(1,1),2) Ptmur(Comur0(1,1),3)
Ptmur(Comur0(1,2),1) Ptmur(Comur0(1,2),2) Ptmur(Comur0(1,2),3)
Ptmur(Comur0(1,3),1) Ptmur(Comur0(1,3),2) Ptmur(Comur0(1,3),3)
Ptmur(Comur0(1,4),1) Ptmur(Comur0(1,4),2) Ptmur(Comur0(1,4),3)]; % mur réflecteur à l'ombre

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),0)

A=[Ptmur(ComurE(1,1),1) Ptmur(ComurE(1,1),2) Ptmur(ComurE(1,1),3)

```

```

Ptmur(ComurE(1,2),1) Ptmur(ComurE(1,2),2) Ptmur(ComurE(1,2),3)
Ptmur(ComurE(1,3),1) Ptmur(ComurE(1,3),2) Ptmur(ComurE(1,3),3)
Ptmur(ComurE(1,4),1) Ptmur(ComurE(1,4),2) Ptmur(ComurE(1,4),3)]; % mur réflecteur éclairé

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),3)

for i=1:size(Comasque,1)

    A=[Ptmur(Comasque(i,1),1) Ptmur(Comasque(i,1),2) Ptmur(Comasque(i,1),3)
        Ptmur(Comasque(i,2),1) Ptmur(Comasque(i,2),2) Ptmur(Comasque(i,2),3)
        Ptmur(Comasque(i,3),1) Ptmur(Comasque(i,3),2) Ptmur(Comasque(i,3),3)
        Ptmur(Comasque(i,4),1) Ptmur(Comasque(i,4),2) Ptmur(Comasque(i,4),3)];

    patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),Pt(Co2(i,1),1)*Pt(Co2(i,1),2)/3)
end %masque autour de la pièce

%-----figure 2 : réflexion du mur extérieur + réflexion interne
figure;hold on;
axis equal;
xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z')
title('radiosité issue de la reflexion du mur + reflexion interne')

for i=1:Nmaille

    A=[Pt(Co2(i,1),1) Pt(Co2(i,1),2) Pt(Co2(i,1),3)
        Pt(Co2(i,2),1) Pt(Co2(i,2),2) Pt(Co2(i,2),3)
        Pt(Co2(i,3),1) Pt(Co2(i,3),2) Pt(Co2(i,3),3)
        Pt(Co2(i,4),1) Pt(Co2(i,4),2) Pt(Co2(i,4),3)];

    patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),B(i))
end

A=[Ptmur(Comur0(1,1),1) Ptmur(Comur0(1,1),2) Ptmur(Comur0(1,1),3)
    Ptmur(Comur0(1,2),1) Ptmur(Comur0(1,2),2) Ptmur(Comur0(1,2),3)
    Ptmur(Comur0(1,3),1) Ptmur(Comur0(1,3),2) Ptmur(Comur0(1,3),3)
    Ptmur(Comur0(1,4),1) Ptmur(Comur0(1,4),2) Ptmur(Comur0(1,4),3)]; % mur réflecteur à l'ombre

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),0)

A=[Ptmur(ComurE(1,1),1) Ptmur(ComurE(1,1),2) Ptmur(ComurE(1,1),3)
    Ptmur(ComurE(1,2),1) Ptmur(ComurE(1,2),2) Ptmur(ComurE(1,2),3)
    Ptmur(ComurE(1,3),1) Ptmur(ComurE(1,3),2) Ptmur(ComurE(1,3),3)
    Ptmur(ComurE(1,4),1) Ptmur(ComurE(1,4),2) Ptmur(ComurE(1,4),3)]; % mur réflecteur éclairé

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),3)

for i=1:size(Comasque,1)

    A=[Ptmur(Comasque(i,1),1) Ptmur(Comasque(i,1),2) Ptmur(Comasque(i,1),3)
        Ptmur(Comasque(i,2),1) Ptmur(Comasque(i,2),2) Ptmur(Comasque(i,2),3)
        Ptmur(Comasque(i,3),1) Ptmur(Comasque(i,3),2) Ptmur(Comasque(i,3),3)
        Ptmur(Comasque(i,4),1) Ptmur(Comasque(i,4),2) Ptmur(Comasque(i,4),3)];

    patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),Pt(Co2(i,1),1)*Pt(Co2(i,1),2)/3)
end

%-----Réflexion interne - réflexion du mur extérieur-----
figure;hold on;
axis equal;
xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z')
title('radiosité issue de la reflexion interne seule (figure 2-figure 1)')

for i=1:Nmaille

    A=[Pt(Co2(i,1),1) Pt(Co2(i,1),2) Pt(Co2(i,1),3)
        Pt(Co2(i,2),1) Pt(Co2(i,2),2) Pt(Co2(i,2),3)
        Pt(Co2(i,3),1) Pt(Co2(i,3),2) Pt(Co2(i,3),3)

```

```

Pt(Co2(i,4),1) Pt(Co2(i,4),2) Pt(Co2(i,4),3)];

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),B(i)-E(i))
end

A=[Ptmur(Comur0(1,1),1) Ptmur(Comur0(1,1),2) Ptmur(Comur0(1,1),3)
Ptmur(Comur0(1,2),1) Ptmur(Comur0(1,2),2) Ptmur(Comur0(1,2),3)
Ptmur(Comur0(1,3),1) Ptmur(Comur0(1,3),2) Ptmur(Comur0(1,3),3)
Ptmur(Comur0(1,4),1) Ptmur(Comur0(1,4),2) Ptmur(Comur0(1,4),3)]; % mur réflecteur à l'ombre

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),0)

A=[Ptmur(ComurE(1,1),1) Ptmur(ComurE(1,1),2) Ptmur(ComurE(1,1),3)
Ptmur(ComurE(1,2),1) Ptmur(ComurE(1,2),2) Ptmur(ComurE(1,2),3)
Ptmur(ComurE(1,3),1) Ptmur(ComurE(1,3),2) Ptmur(ComurE(1,3),3)
Ptmur(ComurE(1,4),1) Ptmur(ComurE(1,4),2) Ptmur(ComurE(1,4),3)]; % mur réflecteur éclairé

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),3)

for i=1:size(Comasque,1)

A=[Ptmasque(Comasque(i,1),1) Ptmasque(Comasque(i,1),2) Ptmasque(Comasque(i,1),3)
Ptmasque(Comasque(i,2),1) Ptmasque(Comasque(i,2),2) Ptmasque(Comasque(i,2),3)
Ptmasque(Comasque(i,3),1) Ptmasque(Comasque(i,3),2) Ptmasque(Comasque(i,3),3)
Ptmasque(Comasque(i,4),1) Ptmasque(Comasque(i,4),2) Ptmasque(Comasque(i,4),3)];

patch(A(:,1),A(:,2),A(:,3),Pt(Co2(i,1),1)*Pt(Co2(i,1),2)/3)
end

end

```

Bibliographie

- [BB] B. BECKERS et P. BECKERS : A general rule for circle and hemisphere partition into equal-area cells.
- [BMB11] B. BECKERS, L. MASSET et P. BECKERS : The universal projection for computing data carried on the hemisphere. *Computer aided design*, 2011.
- [Bou09] Julien BOUYER : *Modélisation et simulation des microclimats urbains , étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, Ecole nationale d'architecture de Nantes, 2009.
- [DB06] John A. DUFFIE et William A. BECKMAN : *Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2006.
- [Dub10] Thibaut DUBERNET : Les méthodes de monte carlo appliquées aux problèmes urbains, rapport UV TX, 2010.
- [Gro99] Dominique GROLEAU : Solene, un outil de simulation des éclairement solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains. *Les professionnels de la Construction - Confort intérieur : Outils informatiques d'aide à la conception et à la prévision du confort thermique, acoustique et d'éclairage*, 1999.
- [Kaj86] James T. KAJIYA : The rendering equation. *Computer graphics*, pages 143–150, 1986.
- [Nus28] Willhelm NUSSELT : Graphische bestimmung des winkelverhältnisses bei der wärmestrahlung. *In Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1928.
- [SH01] Robert SIEGEL et John R. HOWELL : *Thermal radiation heat transfert, 4th edition*. Taylor and Francis, 2001.
- [Sil04] François X. SILLION : Simulation efficace des échanges radiatifs dans des environnements complexes, mémoire d'habilitation, 2004.
- [SP94] François X. SILLION et Claude PUECH : *Radiosity & Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994.