
Optimisation basée sur la fiabilité pour l'amélioration des systèmes d'isolation des bâtiments

A. Aïssani*

* Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France.

Amina.Aissani@univ-bpclermont.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ.

Dans le cadre du développement durable, la bonne conception des nouveaux bâtiments et la réhabilitation des bâtiments existants pour satisfaire les nouvelles exigences environnementales et énergétiques représentent un défi réel pour l'ingénierie de la conception et de la maintenance. Aujourd'hui, la conception se base sur l'utilisation de méthodes déterministes, qui peuvent entraîner des déviations de la performance réelle par rapport à celle prévue lors de la conception. Ainsi, nos travaux portent sur le développement d'approches probabilistes pour estimer la déviation potentielle de la performance par rapport aux objectifs visés en considérant les incertitudes liées aux paramètres de calcul. Une nouvelle méthodologie de conception est introduite en considérant en plus de l'aléa associé aux paramètres d'entrée, différents critères environnementaux et sociétaux en relation avec le niveau d'exigence attendu par le maître de l'ouvrage.

ABSTRACT.

In the context of sustainable development, design of new buildings and rehabilitation of existing buildings represent a real challenge for engineering design and maintenance. This is due to the current environmental and energy requirements imposed by the European Union. Currently, the design is based on deterministic approaches that can lead to deviations of real performance compared to the expected one. Thus, our work aims at developing probabilistic approaches to estimate the potential deviation with respect to objectives, by considering different types of uncertainties parameters. Finally, a new design methodology is introduced. This methodology considers, in addition to the hazard related to input parameters, different social and environmental factors, in addition to the level of requirements expected by the building owner.

MOTS-CLÉS : Optimisation, Fiabilité, Isolation, Consommation énergétique, Incertitudes.

KEY WORDS: Optimization, Reliability, Insulation, Energy consumption, Uncertainties.

1. Introduction

La maîtrise des consommations est devenue un enjeu économique majeur dans notre société. En France, 46% de la consommation énergétique nationale est liée au secteur du bâtiment [COR 13]. Une prise de conscience qui entraîna la mise en place d'un cadre politique et réglementaire de plus en plus exigeant, qui vise à réduire les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre, et à contribuer ainsi à l'indépendance énergétique nationale.

Pour tenir ces objectifs, la construction de bâtiments basse consommation (BBC) se généralise et un programme de rénovation du parc existant est en cours [SPI 12]. Cependant la conception est généralement basée sur l'utilisation de modèles de simulation simplifiés [MAN 13] négligeant les données d'entrée souvent incertaines. Les exigences de précisions étant de plus en plus accrues, il devient essentiel d'apprécier les différentes incertitudes associées aux modèles et aux paramètres utilisés pour la simulation.

Nos travaux portent en particulier sur l'identification et la quantification des sources d'incertitudes liées aux paramètres d'entrée des modèles de simulation. Le but étant d'améliorer les prévisions énergétiques et de ce fait la conception des bâtis et de leur rénovation. Dans ce qui suit, nous présentons nos principales motivations et la démarche adoptée pour atteindre nos objectifs. Par la suite, nous présentons les différents paramètres incertains étudiés qui influent sur la performance énergétique. Ces paramètres seront représentés par des modèles probabilistes pour nous permettre d'obtenir des conceptions basées sur des données réalistes. Enfin, nous

proposons une méthodologie de conception permettant une prise de décision fiable et personnalisée basée sur la considération à la fois de l'aléa, des exigences énergétiques du maître de l'ouvrage mais également de divers paramètres environnementaux et sociétaux.

2. Motivations

Dans le contexte de la construction, il est encore difficile de prévoir les consommations énergétiques réelles à partir de celles issues des scénarios conventionnels, parce qu'il est difficile de fixer une valeur de consommation énergétique compte tenu des aléas possibles durant les différentes phases du cycle de vie du bâtiment [SPI 12].

Durant la phase de conception, une prévision de l'occupation du bâtiment va permettre de caractériser le besoin de confort à assurer, une donnée incertaine qui va dépendre du scénario d'occupation du logement tout au long de son cycle de vie. De plus, les outils de simulation dynamique se basent sur l'utilisation de fichiers décrivant les sollicitations environnementales. Ces sollicitations doivent représenter l'évolution climatique pendant la période étudiée, ce qui représente également de grandes incertitudes car à l'heure actuelle il est encore difficile de prévoir l'évolution du climat. Enfin, pendant la phase de mise en œuvre, plusieurs sources d'incertitudes sont déplorées. On parle notamment des différentes variabilités liées aux performances intrinsèques des matériaux utilisés pour la construction, mais aussi des différents problèmes de mise en œuvre qui impliquent la dégradation de la performance thermique attendue.

La présence de toutes ces sources d'incertitudes est responsable du biais sur les résultats attendus de la performance énergétique. L'objectif de ce travail consiste à proposer une méthodologie d'aide à la décision pouvant être utilisée en phase de conception pour une évaluation réaliste des performances énergétiques. Cette méthodologie est basée sur la théorie de la fiabilité, et considère en entrée des modèles de simulation et différentes sources d'incertitude grâce à l'utilisation des approches probabilistes.

La démarche que nous avons suivi visait à identifier, en premier lieu, les différents paramètres de conception les plus influents sur la performance énergétique. Ceux-ci ont été identifiés en se basant sur les modèles prédictifs utilisés en simulation énergétique. L'incertitude liée à chaque paramètre est quantifiée puis étudiée indépendamment. Enfin, une méthode de conception basée sur la fiabilité est proposée. Celle-ci permet de considérer les sources d'incertitudes identifiées, ainsi que d'autres critères indirects relatifs à l'isolation.

3. Amélioration de la performance énergétique

L'analyse de la performance énergétique d'un bâtiment passe par la considération de deux bases de données. La première est liée aux conditions environnementales auxquelles sera soumis le bâtiment, tandis que la deuxième regroupe les dispositions constructives adoptées. Les conditions environnementales sont régies par des facteurs incontrôlables liés aux comportements des habitants et aux changements climatiques quant à la qualité des dispositions constructives, celles-ci dépendent des différents choix du concepteur et de la qualité et de la rigueur des fabricants de matériaux et des campagnons sur chantier.

L'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment passe par l'amélioration de la performance de l'enveloppe du bâtiment et par l'utilisation optimisée du système de chauffage et de la climatisation. Cependant, l'utilisation du système de chauffage et de climatisation dépend de la qualité de l'enveloppe du bâtiment. De plus, l'utilisation d'une instrumentation appropriée suffirait à réguler le fonctionnement des systèmes énergétiques. De ce fait, il devient important d'améliorer la qualité de l'enveloppe du bâtiment pour en améliorer la performance. Une meilleure qualité de l'enveloppe entraînerait automatiquement une utilisation plus modérée du système de chauffage et de climatisation.

La performance thermique d'une enveloppe de bâtiment va dépendre principalement de la résistance thermique de chaque composant la constituant. Dans le cas d'un mur par exemple (figure 1), la résistance totale de la paroi est égale à la somme des résistances thermiques de chaque couche de matériau composant cette paroi :

$$R_{th} = \left(R_{si} + R_{se} + \sum_1^n \frac{e_i}{\lambda_i} \right) \quad [1]$$

où e_i représente l'épaisseur de la couche i de conductivité thermique λ_i , n représente le nombre de couches constituant l'enveloppe tandis que R_{si} et R_{se} représentent les résistances thermique d'échange superficiel des surfaces intérieure et extérieure, respectivement.

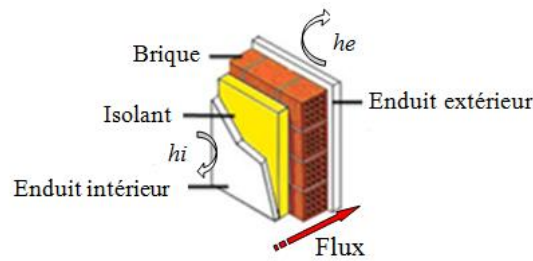


Figure 1. Transfert de chaleur à travers une façade de bâtiment.

La consommation énergétique totale est alors déterminée en évaluant les consommations nécessaires pour satisfaire les besoins en chauffage et en climatisation, comme suit [DOM 07]:

$$E_{C,H} = \frac{86400}{R_{th}} \frac{HDD}{\eta_s} \quad [2]$$

$$E_{C,C} = \frac{86400}{R_{th}} \frac{CDD}{COP} \quad [3]$$

où η_s représente l'efficacité du système de chauffage et COP est le coefficient de performance du système de refroidissement, R_{th} est la résistance thermique (Eq.1), et les HDD et CDD représentent respectivement, les degrés-jours chauffage et les degrés-jours climatisation.

Le concept des degrés-jours permet de remplacer l'utilisation de la différence de température ponctuelle. Les degrés-jours sont calculés annuellement comme étant la somme de toutes les différences de températures des journées froides (HDD) et chaudes (CDD).

Dans la littérature scientifique, des études ont déjà été réalisées pour la quantification de l'incertitude liée aux modèles de conception [LUY 13, HOP 11]. Cependant, très peu d'études traitent encore l'incertitude liée aux paramètres d'entrée car cela nécessite des études statistiques, des expérimentations et des observations. Cependant, bien que ces analyses prennent du temps, elles permettent de supporter le processus de conception.

Dans ce qui suit, nous détaillons chaque paramètre incertain pouvant influencer sur la consommation énergétique. D'après les équations 2 et 3, nous pouvons nous référer à deux paramètres principaux à savoir : 1) les incertitudes liées aux matériaux et à la mise en œuvre affectant ainsi la résistance thermique de l'enveloppe R_{th} ; 2) les conditions environnementales extérieures, notamment le changement climatique, qui affecteraient quant à elles les degrés-jours à considérer.

3.1. INCERTITUDES LIEES AUX PROPRIETES INTRINSEQUES DES MATERIAUX

Pour atteindre les objectifs énergétiques visés, le CSTB (Centre Scientifique et Technique du bâtiment) préconise aujourd'hui de doubler en moyenne le niveau d'isolation des bâtiments et d'utiliser des isolants de plus faibles conductivités thermiques intégrés aux parois (www.cstb.fr). Pour répondre à cette demande, le marché français propose une large gamme d'isolants de plus en plus performants. Cependant, les caractéristiques de ces isolants sont souvent altérées par différents facteurs extérieurs liés notamment aux erreurs de mesure, aux moyens de transport et de stockage, au processus de fabrication, ... etc.

Ces incertitudes sont inévitables et réfèrent aux propriétés physiques du matériau telles que l'épaisseur, la densité et la conductivité thermique, etc [HOP 11]. Une étude réalisée par Dominguez-Munoz et al. [DOM 10] considère deux sources d'incertitudes : les variations du processus de fabrication et la faible précision des mesures expérimentales. Une visite d'usine de fabrication de laine de verre a également permis de mettre en évidence d'autres sources d'incertitudes. En effet, la mesure de la conductivité fournie par le fabricant représente une valeur homogène qui peut être atteinte en production et de façon répétitive. Le calcul se fait en considérant tous les résultats des productions (journaliers ou hebdomadaires). De plus, le changement de type de production se fait en continu suite à un changement de la commande automatique. Les premiers panneaux résultant sont ainsi

soumis à des variations de densité en phase de stabilisation. Une différence de performance qui n'est cependant pas prise en compte car le premier contrôle se fait au bout de 5 à 10 min du lancement de la production. Enfin, nous avons noté que la détection de défaut dans les panneaux se fait par contrôle visuel à une distance d'environ 1.50m, ne permettant pas de contrôler réellement l'homogénéité des matériaux fabriqués.

3.2. INCERTITUDES DUES AUX DEFAUTS DE MISE EN ŒUVRE

La performance des bâtiments passe en premier lieu par la performance de son isolation, soit la résistance thermique des matériaux composant l'enveloppe. Or, plus un bâtiment est bien isolé, plus les ponts thermiques jouent un rôle déterminant puisqu'ils deviennent les seuls points de passage de la chaleur. Les ponts thermiques linéiques, qui représentent les fuites au niveau des jonctions (Figure 2), sont dans la plupart des cas pris en compte lors de la modélisation grâce à l'utilisation d'une valeur linéique donnée dans les réglementations. En ce qui concerne les ponts thermiques ponctuels (Figure 3), ces derniers sont considérés au moyen de l'ajout d'une valeur unitaire qui va représenter les déperditions dues notamment aux procédés d'encoches des isolants ou de leurs parements. Cependant, les défauts de mises en œuvre ne sont pas systématiquement considérés en dépit de leur présence quasi-systématique.

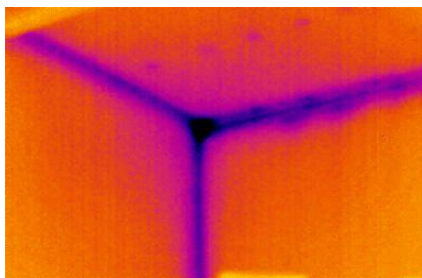


Figure 2. Illustration d'un pont thermique linéique.

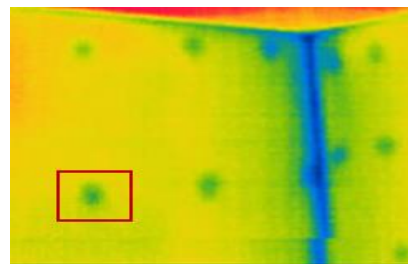


Figure 3. Illustration du type de pont thermique ponctuel.

La présence des différents ponts thermiques dégrade fortement la performance de l'enveloppe. Le degré d'incertitude à considérer sur la présence de tels ponts est très aléatoire et dépend du contrôle de qualité et de la rigueur du travail des compagnons. Une étude expérimentale sur un banc de test spécifique comprenant des parois en présence de défauts a été réalisée dans ce travail de recherche. En se basant sur des techniques de thermographie, il nous a été possible de détecter et mesurer les différences de température au niveau des zones de défauts (Figure 4). Les écarts de résistance, entre les différentes parties des matériaux étudiés, ont permis de définir l'incertitude liée à différents types de défauts de mise en œuvre.

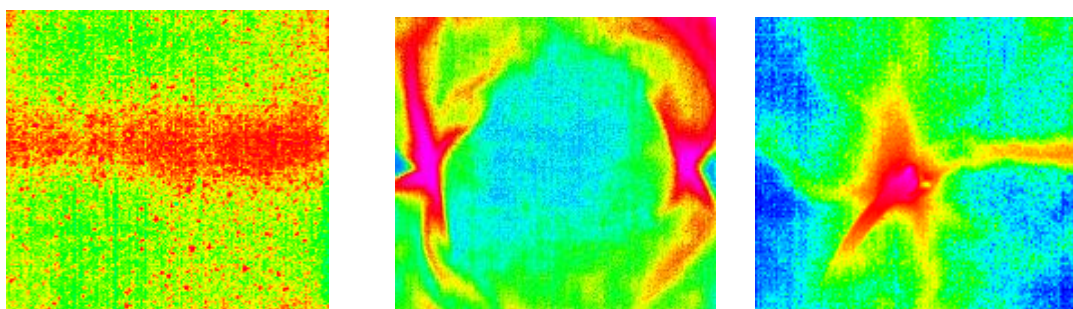


Figure 4. Image infrarouge montrant les écarts de température dans un même matériau en présence :
 a. d'une rainure dans un échantillon en Polystyrène,
 b. d'un écrasement de laine minérale,
 c. d'un passage de gaines électrique.

3.3. INCERTITUDES DUES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les équations permettant le calcul de la consommation énergétique (Eq.2 et 3) nécessitent l'utilisation de données météorologiques ou climatiques. Ces données doivent être considérées pendant toute la durée du projet. En simulation énergétique, les fichiers de données météorologiques utilisés sont généralement basés sur des données obtenues de la station météo la plus proche du bâtiment. Cependant, il est encore difficile de prédire exactement l'évolution du climat car ce dernier dépend de nombreux facteurs sociaux, démographiques, économiques, environnementaux et technologiques.

Dans la littérature, de nombreux auteurs expriment des réserves à l'égard des prévisions utilisées en simulation énergétique [YAU 13, DEW 12, LIS 06]. Une quantification de l'incertitude climatique a été réalisée par le *GIEC* (Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'Environnement du Climat) conduisant à différents modèles de progression climatique jusqu'en 2100. Chaque modèle ou scénario étant associé à des degrés de variabilité différents en fonction de certaines hypothèses socio-économiques. La figure 5 présente ces différents scénarios climatiques.

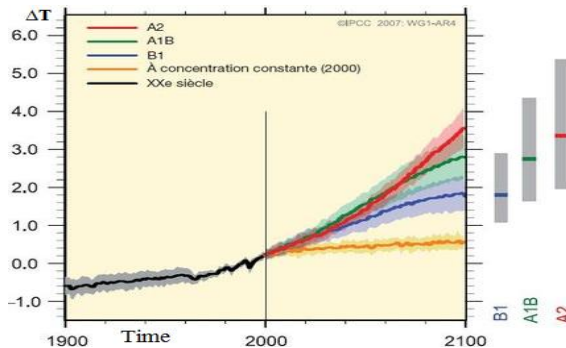


Figure 5. Scénarios d'évolution climatiques proposés par le GIEC [GIE 07].

En nous basant sur ces prévisions, nous proposons de modéliser ces incertitudes par la théorie des probabilités. Deux approches sont alors proposées. Dans un premier lieu, la variabilité climatique est considérée croissante dans le temps, où chaque donnée climatique au temps t est associée à une variabilité instantanée σ_t qui ne dépend pas de la variabilité du climat au temps $t-1$. Cependant, quelques auteurs désapprouvent l'utilisation d'un climat qui ne serait pas dépendant de son historique météorologique [DEW 12]. De ce fait, nous avons considéré une deuxième approche où l'évolution du climat est défini par des processus aléatoires pour prendre en compte la dépendance ou la corrélation entre les variables. L'utilisation de ce genre d'approche nécessite cependant un temps de calcul plus important.

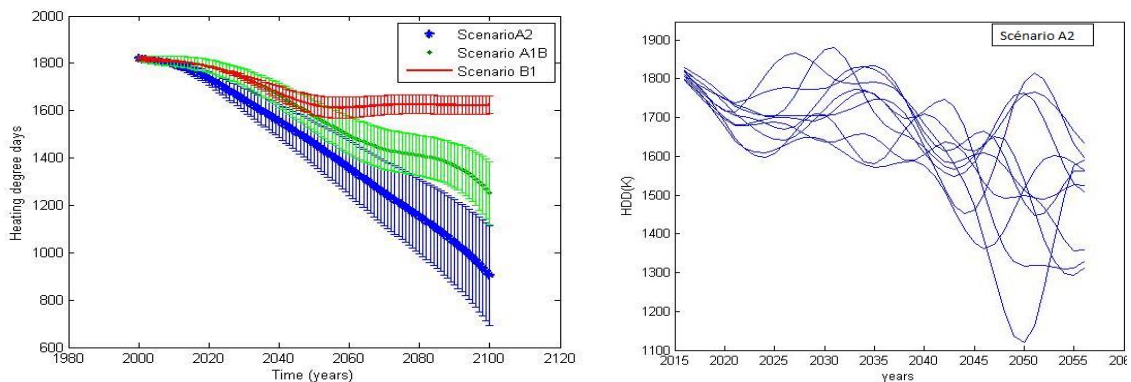


Figure 6. Propagation de l'incertitude associée aux prévisions climatiques dans le cas :
 a. d'une variabilité linéairement croissante ;
 b. de processus stochastiques.

La quantification de l'incertitude associée à chaque paramètre incertain est très importante et permet ainsi de valider les prévisions énergétiques cependant ce n'est pas tout. En effet, la modélisation de cette incertitude est également très importante. L'incertitude liée au changement climatique est considérée croissante et variable d'une année à l'autre, du fait que la prévision climatique est de plus en plus incertaine au fil des années. Ainsi, la dégradation des propriétés thermiques du matériau, qui dépend de l'agressivité du climat, varie également dans le temps. Cependant, les incertitudes de mise en œuvre sont, quant à elles, considérées constantes tout au long de la durée de vie, car les défauts sont supposés constants.

4. Optimisation de la conception basée sur la fiabilité

Dans la littérature, les études réalisées dans l'optique d'améliorer la performance thermique des bâtiments, cherchent à définir le meilleur couplage « Matériau d'isolation/Épaisseur associée ». Cependant, les modèles de conception sont basés sur des approches déterministes où le système d'isolation est supposé constant et l'évolution des scénarios considérés est supposée connue. Le problème avec ces méthodes est que les

performances réelles obtenues peuvent dévier par rapport aux performances prévues. La conception est alors déséquilibrée par rapport aux paramètres sensibles et finalement, l'investissement économique pourrait ne pas être justifié. En effet, une conception peu fiable conduira à des pertes économiques dues à la défaillance, alors qu'une conception trop fiable présentera trop souvent un coût d'investissement trop élevée.

En règle générale, l'utilisation de coefficients de sécurité permet d'atténuer le rôle des incertitudes et d'introduire ainsi une marge de sécurité afin d'augmenter la sûreté de la conception adoptée. Cependant, ces coefficients ne sont pas liés de manière directe à l'exigence de fiabilité, pouvant entraîner des manques de robustesse de la solution adoptée. La procédure d'optimisation doit donc permettre la redistribution des rôles des incertitudes sur la base de la sensibilité des objectifs de la conception [AOU 08]. De ce fait, nous proposons d'utiliser des approches fiabilistes pour prendre en compte ces différentes incertitudes.

L'avantage d'utiliser une telle approche réside dans le fait que la conception optimale représente le meilleur compromis entre différentes contraintes liées au coût, au confort et à la durabilité. La formulation mathématique de l'optimisation vise à rechercher les paramètres de conception qui minimisent une fonction objectif, en termes de coûts, d'énergie ou de résistance, sous contraintes de performances mécaniques, géométriques ou physiques [AOU 08]. La formulation fiabiliste va en plus considérer des contraintes de fiabilité permettant d'obtenir une conception équilibrée en réduisant l'espérance du coût total. Les variables présentant les grandes incertitudes sont pénalisées indépendamment de leur rôle physique. Mathématiquement, la formulation de l'optimisation fiabiliste est comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C_{tot}(d, x) = C_{inv}(d, x) + C_{enr}(d, x) \\ \text{Sous} \quad & \begin{cases} P_f(d, x) \leq P_{f0} \\ g_j(d) \geq 0 \end{cases} \quad j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad [4]$$

où C_{tot} représente le coût total du système cumulant le coût d'investissement en isolation (C_{inv}) et le coût de la consommation énergétique (C_{enr}), x est le vecteur des variables aléatoires, d est le vecteur des paramètres de conception à optimiser, P_f est la probabilité de défaillance du système (i.e. probabilité que le système ne vérifie pas les exigences réglementaires), P_{f0} est la probabilité de défaillance maximum à ne pas dépasser et g_i sont les contraintes déterministes.

La contrainte de fiabilité permet de vérifier une exigence de fiabilité minimum qui est imposée en phase de conception. La probabilité de défaillance donne une mesure du degré de confiance à accorder à l'isolation. Le mode de défaillance est décrit par un état limite et les incertitudes présentées précédemment sont introduites au moyen de lois de probabilité précédemment déduites de l'analyse d'incertitude. La probabilité de défaillance P_f correspond à la probabilité de dépassement du critère d'état limite. Dans notre cas, la fonction d'état limite peut être définie en termes de consommations énergétiques réalisées:

$$G(x, d) = E_{Cref} - E_C(x, d) \quad [5]$$

où x est le vecteur des variables aléatoires, d sont les paramètres de conception à optimiser, E_{Cref} est la consommation annuelle de référence imposée par les réglementations et E_C est la consommation énergétique calculée en considérant les incertitudes x . $G(x, d) > 0$ définit le domaine de sûreté alors que le domaine de défaillance est défini lorsque $G(x, d) \leq 0$; la probabilité de défaillance représente alors la probabilité que la fonction d'état limite soit inférieure ou égale à zéro. Dans notre cas, l'isolation est considérée performante lorsque la consommation énergétique totale est inférieure à la consommation maximum de référence imposée par la réglementation.

La figure 7 montre l'évolution de la probabilité de défaillance tout au long de la durée de vie. Différentes évolutions sont présentées en fonction du type d'incertitude considéré. On peut voir que les incertitudes liées au climat influent de façon importante sur la fiabilité de la performance énergétique du bâti, plus que les incertitudes liées aux propriétés intrinsèques des matériaux seuls. Cependant, le cumul des incertitudes totales de l'isolation, à savoir celles liées aux propriétés intrinsèques et celles liées aux défauts, altèrent la performance énergétique plus que l'impact des incertitudes liées au climat extérieur. La prise en compte de toutes ces sources d'incertitudes donne la courbe prévisionnelle en pointillés.

La méthodologie décrite permet d'optimiser les paramètres de conception (d), en considérant non seulement les différentes incertitudes mais également le degré de confiance que le concepteur attend de la solution à adopter (P_{f0}). Si on considère une façade de bâtiment, le choix de l'épaisseur à adopter en dépit de toutes les incertitudes dépend de P_{f0} comme on peut le voir sur la figure 8. Ainsi, plus le concepteur veut atteindre des niveaux de fiabilité élevés (en imposant de faibles P_{f0}), plus l'épaisseur optimale à adopter sera importante.

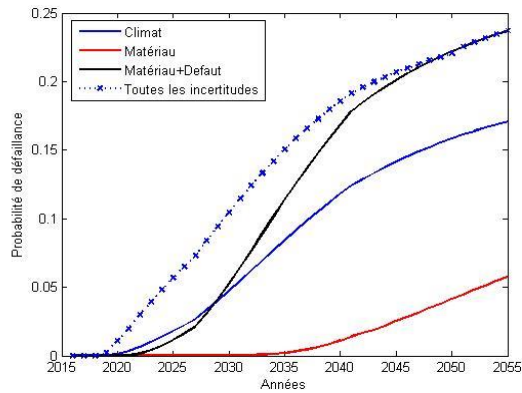


Figure 7 : Evolution de la probabilité de défaillance sur la durée de vie en présence de différents types d'incertitudes.

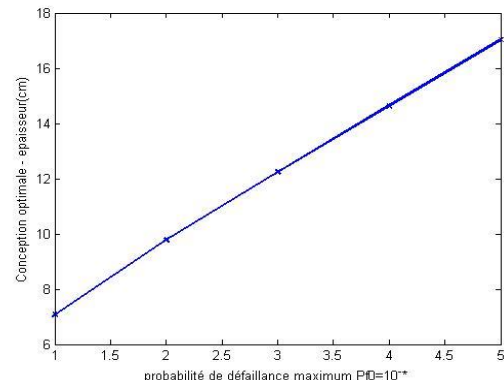


Figure 8 : Conceptions optimales dans le cas de différentes exigences de probabilité de défaillance maximum admissible (P_{f0}).

5. Etude Economique

L'isolation permet de minimiser les consommations énergétiques des habitants, réduisant ainsi les émissions de gaz à effets de serre tout en assurant les besoins en confort des habitants. Cependant, une isolation trop importante peut engendrer des pertes de surface habitable en plus des coûts d'investissement et de pose. L'optimisation étant basée sur la minimisation du coût total de revient, une formulation a été proposée (Eq. 6) comprenant les coûts associés aux impacts indirects de l'isolation, à savoir les coûts liés à la pollution, au confort et à la perte en surface d'habitation en plus des coûts conventionnels liés à l'investissement et à la consommation énergétique [AÏS 14].

$$C_{totN} = C_{inv} + C_{ad} + C_{enr} + C_{CO_2} + C_{surf} + C_{conf} \quad [6]$$

où C_{inv} est le coût d'investissement, C_{enr} est le coût lié à la consommation énergétique, C_{ad} est le coût additionnel lié à la pose, C_{surf} est le coût lié à la perte en surface d'habitation et C_{CO_2} est le coût lié à la pollution considéré au moyen de l'utilisation de la taxe de carbone. Enfin, C_{conf} est le coût énergétique additionnel lié à des consommations additionnelles en chauffage et climatisation nécessaire à atteindre la sensation de confort de l'habitant. En effet, les habitants d'un même environnement n'ayant pas systématiquement la même sensation de confort.

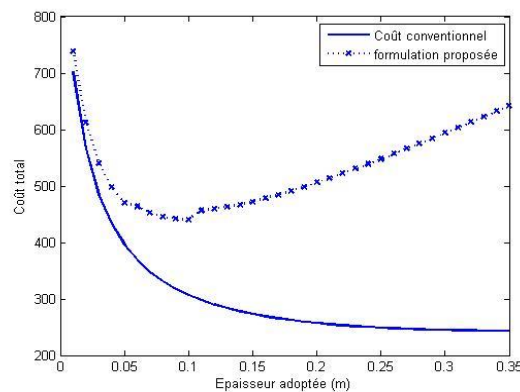


Figure 9. Evolution du coût total en fonction de l'épaisseur adoptée et des différents critères considérés.

La figure 9 montre la différence de coût total obtenu par épaisseur considérée. La considération des coûts conventionnels montre que plus on investit en isolation plus on rentabilise l'investissement en réduisant les consommations énergétiques. Cependant, il existe un point au-delà duquel le gain en consommation énergétique n'est plus compensé par le coût supplémentaire du matériau. En d'autres termes, il existe une épaisseur d'isolation optimale à laquelle le coût d'investissement en isolation associé au coût de la consommation énergétique au cours de la durée de vie est minimal. Dans le cas où les coûts indirects sont considérés, cette

épaisseur optimale est plus petite ($e_p = 10\text{cm}$) que celle attendue en considérant uniquement les coûts conventionnels ($e_p = 40\text{cm}$).

Cette formulation permet de prendre en compte les différents impacts de l'isolation pour un meilleur compromis entre les différents critères. Ces paramètres varient en fonction des différentes conditions environnementales et sociétales. Par exemple, le coût lié à la perte en surface d'habitation dépend fortement de la région où l'on est car le prix du m^2 à Paris est bien différent du prix du m^2 habitable à Aurillac.

6. Conclusion

Le principal défi des études liées à l'évaluation des performances énergétique réside dans la prise en compte des incertitudes relatives au comportement à long terme (dégradation des matériaux, singularités, conditions environnementales,...). La considération de ces incertitudes dans les différents modèles de simulations permet une prévision réaliste du comportement énergétique du bâtiment. Cependant, la modélisation de ces incertitudes prend du temps et nécessite beaucoup d'efforts en phase de conception et d'optimisation de l'exploitation fournissant néanmoins des solutions de conception et des processus de décision plus robustes.

Les travaux réalisés ont permis d'étudier différents types d'incertitude liés aux paramètres d'entrée des modèles. Leurs impacts sur la performance énergétique ont pu être mis en évidence au moyen d'études de fiabilité. Quant à la méthode de conception que nous proposons, elle vise à chercher le meilleur compromis entre différents critères de coûts liés à des aspects environnementaux et sociétaux. Les solutions obtenues seraient alors personnalisées en fonction de la future fonction du bâtiment et de l'exigence imposée par le maître d'ouvrage.

7. Bibliographie

- [AÏS 14] AÏSSANI A., CHATEAUNEUF A., FONTAINE J-P., AUDEBERT PH., « Cost model for optimum thicknesses of insulated walls considering indirect impacts and uncertainties ». *Energy and Buildings*, vol. 84, 2014, p. 21-32.
- [AOU 08] AOUES Y., *Optimisation fiabiliste de la conception et de la maintenance des structures*. Clermont-Ferrand, Thèse de doctorat, 2008.
- [COR 13] CORGNATI S., FABRIZIO E., FLIPPI M., MONETTI V., « Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application ». *Applied Energy*, vol. 102, 2013, p. 983-993.
- [DEW 12] DE WILDE P., TIAN W., « Management of thermal performance risks in buildings subjected to climate change ». *Building and Environment*, vol. 55, 2012, p. 167-177.
- [DOM 07] DOMBAYCI Ö., « The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings ». *Building and Environment*, vol.42, 2007, p. 3855-3859.
- [DOM 10] DOMINGUEZ-MUNOZ W., ANDERSON F., CEJUDO-LOPEZ B., CARRILLO-ANDRES A., « Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials ». *Energy and Buildings*, vol.42, 2010, p. 2159-2168.
- [HOP 11] HOPFE C.J., HENSEN J.L., « Uncertainty analysis in building performance simulation for design support ». *Energy and Buildings*, vol. 43, 2011, p. 2798-2805.
- [LIS 06] LISØ K., « Integrated approach to risk management of future climate change impacts ». *Building Research & Information*, 2006, p. 1-10.
- [LUY 13] LU Y., HUANG Z., ZHANG T., « Method and case study of quantitative uncertainty analysis in building energy consumption inventories ». *Energy and Buildings*, vol. 57, 2013, p. 193-198.
- [MAN 13] MANFREN M., ASTE N., MASHKSAR R., « Calibration and uncertainty analysis for computer models- A meta-model based approach for integrated building energy simulation ». *Applied Energy*, vol. 103, 2013, 627-641.
- [OZE 12] OZEL M., « Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials ». *Energy and Building*, vol. 49, 2012, p.552-559.
- [SPI 12] SPITZ C., *Analyse de fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*. Grenoble, Thèse de doctorat, 2012.
- [YAU 13] YAU Y., HASBI S., « A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, 2013, p. 430-441.