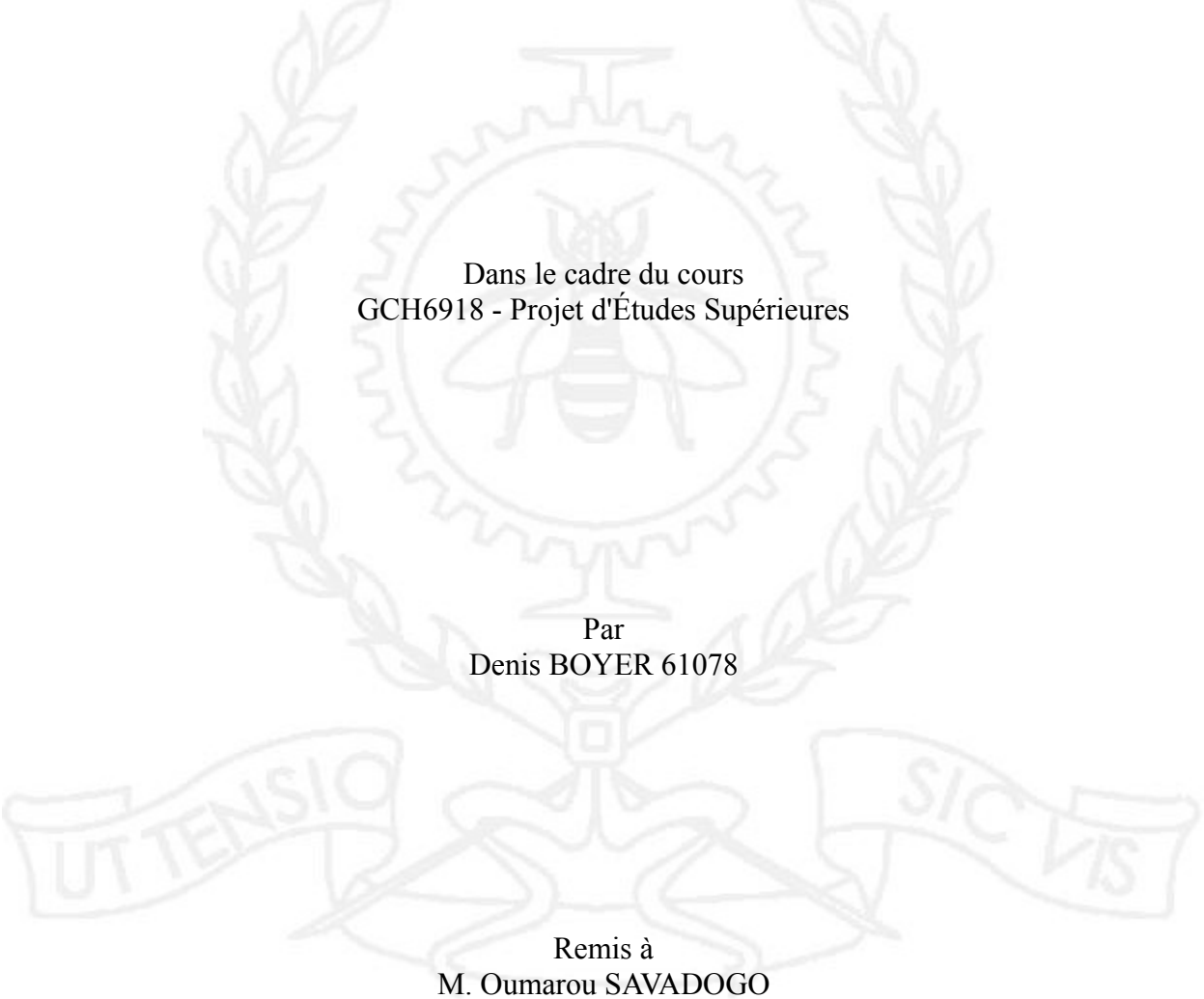


RAPPORT DE PROJET

SUR L'AUGMENTATION DE L'ALBÉDO DES TOITURES DE BÂTIMENTS POUR DIMINUER LA PROGRESSION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



Dans le cadre du cours
GCH6918 - Projet d'Études Supérieures

Par
Denis BOYER 61078

Remis à
M. Oumarou SAVADOGO

Mercredi, le 22 décembre 2010
École Polytechnique de Montréal

Table des matières

1	Résumé	1
2	Introduction	1
3	Problématique	2
4	Principes thermiques de réchauffement sur une base diurne	3
4.1	Radiation solaire.....	3
4.2	Principes de radiation thermique.....	5
4.2.1	Émission du corps noir.....	6
4.2.2	Émission d'une surface réelle (ou corps gris).....	8
4.3	Mécanismes de transfert de l'énergie	8
4.3.1	Le rayonnement thermique.....	9
4.3.2	La conduction thermique.....	10
4.3.3	La convection.....	11
4.4	Bilan énergétique de la surface d'un toit à l'équilibre.....	13
4.4.1	Surface en béton	13
4.4.2	Surface recouverte d'une peinture réfléchissante.....	15
4.4.2.1	Peinture d'extérieur au latex.....	15
4.4.2.2	Produit de haute technologie : la peinture SUPER THERM®.....	17
5	Évaluation de l'impact	19
6	Aspect financier	23
7	Conclusion	24
8	Références bibliographiques	25
	Annexes	26
	Annexe A : Calcul de la portion d'énergie dans le spectre visible avec <i>EES</i>	27
	Annexe B : Calcul du bilan énergétique de la surface d'un toit avec <i>EES</i>	28

Liste des figures

Figure 1: Rayonnement spectral d'un corps noir à 5 800 K, du soleil hors atmosphère terrestre (AM0) et du soleil en Europe centrale (AM1.5).....	6
Figure 2: Longueur du trajet en unités de Masse d'Air, en fonction de l'angle par rapport au zénith.....	7
Figure 3: Spectre électromagnétique.....	8
Figure 4: Comparaison entre la puissance émissive du corps noir et d'un corps gris.....	11
Figure 5: Une surface de béton avec un gradient de température.....	13
Figure 6: Une surface en béton avec un gradient de température et un coefficient de convection.....	15
Figure 7: Représentation équivalente de la résistance thermique en divers milieux.....	15
Figure 8: Équilibre des flux de chaleur à la surface d'un matériau.....	16
Figure 9: Deux résistances thermiques en série.....	18

Liste des tableaux

Tableau 1: Températures calculées selon un modèle simplifié d'échanges énergétiques.....	17
Tableau 2: Températures calculées pour une surface peinte avec une peinture ordinaire au latex.....	19
Tableau 3: Températures calculées pour une surface peinte avec la peinture SUPER THERM®.....	20
Tableau 4: Énergie solaire incidente versus énergie réfléchie selon le matériau.....	21
Tableau 5: Énergie solaire incidente versus énergie réfléchie selon le matériau.....	22
Tableau 6: Coefficient d'absorption de différents matériaux.....	22

1 Résumé

Ce document traite d'une approche pragmatique et relativement peu coûteuse pour faire face aux changements climatiques, notamment il propose une méthode pour réduire la progression ascendante de la température moyenne du globe en augmentant l'albédo des toitures des maisons, principalement dans les régions proches de la zone tropicale et sujettes à une importante insolation annuelle. On explore dans un premier temps la radiation solaire et les mécanismes de transfert d'énergie. On expose ensuite une réponse technologique pour diminuer l'absorption de chaleur des toits des maisons et en augmenter le rayonnement vers l'espace : une peinture à forte émissivité, faible absorption et faible conductivité thermique. On montre qu'enduire une peinture blanche au latex sur un toit en béton permet de réduire la température maximale sous un climat tropical de 18% au cours de la journée, alors qu'un produit de haute technologie permettrait une réduction de plus de 30%.

2 Introduction

La menace des changements climatiques est aujourd'hui sur toutes les lèvres, malgré la divergence d'opinion de certains groupes qui mettent toujours en doute la véracité du lien anthropique entre les nombreuses évidences du bouleversement du climat et l'activité humaine. Puisque le péril pour la survie même de l'espèce humaine, sans oublier les millions d'autres espèces vivantes au coeur de la biodiversité en général, est sans précédent, une extrême prudence doit dicter l'approche de l'humanité pour faire face à la crise et éviter un désastre incomparable dans l'histoire du genre humain. Il importe d'agir maintenant et sur plusieurs fronts, de façon à faire cesser la progression de la hausse de la température moyenne du globe, la fonte des glaciers qui desservent en eau une part importante de la population mondiale, la montée des eaux qui met en danger les nombreuses villes côtières et ses habitants, la désertification des terres arables qui réduit la capacité de production agricole, sans compter la force croissante des phénomènes météorologiques tels que les ouragans, les tornades et les pluies diluviennes.

Outre le défi relié au dérèglement du climat, une quantité importante d'énergie est gaspillée chaque années aux quatre coins du globe pour abaisser la température de l'espace familial ou de travail, puisant parfois l'énergie requise à même une ressource appelée à être épuisée tôt ou tard, et dont le coût d'utilisation, autant pour son achat que pour contrer ses effets sur la santé et les écosystèmes, croît rapidement année après année. De plus, si les populations des pays développés peuvent d'ores et déjà se permettre la climatisation de leur habitat, il en est autrement pour une fraction importante de l'humanité pour qui un milieu de vie agréable est un luxe inabordable.

Nous examinerons dans les paragraphes qui suivent une façon d'atténuer une partie des problèmes cités plus haut et du même coup de se donner un peu de temps pour mettre en lumière le lien anthropique avec les changements climatiques et de trouver des solutions à long terme à la demande grandissante d'énergie.

Au cours de l'été 2010, nous avons effectué quelques mesures de température à l'intérieur d'une demeure situé dans une zone quasi tropicale, avant et après avoir appliqué une couche de peinture blanche sur le toit afin de réduire l'absorption solaire. Cette étude vient confronter les résultats obtenus à cette époque.

3 Problématique

Une approche simple et relativement peu coûteuse pour faire face à la crise énergétique que nous commençons à entrevoir et aux changements climatiques qui lui sont intimement liés consisterait à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes déjà en place partout à travers le monde, en commençant préférablement par les domaines et les régions pouvant apporter le plus grand bénéfice à plus faible coût. On pourrait ainsi maximiser le bénéfice environnemental sur une courte échelle temporelle et investir simultanément sur des projets de plus grande envergure et de longue haleine pour le plus long terme. Une avenue particulièrement élémentaire qui a parfois été évoquée¹ serait de peindre en blanc la toiture des habitations de sorte qu'une partie importante de l'énergie solaire incidente soit réfléchiée vers les cieux, sous forme de rayonnement visible. Bien qu'il s'agisse d'une technique apparemment simpliste, ce serait, selon le secrétaire de l'énergie des États-Unis, M. Steven Chu, prix Nobel de physique, une option qui, appliquée aux toits et aux routes de la planète aurait le même impact que d'éliminer toutes les voitures du globe pendant 11 ans.²

Il y aurait donc un certains nombres de bénéfices à tirer d'un point de vue individuel, local et global, de mettre en œuvre un projet planétaire pour rendre les toitures plus réfléchissantes :

- a) pour les membres d'une maisonnée, cela se traduirait par un milieu de vie plus confortable et agréable tout en permettant une réduction de la facture d'énergie reliée à la climatisation;
- b) au niveau local, cela devrait contribuer à réduire les ilots de chaleur et à abaisser la température ambiante en milieu urbain, réduction qui serait particulièrement appréciée même aux latitudes plus élevées avec les phénomènes de plus en plus fréquents de vagues de chaleurs; et
- c) au niveau global, cela donnerait lieu, comme le suggérait M. Chu, à un albédo planétaire plus élevé et donc, une moins grande élévation de la chaleur du globe au cours d'un cycle diurne, de même qu'une réduction des émissions de GES dues à l'utilisation d'électricité de source fossile pour la climatisation.

Soulignons également que la part du globe qui reçoit la radiation solaire la plus directe, donc intense, sur une base annuelle, la bande tropicale et sa périphérie, est aussi généralement la plus démunie, faisant en sorte qu'une large tranche de la population mondiale doit supporter l'inconfort qui résulte de sa position géographique mais serait incapable de participer financièrement à un programme planétaire d'augmentation de l'albédo des toitures; il faudrait donc que les pays riches envisagent le financement d'un tel programme. Cette aide ne serait pas fournie sur une base d'altruisme car d'une part, les pays riches sont grandement responsables de l'élévation du niveau de CO₂ dans l'atmosphère et d'autre part, toutes les nations souffriront de manière solidaire, qu'elles le veuillent ou non, des effets néfastes du dérèglement climatique. Les pays riches ont donc un intérêt purement « égoïste » à venir en aide aux pays pauvres afin de réduire le réchauffement climatique.

4 Principes thermiques de réchauffement sur une base diurne

Lorsque les rayons solaires frappent une surface, l'énergie lumineuse est partiellement transformée en chaleur alors qu'une autre part est réfléchi. Cette chaleur est alors diffusée dans le matériau par divers phénomènes physiques entraînant une élévation de température du milieu ambiant et sous-jacent. Nous allons examiner ici les principes physiques qui entrent en jeu au cours de ce processus.

4.1 Radiation solaire

On utilisera dans le texte qui suit les définitions suivantes³ :

Faisceau de Rayonnement Rayonnement solaire intercepté par une surface avec un changement de direction et une dispersion négligeables dans l'atmosphère. Aussi appelé *rayonnement directe*.

Rayonnement diffus Rayonnement solaire dispersé par les aérosols, la poussière et par le mécanisme de Rayleigh; il n'a pas une direction unique. Aussi appelé *rayonnement du ciel*.

Rayonnement total : Le total du faisceau de rayonnement et du rayonnement diffus sur une surface; on s'y réfère aussi comme le *rayonnement global*.

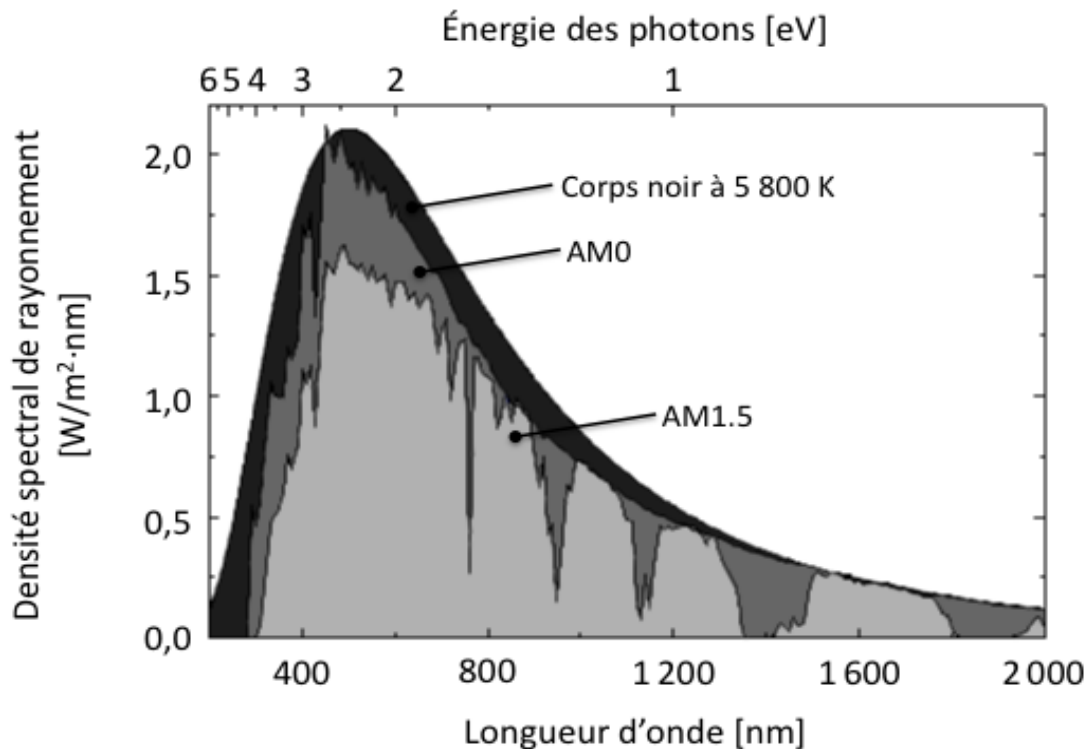


Figure 1: Rayonnement spectral d'un corps noir à 5 800 K, du soleil hors atmosphère terrestre (AM0) et du soleil en Europe centrale (AM1.5). Source www.superstrate.net/pv/illumination/spectrum.html.

Le soleil est une étoile moyenne composée d'hydrogène et d'hélium (74% et 24% respectivement) et qui se trouve en équilibre hydrostatique grâce à la force gravitationnelle agissant en direction opposée à la pression radiative de la fusion nucléaire survenant en son cœur. Cette réaction transforme l'hydrogène en hélium, d'où il tire son énergie, laquelle est transmise par rayonnement, fournissant la lumière et la chaleur nécessaires aux conditions de la vie sur terre. La radiation solaire est distribuée sur une gamme de longueurs d'onde, comme l'illustre clairement la figure 1 ci-dessus. Tel que l'indique la figure 1, le soleil émet un rayonnement correspondant de près à celui d'un corps noir élevé à une température de 5 800 K. Cette figure montre l'intensité du rayonnement juste en dehors de l'atmosphère terrestre (AM0, *i.e.* zéro *Air Mass*) et à une latitude équivalente à l'Europe centrale (AM1.5), où l'atmosphère atténue le rayonnement à diverses longueurs d'onde par absorption des différentes molécules en suspension dans la couche atmosphérique terrestre. Puisque l'orbite terrestre est elliptique, la distance terre-soleil varie légèrement en fonction du temps. Si $G_{solaire}$ représente l'énergie moyenne reçue du soleil par la terre, alors l'énergie G_n reçue le $n^{ième}$ jour de l'année est donnée par :

$$G_n = G_{solaire} \left[1 + 0,0334 \cos \left(2 \pi \frac{n-3}{365} \right) \right] \quad (1)$$

où le terme $n - 3$ signifie que la terre n'arrive à son périhélie seulement que le 3 janvier.

La radiation solaire moyenne qui arrive à la couche extraterrestre de l'atmosphère (AM0) a été mesurée à 1367 W/m^2 (le $G_{solaire}$ de l'équation (1) ci-haut). Cette énergie est cependant atténuée substantiellement en passant à travers une bande plus ou moins importante d'atmosphère avant d'arriver au sol, selon l'élévation du soleil et les conditions météorologiques prévalentes. L'absorption et la dispersion par les particules dans l'atmosphère (ozone, vapeur d'eau, dioxyde de carbone, et autres) empêchent la transmission d'une partie de l'énergie solaire; les nuages constituent un exemple courant de phénomène bloquant la radiation directe. L'intensité de la radiation solaire qui arrive au niveau du sol dépend aussi de l'épaisseur d'atmosphère qui doit être traversée, tel qu'illustré par la figure 2 ci-contre⁴.

Les facteurs qui entrent en considérations pour le calcul de la longueur du trajet à travers l'atmosphère comprennent l'élévation, la latitude et l'heure du jour.

La valeur maximale de rayonnement survient à midi solaire aux emplacements géographiques où le soleil se trouve à 90° d'élévation au zénith (zone tropicale), particulièrement en terrain élevé et ayant un climat sec.

Une approximation de l'intensité du faisceau

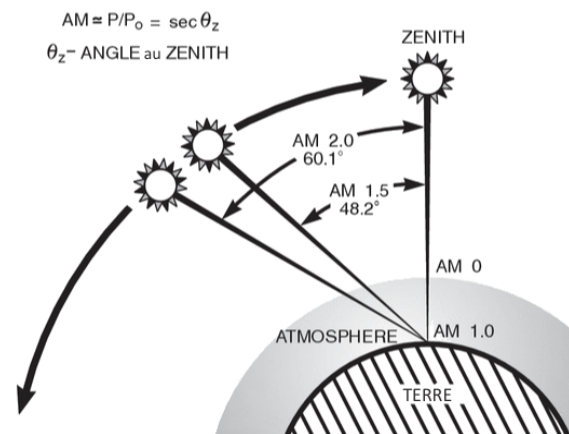


Figure 2: Longueur du trajet en unités de Masse d'Air, en fonction de l'angle par rapport au zénith.
Source : Newport Corporation (www.newport.com).

de rayonnement en tenant compte de la masse d'air à traverser est donnée par l'équation suivante :

$$E_{dn} = G_n e^{-km} \quad (2)$$

où

E_{dn} est le rayonnement direct normal corrigé pour l'effet atténuant de l'atmosphère,

k est le coefficient d'extinction atmosphérique, $k \in [0,142, 0,207]$ et

m est la masse d'air optique relative.

La masse d'air m peut être approximée par $m = \frac{1}{\cos \theta_z}$ où θ_z est l'angle du soleil avec le zénith.

Par exemple, quand le soleil est à 90° d'élévation, $m = 1$ alors qu'à une élévation de 30° , $m = 2$. L'équation (2) montre donc clairement qu'un maximum d'énergie atteindra le sol lorsque m sera minimal, *i.e.* lorsque le soleil est à son zénith.

4.2 Principes de radiation thermique

La radiation thermique est une forme d'émission et de transmission d'énergie qui ne dépend que de la température et des caractéristiques émissives de la surface, sans le moindre support de conduction.⁵ Le rayonnement thermique est décrit en terme d'ondes électromagnétiques, dont le spectre est illustré à la figure 3 ci-contre. La gamme de longueurs d'onde du rayonnement thermique s'étend en théorie de zéro à l'infinité, mais la portion principale de l'énergie thermique se trouve dans la zone de 0,1 à 100 μm . La portion visible de la radiation thermique varie de 0,4 à 0,7 μm .

Le rayonnement thermique, comme toutes les ondes électromagnétiques, se propage à la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s dans le vide) selon la relation

$$c = \lambda \nu$$

où λ est la longueur d'onde et ν la fréquence.

Bien que la théorie des ondes soit très pratique pour la prédiction des propriétés radiatives des matériaux, la théorie corpusculaire du rayonnement électromagnétique est nécessaire pour prédire la quantité d'énergie qui sera émis par un corps dû à sa température. Selon la théorie quantique, une onde électromagnétique est constituée de photons discrets d'énergie $h\nu$, *i.e.*

$$E = h \nu$$

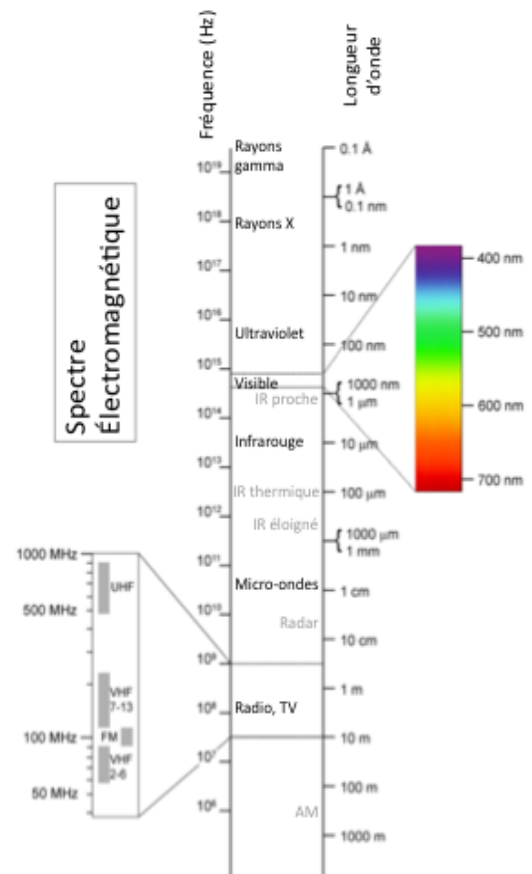


Figure 3: Spectre électromagnétique
Source Wikimedia Commons.

où E = énergie d'un photon

h = la constante de Planck $\approx 6,6 \times 10^{-34}$ J·s

ν = la fréquence du rayonnement.

Lorsqu'un faisceau de rayonnement est incident à la surface d'un corps, une partie du faisceau est réfléchi, une partie est absorbée et une autre peut être transmise à travers le corps. Si on nomme

ρ = la *réflectivité* ou fraction d'énergie réfléchi;

α = l'*absorbance* ou fraction d'énergie absorbée; et

τ = la *transmissivité* ou fraction d'énergie transmise,

alors on doit avoir, en accord avec la première loi de thermodynamique,

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (3)$$

Ces propriétés sont fonction non seulement de la surface d'intérêt mais aussi de la longueur d'onde du rayonnement incident. L'équation (3) est donc valide pour l'énergie moyenne sur tout le spectre de longueurs d'onde. Pour illustrer la dépendance sur la longueur d'onde, on peut écrire l'équation (3) sous la forme

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4)$$

Mentionnons en passant que la dépendance du rayonnement sur la longueur d'onde est responsable de l'effet de serre. Une serre est chaude à l'intérieur même si l'extérieur est froid car la transmissivité du verre le rend transparent au spectre visible bien qu'il soit opaque à l'infrarouge thermique émis par l'intérieur de la serre. C'est aussi ce qui se passe à l'échelle de la planète, où le CO₂ et autres gaz atmosphériques agissent comme le verre d'une serre.

Si un corps est opaque, alors $\tau = 0$ et on aura $\rho_\lambda + \alpha_\lambda = 1$ d'où on déduit que plus une surface est réfléchissante, moins elle absorbe l'énergie du rayonnement.

Ces deux dernières remarques seront fondamentales dans notre analyse du réchauffement planétaire causé par l'effet de serre et de notre stratégie pour en réduire les impacts à très court terme.

4.2.1 Émission du corps noir

Un corps qui serait tel que $\tau = 0$ et $\rho = 0$ peu importe les caractéristiques et la direction du rayonnement incident aurait alors une absorbance $\alpha = 1$: on appelle ce corps un *corps noir*. En plus d'être un absorbeur parfait, un corps noir possède aussi une limite supérieure à l'énergie qu'il émet, laquelle n'est fonction que de la température et est distribuée sur tout le spectre électromagnétique selon l'équation de Planck :

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (5)$$

où

$E_{b\lambda}$ est la puissance monochromatique du corps noir, en $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$

T est la température du corps en K

$$C_1 = 3,74 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = 1,44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

L'énergie totale émise E_b du corps noir et l'énergie monochromatique $E_{b\lambda}$ émise sont reliées par l'expression

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda \quad (6)$$

En substituant (5) dans (6) et en intégrant on obtient l'équation de la *loi de Boltzmann* :

$$E_b = \sigma T^4 \quad (7)$$

où $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Exemple 1 : On peut estimer la portion de l'énergie solaire qui est transmise par la partie visible du spectre électromagnétique en utilisant les équations (5) à (7). En effet, si on prend pour hypothèse que le soleil est un corps noir dont la température est établie à 5 777 K, l'équation (7) nous donne l'énergie totale du rayonnement; on trouve

$$E_b = \sigma \cdot 5\,777^4 = 6,315 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

Pour connaître l'énergie contenu dans la partie visible du rayonnement, il faut savoir que le visible correspond à un rayonnement allant d'une longueur d'onde de 0,38 μm à 0,78 μm . Utilisant les relations (5) et (6), on trouve[†] que

$$E_b^{\text{visible}} = \int_{0,38}^{0,78} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d\lambda = 2,938 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

La portion énergétique du visible est donc $\frac{E_b^{\text{visible}}}{E_b} = 0,4653 = 46,53\%$ du rayonnement total.

[†] Le calcul de cette intégrale a été effectuée numériquement à l'aide du logiciel EES (*Engineering Equation Solver*) développé par le professeur Sanford A. Klein de l'Université du Wisconsin. Le code est joint en annexe A.

4.2.2 Émission d'une surface réelle (ou corps gris)

Un corps noir est un concept de l'esprit qui nous renseigne sur la limite supérieure du rayonnement d'un corps à une température donnée; en réalité, toute surface émet moins d'énergie que le corps noir, et ce, sur toute la gamme de fréquence du spectre électromagnétique. Le rapport entre l'émissivité d'une surface réelle et un corps noir à la même température s'exprime comme suit :

$$\epsilon = \frac{E_{\lambda}}{E_{b\lambda}} \quad (8)$$

Pour simplifier les calculs et les modèles théoriques, on assumera souvent que l'émissivité ϵ est constante pour toutes les longueurs d'onde. La figure 4 ci-dessous montre le spectre de radiation du corps noir et le spectre correspondant d'un corps gris à la même température. On y trouve aussi le spectre d'émission d'une surface réelle, toujours élevée à la même température. Ce spectre suit plus ou moins fidèlement celui du corps gris.

Les surfaces que nous analyserons dans ce texte (béton, ardoise, terre cuite, ...) sont toutes des surfaces réelles ayant une émissivité strictement plus petite que l'unité ($\epsilon < 1$).

Comme le montre clairement la figure 4, la valeur de l'émissivité est généralement fonction de la longueur d'onde en plus de dépendre du matériau. Mais on estimera que la radiation totale de la surface est bien approximée par le corps gris et pour fins de calculs, on se contentera de cette approximation. Ainsi, la valeur de l'émissivité sera considérée constante sur tout le spectre du rayonnement. Il s'agira alors d'une moyenne.

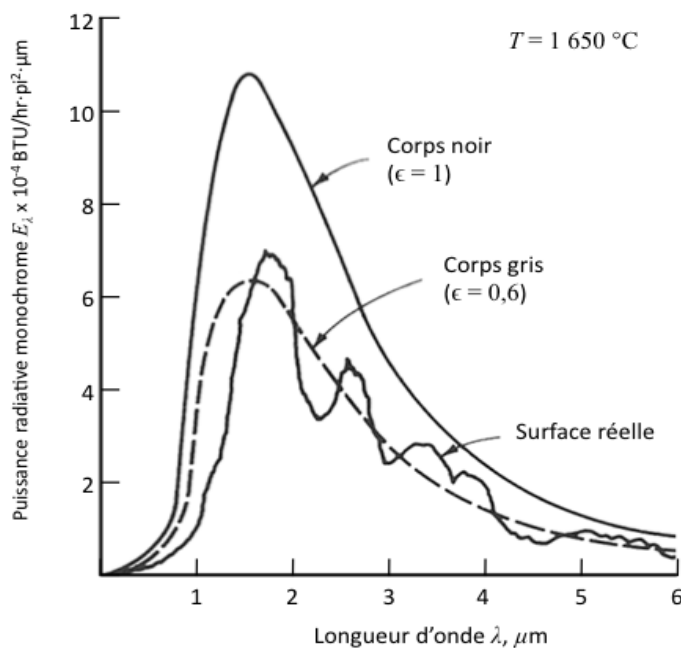


Figure 4: Comparaison entre la puissance émissive du corps noir et d'un corps gris. Source : Jui Sheng Hsieh *Solar Energy Engineering*, 1986. P. 35.

4.3 Mécanismes de transfert de l'énergie

L'apport en énergie à une surface soumise au rayonnement solaire altérera sa température jusqu'à ce que la surface éclairée soit en équilibre thermodynamique avec son environnement. Cet équilibre sera atteint par le biais de divers mécanismes de régulation : le rayonnement, la conduction et la convection.

4.3.1 Le rayonnement thermique

Nous avons vu précédemment au §4.2 les principes gouvernant le rayonnement d'un corps noir et d'un corps gris. Nous verrons maintenant à travers un exemple comment une surface réelle peut transférer une part de son énergie par le rayonnement thermique.

Bien que les autres mécanismes de transfert d'énergie requièrent un médium pour que le transfert puisse avoir lieu, le rayonnement électromagnétique peut se réaliser dans le vide absolu, tel que l'illustre le cas du soleil dans l'espace. La puissance rayonnée par unité de surface par un corps ayant un coefficient d'émissivité ϵ est donnée par la relation

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

où T est la température de la surface du corps, en Kelvin.

Exemple 2 : Si un toit plat est fait de béton ($\epsilon=0,85$) et reçoit un rayonnement solaire du zénith par une journée dégagée ($k = 0,142$), quelle serait la température de surface si on néglige toute autre forme de transfert énergétique et que la surface du toit atteint un équilibre thermodynamique? On suppose un coefficient d'absorption solaire de $0,6^i$. Et si le toit était peint en blanc avec une peinture ayant une émissivité ($\epsilon_{\text{peinture}} = 0,77$) et un coefficient d'absorption de $0,18$, quelle serait alors la température?

L'énergie solaire qui arrive à l'extérieur de l'atmosphère est de $1\,367\text{ W/m}^2$ en moyenne. L'atténuation atmosphérique réduira cette valeur selon l'équation (2) : $E_{dn} = 1\,367 e^{-0,142} = 1\,186\text{ W/m}^2$ alors que $m = 1$ puisque l'élévation est de 90° (0° par rapport au zénith). La surface de béton n'absorbera que 60% de l'énergie incidente, soit $E = 0,6 \cdot 1\,186\text{ W/m}^2 = 711,6\text{ W/m}^2$.

L'énergie qui sera réémise à l'équilibre sera égale à l'énergie incidente et on aura

$$E = 711,6\text{ W/m}^2 = 0,85 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot T^4$$

d'où

$$T = \sqrt[4]{1,47 \times 10^{10} \text{K}^4} = 348\text{ K} = 75,6^\circ\text{C}$$

Selon la seconde hypothèse, l'énergie absorbée sera de $E = 0,18 \cdot 1\,186\text{ W/m}^2 = 213,5\text{ W/m}^2$.

L'énergie qui sera réémise à l'équilibre sera égale à l'énergie incidente et on aura

$$E = 213,5\text{ W/m}^2 = 0,77 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot T^4$$

d'où

$$T = \sqrt[4]{4,89 \times 10^9 \text{K}^4} = 264,4\text{ K} = -8,7^\circ\text{C}$$

En réalité, l'expérience courante nous rappelle que la température du toit ne serait pas si élevée dans le cas du béton brut ni si froid dans celui d'une surface peinte en blanc. Ceci vient du fait que d'autres phénomènes de transfert de chaleur entrent en jeu et altèrent la température de surface du matériau de manière significative. C'est ce que nous explorons aux paragraphes suivants.

ⁱ Voir le tableau 6 de coefficients d'absorption

Nous pouvons noter cependant la constatation suivante de cette expérience théorique : en diminuant le coefficient d'absorption d'une surface tout en augmentant son coefficient d'émissivité, on arrive à réduire sa température de surface.

Il est à noter que l'énergie incidente qui n'est pas absorbée par la surface est réfléchiée en très grande partie vers l'espace intersidérale alors que la partie absorbée dans un premier temps et par la suite rayonnée par la surface due à sa température sera en partie interceptée (absorbée) par l'atmosphère et réémise vers la terre. C'est le principe de l'effet de serre planétaire et ceci est dû au fait que la couche de gaz dans l'atmosphère est beaucoup plus transparente au rayonnement du visible qu'à l'infrarouge émanant de sources terrestres relativement froides.

4.3.2 La conduction thermique

La conduction est le seul mode de transfert de chaleur dans un milieu solide opaque. Elle est due à la vibration moléculaire ou du réseau ou dans le cas d'un métal, à la dérive des électrons libres. Lorsqu'un gradient de température existe dans un tel milieu, une certaine quantité de chaleur sera transférée de la région la plus chaude vers la plus froide. Le taux de transfert de chaleur par conduction Q est proportionnel au gradient de chaleur dT/dx et à la surface A par laquelle la chaleur est transmise. Ainsi,

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

où k est la constante de conductivité thermique [W/m·K] et le signe (-) est une conséquence de la deuxième loi de thermodynamique qui exige que la chaleur se propage du chaud vers le froid. Ainsi, si on se déplace d'une région chaude à une région froide, on aura $dT/dx < 0$ et $Q > 0$, *i.e.* un apport de chaleur.

Il est à noter que k est généralement fonction de la température, mais sur une plage assez restreinte de températures qui entrent en jeu dans le cas des bâtiments, on pourra considérer la conductivité comme une constante pour fins de calculs.

Si on intègre l'équation (9) sur l'épaisseur Δx du matériau, on obtient (en considérant k constant) :

$$Q = -\frac{kA}{\Delta x}(T_2 - T_1) = \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2) = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (10)$$

Si par ailleurs on note $R = \frac{\Delta x}{kA}$ avec R ayant des unités de K/W, alors l'équation (10) s'écrit

$$Q_{conduction} = \frac{\Delta T}{R} \quad (11)$$

Le terme R est l'analogie thermique de « résistance » et ΔT est celui d'une différence de potentiel. Q est alors le « courant » de chaleur.

Exemple 3 : Considérons un toit en béton de 70 m^2 , dont la surface externe est maintenue à une température $T_1 = 50^\circ\text{C}$ et la surface interne est à $T_2 = 40^\circ\text{C}$ et ayant une constante de conduction thermique $k = 0,92 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. L'épaisseur de la surface A est de $\Delta x = 6 \text{ cm}$, tel qu'illustré sur la figure 5 ci-contre.

On voudrait calculer le taux de transfert de chaleur à travers la surface, en régime permanent.

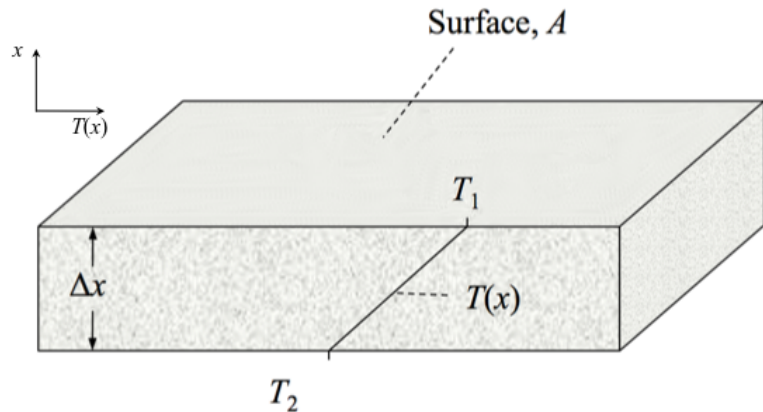


Figure 5: Exemple 3 - une surface de béton avec un gradient de température.

Selon l'équation (10), on a

$$Q = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) = \frac{0,92 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot 70 \text{ m}^2}{0,06 \text{ m}} (10 \text{ K}) = 10733 \text{ W} = 10,73 \text{ kW}$$

4.3.3 La convection

Lorsqu'un fluide entre en contact avec un solide dont la température diffère, une échange d'énergie thermique a lieu; le processus qui entre en jeu est le transfert de chaleur par convection. Deux types de processus de convection peuvent avoir lieu : la convection naturelle ou *libre* et la convection *forcée*. Dans le premier cas, la différence de densité du fluide qui est en contact avec la surface du solide par rapport au fluide environnant agit pour créer un déplacement vertical sous l'effet de la poussée d'Archimède. Dans le second cas, la convection est provoquée par une circulation artificielle d'un fluide (qui pourrait être de source naturelle dans le cas d'un toit, *i.e.* due au vent).

Le transfert de chaleur par convection est analogue à la conduction, et on écrit

$$Q_{\text{convection}} = hA \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (12)$$

où $R = \frac{1}{hA}$ et h est le coefficient de transfert de chaleur par convection. À nouveau, les unités de R sont des K/W et R conserve son analogie avec la résistance qu'on retrouve dans un circuit électrique. Lorsqu'on analyse les flux de transfert de chaleur d'un milieu à un autre, on peut additionner les résistances de conduction et de convection pour écrire simplement

$$Q = \frac{\Delta T_{\text{total}}}{R_{\text{total}}} \quad (13)$$

où ΔT_{total} est la différence de température entre les frontières des surfaces, et

R_{total} est la résistance thermique totale entre les frontières des surfaces.

De manière analogue aux circuits électriques on peut écrire

$$R_{\text{total}} = \sum R_i \text{ lorsque les composantes de résistances sont en série, et}$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_i}} \text{ lorsque les composantes de résistances sont en parallèle.}$$

Exemple 4 : Reprenons l'exemple précédent en considérant cette fois le coefficient de convection h_a de l'air qui entre en contact avec la surface. On ne considèrera que la surface supérieure puisque l'air chauffé sous le toit aura tendance à rester en contact avec celui-ci. La figure 6 ci-contre illustre la situation. La température du toit est plus élevée que la température de l'air ambiant T_a , faisant en sorte que l'air se réchauffe au contact de la surface du toit, ce qui a pour effet de refroidir cette surface par convection naturelle.

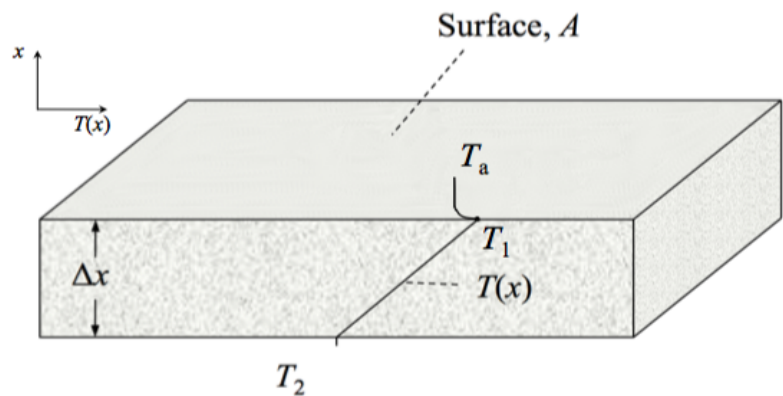


Figure 6: Une surface en béton avec un gradient interne de température et un coefficient de convection en surface.

En régime permanent, la température T_1 est maintenue par l'apport de la radiation solaire d'une part et par les pertes due à la convection de l'air et par conduction dans le solide, d'autre part. Le flux de chaleur est représenté schématiquement par la figure 7 ci-dessous. À partir de la surface à la température T_1 , un flux Q_a s'échappe de la surface vers le haut et un flux Q_1 est transmis à travers la structure de béton, vers le bas.

On aura donc :

$$Q_1 = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x / k_1 A}$$

et

$$Q_a = \frac{T_1 - T_a}{1/h_a A}$$

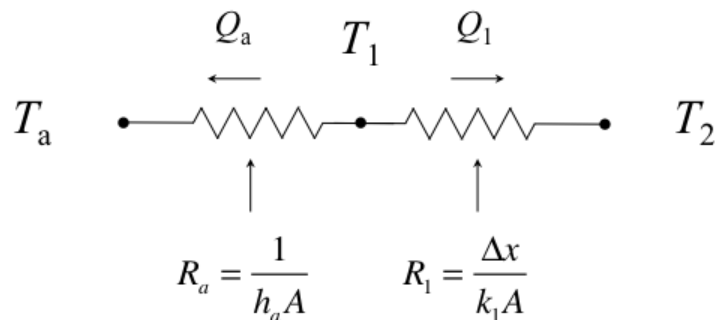


Figure 7: Représentation équivalente de la résistance thermique en divers milieux.

Si T_a est de 35°C et T_1 est de 50°C , on peut considérer⁶ que $h_a = 8 \text{ W/m}^2$, et par conséquent, pour une toiture de 70 m^2 ayant une épaisseur de 11 cm ,

et dont la température sous-jacente est de 40°C, on trouvera que

$$Q_1 = \frac{(50-40) \text{ K}}{0,11 \text{ m} / 0,92 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 70 \text{ m}^2} = 5,8 \text{ kW} \quad \text{comme précédemment, et} \quad Q_a = \frac{(50-35) \text{ K}}{\frac{1}{8 \text{ W/m}^2} \cdot 70 \text{ m}^2} = 8,4 \text{ kW}$$

4.4 Bilan énergétique de la surface d'un toit à l'équilibre

4.4.1 Surface en béton

Les exemples précédents donnent une idée de la complexité des calculs de la température d'une surface assujettie à diverses sources et puits d'énergie. Il est encore plus compliqué de calculer dynamiquement cette température en fonction de l'heure du jour. On se bornera à évaluer la température en supposant un système à l'équilibre (les entrées = les sorties) en prenant en compte toutes les sources et les pertes.

Le schéma de la figure 8 ci-contre montre comment une surface est sujette à une variété d'entrées/sorties énergétiques. On voit clairement qu'on doit avoir :

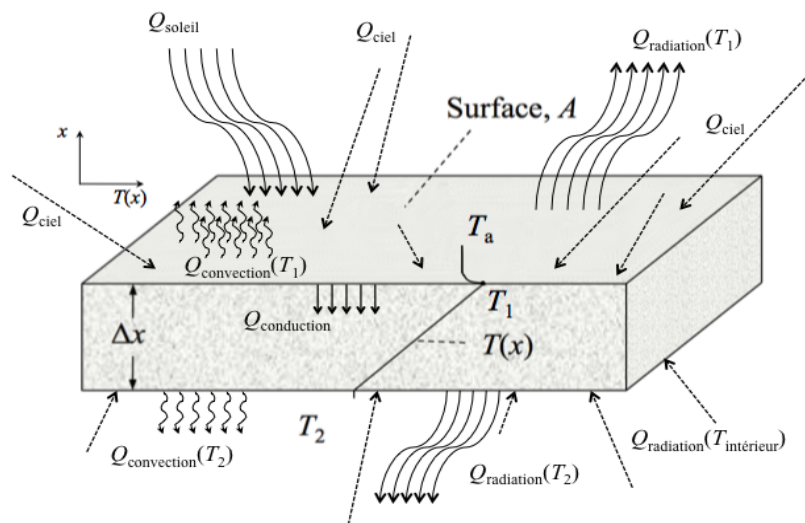


Figure 8: Équilibre des flux de chaleur à la surface d'un matériau. Les flux sous la surface réchauffent la pièce sous-jacente et contribuent à l'inconfort des habitants de la demeure.

$$Q_{\text{soleil}} + Q_{\text{ciel}} + \sum Q_{\text{radiation}} - Q_{\text{conduction}} + \sum Q_{\text{convection}} = 0 \quad (14)$$

où $Q_{\text{ciel}} = \sigma \epsilon_{\text{ciel}} T_a^4$ et avec $\epsilon_{\text{ciel}} \approx 0,787 + 0,764 \ln(T_{\text{rosée}}/273)$ alors que $T_{\text{rosée}}$ est la température du point de rosée (en K). Nous prendrons ici la valeur approximative de $\epsilon_{\text{ciel}} \approx 0,787$.

Q_{ciel} représente le flux d'énergie sous forme diffuse en provenance du ciel, dont l'émission est considérée distribuée de façon uniforme. Les flux convectifs et radiatifs sont dus non seulement à la surface supérieure mais à celle interne également. Tel qu'indiqué sur la figure, on a un flux vers le ciel à la température T_1 et un autre vers le sol (à l'intérieur de la maison) à la température T_2 .

Notons que les termes sous le signe somme (Σ) dans l'équation (14) sont positifs s'ils « entrent » dans la surface et négatifs s'ils en « sortent ».

Il n'est pas possible de trouver à partir de cette situation d'équilibre la température à la surface T_1 et les

températures intérieures T_2 et la température de la pièce $T_{\text{intérieur}}$. Ceci vient du fait qu'il faut connaître l'aspect dynamique du réchauffement afin de déterminer quelle sera la valeur maximale de chaque température. Nous devons donc considérer un modèle simplifié afin de donner une idée des températures impliquées et surtout de constater leur progression en apportant des changements aux propriétés de la surface externe.

Pour simplifier les calculs, on pose que $T_2 = 0,95 \cdot T_1$ et que la température ambiante à l'intérieur est de $0,98 \cdot T_2$. Par ailleurs, on prendra soin de trouver les températures et les échanges d'énergie sur une plage de temps, pour une élévation du soleil de 15° et plus. On pose donc que la longueur du trajet lumineux dans l'atmosphère est de $m = 1/\sin \theta$ où θ est l'angle d'élévation du soleil. On définit aussi la température ambiante extérieure comme

$$T_a = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cos[150(t - \bar{t})]$$

où $T_{\min} = 25^\circ\text{C}$ est la température la plus basse de la journée, $T_{\max} = 38^\circ\text{C}$ est la température la plus élevée et $\bar{t} = 15$ heures, le moment de la journée où la température extérieure atteint son apogée. En d'autres termes, $T(\bar{t}) = T_{\max}$. On retrouvera le détail du calcul sur *EES* en annexe B.

Le tableau 1 qui suit montre l'évolution des températures au cours d'une journée, entre 08h00 et 18h00 pour une surface en béton ayant un coefficient d'absorption de 0,6, un coefficient d'émission de 0,85, une épaisseur de 11 cm, et un coefficient de conduction thermique de 12 W/m·K.

Tableau 1 : Températures calculées selon un modèle simplifié d'échanges énergétiques.

t (heures)	θ (degrés)	T ambiant ($^\circ\text{C}$)	T surface ($^\circ\text{C}$)	T intérieur ($^\circ\text{C}$)
8	15	25,6	41,4	22,6
9	30	28,4	49,5	27,8
10	45	31	53,9	31,2
11	60	33,4	57	33,8
12	75	35,3	59,3	35,8
13	90	36,8	60,7	37,2
14	75	37,7	61,4	38
15	60	38	61,3	38,1
16	45	37,7	60,1	37,4
17	30	36,8	57,3	35,6
18	15	35,3	50,6	31,8

Les valeurs données dans ce tableau correspondent assez bien avec des valeurs prises au cours de l'été 2010 dans une habitation de la petite communauté de *Los Mochis*, une petite ville de l'état de Sinaloa, au Mexique. La température extérieure variait habituellement de 25°C le matin à 38°C au plus chaud de la journée alors que la température d'une pièce pouvait rejoindre $38 - 40^\circ\text{C}$ en milieu d'après-midi. La température du toit n'a pas été mesurée cependant mais il était clairement très chaud au toucher.

Cette correspondance avec la réalité est importante car elle permet de donner une certaine validité au modèle et aux hypothèses de départ.

Tel que mentionnée précédemment, la surchauffe de la maïsonnée au cours d'un cycle diurne est doublement problématique car

1. l'énergie du soleil transformée en chaleur sera réémise dans le spectre infrarouge, où elle sera en partie absorbée par la couche atmosphérique et réémise vers le sol; et
2. la température élevée à l'intérieur des demeures nécessitera dans bien des cas l'utilisation de climatisation dont la source d'énergie pourrait être de l'électricité provenant d'une centrale au mazout ou au charbon, ajoutant encore davantage aux émissions de GES.

Il serait donc avantageux de réduire l'absorption de chaleur par le toit et d'augmenter au maximum la réflexion d'énergie lumineuse.

4.4.2 Surface recouverte d'une peinture réfléchissante

Reprenons l'exercice précédent mais en supposant qu'on a d'abord appliqué une couche de peinture réfléchissante sur la surface de béton. Il existe diverses peintures sur le marché qui promettent toutes d'aider à améliorer le confort interne en réfléchissant les rayons solaires dans le spectre visible. Nous allons commencer par examiner l'effet d'appliquer une peinture d'extérieur blanche au latex, n'ayant comme principale fonction que de réfléchir la lumière visible. Nous examinerons ensuite le gain qui peut être espéré en appliquant une peinture technologiquement avancée conçue expressément dans le but de réduire la température d'une surface.

4.4.2.1 Peinture d'extérieur au latex

Une peinture commerciale typique aurait les propriétés suivantes :

- i) émissivité = 0,74ⁱⁱ
- ii) conductivité thermique $\approx 0,25$ ⁱⁱⁱ
- iii) réflectivité = 0,8^{iv}

L'épaisseur d'une couche de peinture sèche peut être déduite de la surface couverte par unité de volume (environ 37 m² / 4 litres^v, ce qui revient à environ 0,11 mm par couche humide.) On supposera donc 0,00015 m d'épaisseur pour deux couches sèches.

La figure 9 ci-dessous illustre comment calculer la résistance équivalente du circuit composé de deux résistances thermiques en séries. On a donc

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = \frac{0,00015 \text{ m}}{0,25 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,11 \text{ m}}{0,92 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} = 0,1202 \text{ K/W} \cdot \text{m}^2$$

ii Selon Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Émissivité>. Dernière consultation le 20 décembre 2010.

iii Selon Wikipedia, considérant que la peinture au latex est à la base un polymère (<http://en.wikipedia.org/wiki/Paint>) et selon les propriétés conductrices de ce matériau : http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_conductivités_thermiques. Dernière consultation le 20 décembre 2010.

iv Pour une peinture blanche typique : <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/25w.html>. Dernière consultation le 20 décembre 2010.

v Société Canadienne d'Hypothèque et de Logement, « La peinture : murs, plafonds et planchers » http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/co/enlo/enre/enre_005.cfm. Dernière consultation le 20 décembre 2010.

On applique ce calcul pour une surface de 1 m². Nous avons maintenant toutes les données requises pour refaire les calculs de température. Le tout est regroupé dans le tableau 2 ci-dessous.

Les valeurs calculées diffèrent quelque peu de mesures effectuées avec ce genre de peinture mais elles donnent une idée de la tendance observée. Après avoir appliqué une peinture blanche extérieure au latex sur un toit de béton, on a pu noter un abaissement de la température interne de 38 °C à environ 33 ou 34 °C ce qui est assez près des valeurs qu'on retrouve dans le tableau 2.

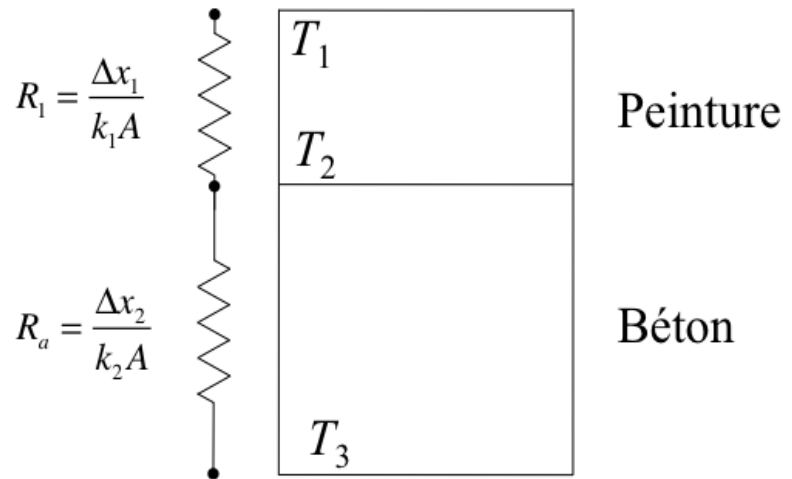


Figure 9: Deux résistances thermiques en série. La résistance équivalente est la somme des résistances.

On notera que le coefficient d'absorption étant beaucoup plus bas que pour le béton brute, une part importante de l'énergie solaire contenue dans le visible est réfléchié vers l'espace. D'autre part, l'abaissement de température des pièces permet de limiter davantage l'utilisation de la climatisation, ou à tout le moins, de jouir d'un plus grand confort.

Tableau 2 : Températures calculées pour une surface peinte avec une peinture ordinaire au latex.

t (heures)	θ (degrés)	T ambiant (°C)	T surface (°C)	T intérieur (°C)
8	15	25,6	31	17,8
9	30	28,4	35,8	21,4
10	45	31	39,1	24,3
11	60	33,4	41,8	26,7
12	75	35,3	43,9	28,7
13	90	36,8	45,4	30,1
14	75	37,7	46,3	31
15	60	38	46,4	31,2
16	45	37,7	45,8	30,7
17	30	36,8	44,2	29,5
18	15	35,3	40,8	27,2

4.4.2.2 Produit de haute technologie : la peinture SUPER THERM®

- i) L'émissivité du produit est évaluée à 0,91
- ii) La conductivité est de 0,31 W/m · K pour une couche; 0,21 pour deux
- iii) Selon la fiche technique^{vi} de la peinture SUPER THERM®, celle-ci reflète
 - a. 99% de la chaleur causée par les UV, qui représentent 3% du spectre générant de la chaleur;
 - b. 92% de la chaleur due aux rayons visibles, qui représentent 40% du spectre; et
 - c. 99% de l'infrarouge, qui représente 57% de la charge.

Le coefficient d'absorption global peut donc être calculé ainsi :

$$\alpha = 1 - (0,03 \cdot 99\% + 0,40 \cdot 92\% + 0,57 \cdot 99\%) = 3,8\%$$

Nous considérerons dans nos calculs l'usage d'une seule couche, donc une épaisseur de 250µm avec une conductivité thermique de 0,31 W/m · K. L'application d'une seconde couche apporterait un bénéfice marginal compte tenu de l'apport supplémentaire en capitaux qu'elle nécessiterait. Le but de cet exercice est de vérifier comment il est possible de maximiser l'économie d'énergie et d'argent pour un effet maximal sur le milieu ambiant.

Comme pour le cas précédent, on commence par calculer la résistance équivalente de l'agrégat peinture-béton comme suit :

$$R_{\acute{e}q} = R_1 + R_2 = \frac{0,00025 \text{ m}}{0,31 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,11 \text{ m}}{0,92 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} = 0,1204 \text{ K/W} \cdot \text{m}^2$$

On applique ensuite aux valeurs des propriétés thermiques de cette peinture les mêmes calculs que pour les cas précédents. Le tableau 3 ci-dessous (en haut de la page suivante) résume les résultats.

^{vi} Voir la brochure de SUPER THERM® sur le site : <http://www.spicoatings.com/products/>. Dernière consultation le 20 décembre 2010.

Tableau 3 : Températures calculées pour une surface peinte avec la peinture SUPER THERM®.

t (heures)	θ (degrés)	T ambiant (°C)	T surface (°C)	T intérieur (°C)
8	15	25,6	22,8	14
9	30	28,4	25,9	17,8
10	45	31	28,6	19,4
11	60	33,4	31	21,7
12	75	35,3	32,9	23,6
13	90	36,8	34,4	25
14	75	37,7	35,2	25,8
15	60	38	35,5	26,1
16	45	37,7	35,1	25,8
17	30	36,8	34,1	24,8
18	15	35,3	32,3	23,3

Les valeurs des températures ambiantes qu'on voit dans ce tableau laisse présager une diminution importante de la température dans l'habitation (notons cependant que les valeurs sous la barre des 20 °C ne nous apparaissent pas très réalistes). De fait, il deviendrait essentiellement superflu d'ajouter un système de climatisation pour diminuer davantage la température ambiante, ou, le cas échéant, la climatisation pourrait être réduite à un minimum d'utilisation. Simultanément, ceci permettrait des économies sur la facture d'électricité des ménages qui ont recours à la climatisation et une réduction des émissions de GES provenant des centrales thermiques.

Par ailleurs, et de manière toute aussi importante pour le climat du globe, une part très importante du rayonnement solaire serait renvoyer vers le ciel dans le spectre visible, permettant ainsi de diminuer le réchauffement du globe d'autant.

5 Évaluation de l'impact

On trouvera au tableau 4 ci-dessous le flux d'énergie moyenne reçu par unité de surface (1 m^2) sur un plan horizontal en fonction de l'heure du jour et nous comparerons cette énergie incidente à l'énergie réfléchiée par la surface en fonction de la substance qui la recouvre : béton, latex ou SUPER THERM[®]. Nous pourrons ainsi évaluer l'impact global de l'application d'une mince couche de ce produit sur les toitures des maisons.

Tableau 4 : Énergie solaire incidente versus énergie réfléchiée selon le matériau.

t (heures)	Énergie incidente (W)	Béton (W)	Peinture blanche au latex (W)	SUPER THERM [®] (W)
8	816	326	653	785
9	1063	425	851	1023
10	1156	462	924	1112
11	1199	480	959	1153
12	1219	488	976	1173
13	1226	490	980	1179
14	1219	488	976	1173
15	1199	480	959	1153
16	1156	462	924	1112
17	1063	425	851	1023
18	816	326	653	785

Si on fait la somme de chaque colonne, on aura essentiellement la quantité d'énergie (en $\text{W}\cdot\text{h}$) reçue/réfléchiée au cours d'une journée. C'est ce que montre le tableau 5 ci-dessous.

Note : Les calculs ont été effectués sur la base d'un soleil qui passe par le zénith au cours du cycle diurne, ce qui n'est strictement vrai que dans la zone tropicale. On peut cependant faire le même exercice pour des latitudes plus élevées. La bande tropicale est toutefois plus intéressante vu sont ensoleillement abondant et le niveau de pauvreté qui complique la tâche des autorités locales pour mettre sur pieds un programme d'infrastructure pour augmenter la réflexion des toitures.

Tableau 5 : Énergie solaire incidente versus énergie réfléchié selon le matériau.

	Énergie incidente	Béton	Peinture blanche au latex	SUPER THERM®
Total (W·h)	12132	4852	9706	11671

Ainsi, une toiture en béton réfléchié 40% de l'énergie incidente, soit 4 850 W·h/m², la peinture au latex 80% ce qui correspond à 9 700 W·h/m² et la peinture SUPER THERM® 96,2% ou 11 670 W·h/m².

Il est essentiel de garder à l'esprit que le béton est un matériau ayant des propriétés réfléchissantes plus intéressantes que bien d'autres, l'asphalte par exemple, lequel absorbe jusqu'à 93% de l'énergie solaire incidente. Or, les toitures en asphalte, en goudron, ou autres produits similaires sont assez répandues (au Canada par exemple) et on aurait avantage à les enduire d'une peinture réfléchissante.

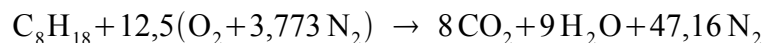
Le tableau 6 suivant donne les coefficients d'absorption de quelques autres produits répandus pour la couverture de toitures. À la lumière des calculs effectués avec les données du béton, il est clair qu'il est possible de faire beaucoup mieux pour diminuer l'absorption de la chaleur solaire. Par exemple, un toit en ardoise absorbe une part importante des rayons du soleil, de même que le bitume, l'asphalte, etc.

Tableau 6 : Coefficient d'absorption de différents matériaux^{vii}

Matériau	Coefficient d'absorption
Béton brut	0,60
Tuile terre cuite	0,64
Ardoise gris foncé lisse	0,89
Acier galvanisé neuf	0,64
Acier rouillé	0,92
Aluminium poli	0,15
Asphalte	0,93

Selon un article⁷ paru dans le journal *The Guardian*, chaque 10 m² de surface urbaine foncée qui serait peinte en blanc aurait le même impact refroidissant que d'éviter l'émission de 1 tonne de CO₂. Cette affirmation vaut la peine d'être examinée d'un peu plus près.

On associe souvent, pour fin de calcul d'émissions ou de température de combustion, le pétrole à de l'isooctane C₈H₁₈. En outre, l'équation de combustion stoechiométrique de ce carburant est donnée par :



vii <http://www.outilssolaires.com/Glossaire/pop-absorption.htm>. Dernière consultation le 21 décembre 2010.

C'est dire que 1 mole de C_8H_{18} donne 8 moles de CO_2 ou encore que $8 \cdot 12 + 18 = 114$ kg de C_8H_{18} produit $8(12 + 2 \cdot 16) = 352$ kg de CO_2 . Une tonne (1 000 kg) de CO_2 serait donc émise lors de la combustion de $114 \cdot 1000 / 352 = 324$ kg d'essence. La densité de l'essence étant d'environ 0,7 kg/litre, il faudrait donc consommer 463 litres d'essence pour produire 1 tonne de CO_2 . Dans la seule région de *Los Mochis*, au Mexique, il y a près de 100 000 demeures individuelles⁸ dont la surface projetée au sol est de l'ordre de 70 m², en moyenne. C'est dire que la surface totale de toits (d'habitations, donc excluant les commerces et l'industrie) serait de l'ordre de 7 000 000 m² pour cette région seulement. Un programme municipal d'éclaircissement des toitures pourrait donc permettre d'éviter de brûler l'équivalent de $3,24 \times 10^8$ litres d'essence, selon l'article du *Guardian*.

Selon Statistiques Canada, la voiture moyenne parcourt 16 500 km/année au Canada^{viii}. Au Mexique, les gens se déplacent souvent en voiture, dû au manque d'infrastructure pour le transport en commun dans les petites villes, mais sur de courtes distances et il est probable que la moyenne des gens parcourt bien moins que cette distance annuellement. Or, une voiture standard qui parcourt 16 500 km/an et qui consomme quelque 10 L/100 km (un chiffre conservateur) nécessiterait donc environ

$$16500 \text{ km/an} \cdot \frac{10 \text{ L}}{100 \text{ km}} = 1650 \text{ l par année.}$$

Pour consommer $3,24 \times 10^8$ litres d'essence annuellement il faudrait alors que 200 000 voitures parcourent les 16 500 km/an. Considérant le nombre de foyers de la communauté visée et considérant que peu de foyers possèdent un véhicule, ceci signifierait que peindre les toits en blanc, ou mieux encore, avec une peinture ayant des propriétés telles que celles du produit SUPER THERM[®], aurait le même impact que de ne pas utiliser de véhicules personnels dans toute la ville pendant au moins 2 ans. Ceci a vraiment de quoi faire réfléchir les autorités publiques, autant celles des pays riches, qui pourraient subventionner un tel programme dans les pays pauvres de la couronne tropicale afin de contribuer au maximum à l'arrêt de la progression de la hausse des températures du globe, que des municipalités concernées, qui pourraient y voir une façon d'améliorer la qualité de vie de leurs citoyens.

viii Voir les données sur la population canadienne : Statistics Canada, The Daily, Canada's Population 28 mars 2006. <http://www.statcan.gc.ca/daily-quotidien/060328/dq060328e-eng.htm>. Dernière consultation le 21 décembre 2010. Voir aussi : Ressources humaines et Développement des compétences Canada, Indicateurs de mieux-être au Canada, Environnement – Transport. <http://www4.hrsdc.gc.ca/.3ndic.1t.4r@-fra.jsp?iid=67>. Dernière consultation le 21 décembre 2010.

6 Aspect financier

Une peinture ordinaire au latex produit un effet désirable à un prix assez modeste, quoiqu'une part importante de la population du globe ne saurait se permettre le luxe d'investir même un faible montant alors qu'il est déjà difficile de se payer de quoi manger. Il est possible par exemple de trouver un produit de base à \$299,00 MXN (\$24,60 CAD) pour 19 litres^{ix}, soit de quoi appliquer 2 couches de peinture sur une surface de 70 m². Au Mexique, l'économie potentiel qu'il est possible de réaliser avec un tel investissement est de l'ordre de \$100,00 MXN par mois^x, pendant les mois les plus chauds (de début mai jusqu'à la fin octobre, *i.e.* 6 mois par année). Vu le coût d'investissement, on constate qu'en seulement 3 mois, le montant initial déboursé sera remboursé en entier et dès lors, l'économie se traduira par un surplus financier dans le budget familial. Par surcroît, le milieu de vie sera plus agréable car les températures extrêmes seront beaucoup plus rares.

Tel que l'a démontré l'analyse des §§ 4.4.2.1 et 4.4.2.2, plus prometteur encore est le produit SUPER THERM[®] qui se vend \$35,00 CAD le litre. Il s'applique au taux de 100 pi² par gallon US, c'est-à-dire 2,46 m² par litre. À ce taux, il en coûterait \$996.00 CAD (un peu plus de 12 000 MXN) pour couvrir un toit d'à peine 70 m², en plus des frais de transport pour cette marchandise qui n'est pas actuellement facilement disponible partout. On peut cependant supposer que le coût diminuerait grandement pour des achats plus volumineux. Il serait probablement possible pour un promoteur s'occupant de projets à grande échelle d'obtenir le produit à moins de la moitié de ce prix, ce qui deviendrait intéressant sur le plan financier et environnemental, vu l'effet réfléchissant accru du produit (d'un facteur de 20% selon les fiches techniques respectives) et sa meilleure performance pour *refroidir* le milieu de vie familial. Il est probable que les économies réalisées sur une base annuelle seraient de l'ordre du prix d'acquisition du produit, ce qui signifierait une économie réelle dès la deuxième année.

Il apparaît nécessaire pour les pays riches de porter attention aux effets que le niveau de vie élevé de leurs sociétés peuvent avoir sur le globe tout entier. Il serait donc envisageable de faire assumer à ces sociétés une part non-négligeable des frais à encourir pour appliquer cette stratégie dans les pays où l'impact serait maximal. Une aide pourrait être accordée, en partie sous forme de dons, en reconnaissance du tort qui est causé chaque jour par les pays développés à l'équilibre thermodynamique entre notre planète et l'espace intersidéral, et en partie sous forme de prêts, à des taux avantageux. En particulier, il apparaît comme une stratégie gagnant-gagnant pour une compagnie oeuvrant dans l'industrie du pétrole de redorer son image en subventionnant, sur une base volontaire (mais non par pur altruisme), le déploiement et la mise en oeuvre de cette approche dans les pays émergents situés près de la couronne tropicale.

Pour donner une idée du bénéfice envisageable d'investir dans les pays équatoriaux, voyons l'impact d'investir dans cette région plutôt qu'à des latitudes élevées, comme au Canada par exemple. La déclinaison du soleil est donnée par l'équation suivante :

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (15)$$

ix Voir le site Pinturas & Pintores ADLER: <http://www.sinaloamall.com/index.php?mod=products&p=adler&ID=378>. Dernière consultation le 22 décembre 2010.

x Basé sur le nombre de kW-h moyen requis par mois pour une demeure où a été appliqué une peinture réfléchissante au cours de l'été 2010, à Los Mochis, au Mexique. Les économies mensuelles se sont chiffrées à \$105 MXN (\$8,64 CAD) par mois, malgré une augmentation des tarifs d'électricité.

La ville de Montréal étant située à 45° 31' Nord, il en découle que le soleil ne se trouve jamais à plus de 68° d'élévation. Le coefficient d'atténuation atmosphérique[†] que nous avons vu précédemment (éq. 2) donne le résultat suivant :

$$y_{max} = e^{-km} = e^{-0,205/\sin 68} = 0,802$$

où y_{max} est l'atténuation maximale, alors que près de l'équateur, on aurait

$$y_{max} = e^{-0,156/\sin 90} = 0,856$$

Le rayonnement solaire est donc atténuée d'un facteur 7% de plus à Montréal qu'à l'équateur, dans le meilleur des cas, alors que pendant la saison froide, son atténuation avoisine les 26%. Par ailleurs, l'élévation du soleil étant moins importante à Montréal, l'intensité du rayonnement qui atteint une surface plane a un impact réduit sur le réchauffement de celle-ci d'un facteur $\sin \alpha$ où α est l'élévation du soleil par rapport à l'horizon. À Montréal, ce facteur varie entre 93% en été à 37% en hiver. Ainsi, si le coût d'enduire les toits plats à Montréal était le même que dans les pays équatoriaux, l'impact de cet investissement serait 14% moins important dans le meilleur des cas. En hiver, cette stratégie est inutile puisque les toits plats sont fréquemment recouverts de neige et le problème ne se pose même pas.

Il serait par ailleurs considérablement avantageux d'augmenter artificiellement l'albedo des surfaces dans des régions du monde qui jouissent d'un fort rayonnement solaire au cours d'une année plutôt que de s'attarder à des régions qui enregistrent très peu d'heures d'ensoleillement. Afin de maximiser la valeur de l'investissement, il serait donc de mise d'examiner les données climatiques du globe[‡] et de concentrer les efforts là où l'insolation est maximale. À Montréal, comme dans la plupart des climats continentaux, la présence de nuages est très fréquente, alors que plusieurs parties du Mexique bénéficient d'un ensoleillement annuel exceptionnel. Il serait d'autant plus avantageux d'investir dans l'augmentation de l'albedo des toits dans une région où le couvert nuageux est rare.

Un autre facteur réduit l'impact de ce genre d'investissement appliqué aux pays nordiques (et développés) : l'hiver étant beaucoup plus rigoureux dans ces régions, il est impératif de bien isoler les bâtiments, de façon à éviter des dépenses trop onéreuses pour le chauffage en hiver. En outre, les toits sont habituellement bien isolés du climat externe, ce qui rend les habitations nordiques moins susceptibles à la surchauffe en été et l'utilisation de la climatisation beaucoup moins nécessaire pour accéder à un milieu de vie agréable. Peindre les toits en blanc ne contribuerait que marginalement à diminuer l'énergie nécessaire à la climatisation et ce, pendant une courte période de l'année. Au Québec, l'énergie ainsi économisée étant très majoritairement de source renouvelable, l'énergie de la climatisation n'ajoute pas d'autres effets néfastes pour le climat comme c'est le cas dans les pays qui carburent au mazout ou au charbon (tel qu'aux États-Unis ou en Chine, par exemple).

Bref, s'il est difficile de chiffrer à quel point il peut s'avérer plus avantageux d'investir pour mettre en oeuvre la stratégie proposée dans les tropiques plutôt que dans les régions nordiques, il est clair qu'un même investissement aurait un impact global beaucoup plus important près de l'équateur que près des pôles. C'est donc là qu'il faut agir en tout premier lieu.

[†] Ce coefficient varie avec la distance terre-soleil et le point culminant du soleil dans le ciel n'arrive pas au même moment dans l'année, selon la latitude. Voir la référence [5], page 49 pour un tableau complet de ce coefficient en fonction de la période de l'année.

[‡] On peut se donner une idée rapide du taux d'ensoleillement d'une région en utilisant le logiciel HOMER. Voir le site internet <http://www.homerenergy.com/>.

7 Conclusion

Nous avons vu que l'hypothèse de départ voulant qu'il est possible de réduire la progression du réchauffement global en augmentant la réflectivité des toitures est objectivement vérifiée et qu'une telle mesure aurait également un grand nombre de bénéfices secondaires :

1. amélioration du confort dans les foyers n'ayant pas accès à la climatisation;
2. amélioration du niveau de vie des familles à faibles revenus qui dépensent actuellement une part importante de leur moyens financiers pour abaisser la température du domaine familial à un niveau supportable;
3. diminution de la température extérieure locale;
4. diminution des émissions de GES provenant de la génération d'électricité à partir de centrales thermiques;
5. augmentation de la réflexion du rayonnement solaire incident et abaissement de la température du globe associée.

La mise en oeuvre d'un programme structurée ciblant une région donnée de la zone tropicale aurait pour effet de sensibiliser une population pour qui les préoccupations quotidiennes l'emportent majoritairement sur les questions d'ordre environnementales. Une petite ville où seraient implantées avec succès de telles mesures pourrait servir de modèle à toute une nation et influencer positivement d'autres régions. L'augmentation de la qualité de vie d'une communauté permettrait de changer les mentalités en ce qui concerne le fragile équilibre entre l'homme et la nature.

Si les régions où il serait particulièrement avantageux de procéder avec cette approche sont souvent aussi les moins riches du globe, leurs habitants sont par ailleurs très peu responsables du problème aigu que représentent les changements climatiques à l'heure actuelle. Paradoxalement, ils en sont aussi les premières victimes, avec la croissance de la fréquence des phénomènes extrêmes (ouragans, pluies diluviennes, sécheresses) et la crue des océans. Il y a donc une urgence à agir et une obligation morale qui incombe aux pollueurs, actuels et passés. Le Canada, 13^{ème} plus grand émetteur de CO₂ par habitant en 2007⁹, fait de plus en plus mauvaise figure sur la scène internationale et gagnerait en notoriété en s'impliquant dans le financement d'un programme international d'augmentation de l'albédo des bâtiments. De même, les compagnies pétrolières oeuvrant dans les sables bitumineux albertain pourraient dorénavant dorer leur image et courtiser le respect du public en subventionnant une telle entreprise sur une base volontaire, de façon à faire contrepoids au tort qu'elles causent à la planète et à la réputation du pays tout entier en exploitant les gisements du sous-sol canadien.

8 Références bibliographiques

- 1 Sean O'Driscoll, The Washington Post, 18 septembre 2010. <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2010/09/16/AR2010091607740.html>. Dernière consultation le 4 octobre 2010.
- 2 Mark Henderson, The Times, 27 mai 2009, <http://www.timesonline.co.uk/tol/news/environment/article6366639.ece>. Dernière consultation le 4 octobre 2010.
- 3 Frank Kreith, Jan F. Kreider, Principles of Solar Engineering. Washington : Hemisphere Publishing Corporation. 1978. 778 pages
- 4 Newport Corporation, Introduction to Solar Radiation, <http://www.newport.com/store/genContent.aspx/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033>. Dernière consultation le 5 octobre 2010.
- 5 Jui Sheng Hsieh, Solar Energy Engineering. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall. 1986. 553 pages.
- 6 R.D. Clear, L. Gartland, F.C. Winkelmann, An Empirical Correlation for the Outside Convective Air Film Coefficient for Horizontal Roofs, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001. <http://simulationresearch.lbl.gov/dirpubs/47275.pdf>. Dernière consultation le 18 décembre 2010.
- 7 David Adam, Paint it white, The Guardian, 16 janvier 2009. <http://www.guardian.co.uk/environment/2009/jan/16/white-paint-carbon-emissions-climate>. Dernière consultation le 21 décembre 2010.
- 8 Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ahome, Sinaloa. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=25>. Dernière consultation le 21 décembre 2010.
- 9 Indicateurs des Objectifs du Millénaire pour le développement. <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Data.aspx>. Dernière consultation le 24 décembre 2010.

ANNEXES

Annexe A

Calcul de la portion d'énergie dans le spectre visible (cf. exemple 1 page 7)

Code :

```

C_1 = C1#
C_2 = C2#
e = EXP(1)
sigma = sigma#
T = 5777 [K]

E_b_lambda = C_1/( lambda^5 * (e^(C_2/(lambda * T)) - 1) )
E_b =Integral( E_b_lambda, lambda, 0.38, 0.78 )
E_visible_% = E_b/(sigma * T^4)

```

Équations formatées :

$$C_1 = 3.742E+08 \quad [\text{W-micrometer}^4/\text{m}^2]$$

$$C_2 = 14388 \quad [\text{micrometer-K}]$$

$$\sigma = 5.670E-08 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{-K}^4]$$

$$T = 5777 \quad [\text{K}]$$

$$E_{b,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\left[\frac{C_2}{\lambda \cdot T} \right]} - 1 \right)}$$

$$E_b = \int_{0.38}^{0.78} (E_{b,\lambda}) \, d\lambda$$

$$E_{\text{visible},\%} = \frac{E_b}{\sigma \cdot T^4}$$

Résultats :

```

C_1 = 3.742E+08 [W-micrometer^4/m^2]
C_2 = 14388 [micrometer-K]
E_b = 2.938E+07 [W/m^2]
E_b_lambda = 5.548E+07 [W/(m^2-micrometer)]
lambda = 0.78 [micrometer]
sigma = 5.670E-08 [W/m^2-K^4]
T=5777 [K]
E_visible_% = 0.4653

```

Annexe B

Calcul du bilan énergétique de la surface d'un toit, en fonction du matériau en surface (béton brute, peinture latex ou SUPER THERM® (cf. §4.4 pages 13-18)

Code :

```

G_n = G_solaire * (1+0.0334 * COS(2*pi * (n-3)/365))
G_solaire = 1367 [W]
n = 172 "i.e. 21 juin"
k = 0.142
m = 1
alpha_béton = 0.6
alpha_latex = 0.2
alpha_supertherm = 0.038
sigma = 0.0000000567 [W/(m^2 K^4)]
epsilon_béton = 0.85
epsilon_latex = 0.74
epsilon_supertherm = 0.91
DELTAx = 0.11 [m]
h_a = 12 [W/m^2]
epsilon_ciel = 0.787
k_1 = 0.92 [W/(m K)]
T_a = 35 + 273 [K]
T_intérieur = (0.98 * T_2 + T_a)/2
T_2 = .95 * T_1
R_latex = 0.12016
R_supertherm = 0.1204

{Q_soleil = G_n * exp(-k*m) * alpha_béton}
{Q_soleil = G_n * exp(-k*m) * alpha_latex}
Q_soleil = G_n * exp(-k*m) * alpha_supertherm

Q_ciel = sigma * epsilon_ciel * T_a^4

{Q_radiation_T_1 = epsilon_béton * sigma * T_1^4}
{Q_radiation_T_1 = epsilon_latex * sigma * T_1^4}
Q_radiation_T_1 = epsilon_supertherm * sigma * T_1^4

Q_radiation_T_2 = epsilon_béton * sigma * T_2^4
Q_radiation_T_intérieur = epsilon_béton * sigma * T_intérieur^4

{Q_conduction = (T_1 - T_2) * k_1 / DELTAx}
{Q_conduction = (T_1 - T_2) / R_latex}
Q_conduction = (T_1 - T_2) / R_supertherm

Q_convection_T_1 = h_a * (T_1 - T_a)
Q_convection_T_2 = h_a * (T_2 - T_intérieur)

Q_soleil + Q_ciel - Q_radiation_T_1 - Q_radiation_T_2 - Q_conduction - Q_convection_T_1 -
Q_convection_T_2 + Q_radiation_T_intérieur = 0

T_surface = T_1 - 273
T_plafond = T_2 - 273

```

$$T_{\text{pièce}} = T_{\text{intérieur}} - 273$$

$$\{t = 7\}$$

$$t_{\text{prime}} = (t - 7)/12$$

$$m = 1/\sin(\theta)$$

$$\theta = 180 * t_{\text{prime}}$$

$$T_{\text{max}} = 38$$

$$T_{\text{min}} = 25$$

$$t_{\text{peak}} = 15$$

$$\phi = 150 * (t - t_{\text{peak}})/12$$

$$T_{\text{a}} = T_{\text{min}} + (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) * \cos(\phi) + 273$$

$$T_{\text{ambient}} = T_{\text{a}} - 273$$

$$E_{\text{incident}} = G_{\text{n}} * \exp(-k*m)$$

$$E_{\text{r_béton}} = G_{\text{n}} * \exp(-k*m) * (1 - \alpha_{\text{béton}})$$

$$E_{\text{r_latex}} = G_{\text{n}} * \exp(-k*m) * (1 - \alpha_{\text{latex}})$$

$$E_{\text{r_supertherm}} = G_{\text{n}} * \exp(-k*m) * (1 - \alpha_{\text{supertherm}})$$

Équations formatées :

$$E_{\text{visible, \%}} = \frac{E_{\text{b}}}{s \cdot T^4}$$

$$G_{\text{n}} = G_{\text{solaire}} \cdot \left[1 + 0.0334 \cdot \cos \left(2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{n - 3}{365} \right] \right) \right]$$

$$G_{\text{solaire}} = 1367 \quad [\text{W}]$$

$$n = 172$$

$$k = 0.142$$

$$\alpha_{\text{béton}} = 0.6$$

$$\alpha_{\text{latex}} = 0.2$$

$$\alpha_{\text{supertherm}} = 0.038$$

$$s = 5.67 \times 10^{-8} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$$

$$e_{\text{béton}} = 0.85$$

$$e_{\text{latex}} = 0.74$$

$$e_{\text{supertherm}} = 0.91$$

$$D_{\text{x}} = 0.11 \quad [\text{m}]$$

$$h_{\text{a}} = 12 \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$e_{\text{ciel}} = 0.787$$

$$k_1 = 0.92 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

$$T_{\text{intérieur}} = \frac{0.98 \cdot T_2 + T_a}{2}$$

$$T_2 = 0.95 \cdot T_1$$

$$R_{\text{latex}} = 0.12016$$

$$R_{\text{supertherm}} = 0.1204$$

$$Q_{\text{soleil}} = G_n \cdot \mathbf{exp}(-k \cdot m) \cdot a_{\text{supertherm}}$$

$$Q_{\text{ciel}} = s \cdot e_{\text{ciel}} \cdot T_a^4$$

$$Q_{\text{radiation},T,1} = e_{\text{supertherm}} \cdot s \cdot T_1^4$$

$$Q_{\text{radiation},T,2} = e_{\text{béton}} \cdot s \cdot T_2^4$$

$$Q_{\text{radiation},T,\text{intérieur}} = e_{\text{béton}} \cdot s \cdot T_{\text{intérieur}}^4$$

$$Q_{\text{conduction}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{supertherm}}}$$

$$Q_{\text{convection},T,1} = h_a \cdot (T_1 - T_a)$$

$$Q_{\text{convection},T,2} = h_a \cdot (T_2 - T_{\text{intérieur}})$$

$$Q_{\text{soleil}} + Q_{\text{ciel}} - Q_{\text{radiation},T,1} - Q_{\text{radiation},T,2} - Q_{\text{conduction}} - Q_{\text{convection},T,1} - Q_{\text{convection},T,2} + Q_{\text{radiation},T,\text{intérieur}} = 0$$

$$T_{\text{surface}} = T_1 - 273$$

$$T_{\text{plafond}} = T_2 - 273$$

$$T_{\text{pièce}} = T_{\text{intérieur}} - 273$$

$$t_{\text{prime}} = \frac{t - 7}{12}$$

$$m = \frac{1}{\mathbf{sin}(q)}$$

$$q = 180 \cdot t_{\text{prime}}$$

$$T_{\text{max}} = 38$$

$$T_{\text{min}} = 25$$

$$t_{\text{peak}} = 15$$

$$f = 150 \cdot \left[\frac{t - t_{\text{peak}}}{12} \right]$$

$$T_a = T_{\text{min}} + (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \cdot \mathbf{cos}(f) + 273$$

$$T_{\text{ambient}} = T_a - 273$$

$$E_{\text{incident}} = G_n \cdot \mathbf{exp}(-k \cdot m)$$

$$E_{r,\text{béton}} = G_n \cdot \mathbf{exp}(-k \cdot m) \cdot (1 - a_{\text{béton}})$$

$$E_{r,\text{latex}} = G_n \cdot \mathbf{exp}(-k \cdot m) \cdot (1 - a_{\text{latex}})$$

$$E_{r,\text{supertherm}} = G_n \cdot \mathbf{exp}(-k \cdot m) \cdot (1 - a_{\text{supertherm}})$$