



Sans occupant, les bâtiments ne consomment pas d'énergie

Françoise Thellier

► To cite this version:

Françoise Thellier. Sans occupant, les bâtiments ne consomment pas d'énergie. Sociologie de l'énergie : Gouvernance et pratiques, 2014. <hal-01933928>

HAL Id: hal-01933928

<https://hal.science/hal-01933928v1>

Submitted on 31 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

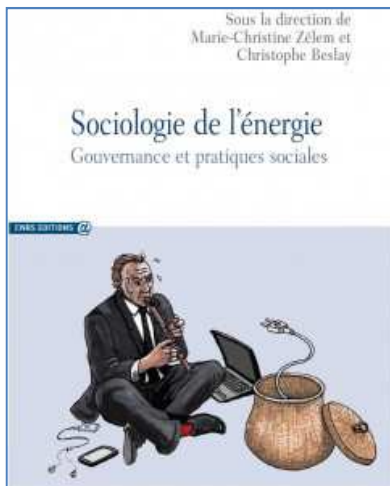


HAL Authorization

Sans occupant, les bâtiments ne consomment pas d'énergie!

Françoise Thellier – Université Toulouse III Paul Sabatier – laboratoire PHASE

Extrait de “ **Sociologie de l'énergie : Gouvernance et pratiques**” sociales pp 283-292.



Sociologie de l'énergie : Gouvernance et pratiques sociales,

Livre collectif publié aux éditions du CNRS et dirigé par M.C Zélem et C. Beslay. Il rassemble principalement les contributions des participants aux 1^{ères} Journées Internationales de Sociologie de l'Énergie qui ont eu lieu à Toulouse en octobre 2012. Il regroupe une quarantaine d'articles détaillés sur les approches théoriques, la gouvernance, l'innovation, les usages, le changement en matière d'énergie, le tout sur un peu moins de 500 pages.

Il peut être commandé sur le site du CNRS.

Résumé : Affaire de société, enjeu politique, objet de controverses, l'énergie est devenue depuis une quinzaine d'années un sujet de recherche de première importance pour les sociologues. Alors que les débats autour de la transition énergétique s'animent, ce livre réunit les analyses scientifiques de chercheurs issus d'horizons institutionnels différents. L'objectif est de mutualiser, en un seul ouvrage et pour la première fois, les connaissances et les approches théoriques quant à la gouvernance de l'action publique et aux pratiques sociales dans le domaine de l'énergie. L'ouvrage s'organise autour de six parties. La première est consacrée aux approches conceptuelles et théoriques. Cette partie insiste sur les changements en termes d'action publique, et les reconfigurations qu'implique le choix d'une société bas carbone. La seconde partie traite des conditions et des instruments de la gouvernance en matière de politique énergétique. La troisième partie de l'ouvrage s'intéresse aux dynamiques d'innovation, notamment des territoires en transition et des technologies émergentes. La quatrième partie est centrée sur les usages et les usagers, d'un triple point de vue, celui des conditions sociotechniques de la maîtrise de la demande, mais aussi des situations de précarité énergétique et des pratiques de certains acteurs. Les deux dernières parties proposent une focale sur l'accompagnement au changement par les nouvelles technologies « smart ».

Marie-Christine Zélem est professeur de sociologie, à l'Université de Toulouse II Jean Jaurès, membre du laboratoire CERTOP (UMR 5044 du CNRS). Ses recherches portent sur les modes de réception des politiques publiques environnementales et les résistances aux innovations technologiques et sociales. Elle a fait partie des experts du Débat National sur la Transition Énergétique en 2013. Elle est notamment l'auteur de Politiques de Maîtrise de la Demande d'Énergie et résistances au changement. Une approche socio-anthropologique (2010).

Christophe Beslay est sociologue au bureau d'études BESCOB et maître de conférences associé à l'Université Toulouse II Jean Jaurès. Il travaille essentiellement sur les questions d'énergie avec une approche sociotechnique centrée sur l'analyse des pratiques sociales, des techniques, de l'innovation et des professions, notamment dans le secteur du Bâtiment.

Sans occupant, les bâtiments ne consomment pas d'énergie !

Françoise Thellier

Introduction

« Buildings don't use energy, people do ! » cette phrase résume bien ce qu'on a parfois tendance à oublier. Effectivement, sans occupants, les bâtiments n'ont pas de raison de consommer de l'énergie et n'ont en fait pas de raison d'exister. Le bâtiment n'est là que pour protéger l'être humain des agressions extérieures. Avec l'arrivée de l'ère industrielle, puis des problèmes d'énergie, on a trop souvent oublié les occupants et il devient plus qu'indispensable de revenir à la source même de la raison d'exister de l'Habitat. Il est à noter que le terme Habitat est plus large que le seul bâtiment, puisqu'il englobe tous les types d'enceintes habitables, dans lesquels nous passons plus de 90 % de notre temps dans nos sociétés occidentales. De plus, ce terme d'Habitat renvoie clairement à l'Habitant pour lequel il est construit.

L'être humain a développé sans cesse des stratégies et des techniques pour se protéger des agressions climatiques et l'amélioration de la qualité de vie a été le moteur essentiel d'une partie des grandes découvertes. L'Habitat et l'Énergétique en général, sont les plus anciennes préoccupations de l'Homme. Sa première grande découverte, "le feu", en est la preuve. Au cours des dernières décennies pour répondre aux crises énergétiques et aux limitations de rejets de gaz à effet de serre, les réglementations thermiques successives destinées à réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment se sont durcies au fil du temps. Leur efficacité est réelle et l'effort se poursuit régulièrement, particulièrement pour les bâtiments neufs. On constate toutefois sur le terrain que les bâtiments récents habités présentent des performances dégradées par rapport aux prévisions issues de simulations numériques. Ces écarts viennent pour une bonne part de l'impact de l'Homme, qui devient alors la pierre angulaire du succès indispensable. La part relative de son impact s'amplifie avec la baisse des demandes

énergétiques. L'International Energy Agency¹ a conclu récemment que parmi les 6 facteurs cruciaux à étudier pour la performance des bâtiments (cf. Fig. 1), l'occupant a une place importante.

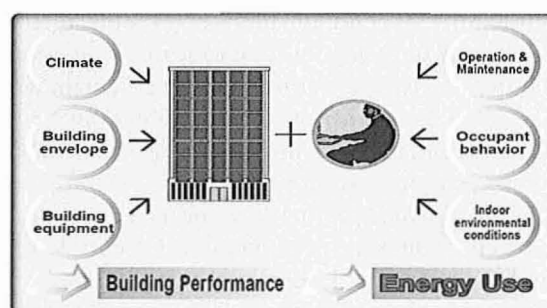


Figure 1 : Les 6 principaux enjeux pour améliorer la performance énergétique des bâtiments selon l'IEA.

Le travail présenté dans notre article décrit les phénomènes et les outils mis en œuvre pour caractériser le couplage entre l'habitant et son environnement thermique, par la prise en compte de l'être humain lui-même et de la façon dont ses comportements peuvent dégrader ou non les performances énergétiques. On vise deux objectifs antagonistes : procurer à l'habitant ses conditions préférées, tout en limitant les consommations énergétiques, ce qui rend le problème complexe.

Positionnement du problème

Si on aborde le problème du point de vue de la thermique (Fig. 2), l'humain est un être homéotherme, c'est-à-dire que pour assurer ses fonctions vitales, il doit maintenir sa température interne proche de

1. IEA International Energy Agency. Energy Conservation in Buildings & Community systems. Annex 53 Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods. www.ecbcs.org/annexes/annex53.htm

37 °C. Pour un homme nu au repos, la température « idéale » à proximité de la peau est aux alentours de 29°C. Par conséquent, il a développé divers niveaux de protection pour maintenir cette température quelles que soient les conditions climatiques terrestres variant globalement de -50 à +50°C. Tout d'abord, il possède un système de régulation thermique physiologique interne très performant. Ensuite, la première couche de protection est l'Habit et la deuxième l'Habitat. Il doit réguler ses systèmes de protection en fonction des conditions climatiques extérieures et selon ses besoins et ses préférences. L'imbrication des divers niveaux de régulation est donc la condition de sa survie, sa santé et son confort [GIE, 2011].

Le maintien de conditions de vie idéales dans les bâtiments est très consommateur d'énergie et génère une forte pollution. Il apparaît évident que pour réduire les consommations et les coûts, il faut optimiser le système. Cela passe par une régulation qui minimise l'énergie utilisée tout en procurant des conditions de confort maximales. Répondre à ces exigences contradictoires impose aussi que des compétences très diverses soient réunies.

Nous pouvons aborder le problème autrement : c'est l'Habitant qui est consommateur d'énergie, du fait des systèmes qu'il a développés pour répondre à ses exigences de qualité de vie. Si l'augmentation de la pollution et la disparition des combustibles fossiles ne mettent que très peu en danger la planète, elles compromettent la survie de l'homme dans les conditions qu'il connaît actuellement. C'est donc avec une vision anthropo-centrée qu'il faut amorcer la réflexion, et tout particulièrement dans le domaine des sciences pour l'ingénieur. Beaucoup pensent qu'il suffirait de diminuer la température de consigne du chauffage pour diminuer la facture énergétique. Cela est vrai, mais cette solution n'est pas acceptée, car l'homme est hédoniste et cherche d'abord à maintenir ses conditions de vie préférées. En effet, l'être humain possède des capteurs internes lui permettant de percevoir son état physiologique et de déterminer s'il est satisfaisant ou non. Cependant, il ne possède pas cette faculté dans le domaine de l'énergie, et règle ponctuellement une facture d'énergie et des consommations dont l'origine détaillée n'est jamais connue !

Les liens entre l'homme, l'énergie et l'habitat sont très étroits (Fig. 3). Tout d'abord, l'homme consomme de l'énergie sous forme d'aliments, environ 2000 à 3000 kcal soit 2,5 à 3,5 kWh par jour. La plus grande partie de cette énergie est transformée en chaleur suite aux réactions chimiques de transformation des aliments. C'est ce que l'on nomme le métabolisme, qui dépend principalement de l'activité physique. Cette chaleur doit être évacuée dans l'environnement afin

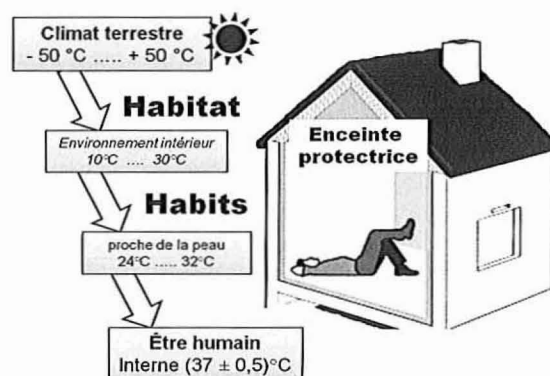


Figure 2 : Rappel des objectifs premiers de nos besoins, menant à la construction des bâtiments

que la température interne reste constante [ASHRAE, 2009]. Au total, un être humain consomme (et donc produit sous forme de chaleur) 900 à 1300 kWh par an. Cette énergie équivaut à celle consommée dans un Bâtiment Basse Consommation (BBC) d'environ 20 m² de surface habitable (50 kWh/m².an). On constate donc très simplement que l'énergie mise en jeu par les êtres humains et celle des BBC est du même ordre de grandeur.

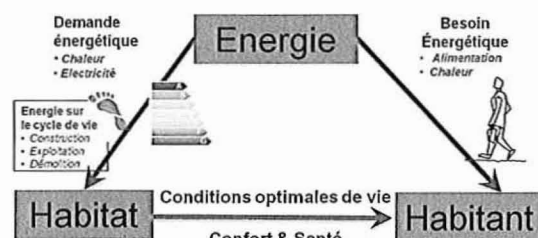


Figure 3 : Liens entre Energie-Habitat-Habitant

L'habitat consomme également de l'énergie, que ce soit lors des différentes phases du cycle de vie ou également lors de la phase d'exploitation. La réglementation thermique fixe des températures de consignes compatibles avec les économies d'énergie mais incompatibles avec le confort thermique. En pratique, on constate que souvent¹, les thermostats sont réglés à 21°C alors que la réglementation les prévoit à 19°C. Il est urgent de mettre en place de nouveaux outils, pour répondre au constat suivant : « Les méthodes de calcul des consommations conventionnelles correspondent à des conditions normalisées qui ne correspondent en rien aux modes de vie des occupants. On

1. Travail Olivier Sidler. www.enertech.fr.

incrimine souvent les usagers au lieu de les prendre en compte comme un élément essentiel de l'habitat »¹.

Depuis la prise de conscience des problèmes énergétiques à la suite du choc pétrolier des années 1970, des réglementations ont été mises en place pour réduire les consommations de chauffage. Les premières étapes avaient pour objectif principal d'améliorer l'enveloppe du bâtiment, puis d'en contrôler la ventilation. Avec la Réglementation Thermique du début des années 2000 (RT2000), renforcée par la RT2005, une approche plus globale du bâtiment a été considérée et la baisse des consommations a été notable. Avec cette tendance, on s'intéresse aujourd'hui à l'énergie primaire totale consommée afin de prendre en compte tous les usages. Ainsi, on considère les consommations d'électricité spécifiques de tous les équipements. Ces derniers sont de plus en plus nombreux et prennent une part de plus en plus forte, surtout dans le bilan énergétique des bâtiments à faible besoin de chauffage. En outre, les systèmes qui consomment de l'électricité dégagent également de la chaleur qui augmente les apports internes et génère des surchauffes, surtout dans les bâtiments très isolés. Il en résulte que les problèmes d'inconfort d'été deviennent de plus en plus fréquents. Dans l'approche actuelle de l'ingénierie, on développe des systèmes de plus en plus efficaces d'un point de vue énergétique, mais on oublie très souvent la façon dont ils seront utilisés. La consommation totale (E) d'énergie peut s'écrire :

$$E = E_{(1)} + \dots + E_{(i)} + \dots + E_{(N)} \quad \text{où } E_{(i)} = P_{(i)} \cdot t_{(i)}$$

avec $E_{(i)}$ (kWh) l'énergie consommée par le système (i) (éclairage, chauffage, bureautique, etc.)
 N le nombre total de systèmes consommateurs
 $P_{(i)}$ (kW) la puissance appelée par le système (i)
 $t_{(i)}$ (h) le temps de fonctionnement de ce système

Certes, les ingénieurs font en sorte que la puissance consommée $E_{(i)}$ par les systèmes soit réduite et que le nombre de systèmes N prévus lors de la conception du bâtiment soit faible. Mais en pratique ce sont les usagers qui décident de bon nombre d'installations et qui, dans la plupart des cas, gèrent la durée de leur fonctionnement (t). On constate alors que le comportement de l'habitant a une part très importante dans la consommation énergétique du bâtiment en activité.

Les difficultés de la prise en compte de l'être humain dans son environnement viennent du fait que l'approche doit être totalement transdisciplinaire²

puisque'il faut mettre en lien la physique, la physiologie, la psychologie et la sociologie (Fig. 4). Contrairement à d'autres pays, en particulier anglo-saxons, la France a peu d'équipes travaillant conjointement dans ce domaine. Il reste encore du chemin à parcourir avant d'avoir des objectifs communs, à commencer par le vocabulaire. Il faut souligner également que dans ce domaine la bibliographie est large mais éparpillée, chaque thématique de recherche publiant dans des journaux différents. Dans le domaine de l'évaluation de la qualité des ambiances intérieures (Indoor Environmental Quality IEQ), l'évaluation des ambiances thermiques est la plus complexe et la plus ancienne. Il existe une vingtaine de normes internationales regroupées sous le titre commun « Ergonomie des ambiances thermiques ».

Dans la pratique, la conception des bâtiments est faite par les architectes et les ingénieurs de bureaux d'études, dont l'objectif est trop souvent d'obtenir des bâtiments conformes aux réglementations. C'est insuffisant, car dans le domaine d'étude de la qualité des ambiances, communément appelée 'confort', on retrouve les ambiances lumineuses, thermiques, acoustiques et la qualité de l'air. Même si, d'un point de vue scientifique, on connaît une partie de leurs interactions, elles sont encore difficiles à modéliser simultanément et les études dans les divers domaines sont encore menées séparément. L'approche multi-physique est par conséquent encore difficile.

Des études menées par des physiologistes et des médecins ont permis de faire le lien entre les conditions ambiantes, considérées souvent de façon simplifiée, et leur impact sanitaire et physiologique sur l'habitant, allant même jusqu'au lien avec les perceptions - ou sensations - qui sont des données relativement objectives. À partir de ses perceptions, l'être humain va déclarer ses préférences en termes de confort ou d'inconfort. Ce domaine est exploré par des psychologues et des ergonomes. Enfin, sur le terrain, à plus grande échelle, il faut étudier l'acceptabilité des solutions proposées et le comportement des occupants dans leur bâtiment, comportement

Transdisciplinaire : elle dépasse les points de vue disciplinaires. L'intégration entre méthodes d'approche est totale. Les partenaires définissent une nouvelle méthodologie originale qui peut déboucher sur la naissance d'une nouvelle discipline à part entière.

Interdisciplinarité : elle induit une plus grande collaboration en amont des personnes impliquées. Le projet de recherche est défini en commun, les différentes approches sont associées voire unifiées.

Pluridisciplinarité : simple juxtaposition d'équipes de cultures différentes autour du même sujet. Les échanges s'effectuent essentiellement à la fin lors du partage des résultats.

1. « Et si on s'intéressait aux usagers des bâtiments ? » Duffaure-Gallais I. Moniteur déc. 2011. www.lemoniteur.fr.

2. « La difficile évaluation de la recherche interdisciplinaire ». Définitions AERES. www.EducPro.

qui peut aussi largement être impacté par l'aspect financier (Fig. 4). C'est le domaine des sociologues. La notion de confort global reste encore inconnue à ce jour, puisqu'il peut y avoir des effets de choix

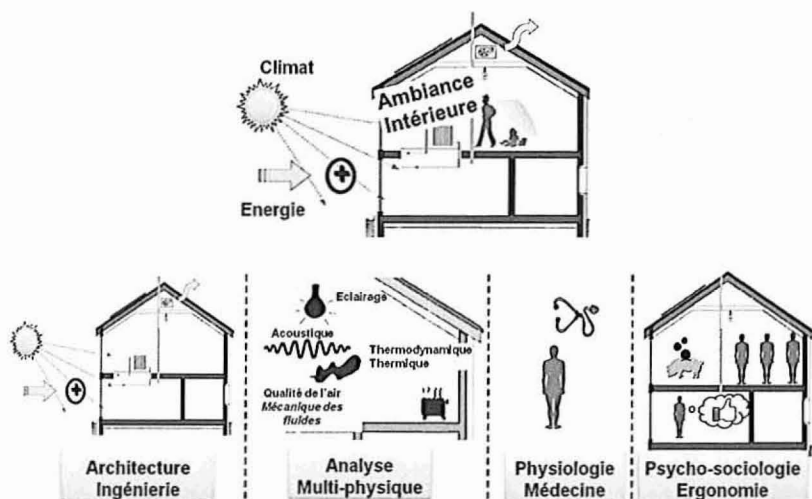


Figure 4 : Schématisation du problème dans son ensemble et de la décomposition actuelle des études.

personnels, des effets de masque ou encore des interactions psychosociologiques. Ces dernières sont très peu connues.

Énergétique de l'Homme et l'habitat

Considérons les énergies mises en jeu chez l'Homme et dans son Habitat. L'un et l'autre sont deux systèmes complexes présentant des similarités, très étroitement liés, beaucoup plus que les approches partielles actuelles ne le prétendent. Le bilan thermique de chacun, ou balance, permet de connaître son évolution de température au cours du temps. Rappelons le principe de base : pour qu'un système soit à l'équilibre, c'est-à-dire que sa température n'évolue pas, il faut que la somme des énergies (chaleur) entrantes et produites soit égale aux quantités d'énergie sortantes.

Énergétique du corps humain

Pour maintenir les fonctions vitales, la température centrale du corps humain doit être assez stable à $(37 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, et le bilan thermique doit être équilibré (Fig. 5). La chaleur produite doit être évacuée dans son environnement.

La puissance produite (M_{net}), ou métabolisme ou thermogénèse, dépend surtout de l'activité et peut varier de 70 à 900 W pour un adulte. Elle dépend aussi de la stature physique, du sexe. Elle décroît avec l'âge et peut varier en fonction d'un système de régulation interne. La majeure partie de cette énergie, produite au centre du corps et dans les muscles, est évacuée sous forme de chaleur vers la surface de la peau à travers les tissus biologiques et par la circulation sanguine.

Les transferts thermiques entre le corps et l'environnement (ou thermolyse) se font par tous les mécanismes classiques de transferts, au niveau cutané et par les voies respiratoires [Parsons, 2003 ; Thellier, 1999]. Les

échanges avec l'ambiance dépendent des données thermo-physiologiques de l'individu, essentiellement de surface, c'est-à-dire la température et la mouillure de la peau, et peuvent largement être modifiés par la présence éventuelle de vêtements. Ces transferts sont fonction des variables physiques de l'ambiance : température (T_{air}), vitesse (V_{air}) et humidité de l'air, températures des surfaces (T_{surf}), et du rayonnement solaire. Aucune de ces variables ne joue un rôle prépondérant, tout dépend des situations. Dans ce qui suit, les échanges notés * sont le plus souvent des pertes, mais peuvent devenir des apports en ambiance chaude.

- Le Rayonnement Solaire (Ray_{sol}) est toujours un gain de chaleur. Il peut être très important et poser des problèmes, car il est très ponctuel dans le temps et l'espace. Actuellement avec la tendance à augmenter les surfaces vitrées, il devient fréquent que les personnes exposées se plaignent de surchauffe.

- L'Évaporation (Evap) est toujours une perte de chaleur. Elle est fonction de l'humidité et de la vitesse de l'air, et surtout de la quantité d'eau suée qui dépend du système de régulation interne. C'est le seul moyen de refroidir le corps humain en conditions chaudes. L'eau à la surface de la peau peut être perçue de façon très désagréable.

- La Convection* (Conv), est fonction de la température et de la vitesse de l'air.

- Le Rayonnement Infra Rouge* (Ray_{IR}), dépend des températures de surface de toutes les parois environnant le corps et d'un certain nombre d'autres

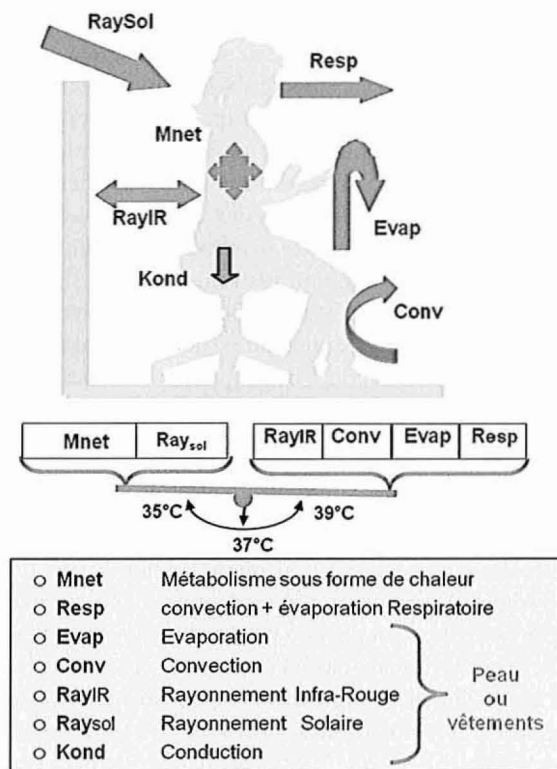


Figure 5 : Balance ou bilan thermique du corps humain.

propriétés physiques, mais surtout de la position de l'individu dans le local, par exemple la proximité d'un radiateur ou d'une surface froide.

– La Conduction* (Kond) est due aux contacts avec des milieux solides. Elle est souvent négligée dans les calculs, ce qui peut être vrai pour des personnes debout, mais plus du tout en cas d'allitement par exemple.

Tous les transferts sont variables dans le temps. En hiver, la convection et le rayonnement représentent chacun 40 % des pertes, alors qu'en été l'évaporation peut atteindre 100 %. Pour garder une température stable, le corps humain dispose d'un système de régulation interne qui provoque des réactions de thermorégulation physiologiques, qui vont moduler les différents phénomènes. Ce système de contrôle-commande est complexe. Il est piloté par le système nerveux central. On a l'habitude de représenter son fonctionnement, de façon très simplifiée, en trois étapes : 1) les thermorécepteurs périphériques et centraux envoient au cerveau des informations qui dépendent de l'état thermique du corps, 2) ces informations sont comparées à des valeurs de consigne, puis intégrées, 3) le système central détermine la commande générale et envoie des informations aux différents effecteurs.

Les informations envoyées par le système nerveux central vont en retour avoir des effets sur les transferts de chaleur. Par exemple, si la température du corps est trop haute, la vasodilatation augmente le diamètre des vaisseaux sanguins pour accélérer les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie, puis la transpiration produit de l'eau à la surface cutanée pour augmenter les pertes de chaleur par évaporation. Ces réactions sont limitées dans leur efficacité et leur durée. Par ailleurs, des réactions de forte amplitude sont perçues comme désagréables. On définit la zone de neutralité thermique ou thermo-neutralité physiologique dans le cas où le bilan thermique du corps humain est proche de l'équilibre avec des réactions physiologiques minimales.

Énergétique de l'habitat

L'objectif premier de l'habitat est de maintenir, autour de l'homme, un climat intérieur propice à ses activités. Il peut donc être variable selon les besoins humains. Les échanges au sein du bâtiment se font par tous les modes de transferts thermiques. Les systèmes de chauffage et/ou de climatisation ont pour but de maintenir les conditions intérieures souhaitées en équilibrant les pertes qui se font à travers l'enveloppe (murs, fenêtres...) et autres (ventilation...). En fonction du type de construction et du climat, les grandeurs physiques intérieures (températures, humidité) seront différentes d'un bâtiment à l'autre, et variables au cours du temps.

Les bâtiments actuels sont munis de systèmes de régulation plus ou moins perfectionnés, dont le but est de maintenir les conditions intérieures égales aux consignes fixées, en modulant uniquement la puissance des appareils de génie climatique (chauffage et climatisation). On peut décrire de façon grossière les systèmes classiques de régulation en trois étapes : 1) les sondes de températures envoient des informations au central de commande, 2) le central de commande compare les informations pour déterminer si la consigne est atteinte ou non, 3) le système central envoie une commande aux appareils de génie climatique. Des systèmes locaux peuvent aussi moduler la commande générale. Par exemple, si la température intérieure est inférieure à la température de consigne, l'ordre va être donné d'augmenter la production de chaleur.

La consommation énergétique dépend du bâtiment lui-même et aussi de la réactivité des systèmes à maintenir les consignes souhaitées. Les besoins en chaleur ou en froid dans les bâtiments récents sont très faibles, mais restent encore très élevés dans les bâtiments anciens qui représentent la grande majorité

du parc de construction. Notons également que les usagers jouent un rôle important puisque les consommations sont totalement dépendantes des consignes qu'ils ont choisies.

Énergétique des bâtiments occupés

Couplage des deux sous-systèmes : homme - bâtiment

Pour passer aux bâtiments "zéro énergie", il faut optimiser l'ensemble du bâtiment et de ses équipements. L'être humain joue un rôle qui devient totalement prépondérant alors qu'il a été jusqu'ici plutôt négligé ou oublié. On arrive donc tout naturellement à la conclusion que pour que les prédictions de consommation énergétique soient fiables, il faut impérativement avoir une approche multi-physique et multi-échelle, mais également intégrer les usages et les usagers. Pour réellement prendre les usagers en compte, il faut avoir une approche du système complet pour faire apparaître les couplages forts entre l'homme et l'habitat (Fig. 6), et qui sont aujourd'hui d'une importance croissante.

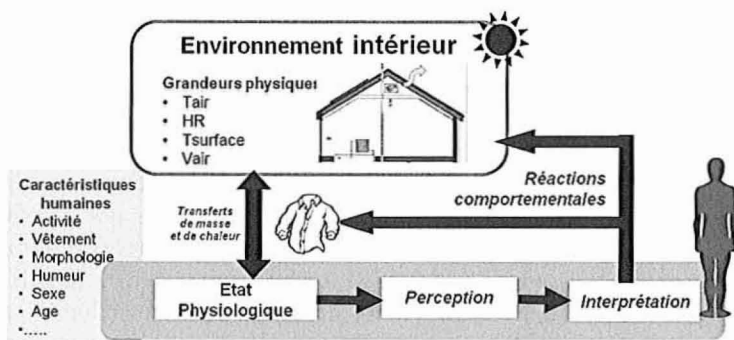


Figure 6 : Schématisation du couplage entre l'homme et l'habitat.

Nous avons vu qu'en fonction des conditions climatiques intérieures, les transferts thermiques au niveau du corps humain peuvent être très variables et dépendent des caractéristiques physiologiques de la personne et de sa tenue vestimentaire. Il va en résulter un certain état thermique du corps. Les thermorécepteurs envoient des informations au cerveau qui, d'une part, déclenche les réactions physiologiques, et d'autre part, les interprète en termes de sensations thermiques ou perceptions, essentiellement liées aux températures de peau et à l'eau produite. Ces sensations sont interprétées en termes d'acceptabilité, de préférences ou

de confort [Thellier, 1999]. Puis, si l'individu n'est pas satisfait, il va rétroagir sur son environnement. On parle alors de thermorégulation comportementale. Soulignons que la régulation physiologique est inconsciente et a pour but le maintien de l'homéothermie, alors que la régulation comportementale est consciente et guidée par des choix hédoniques avec une forte composante psychosociologique. Ces deux modes de régulation peuvent avoir lieu simultanément, mais peuvent aussi s'opposer. Par exemple, un individu qui aime transpirer, pourra ne pas fuir une situation, qui met à dure épreuve son équilibre thermique.

La régulation comportementale entraîne des actions de deux types : les actions individuelles (changement de posture, de vêtements, d'activité...) et les actions collectives ou techniques (ouverture/fermeture des fenêtres, modification de la température de consigne...). Ces actions dépendent des opportunités (par exemple, si on peut ou non modifier la consigne) et elles sont limitées par les contraintes (par exemple, la possibilité de changer de tenue vestimentaire). Les opportunités et contraintes peuvent être techniques, sociales ou affectives. Elles dépendent également des attentes, c'est ce qui fait que l'habitat personnel sera géré d'une façon très différente des espaces de travail. Un autre facteur influençant le comportement est l'impact financier d'une décision. On voit que la régulation comportementale lie encore plus étroitement l'homme et son habitat. Par exemple, pour qu'un système de chauffage soit jugé « confortable » par un individu, il faut qu'il lui procure non pas l'équilibre thermique, mais ses conditions ther-

miques préférées, ce qui est beaucoup plus délicat à obtenir. Il faut que, de surcroît, le système de chauffage lui-même soit accepté d'un point de vue symbolique et esthétique. Si toutes ces conditions ne sont pas réunies, l'occupant peut alors faire une mauvaise utilisation ou dégrader les systèmes mis à sa disposition. Il en résulte invariablement un surcoût énergétique et financier. On peut aisément en conclure qu'il est totalement vain de vouloir déterminer et calculer le « confort thermique universel », mais qu'il faut développer des techniques pour que chaque individu puisse réguler son espace comme il le souhaite, sans générer des surconsommations d'énergie [Thellier, 2012].

Concernant l'expression que les occupants donnent de leur environnement, il existe diverses

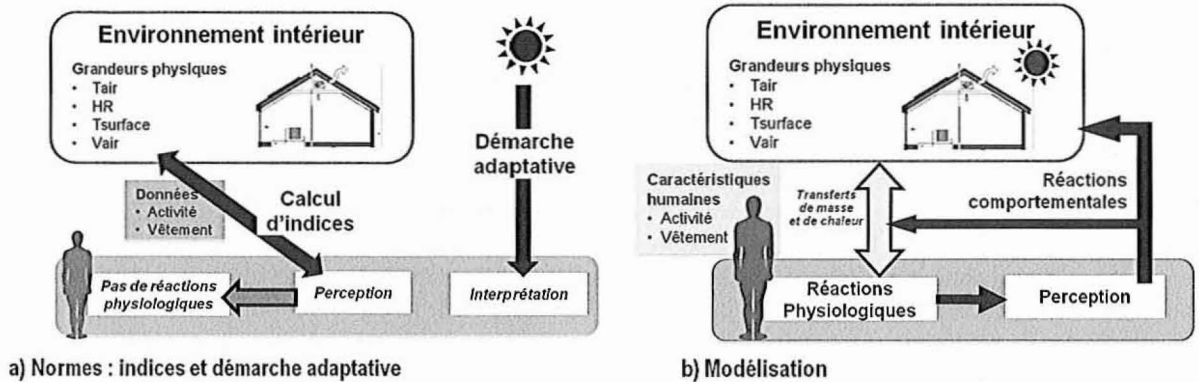


Figure 7 : Méthodes existantes d'évaluation de la qualité des ambiances thermiques.

échelles d'évaluation, qu'il est important de rappeler brièvement :

- **Le jugement thermo-sensoriel** désigne tout jugement porté par un individu sur son état thermique. Il peut être perceptif, évaluatif, préférentiel... Il s'exprime selon plusieurs échelles adaptées, dont les plus utilisées sont la sensation et le confort.

- **La sensation thermique** est le jugement perceptif. Elle est exprimée sur une échelle bipolaire en termes allant de « très froid » à « très chaud ». La sensation « ni chaud ni froid » ou neutre ou encore thermo-neutralité sensorielle n'est possible que dans la zone de neutralité physiologique décrite plus haut, c'est-à-dire lorsque le bilan thermique du corps est équilibré avec peu de réactions physiologiques.

- **Le confort thermique** est le jugement évaluatif totalement subjectif, dont la définition internationale est : « l'état d'esprit où l'homme exprime la satisfaction des conditions thermiques » [ISO 7730]. Le confort comporte une composante psycho-socio-affective qui dépend des préférences de chaque individu. Il s'exprime sur une échelle unipolaire allant de « confortable » à « très inconfortable ».

Entre la sensation et le confort, il n'existe quasiment aucun lien évident, ce passage faisant appel à des processus encore inconnus. D'après toutes les études, même si les conditions de thermo-neutralité sont à peu près les mêmes pour tous les individus et peuvent être calculées, les conditions préférées ou de « confort » sont très différentes selon les habitudes de chacun, la culture, les situations et les attentes personnelles.

Ces définitions sont importantes car, de fait, il n'existe pas de méthode de calcul du confort thermique. L'hypothèse majeure qui a été posée dans les années 1970 est que le confort n'est possible que dans la zone de thermo-neutralité sensorielle, c'est-à-dire pour une sensation « neutre » ou « ni chaud ni froid » [ISO 7730].

Evaluation de la qualité des ambiances thermiques

Traditionnellement dans le domaine du génie climatique, les occupants sont pris en compte de façon sous-jacente (et sommaire !) : ce que l'on nomme « hiver » correspond à la période où il faut chauffer un bâtiment, pour maintenir une température acceptable pour une personne chaudement vêtue. L'été est défini comme étant la période où il faut rafraîchir pour maintenir des conditions optimales pour un occupant vêtu légèrement. Inversement, dans le bilan thermique du bâtiment, les occupants sont considérés comme des sources de chaleur et d'eau avec des valeurs forfaitaires quelles que soient leurs activités. Plusieurs approches sont en cours et parfois s'opposent. La Figure 7 présente les méthodes d'évaluation des ambiances thermiques, les plus courantes qui sont détaillées ci-dessous : les indices et démarche adaptative qui font partie des normes internationales (Fig.7a) et la modélisation (Fig.7b).

- **Les indices, dits de « confort »**, ramènent à un chiffre unique les quatre variables caractérisant l'environnement (température, humidité et vitesse de l'air, température des parois) et les deux caractérisant l'individu (activité, habillement). On considère qu'à une même valeur de l'indice correspond une même sensation thermique. Il faut souligner que tous les indices sont basés sur l'hypothèse de thermo-neutralité, c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas réellement d'indices de confort, mais plutôt d'indicateurs d'éloignement à la situation « neutre », par exemple, l'indice PMV (Predicted Mean Vote) [ISO 7730, 1994] et diverses températures équivalentes : SET, Top, Teq... [ASHRAE, 2010]. Ces indices ne sont en général valables qu'en régime permanent et en ambiances homogènes. Ils sont utilisés, soit pour

calculer la perception dans une ambiance donnée, soit pour déterminer les conditions climatiques permettant d'obtenir une perception neutre. Le Tableau 1 donne quelques exemples de résultats¹, les valeurs de neutralité correspondent à un $PMV=0$ et les limites à $-0,5 < PMV < 0,5$. On constate qu'en hiver pour des activités classiques, les températures ambiantes de neutralité sont supérieures aux 19°C fixés par la réglementation. A cette température, une personne assise habillée normalement aura des frissons et aura donc peu de chance de se déclarer être thermiquement confortable.

Tous les indices sont simples à calculer mais trompeurs. Ils donnent des résultats satisfaisants lors d'une approche statistique dans des bâtiments classiques (chauffés, climatisés), mais ils deviennent totalement inopérants dans des bâtiments BBC, surtout en été où ils ne sont pas utilisables en conditions variables ni pour des vitesses d'air élevées qui favorisent l'évaporation de la sueur et améliorent la perception. Avec les moyens numériques disponibles aujourd'hui, ces méthodes simples n'ont plus vraiment de raisons de perdurer. De nombreux articles les remettent régulièrement en cause pour leurs visions simplistes et réductrices de phénomènes complexes [Humphreys, 2007]. Dans cette approche par les indices, aucun couplage thermique bâtiment-habitant n'est pris en compte.

Saison	Tenue vestimentaire	Activité des occupants	Température ambiante (°C)		Vitesse de l'air
			Neutralité	Limites	
hiver	Tenue d'hiver (0,9 clo) ¹	Repos assis 104 W	23,7	21,8 – 25,5	air calme
		Debout activité légère 150 W	20,1	18,0 – 23,0	
été	Tenue d'été (0,6 clo)	Repos assis 104 W	25,5	24,0 – 27,0	air calme
			27,0	25,6 – 28,4	0,3 m/s
		Debout activité légère 150 W	22,6	20,5 – 24,7	air calme

Tableau 1 : exemples de conditions ambiantes procurant une sensation neutre (Température d'air = température de surface = température ambiante, Humidité relative de 50 %).

¹. Clo : unité de l'isolation thermique d'une tenue vestimentaire [Parsons 1993].

– **La démarche adaptative** prend en compte des actions comportementales. Elle est basée sur le constat suivant : « Si un changement a lieu produisant un inconfort, les gens réagissent de façon à rétablir leur confort » [Nicol, 2002 ; de Dear, 1997]. Elle est issue d'un grand nombre d'expériences sur le terrain et a permis de déterminer des relations entre le climat

extérieur, les tenues vestimentaires et les températures intérieures préférées (Fig. 8). On omet alors la plupart des étapes et des phénomènes liés entre eux. L'avantage de cette approche est d'avoir mis en évidence clairement certains phénomènes. Par exemple, en été dans les bâtiments naturellement ventilés, la température préférée par les occupants est plus élevée que celle désirée dans les bâtiments climatisés. L'Homme accepte des températures intérieures plus élevées car il peut agir sur le bâtiment, ouvrir les fenêtres par exemple, et ainsi rester en contact avec le milieu extérieur. Ces résultats font maintenant partie intégrante des normes récentes. Cependant, l'approche adaptative a été peu étudiée en France. Or les préférences thermiques dépendant beaucoup des habitudes socio-culturelles, des expériences sur le terrain devraient être faites et capitalisées, pour chaque typologie de bâtiment et de climat.

– **Les modèles** permettent d'intégrer l'être humain dans la Simulation Thermique Dynamique (STD) des bâtiments. Ils sont encore peu utilisés en France, mais sont en développement depuis plus d'une vingtaine d'années.

– **Les modèles de thermo-physiologie** calculent le bilan thermique du corps humain. Il en existe une cinquantaine dans le monde. Le corps humain est

décomposé en plusieurs éléments, allant de 2 à plus de 200, suivant les modèles. Ils effectuent le bilan thermique de chaque élément et calculent toutes les grandeurs thermo-physiologiques (température de peau, flux de chaleur, eau suée, etc.) en prenant en compte toutes les réactions physiologiques (frissons, sudation, etc.). Certains modèles calculent également les sensations thermiques locales [Lavoye, 2008 ; Zhang, 2010].

– **Les modèles de comportement de l'Homme** tentent de représenter les actions comportementales de façon simplifiée. Le déclenchement des actions est basé sur les sensations thermiques calculées par les modèles de thermo-physiologie. Les actions qui en découlent sont déterministes et simples : le sujet peut se (dé)vêtir, modifier son activité ou la

1. Résultats obtenus avec l'outil en ligne, conforme aux normes internationales www.cbe.berkeley.edu/comforttool/

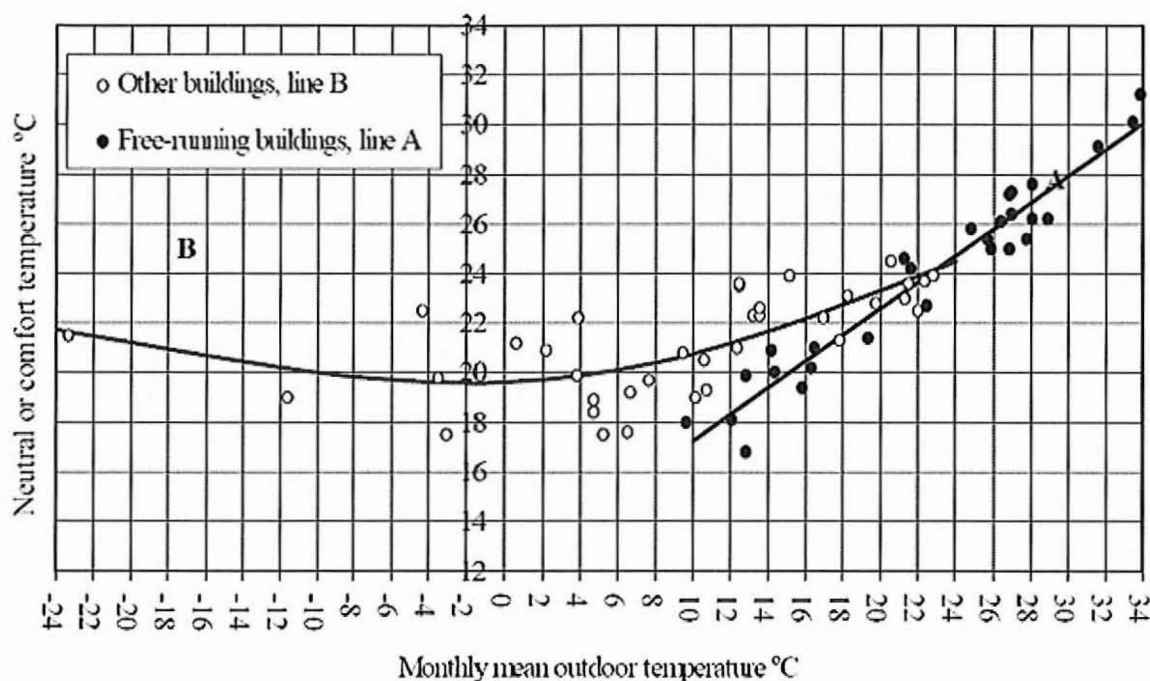


Figure 8 : Température de confort en fonction de la température moyenne courante extérieure (The adaptive approach www.new-learn.info).

ventilation, actionner des systèmes de chauffage, etc. [Endravadan, 2006]. L'objectif est dans un premier temps de chiffrer l'impact des différentes actions comportementales sur la consommation énergétique des bâtiments [Bonte, 2013]. Pour s'approcher d'un comportement réel, du travail reste à faire, d'une part, dans la compréhension de ce qui déclenche tel ou tel type de comportement et, d'autre part, sur la modélisation plus fine des systèmes et de la régulation à mettre à sa disposition.

Le manque actuel de connaissances vient du fait, qu'en France peu d'évaluations en condition de fonctionnement (ou POE-Post Occupancy Evaluation) sont menées. Ces évaluations consistent à suivre les consommations énergétiques d'un bâtiment réel, mais aussi à prendre en compte ses usagers, avec des questionnaires sur leurs perceptions et la régulation de leur environnement. Il apparaît que dans les bâtiments « verts » où les occupants disposent de plus de possibilités de modification des conditions ambiantes et d'opportunités adaptatives, ils sont en général plus satisfaits. A ceci s'ajoute aussi « l'effet pardon » : dans ces bâtiments spécifiques, les occupants peuvent supporter des dérives du climat pour des raisons écologiques [Deuble, 2012]. Si on transpose des techniques venant d'autres pays n'ayant pas les mêmes cultures,

modes de vie ou technologies, on aboutit à l'échec de certaines innovations. Pour ces études, la collaboration entre les physiiciens et les sociologues est totalement indispensable.

Des systèmes performants ont été développés dans le domaine des transports et permettent de créer des conditions thermiques qui conviennent globalement à toutes les personnes présentes et offrent de surcroît des moyens pour personnaliser l'environnement proche. Ceci peut être appliqué aux bâtiments. Des systèmes innovants se développent pour créer des « bulles de confort » qui sont alors beaucoup moins consommatrices d'énergie. Ces systèmes ont en plus l'avantage de pouvoir répondre aux souhaits personnels pour arriver à un confort individuel optimal [Quintela, 2000]. Avec les progrès de l'électronique, de l'automatique et de l'informatique, on est en capacité d'avoir plusieurs niveaux de régulation des équipements, pour répondre aux exigences des utilisateurs.

Perspectives et conclusions

Les études concernant l'habitat se sont considérablement affinées depuis quelques années et ont permis d'améliorer de façon sensible l'habitabilité, pour un coût d'utilisation constant. Cet effet se traduit par la nécessité de prendre en compte des variables de complexité croissante. Il ne s'agit plus de décrire une ambiance uniquement par ses caractéristiques

physiques, mais par l'impact que celles-ci ont sur l'habitant.

Pour réguler les ambiances au plus près des exigences de l'Habitant tout en veillant à minimiser les consommations énergétiques, il devient nécessaire d'agir conjointement sur plusieurs équipements et d'étudier simultanément « les confort des ambiances » : thermique, éclairage, acoustique, qualité de l'air [AFNOR, 2007]. Outre la régulation du système de chauffage ou de climatisation, il faut adapter le débit de ventilation au nombre d'occupants, piloter l'éclairage en fonction de l'éclairement naturel et de la présence d'occupants, de la mise en service et du réglage des protections solaires, etc. La régulation de ces équipements, dont la fonction est d'améliorer le confort, aura une influence en retour sur le bâtiment.

Il est fréquent que les scénarii de régulation imaginés par les concepteurs des systèmes produisent des effets mal acceptés par les habitants. Une période de réglage et d'adaptation, bien que rarement planifiée par la Maîtrise d'Ouvrage, s'avère désormais indispensable durant l'année qui suit la construction d'un bâtiment. Cependant, les conditions préférées de confort varient selon les individus. Il sera donc difficile d'adapter la régulation des systèmes pour des conditions idéales pour tous, ainsi qu'en témoigne l'échec du « tout domotique » constaté ces dernières années. L'automate parfait n'existant pas dans ce domaine, une possibilité de reprise en mains des réglages par l'habitant est indispensable. L'ergonomie des interfaces de réglages doit être étudiée avec soin. En effet, les thermostats programmables de première génération sont finalement plus utilisés que leurs homologues high-tech. La combinaison avec les automatismes requiert des dispositifs de gestion de priorités, de

temporisation... autant de notions dont l'acceptabilité par l'habitant est complexe à faire passer.

La consommation énergétique des bâtiments est le résultat de l'imbrication des deux systèmes énergétiques que sont l'Habitat et l'Habitant. Si le premier est considéré comme relativement bien cerné car dépendant seulement des lois de la Physique, le second montre encore de nombreuses inconnues, tant par son comportement que par le jugement qu'il porte sur son environnement. La nouvelle réglementation considère que les usagers ne doivent pas ouvrir les fenêtres en hiver, pourtant on sait pertinemment que ce ne sera pas accepté, et il est plus judicieux de prévoir un système qui coupe le chauffage en cas d'ouverture des fenêtres. Si la technologie semble au point, le défi à relever pour une bonne intégration de la régulation des systèmes habitat-habitant dans les bâtiments modernes nécessite des recherches approfondies dans le domaine des sciences humaines.

La réflexion peut même devenir encore plus complexe si on prend en compte d'autres éléments : la durée de vie d'un bâtiment est d'environ 50 ans, or le milieu professionnel ne s'approprie que lentement les nouvelles technologies et, pour les usagers, les modifications d'habitudes sociologiques, et donc d'acceptabilité, sont également très lentes. Il est illusoire de viser une baisse de la consommation énergétique sans intégrer les usagers. Le succès ne pourra venir qu'avec leur contribution. Il est donc temps que des études transdisciplinaires d'envergure soient menées, en collaboration avec des physiciens et des sociologues.

Françoise Thellier

PHASE¹ Université Toulouse III

1. L'auteur remercie Pr. Françoise Monchoux pour sa relecture attentive.