

Les outils de modélisation énergétique des bâtiments très basse consommation

Thierry DUFORESTEL, Hassan BOUIA, Olivier HARTMANN (EDF R&D), Jean-Jacques ROUX, Gérard KRAUSS (CETHIL)

Introduction :

Il est désormais inutile, tant ce point de vue est connu et partagé, d'insister sur le besoin de performance du parc de bâtiments pour répondre aux enjeux énergétiques et environnementaux de demain. La question énergétique fait régulièrement la une des journaux et la position centrale du bâtiment (40% des consommations) dans ce paysage ne fait plus aucun doute. Le Grenelle de l'environnement a officialisé ce diagnostic en centrant ses premiers projets de loi sur le bâtiment. Et si certains sceptiques peuvent encore douter de l'importance des enjeux environnementaux, l'évolution du prix des énergies, durablement à la hausse, les incitera certainement à repositionner la question énergétique dans l'ordre de leurs priorités.

L'évidence est là. Tous les bâtiments de toutes les régions du monde vont devoir émettre moins de gaz à effet de serre (GES) et consommer moins d'énergie. Et dans les pays développés, ils devront émettre et consommer beaucoup moins. L'objectif globalement partagé est une division par quatre à l'horizon 2050. Dans ce contexte, les réglementations thermiques des bâtiments neufs vont se durcir très fortement. Mais l'objectif 2050 ne peut pas être atteint par le seul effet des recettes classiques, celles qui ont toujours suivi les chocs énergétiques précédents, consistant à instituer ou à durcir la réglementation thermique des bâtiments neufs. Le taux de renouvellement des bâtiments des pays développés est en effet si faible que si l'on construisait dès maintenant tous les bâtiments neufs à énergie positive, on n'infléchirait qu'à la marge la courbe des émissions de GES en 2050. On entre donc dans une période doublement inédite. Inédite par l'importance de l'effort à consentir (en France par exemple, le Bâtiment Basse Consommation – BBC – devrait devenir la norme pour tous les bâtiments neufs dès 2012) et inédite parce que cet effort devra majoritairement porter sur le secteur des bâtiments existants. On sait en effet concevoir et construire des bâtiments très performants, mais en général, ce sont des bâtiments neufs. On sait également réhabiliter des bâtiments anciens, mais la performance énergétique visée et atteinte est généralement assez modeste.

Afin de bien évaluer l'effort à consentir, de le comparer à celui qui a été accompli en un peu plus de trente ans de conception énergétique de bâtiments neufs, il paraît raisonnable d'examiner l'état actuel de notre parc de bâtiments.

La performance du parc des bâtiments existants.

Depuis plusieurs années, le CEREN (Centre d'études et de recherches économiques sur l'Energie, <http://www.ceren.fr>) publie des études sur les consommations énergétiques mesurées dans les logements. Ces études semblent très fiables car l'agrégation à différentes échelles des consommations individuelles données par le CEREN aboutit systématiquement à des consommations globales effectivement constatées. L'approche du CEREN est purement économique. Elle consiste en fait à quantifier l'énergie consommée dans les bâtiments au travers des achats d'énergie effectués par les occupants.

Cette enquête appliquée aux logements occupés donne les résultats suivants :

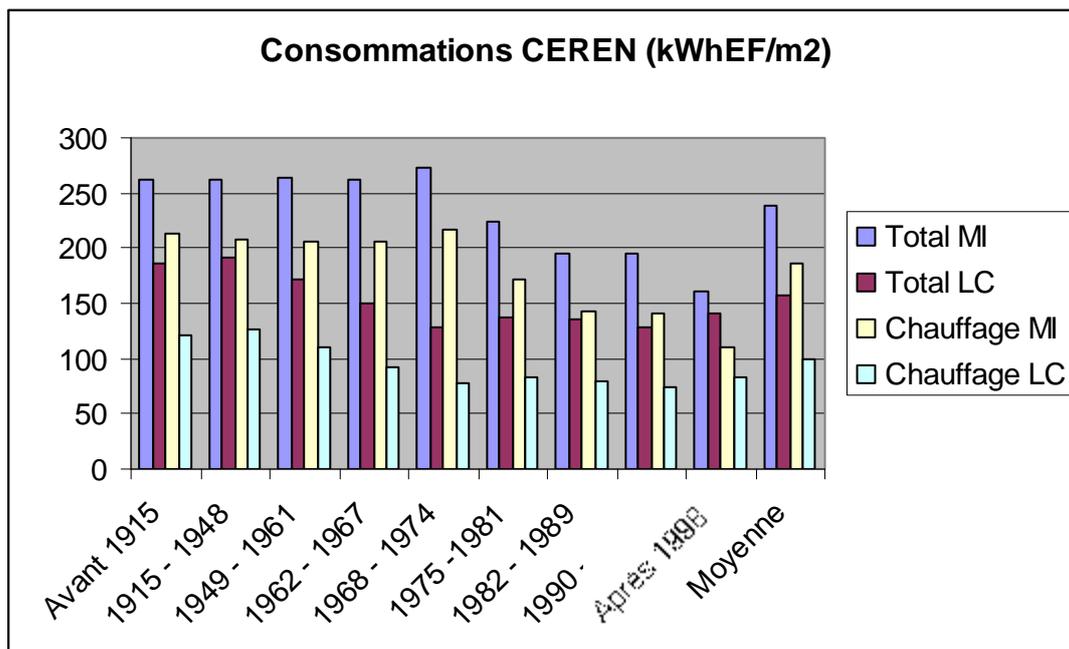


Figure 1. Consommation énergétique des ménages français selon l'enquête CEREN [CEREN]

On constate que certes, les réglementations thermiques successives ont permis de diminuer la consommation énergétique réelle des bâtiments les plus récents, mais dans une proportion finalement assez modeste, de l'ordre de 25% en maison individuelle et de 35% en logement collectif. Ce constat, associé à la faiblesse du taux de renouvellement du parc de bâtiments, et donc à l'importance de la proportion de bâtiments anciens, donne in fine une consommation moyenne du parc assez proche de celle du parc ancien seul.

L'effort à consentir pour réhabiliter le parc de bâtiments français sera donc particulièrement conséquent car l'exigence affichée, le facteur 4, est plus forte que ce qu'ont permis d'atteindre plus de 30 ans de réglementation thermique dans le neuf.

Or, amener la performance dans un bâtiment existant est une tâche autrement plus difficile que d'améliorer celle d'un bâtiment neuf.

En effet, pour ceux-ci, dès le premier trait, la première esquisse, tout peut être maîtrisé. Le montage du projet répond à une logique structurée, avec maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et entreprise, encadrées par un arsenal réglementaire précis. Dès lors la performance peut, dès le départ, reposer sur deux appuis : l'architecture (formes, orientations, répartition des parois opaques et vitrées, ...) et les composants (matériaux, produits, systèmes).

Au contraire, dans l'existant l'architecture est figée. Sauf par chance, elle ne peut pas contribuer à la performance du bâtiment. Celle-ci reposera donc sur les seuls composants qui, de ce fait, devront être encore plus performants que ceux employés en construction neuve. En outre, le plus souvent, la maîtrise d'ouvrage se limite au financement des travaux, la maîtrise d'œuvre, donc la conception, est inexistante, l'entreprise est peu qualifiée. De plus, les locaux concernés sont habités, les

aménagements, les modes de vie y sont institués. Enfin, la variété des bâtiments à traiter est infinie.

En conséquence, il est extrêmement peu probable que l'on améliorera la performance du parc de bâtiments avec les mêmes techniques, les mêmes méthodes et les mêmes produits que ceux utilisés jusqu'à présent pour rendre les bâtiments neufs plus performants. Le bâtiment haute performance de demain ne ressemblera donc pas à ceux que l'on produit aujourd'hui.

Dans ce contexte, la modélisation énergétique des futurs bâtiments très performants va faire face à trois défis.

Le premier est lié aux niveaux de performance à atteindre. En effet, les bâtiments visés ont des besoins énergétiques très faibles. Il est alors tout à fait légitime de s'interroger sur l'aptitude des modèles actuels à les représenter correctement et sur les travaux à engager pour les adapter à cette nouvelle contrainte.

Le second défi provient des nouvelles technologies qui seront développées et utilisées pour atteindre ces niveaux de performance ou pour apporter la performance dans le parc des bâtiments existants. Les outils de modélisation devront intégrer cette offre nouvelle et s'adapter aux principes physiques qu'elle impose.

Le troisième concerne le transfert des compétences de modélisation vers les filières de conception. C'est un problème d'aujourd'hui, mais qui revêtra demain une importance accrue car le volume de bâtiments à traiter sera beaucoup plus important et les délais pour y parvenir, l'horizon 2050, relativement court.

Nous proposons d'organiser cette communication selon ces trois dimensions. Il s'agit de diagnostiquer notre arsenal actuel face au nouveau contexte afin de mettre en évidence les nouveaux besoins. Tâche difficile en fait. Car il est impossible d'en faire la démonstration. Aussi nous avons préféré d'adopter cette posture et d'en illustrer la pertinence par quelques exemples choisis, montrant la faiblesse de nos outils face aux nouveaux enjeux. La liste ne se veut pas exhaustive, mais elle évoque des ombres de notre connaissance, de notre aptitude à restituer des phénomènes qui contribueront à la performance des bâtiments dans lesquels nous vivrons demain.

A ces trois dimensions, nous avons ajouté une quatrième qui les couvre toutes, dans laquelle nous tenterons de montrer que l'évolution du contexte suggère la prise en compte de nouvelles échelles de modélisation.

La modélisation de bâtiments aux besoins énergétiques très faibles.

La modélisation énergétique des bâtiments est une activité qui a pris son essor dans les années 80. Une dizaine d'années après le premier choc pétrolier, les principaux déterminants de la performance énergétique étaient connus, et la conception devenait plus complexe. Pour optimiser les choix, le recours à des outils dynamiques devenait indispensable. Ces outils ont été développés et ont fait ensuite l'objet de campagnes poussées d'inter-comparaison [BESTEST] et de validation [Jensen]. Leur adéquation aux techniques et aux performances de cette époque a ainsi été prouvée. Mais les bâtiments de cette période étaient beaucoup moins performants que ceux que l'on envisage aujourd'hui. Même pour les plus efficaces, la consommation en énergie finale du seul chauffage dépassait assez largement les 100 kWh par m² et par an. En regard,

la consommation de 15 kWh/m².an en énergie primaire visée pour le chauffage des bâtiments basse consommation (BBC) peut être vue comme presque nulle. Les progrès envisagés sont donc en rupture, et beaucoup de principes classiques de modélisation doivent être réexaminés.

Simulations dynamiques fines en toutes saisons.

Un bâtiment très performant a besoin de très peu d'énergie pour se chauffer. Dès lors, il est très sensible aux apports internes ou externes et bascule très facilement dans l'inconfort d'été, même en plein hiver. Les périodes où les apports dépassent les besoins sont de plus en plus longues. Une des conséquences évidentes est que la question du chauffage s'efface devant celle, plus complexe, du confort. Un bâtiment très performant évolue dans une mi-saison permanente. Et l'exigence de performance ne permet pas le sur-dimensionnement synonyme de sur-consommations. Alors, tout devient plus complexe. La modélisation dynamique doit tenir compte de scénarios d'occupation précis, intégrer avec finesse les capacités de stockage énergétique du bâtiment. On sait en effet que la modélisation des périodes chaudes est très problématique. D'une part parce que c'est une affaire de détail où quelques watts font la différence. Mais aussi parce que les techniques et les phénomènes qui permettent de le gérer sont très mal connus et modélisés. L'exemple le plus typique est celui de l'aérodynamique fine, en faibles vitesses, nécessaire pour représenter les échanges entre l'air des locaux et ses parois, mais qui est si difficile à modéliser.

La fin du pas de temps horaire ?

Dans ce domaine de la modélisation dynamique, on doit s'interroger sur la pertinence d'un invariant actuel, jusqu'ici universellement accepté : le pas de temps horaire. En effet, durant de longues périodes, un bâtiment très performant fonctionne sur la frontière entre excès et manque d'énergie. Il n'est donc pas du tout assuré que les moyennes horaires de toutes les sollicitations et réactions modélisées soient représentatives du fonctionnement réel du bâtiment.

La figure suivante permet en effet d'en douter. Les lignes les plus foncées montrent les relevés minute par minute de la température extérieure (en bleu) et du flux solaire (en rouge), alors que les lignes les plus claires montrent leurs valeurs moyennées sur une heure. On constate aisément que tant que la donnée la plus influente est la température extérieure, le pas de temps horaire est une bonne approximation. Mais lorsque les apports solaires sont significatifs pour le bilan énergétique du bâtiment, ce pas de temps lisse très fortement la sollicitation et masque des oscillations très importantes.

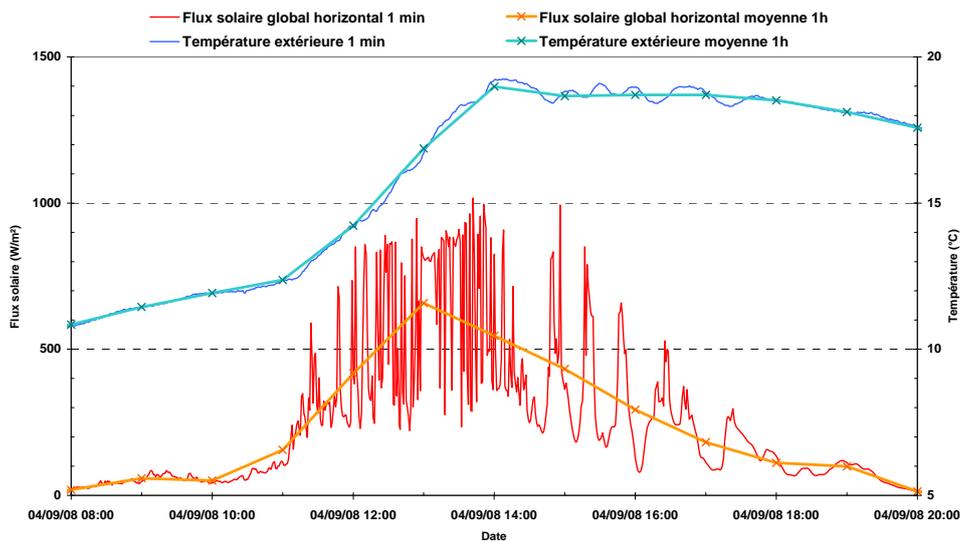


Figure 2 : Sollicitations au pas de temps de l'heure et de la minute

Ainsi, le pas de temps horaire semble bien adapté à des bâtiments suffisamment peu performants pour lesquels les apports solaires occupent une faible part du bilan énergétique et qui sont principalement régis par les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur. Mais si le bâtiment peut cycler plusieurs fois par heure entre besoin et excès d'énergie, l'analyse de son comportement nécessite un pas de temps beaucoup plus court. En conséquence, toutes les données temporelles (fichiers météo, scénarios d'occupation, apports, ...) devront être redéfinies pour satisfaire cette nouvelle contrainte.

La description plus détaillée de l'espace.

On ne peut pas diminuer le pas temps des simulations sans examiner avec attention la façon dont l'espace est représenté. On peut voir une forme d'incohérence dans la modélisation très précise en temps d'objets qui ne sont que grossièrement décrits. La finesse du pas de temps impose donc un raffinement des pas d'espace.

De plus, dans des bâtiments où les apports ont un impact important sur le bilan énergétique, il est nécessaire de connaître avec précision leur nature et leur localisation. Sans cette information, il est impossible de modéliser l'effet des apports sur le confort, donc le comportement thermique réel du bâtiment. Il faut donc une description géométrique des bâtiments permettant de localiser ces apports. Une illustration typique de cette question est la modélisation des tâches solaires et de leurs effets. Leur impact énergétique dépend beaucoup de la nature et de la localisation des surfaces éclairées.

L'activité de modélisation énergétique à l'échelle d'un bâtiment aura donc besoin d'outils de description géométrique plus précis et capables de prendre en charge les trois dimensions de l'espace. On peut penser par exemple à des outils de CAO s'appuyant sur des bases de données d'objets techniques intégrant l'ensemble des informations utiles à la modélisation. Il s'agirait finalement d'approcher les pratiques actuelles de la construction aéronautique ou automobile.

La modélisation du confort.

Il ne s'agit pas ici de reprendre par le menu la très difficile et très clivante question du confort, de sa représentation et de sa modélisation. On connaît la multiplicité des approches possibles, les niveaux de complication auxquels certaines d'entre elles peuvent mener, les controverses inconciliables entre tenants des modèles analytiques, des modèles adaptatifs ou des modèles systémiques, le caractère éminemment multidisciplinaire (de la physique de base aux sciences humaines en passant par la biologie) de ce sujet. Il s'agit seulement de rappeler que la satisfaction du confort des occupants est la raison d'être d'un bâtiment et que la performance énergétique et environnementale ne pourra pas se justifier durablement si elle doit mener à des « ambiances intérieures » moins confortables que ceux que l'on connaît aujourd'hui. A ce titre, toute nouvelle solution devra être évaluée au regard des multiples critères qui font et feront encore longtemps le confort ressenti par l'occupant. Or, la modélisation du confort est aujourd'hui encore un sujet de recherche, avec des approches multiples et divergentes [Jessen Page], [Sten de Wit]. Son application aux bâtiments très performants va encore compliquer cette tâche.

Le déterminisme de la physique modulé par un peu d'aléatoire.

Le bâtiment haute performance est très sensible à tous les petits écarts qui peuvent survenir entre sa conception, sa réalisation et son exploitation. Or, ces écarts génèrent en général une dégradation de la performance. Si bien que son niveau affiché lors de la conception ne reflète pas une valeur moyenne, mais plutôt une valeur maximale. Parmi les écarts possibles on pense naturellement aux défauts de mise en œuvre, d'autant plus probables que les composants utilisés y sont eux-mêmes très sensibles. L'équilibrage d'une ventilation double flux, l'étanchéité à l'air d'une paroi active, ou la protection d'un panneau isolant sous vide deviennent des questions primordiales si l'on veut effectivement atteindre la performance calculée. S'ajoute à cet aléa celui du comportement des occupants. Dans nombre de Passive Haus Allemandes, les habitants sont formés avant d'emménager. Il est vrai que dans ces bâtiments, toute ouverture de fenêtre, tout changement de consigne dans la conduite énergétique du bâtiment génèrent des différences de consommation notables. Or, les bâtiments très performants peuvent susciter plus que les autres de tels comportements. L'inconfort local et momentané est très probable car le jeu des apports et des pertes y produit des effets plus importants. A priori, il semble impossible de traiter ces questions de façon déterministe. Il est donc raisonnable de penser qu'à terme, la modélisation physique des bâtiments très performants intégrera quelques principes probabilistes destinés à tenir compte des multiples aléas qui peuvent grever leur comportement énergétique.

On peut également noter que dans le cas d'une réhabilitation, l'aléatoire touche également la phase de conception car en général on connaît assez mal les caractéristiques du bâtiment existant. Dans ces conditions, l'évaluation du gain de performance obtenu grâce à la rénovation est particulièrement délicat à calculer, car le maximum de l'erreur commise n'est pas dû à l'évaluation de la performance de la prestation, mais à l'estimation de la performance initiale. La réhabilitation haute performance est donc une activité pour laquelle l'approche probabiliste se justifie encore d'avantage.

Relancer d'ambitieux programmes de validation, ciblés sur la modélisation des bâtiments très performants.

Certes, le bon sens physique et la connaissance des outils de modélisation énergétique des bâtiments permettent de formuler de légitimes interrogations quant à l'aptitude de ces modèles à s'adapter aux très faibles besoins. Mais on reste dans le domaine du questionnement et du doute. On sait que les résultats peuvent être faux, mais dans quel sens ? Et de combien ? Nous ne le savons pas. La réponse ne peut provenir que de la comparaison entre simulation et réalité. Il y a donc un véritable besoin de validation des outils de simulation appliqués aux bâtiments très performants.

Pour illustrer ce propos, nous nous appuyons sur une étude récente, soutenue par l'ADEME [TRANSSOLAR], dans laquelle EDF R&D et ses partenaires ont appliqué différents modèles utilisés pour les bâtiments très performants (Méthode réglementaire Allemande EnEV2007, Méthode Passive Haus Allemande PHPP 2007, Méthode Suisse pour bâtiments MINERGIE et Méthode Française pour les BBC RT2005/BBC) au même bâtiment, soumis au même climat, bénéficiant des mêmes apports, avec des hypothèses d'infiltrations d'air strictement identiques. Le résultat est intéressant.



Figure 3 : Le bâtiment simulé.

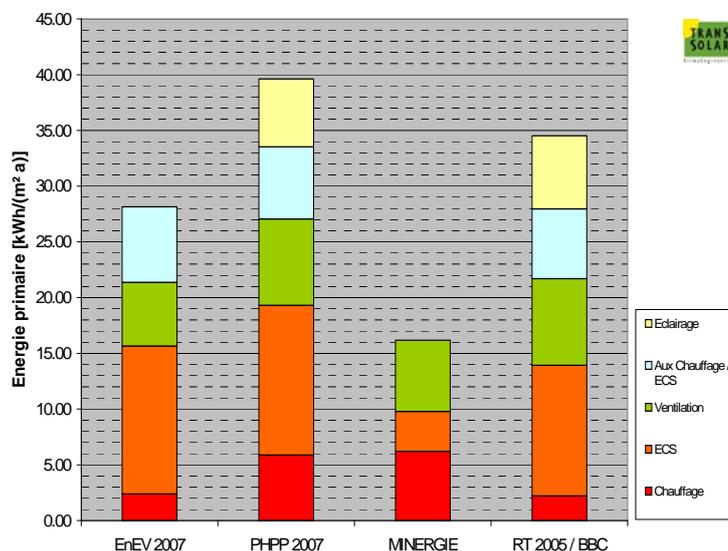


Figure 4 : Consommations par poste

En Allemagne, selon que l'on calcule dans le cadre de la réglementation thermique ou des Passive Haus, la consommation de chauffage du même bâtiment passe du simple au triple. Bien que les scénarios de puisage soient strictement identiques, la consommation énergétique pour l'eau chaude sanitaire est quatre fois plus faible pour la méthode MINERGIE que pour les autres.

Cette variété des résultats pour une prestation modélisée strictement identique devrait inciter la communauté scientifique impliquée dans cette activité à lancer un ambitieux programme de validation des modèles utilisés pour les bâtiments très performants. Il s'agit bien entendu de passer du doute à la certitude. Mais il s'agit aussi de donner confiance. Face aux enjeux du moment, aux objectifs affichés, les modèles seront de plus en plus nombreux et on les souhaite de plus en plus partagés et utilisés afin d'accélérer sur le terrain la conception de bâtiments très performants. Face à cette multitude, le concepteur exigera des critères de qualité des outils constituant l'offre. L'affichage de quelques cas de validation réussis sera sans nul doute au premier rang des critères jugés pertinents.

La modélisation des nouvelles technologies de l'efficacité énergétique du bâtiment.

Les enjeux énergétiques et environnementaux vont sans aucun doute orienter fortement la conception des bâtiments construits ou réhabilités. Les contraintes pesant sur le niveau de performance et sur le volume des bâtiments à traiter vont donner naissance à de nouvelles technologies mieux adaptées que celles que nous connaissons aujourd'hui. Parmi les assemblages phares on pourra trouver des éléments ou composants dont la modélisation, l'analyse du comportement sur de très longues durées, dépasse parfois très largement les savoir-faire du moment. Nous en donnons ici quelques exemples.

Des composants super isolants, grâce à différentes applications des panneaux isolants sous vide.



Figure 5 : Panneaux isolants sous vide

Les panneaux super isolants sous vide (PIV) présentent une conductivité thermique 5 à 6 fois plus faible que celle de l'air. Ils permettent donc d'assurer un très haut niveau de performance dans un espace restreint. Il est donc probable qu'ils se développeront dans les bâtiments existants où l'espace disponible est un bien précieux mais aussi dans tous les bâtiments très performants car leur faible encombrement permet de traiter tous les points singuliers délicats (encadrements de baie en isolation par l'extérieur par exemple).

Cependant, l'usage de tels composants n'est envisageable que si l'on peut évaluer leur performance réelle sur toute leur durée de vie. C'est là une question très difficile, qui reste encore un sujet de recherche pour les énergéticiens du bâtiment. En effet, ces composants présentent un comportement très complexe. Leur pouvoir isolant réel dépend de leur réaction vis à vis des transferts de masse, air et vapeur d'eau principalement, qui s'opèrent au travers des films d'étanchéité qui les protègent. La pénétration de gaz augmente la pression interne des isolants ce qui accroît leur conductivité thermique. L'adsorption de la vapeur d'eau crée des îlots liquides dans la matrice solide, avec la même conséquence. Et ces phénomènes de transfert ne sont pas stables dans le temps car les films d'étanchéité se dégradent selon des processus thermo-activés qui augmentent leurs perméabilités avec les températures qui les sollicitent.

En conséquence, il est impossible d'évaluer la performance réelle d'un composant intégrant un isolant sous vide sans le recours à la modélisation couplée des transferts

de masse d'eau, de masse d'air et de chaleur, pour des configurations complexes, le plus souvent 3D, correspondants aux diverses applications envisagées dans tous les climats possibles. Mais à ce jour, il y a très peu d'outils et très peu de données permettant de mener de telles études.

Des composants de façades actifs, capables de puiser et gérer les apports et les pertes énergétiques dans l'environnement en fonction du besoin du bâtiment.

La voie de l'isolation, dans laquelle s'inscrivent les super-isolants, est considérée comme la voie « classique » de l'efficacité énergétique. Elle consiste à protéger l'intérieur du climat extérieur pour moins perdre l'énergie fournie au bâtiment pour assurer le confort. Pourtant l'environnement du bâtiment, le sol, l'air, le soleil, le ciel et, pourquoi pas, le vent, recèle des sources d'énergie, même quand il fait froid, et des puits de chaleur, même en période chaude. La pratique classique, l'isolation, n'est donc peut-être pas la seule approche pertinente pour répondre aux besoins d'éco-efficacité énergétique. On peut en effet considérer l'environnement comme un potentiel énergétique que l'enveloppe et le système de ventilation doivent, non pas repousser ou isoler, mais utiliser.

Dans ses grandes lignes, cette approche semble tout à fait pertinente car les bâtiments reçoivent globalement beaucoup plus d'énergie qu'ils n'en utilisent (voir la figure 6). Mais pour passer à l'acte, évaluer les ressources effectivement disponibles, leur coïncidence aux besoins et les moyens techniques pour les capter et les utiliser, le travail de modélisation à consentir est considérable.

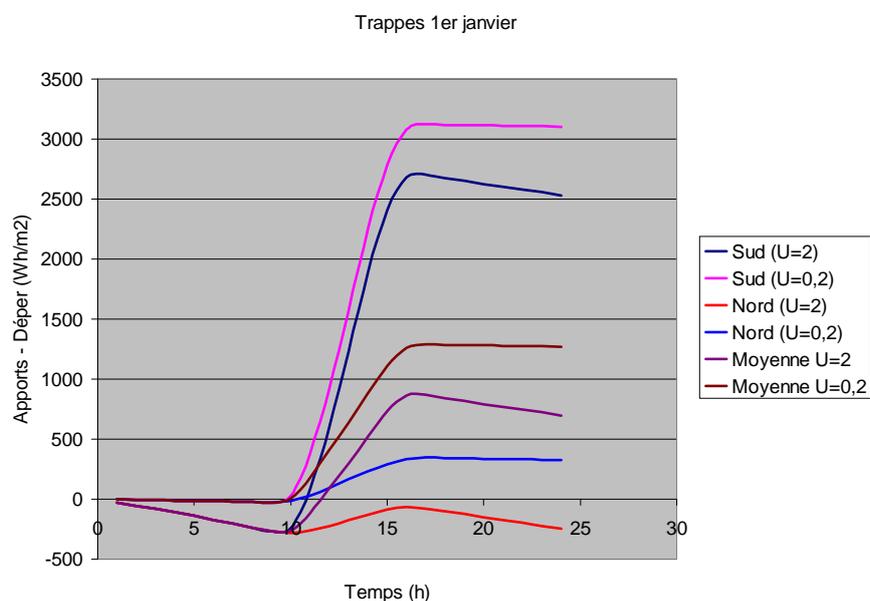


Figure 6 : Ecart Apports/Déperditions durant une journée froide

La modélisation thermo-aéraulique pour évaluer le confort des bâtiments aux besoins énergétiques très faibles.

La question du stockage énergétique, ou de l'inertie thermique, associée ou non à celle des énergies renouvelables, est récurrente lorsque l'on évoque les bâtiments haute performance. En effet, outre sa fonction de stockage, l'inertie des bâtiments très performants permet également de lisser le niveau de confort face aux sollicitations

extérieures. C'est donc une caractéristique très importante de la conception de ces bâtiments.

Mais c'est aussi une des plus compliquées à modéliser. En effet, la modélisation de l'inertie nécessite une parfaite connaissance des échanges entre le stockage (en général dans un solide) et le vecteur qui transfère l'énergie (en général, l'air du bâtiment). Or, ces échanges ne peuvent se représenter que par le couplage de modèles de thermique du solide et de modèles de mécanique des fluides à faible vitesse. De telles modélisations dans des configurations variées relèvent bien plus d'une activité de recherche que de la conception.

La même difficulté (couplage entre thermique du solide et thermique fluide) se présente pour évaluer la pertinence et l'efficacité du chauffage aéraulique. Il semble pourtant certain que c'est le seul mode de chauffage envisageable dans un bâtiment aux très faibles besoins. Mais là encore, la modélisation d'un tel système se situe aux limites des savoir-faire actuels, et de nombreuses recherches restent à accomplir avant que l'on puisse y recourir au stade d'une conception banalisée et à grande échelle.

Simulations thermo –mécaniques des composants d'enveloppe.

La question des températures et des gradients de température est également importante. L'emploi de systèmes très fortement isolés, d'isolants à très faible conductivité, de parois intégrant des capteurs solaires génère des températures ou des gradients de température notablement plus élevés que ceux rencontrés dans les bâtiments d'aujourd'hui. Le comportement mécanique des composants concernés (dilatations et contraintes, intégration au sein des autres composants) doit alors être étudié spécifiquement. La simulation thermo-mécanique des composants fortement isolés et / ou fortement exposés au rayonnement solaire est indispensable.

La modélisation de la durabilité des composants et des performances.

Le conflit entre performance et durabilité existe depuis les origines de l'efficacité énergétique des bâtiments. En remplaçant un simple vitrage par un double, on a remplacé un composant capable d'assurer sa fonction pendant plusieurs générations par un nouveau qui est certes plus efficace, mais qui finit inévitablement embué après une trentaine d'années de service. Les parois non isolées conservent des températures plus stables et plus lentement variables que les parois actuelles isolées par l'intérieur. Elles se fissurent donc moins et présentent une durée de vie notablement supérieure. Ainsi, on peut imaginer qu'avec la très haute performance, l'exploitation de nouveaux phénomènes, la génération d'états inédits subits par les composants du bâtiment, toutes ces questions devront être ré-examinées.

Simplifier et accélérer le transfert des compétences de modélisation vers les filières.

La conception de bâtiments très performants qui nécessitera la mise en œuvre de modèles complexes spécifiquement adaptés à cette activité. Mais on peut craindre que la création de ces nouvelles connaissances et des ces nouveaux outils creuse encore un peu plus le fossé qui sépare les scientifiques développeurs de modèles et les équipes qui conçoivent les bâtiments alors que ce constat était déjà mis en avant il y a quelques années par la communauté scientifique de la modélisation énergétique des bâtiments [IBPSA97]. Dans ce qui suit, nous proposons quelques pistes qui peuvent

contribuer à resserrer le lien entre concepteurs de modèles et concepteurs de bâtiment, et à accélérer le transfert des compétences entre ces deux mondes. Elles reposent sur deux principes essentiels : la création d'outils qui rendent les modèles plus utiles aux concepteurs et le développement de nouvelles méthodes de modélisation qui rendent les modèles physiques plus accessibles à tous les outils et banalisent ainsi l'activité de simulation.

Des modélisations multi-critères et multi-acteurs pour convaincre.

On conçoit bien que la réalisation et la réhabilitation de bâtiments haute performance est un enjeu environnemental important. Mais l'atteinte des objectifs affichés n'est possible que si il devient un enjeu personnel pour tous les acteurs impliqués. Or, si ils contribuent tous à la construction ou à la réhabilitation du même bâtiment, tous n'ont pas les mêmes objectifs, les mêmes attentes, les mêmes contraintes et le même langage. Leur conviction pour la réalisation d'un bâtiment haute performance ne pourra pas être emportée par une seule promesse. Il en faudra plusieurs, basées sur plusieurs critères différents mais compatibles entre eux, pour finalement arriver au partage d'un objectif commun réalisable. Quelques exemples récents de maquettes assez abouties ont montré l'intérêt des méthodes d'analyse multi-critères et multi-acteurs pour la conception de bâtiments neufs [Chlela] ou existants [Flory-Celini]. En donnant à voir et en traitant tous les cas possibles, ils montrent bien qu'il est humainement impossible de les envisager tous. En gérant les relations entre critères, ils mettent à jour les contradictions entre acteurs bien plus rapidement et clairement que tout concepteur. Et plus la conception est complexe, plus la méthode se révèle efficace. On peut donc prédire que ce type d'outil, associé aux modèles physiques classiques, est promis à un grand avenir pour appuyer les concepteurs de bâtiments haute performance.

Des modèles physiques ouverts, facilement adaptables à tous les outils de modélisation.

Un modèle physique, en fait, un jeu d'équations et d'hypothèses, une fois introduit dans un outil de simulation, perd beaucoup de son universalité. Bien qu'en général son fond physique n'ait pas changé, il est devenu totalement illisible et inutilisable pour un non utilisateur de cet outil [Laret]. En passant de la physique à l'outil, on est passé d'un espéranto universellement partagé à une langue plus ou moins répandue et maîtrisée, mais en tout cas hermétique à ceux qui ne la pratiquent pas. Ainsi, le travail de modélisation s'apparente de plus en plus à un travail de traduction, du langage physique vers le langage de l'outil de simulation. Or, la multiplicité de ces outils est un héritage historique. Chacun d'entre eux est devenu pour ses développeurs le lieu de capitalisation des connaissances acquises. Il n'y a donc aucune chance pour qu'ils en changent. On peut parier que l'outil universel n'existera jamais.

Le développement des bâtiments haute performance va demander le développement de nombreux nouveaux modèles, pour tenir compte des nouvelles techniques ou pour adapter la conception aux nouveaux besoins. Pour que ces bâtiments puissent exister effectivement sur le terrain, les modèles devront être développés, validés et diffusés rapidement. La mutualisation des développements pourrait être une solution, mais la dispersion des outils ne le permet pas. Sauf si, et c'est réalisable, on peut définir et appliquer un langage commun, contenant le vocabulaire et la grammaire indispensables aux outils. Ainsi, chaque développeur pourra construire le système de traduction de ce langage commun vers celui de son outil, un système qui ne dépendra plus du modèle physique, mais uniquement du langage de l'outil. Dès lors, un modèle physique

représenté dans le langage commun pourra être traduit automatiquement dans tout outil de simulation disposant d'un traducteur.

De nombreuses initiatives visant cet objectif, parfois très anciennes, ont émaillé l'histoire de la modélisation énergétique des bâtiments : Tentative de production systématique de fiches « PROFORMA » [Dubois], définition du « Neutral Model Format » (NMF) [Sahlin], projet DYNASIMUL [DYNA]. On peut penser que la thématique du bâtiment haute performance, qui est mondiale par ses enjeux, peut remettre au goût du jour ces préoccupations anciennes et accélérer la mise en œuvre des initiatives les plus récentes.

La fin des outils de simulation et la naissance de « méta-modèles » construits pour répondre à des besoins de simulation spécifiques.

C'est là l'étape ultime de la mutualisation des moyens de simulation, qui n'est possible que si les différents outils existants sont capables d'échanger et d'interpréter à minima leurs entrées et leurs sorties. Il s'agit d'exploiter tous les outils existants en chaînant leur lancement en fonction de la simulation que l'on souhaite effectuer. Toutes les échelles peuvent alors être traitées en même temps. On peut imaginer un calcul global sur un bâtiment, mais dont certains détails importants seraient simulés à l'échelle du composant, voire du matériau. On peut aussi imaginer des simulations multi-critères sur des domaines très différents (thermique, acoustique, mécanique, etc...)

Le développement rapide des outils scientifiques libres (ou presque libres), disponibles par simple téléchargement sur Internet, laisse penser que cette logique peut remplacer la pratique actuelle d'outils métiers utilisés séparément. Dans cette hypothèse, les savoir-faire utiles ne se situent plus vraiment dans le développement des outils, mais dans la construction de « méta-modèles », c'est-à-dire des assemblages d'outils disponibles, très pertinents sur leur domaine, et dont le travail en commun donne une simulation très précise et complète des phénomènes que l'on souhaite représenter.

Le bâtiment haute performance, qui demande l'assemblage d'expertises variées, qui nécessite une approche multi-échelles, pourrait être un champ d'application privilégié de cette nouvelle démarche, et même jouer un rôle moteur pour son développement. Le projet SIMBIO [Visier] qui se met en place en France en est une illustration.

Les différentes échelles de la modélisation énergétique des bâtiments.

La modélisation énergétique des bâtiments classiques nous a habitués à une démarche multi-échelles où les phénomènes de base sont simulés à l'échelle microscopique du matériau, puis intégrés à l'échelle du composant puis le plus souvent sont simplifiés et globalisés pour être pris en compte dans les modèles de bâtiments (approche micro, méso et macro).

Il est clair que la modélisation des bâtiments haute performance fera appel à la même démarche, mais il semble également qu'elle va l'étendre en introduisant dans le jeu trois nouvelles échelles.

Tout d'abord une échelle plus petite. En effet, le besoin de réhabilitation va pousser le développement de technologies plus compactes, moins encombrantes, afin de faciliter l'intégration de la performance dans le bâti existant. Et sur ce terrain, de nombreuses pistes techniques convergent vers des solutions utilisant les propriétés des nano-

matériaux : isolants thermiques nano-structurés, micro-échangeurs aux surfaces dopées par des nano-matériaux par exemple. Mais à cette échelle, les bases de la modélisation thermique doivent être revues. Notamment toutes les notions relatives au rayonnement sont à revisiter dans de tels milieux dont les dimensions caractéristiques sont inférieures, et même très nettement inférieures, aux longueurs d'onde concernées. L'étude du comportement thermique des matériaux nano-structurés demandera donc le développement de savoir-faire thermiques nouveaux.

De plus, on peut raisonnablement penser que les bâtiments très performants feront massivement appel aux énergies renouvelables intégrées, produites ou captée par le bâtiment lui-même. Il s'agira tout autant de mieux capter les apports de l'environnement que de moins perdre l'énergie fournie au bâtiment. Dès lors, la connaissance de l'environnement proche du bâtiment, micro-climat local, masques proches et lointains, devient indispensable. En outre, une telle conception peut être vue comme une exploitation raisonnée d'un environnement qui, par nature, n'est pas dédié à un seul bâtiment, mais à tous ceux qui s'y trouvent ou qui y seront construits. Cela peut donner des idées nouvelles où les bâtiments interagissent pour mieux se partager le bien commun. On peut par exemple imaginer un bâtiment dont la façade est orientée au sud, qui exploite une partie du rayonnement solaire qu'il reçoit, et qui réfléchit le surplus vers la façade nord d'un autre bâtiment qui lui fait face. En conséquence, il nous semble tout à fait raisonnable de penser que la modélisation énergétique des bâtiments haute performance devra intégrer l'échelle de l'îlot ou du quartier [Alvarez], [Nakaohkubo] [SunTool].

Enfin, et il s'agit là de mener jusqu'au bout l'analyse énergétique du bâtiment, il ne faut pas oublier que le bâtiment est un lieu de vie, mais le plus souvent, par intermittence. Certes, des études ont montré que les occidentaux passaient plus de 80% de leur temps dans un bâtiment. Mais pas dans le même. Et entre deux bâtiments, l'occupant se déplace. Si ce déplacement génère trop de nuisances, il peut être finalement plus efficace d'avoir deux bâtiments peu performants côte à côte que deux bâtiments très performants mais aussi très éloignés. La construction d'un îlot BBC loin de tout peut avoir un bilan énergétique et environnemental négatif. En somme, on peut attacher la problématique du transport à celle du bâtiment et analyser la question de la performance non pas à l'échelle du bâtiment seul, mais à l'échelle des bâtiments d'une région reliés entre eux par les déplacements de leurs occupants. Ainsi, la question du bâtiment haute performance peut générer une nouvelle échelle d'analyse énergétique, une échelle qui peut être aussi vaste que celle des déplacements de ses occupants.

Conclusion.

La conception de bâtiments très performants crée de nouveaux besoins en matière de modélisation énergétique. Ces nouveaux besoins peuvent être liés au niveau de performance à atteindre, qui est sans commune mesure avec celui qui prévaut aujourd'hui, aux technologies innovantes qui seront mises en œuvre, aux difficultés de prise en main des nouvelles connaissances par les concepteurs ou à ces trois causes à la fois.

Pour répondre à ces besoins, les développeurs vont devoir imaginer des solutions nouvelles qui concerneront trois niveaux différents de leur activité.

Le niveau des modèles eux mêmes en premier lieu, de leur contenu : Il s'agit là de s'assurer a minima que la modélisation physique pourra représenter les nouveaux

phénomènes qui seront à l'origine des nouvelles performances. A ce titre, il faut être particulièrement vigilant aux déplacements des priorités lorsque le niveau de performance d'un poste anciennement prépondérant s'est considérablement accru. Dans un bâtiment haute performance, la consommation de chauffage est rarement la plus importante.

Les réponses à apporter concerneront également les domaines couverts par la modélisation. Certes, la thermique et l'énergétique resteront durablement au centre des préoccupations. Mais la haute performance énergétique ne peut être gérée seule. D'une part parce qu'elle est extrêmement sensible aux aléas. D'autre part, parce que aussi importante soit-elle, elle ne peut altérer par son existence d'autres caractéristiques essentielles du bâtiment, comme le comportement mécanique, acoustique, l'éclairage, la sécurité, la durabilité mais aussi, et peut-être surtout, la raison d'être d'un bâtiment : le confort des occupants.

L'adaptation concernera enfin les méthodes de modélisation elles mêmes, et l'usage des modèles. On peut en effet s'interroger sur la pertinence d'une approche déterministe alors que la variabilité de la performance militerait plutôt pour une approche probabiliste. On peut aussi resituer l'activité de modélisation dans son contexte présent et à venir, qui voit le développement rapide de l'accès libre, la volonté de partage des meilleurs outils, et se demander si la solution d'avenir n'est pas la construction de « méta-modèles » capables de chaîner le lancement d'outils variés, tous très pertinents sur leur domaine, et capables de faire communiquer leurs entrées et leurs sorties.

Enfin, et de façon transverse à ces trois niveaux, se pose la question de l'échelle des problèmes traités par la modélisation. Nous sommes aujourd'hui habitués à trois échelles : le matériau, le composant et le bâtiment. Il semble désormais impossible d'ignorer l'échelle nanométrique dans nos approches matériaux. Pour le composant, il est fort probable que le développement des énergies renouvelables et la prise en compte généralisée des micro-climats notamment urbains, imposeront à terme la question du passage à l'échelle du quartier. De même, si l'énergétique du bâtiment doit à terme s'intégrer dans une réflexion plus globale sur l'énergie, le passage à l'échelle de la région, intégrant bâtiment et transport s'imposera également.

La tentative de mise en lumière et de justification de ces nouveaux besoins, qui ne se veut pas exhaustive, couvre un spectre assez large de l'activité de modélisation énergétique des bâtiments. La discussion sur les priorités devra probablement avoir lieu, même si elle paraît dès maintenant difficile. Mais il semble toutefois important de lancer sans attendre les tâches de fond, lourdes et longues, mais indispensables. A ce titre, on peut raisonnablement mettre au premier plan les activités portant sur la validation, sur l'inter-opérabilité des modèles, sur le langage commun de modélisation et sur la durabilité des composants et de leur performance.

Bibliographie.

[CEREN] Enquête CEREN sur la consommation énergétique des ménages. 2002.

[BESTEST] "International Energy Agency Building energy Simulation Test (BESTEST) and diagnostic Method.", JUDKOFF, R., and NEYMARK J. NREL/TP-472-6231. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>

[Jensen] Søren Østergaard Jensen, Validation of building energy simulation programs: a methodology. Energy and Buildings. Volume 22, Issue 2, 1995, Pages 133-144.

[Jessen Page] Jessen Page, Simulating occupant presence and behaviour in buildings. Thèse EPFL, no 3900 (2007)

[Sten de Wit] Sten de Wit, Influence of Modeling Uncertainties on the Simulation of Building Thermal Comfort Performance, IBPSA Conference ,Prague, september 8-10 1997.

[TRANSSOLAR] Projet HabitEnergie : Analyse des facteurs de réussite dans la construction de logements à très basse consommation. Enquête dans trois pays européens. 2008.

[IBPSA97] D. B. Crawley; L. K. Lawrie; F. C. Winkelmann; W. F. Buhl; A. E. Erdem; C. O. Pedersen; R. J. Liesen; D. E. Fisher; R. K. Strand; R. D. Taylor, What Next For Building Energy Simulation. A Glimpse of the Future. IBPSA Conference ,Prague, september 8-10 1997.

[Chlela] Fadi Chlela, Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie, Thèse de l'Université de la Rochelle, 05 février 2008

[Flory-Celini] Caroline Flory-Célini, Modélisation, analyse multicritères et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant. Thèse de l'Université Claude Bernard, 26 mars 2008

[Laret] Louis Laret, The Simulation of Large Scale Interconnected systems for Building and Equipment Performance Evaluation. IBPSA Conference , Nice, France August 20-22, 1991

[Dubois] Anne Marie Dubois, Eléments de spécification d'un environnement avancé de modélisation et de simulation. Application à la thermique du bâtiment. Thèse de l'Université de Sophia-Antipolis, Nice, septembre 1990

[Sahlin] Per Sahlin Axel Bring, Edward F. Sowell, The Neutral Model Format for Building Simulation, June 1996, <http://www.equa.se/dncenter/nmfre302.pdf>.

[DYNA] DYNASIMUL : Développement d'une plate-forme commune de simulation. ANR. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/documents/aap/2006/finance/PREBAT-2006-resumes.pdf>

[Visier] Jean-christophe Visier, Simbio : Plate-forme d'assemblage virtuel au service des bâtiments basse consommation. Etude de définition. Mars 2007

[Alvarez] Francisco Sánchez de la Flor, Servando Alvarez Domínguez , Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings, Energy and Buildings, Volume 36, Issue 5, May 2004, Pages 403-413

[Nakaohkubo] Kazuaki Nakaohkubo, Akira Hoyano, and Takashi Asawa, Development of support tool for outdoor thermal environmental design of urban/building using numerical analysis, *ibpsaNEWS* volume 18 number 1, p33-39, april 2008

[SunTool] Robinson D., Stankovic S., Morel N., Deque F., Rylatt M., Kabele K., Manolakaki E. et Nieminen J. (2002). Integrated resource flow modelling of urban neighbourhoods: project SUNtool. Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, IBPSA, 11-14 aout 2003, p. 1117 - 1122.