



HAL
open science

Adaptation du cadre bâti aux conditions climatiques actuelles et futures : le cas des canicules

Jean-Luc Salagnac

► **To cite this version:**

Jean-Luc Salagnac. Adaptation du cadre bâti aux conditions climatiques actuelles et futures : le cas des canicules. [Rapport de recherche] CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment. 2015. hal-01232773

HAL Id: hal-01232773

<https://cstb.hal.science/hal-01232773>

Submitted on 24 Nov 2015

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Maîtrise des risques

Adaptation du cadre bâti aux conditions climatiques actuelles et futures : le cas des canicules

SALAGNAC Jean-Luc

Juin 2015

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | www.cstb.fr

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Maîtrise des risques

**Adaptation du cadre bâti aux conditions
climatiques actuelles et futures :
le cas des canicules**

SALAGNAC Jean-Luc

Université Paris-Est, Centre scientifique et Technique du Bâtiment
Direction Economie et Sciences Humaines

Juin 2015

Remerciements à mes (ex)-collègues Jean-Marie Alessandrini, Morgane Colombert, Philippe Delpech et Emmanuelle Loyson pour leur relecture attentive et leurs conseils avisés.

© 2015 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence **Creative Commons Attribution 3.0 France (CC BY 3.0 FR)**

Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante :
<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/fr/legalcode>

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de :**

- partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
- remixer, adapter l'œuvre ;
- d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes :**

Attribution (paternité, crédit) : vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée son auteur ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).

Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme :

SALAGNAC J.L., Adaptation du cadre bâti aux conditions climatiques actuelles et futures : le cas des canicules, Rapport CSTB, juin 2015

⇒ **Comprenant bien que**

Les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :

- Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
- Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.

À chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web : <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/fr/>

Résumé

Le cadre bâti (bâtiments et réseaux les reliant (transport, énergie, eau,...)) est essentiel au fonctionnement des groupes humains. Il est par nature exposé aux phénomènes climatiques, évènements d'occurrence et d'intensité aléatoires.

Bien que réputé être adapté aux aléas climatiques actuels, la question se pose de l'adaptation du cadre bâti aux effets d'aléas modifiés (intensité, fréquence, durée) du fait du changement climatique en cours.

En s'appuyant sur une analyse de la situation actuelle concernant la prévention des dommages aux personnes et aux biens consécutivement à des aléas d'origine climatique, ce rapport explore les perspectives ouvertes par une modification de ces aléas.

Un chapitre est consacré à l'aléa canicule du fait de ses conséquences, principalement humaines, dans les villes qui concentrent désormais la majorité de la population.

Des suggestions d'actions contribuant à adapter le cadre bâti aux effets du changement climatique closent ce rapport.

Mots clés : changement climatique, vulnérabilité, assurance, prévention, canicule

Abstract

The built environment (buildings and connecting (transport, energy, water, etc) networks) is essential to the functioning of human groups. It is by nature vulnerable to random climatic events.

Although deemed relevant to current climatic conditions, the capacity of the built environment to face altered climatic hazards (intensity, frequency, duration) has to be investigated in the perspective of climate change.

Based on an analysis of the current situation regarding the prevention of damage to people and property consecutively to climate-induced hazards, this report explores opportunities created by a change of these hazards.

A chapter is devoted to the heat wave because of its consequences in the cities, which now account for the majority of the population.

Suggestions for actions contributing to adapt the built environment to climate change close this report.

Keywords: Climate change, vulnerability, insurance, prevention, heat-wave

Résumé long

Le cadre bâti représente un actif non financier considérable dont la préservation et l'entretien sont essentiels au fonctionnement des groupes humains. Il est par nature exposé aux phénomènes climatiques, événements d'occurrence et d'intensité aléatoires.

Les conséquences humaines et matérielles de ces événements climatiques peuvent être très importantes et concernent souvent des zones géographiques allant bien au-delà des zones directement touchées par les phénomènes météorologiques.

Les mécanismes d'assurance permettent un transfert, vers les compagnies d'assurance, des charges financières liées aux dommages difficilement supportables par les seuls individus.

La prévention est indispensable pour réduire les conséquences des aléas d'origine climatique (AOC). Elle contribue à réduire la vulnérabilité des enjeux¹ et à permettre une application non biaisée des mécanismes assuranciers.

L'expérience au cours des siècles passés, dans un contexte climatique relativement stable, a conduit les groupes humains à adapter la conception, la réalisation et l'entretien des constructions de manière à limiter les effets destructeurs des AOC.

La perspective du changement climatique (CC) dans les décennies à venir modifie cette donne. Malgré des incertitudes sur l'ampleur des modifications à venir, la fréquence, l'intensité, la durée des événements le cas échéant, pourraient localement augmenter ou diminuer au même horizon temporel.

Par ailleurs, sous l'effet des évolutions socio-économiques, les enjeux exposés aux AOC sont appelés à croître au cours des décennies à venir.

Ces perspectives plaident pour un renforcement des mesures de prévention déjà connues afin de mieux adapter le cadre bâti, c'est-à-dire réduire sa vulnérabilité aux effets des AOC, en lien avec ce qui est acceptable dans un territoire donné ou ce qui peut le devenir.

Ces évolutions doivent se faire en cohérence avec les mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Concernant plus particulièrement les canicules, les projections climatiques, tout en restant inévitablement entachées d'incertitudes spatiales et temporelles, font ressortir une forte probabilité d'augmentation de leur fréquence, de leur durée et de leur intensité sur le territoire national au cours des décennies à venir.

Compte tenu des effets potentiellement mortifères de tels événements, l'adaptation du cadre bâti aux effets de canicules est une priorité notamment en

¹ Le terme "enjeu" est employé dans ce document au sens que lui donnent les spécialistes du risque. Ce terme désigne ainsi ce qui est susceptible d'être affecté par des aléas (naturels, industriels, etc.), à savoir les vies humaines, les biens et richesses, les activités, l'environnement. (voir partie 1.2.2.3).

ville où le phénomène d'îlot de chaleur urbain vient renforcer les caractéristiques de cet AOC.

Un mode d'adaptation spontané de la population est le recours à des climatiseurs. Installés dans des conditions sous-optimales, ces équipements peuvent certes contribuer à aider la population à supporter les fortes chaleurs mais au prix d'une dépense d'énergie inconsidérée. Cette dépense est elle-même contre performante puisqu'elle occasionne un surcroît d'émissions de GES qui vient renforcer les mécanismes du CC.

Face à cette situation des actions à caractère opérationnel (Plan canicule) ont été lancées suite notamment à la canicule d'août 2003 et font l'objet d'évaluation.

Des actions de recherche sont également en cours qui visent à éclairer les choix à effectuer tant en matière d'organisation de la société qu'en matière de techniques constructives.

L'adaptation aux effets du changement climatique n'est pas un « choc » pour la construction, c'est en revanche un défi. Nombre d'outils et de savoir-faire sont à portée de main compte tenu de l'expérience acquise par les constructeurs au fil du temps pour réaliser un cadre bâti adapté aux effets des AOC actuels. Un saut qualitatif est cependant rendu nécessaire pour construire des ouvrages offrant de manière pérenne des performances plus élevées que celles des bâtiments actuels, du fait de la modification probables des AOC.

La perspective du CC peut être ainsi vue comme une chance pour le secteur en « obligeant » à mieux construire (accroissement des exigences réglementaires relatives aux performances des ouvrages, amélioration du respect des règles de construction, contrôle plus efficient de ces règles, « éducation » des clients à être plus exigeants).

Les actions engagées et à venir concernent pour une grande part des sujets d'organisation et pour une moindre part des sujets techniques. Il est en effet peu probable que la réflexion sur l'adaptation du cadre bâti aux effets du CC débouche sur des innovations fortes remettant en cause des savoir-faire constructifs élaborés au cours des siècles. Le tissu professionnel et l'économie du secteur sont profondément structurés par cette histoire qui avance à son propre pas. En revanche, le développement du numérique débouchera sûrement sur des améliorations des savoir-faire et de l'organisation de la prévention.

Executive Summary

The built environment represents a significant non-financial asset the preservation and maintenance of which are essential to the functioning of human groups. It is inherently vulnerable to random climatic phenomena.

Human and material consequences of such climate events can be very important and often involve geographic areas extending well beyond the areas directly affected by these events.

Corresponding financial losses can be unbearable by individuals or companies alone. Insurance mechanisms transfer the risk of such financial losses as a result of specified but unpredictable events from an individual or company to an insurer in return for a premium.

Prevention is essential to reduce impacts of climate-induced hazards. It helps reduce the vulnerability of exposed buildings and networks. It also allows an unbiased implementation of insurance-mechanisms.

Experience over the past centuries, in relatively stable climatic conditions, has led human groups to adapt the design, the construction and the maintenance of buildings to limit the destructive effects of climate-induced hazards.

The prospect of climate change in the coming decades, changes this situation. Despite uncertainties about the extent of future changes, the frequency, intensity, duration events if any, could locally increase or decrease at the same time horizon.

Moreover, under the impact of socio-economic developments, the stakes exposed to climate-induced hazards are expected to grow over the coming decades.

These prospects call for a strengthening of the already known prevention measures to better adapt the built environment, i.e., reduce its vulnerability to the effects of climate-induced hazards in connection with what is acceptable in concerned territories.

These developments must be consistent with mitigation of emissions of greenhouse gases.

Climate projections, while remaining inevitably subject to spatial and temporal uncertainties, show a strong likelihood of increased frequency, duration and intensity of heat waves in France over the coming decades.

The phenomenon of urban heat island reinforces potential deadly effects of such events in cities. Adapting urban built environment then becomes a priority.

A spontaneous adaptation mode of the population is the use of air-conditioners. Set in sub-optimal conditions, these devices can certainly contribute to help people withstand extreme heat but at the cost of a reckless energy consumption. This consumption causes greenhouse gases addition that strengthens CC mechanisms.

Operational actions (heat wave plan) aiming to face such situations were launched in particular following the August 2003 heat wave and are being evaluated.

Research actions are also underway to clarify choices and decisions to be made both in terms of organisation of society and in terms of construction techniques.

Adaptation to climate change is not a "shock" for the construction industry, it is however a challenge. Number of tools and know-how are available. They come from the experience gained by the construction industry over time to achieve a built environment adapted to the effects of current climate-induced hazards. A qualitative leap is nevertheless necessary to construct works with perennially

higher performance than existing buildings, because of the probable change of climate-induced hazards.

The prospect of climate change can thus be seen as a chance for the construction sector in "forcing" to improve performances of the built environment (increase in regulatory requirements for the performance of the works, improvement of compliance with building regulations, more efficient controls of these rules, "education" of customers to be more demanding).

To a large extent, on-going and future actions concern organisational issues and to a lesser extent technical subjects. It is indeed unlikely that thinking about the adaptation of the built environment to the effects of climate change leads to major innovations challenging constructive know-how developed over the centuries. The construction sector organisation and economy are deeply structured by this long story. Nevertheless, the development of digital technology is likely to lead to improvements in expertise and organisation of prevention.

Table des matières

INTRODUCTION.....	12
1. CADRE BATI ET CLIMAT	15
1.1 Le cadre bâti	15
1.2 Les AOC et leurs effets.....	16
1.2.1 Phénoménologie	16
1.2.2 Typologies des effets	18
1.2.3 Coûts des dommages	21
1.3 Prévention des effets des Aleas d'Origine Climatique	22
1.3.1 Principes de prévention.....	22
1.3.2 Rôle des personnes dans la prévention	25
1.3.3 Evolution de la prévention	25
2. CADRE BATI ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	31
2.1 Evolution du cadre bâti	31
2.1.1 Evolution quantitative	31
2.1.2 Evolution qualitative	32
2.2 Evolution des Aleas d'origine climatique.....	35
2.2.1 Connaissances actuelles.....	35
2.2.2 Attribution des changements climatiques	36
2.3 Adaptation, atténuation	37
2.3.1 Atténuation : une dynamique en cours.....	38
2.3.2 Adaptation : de quoi parlons-nous?	39
2.3.3 Adaptation du cadre bâti	41
2.3.4 Adaptation-atténuation : une question de cohérence	44
3. CADRE BATI ET CANICULES	47
3.1 Canicule : définition, évolutions	47
3.2 Îlot de chaleur urbain	48
3.3 Canicule et santé	51
3.4 Canicule et consommation énergétique	52
3.4.1 Enseignements de la canicule 2003	52
3.4.2 Réponses réglementaires	53
3.4.3 Projets de recherche.....	54
4. ADAPTATION DU CADRE BATI AUX EFFETS DES CANICULES	57
4.1 Principes d'Adaptation aux effets des canicules.....	57
4.1.1 Adaptation ancestrale	57
4.1.2 Adaptation spontanée	61
4.1.3 Adaptation planifiée.....	62
4.2 (Rétro)-Innovation	65
4.2.1 Echelle individuelle	68
4.2.2 Echelle du bâtiment et de son environnement immédiat.....	70
4.2.3 Echelle du quartier	73
4.2.4 Echelle de la ville	74
CONCLUSION-RECOMMANDATIONS	76
LISTE DES REFERENCES.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Effets sur les réseaux des principaux AOC (source CSTB)	17
Tableau 2 : Effets sur les bâtiments des principaux AOC (source CSTB).....	17
Tableau 3 : Typologie des AOC par étendue spatiale et effets sur les bâtiments (source CSTB)	19
Tableau 4 : Conséquences humaines et assurancielles de quelques événements récents (source FFSA 2009, FFSA-Gema 2011, FFSA-Gema 2013)	21
Tableau 5 : Textes de référence pour la prise en compte des principaux AOC dans la conception des bâtiments	24
Tableau 6 : Pour quelques AOC, possibilités d'actions des personnes suivant les phases d'un événement en fonction de leur rôle	27
Tableau 7 : Fonctions d'usage (adapté de [Gobin 2003])	33
Tableau 8 : Production de GES et consommation d'énergie finale à l'échelle mondiale en 2010 (d'après Giec-WG3 2014, chapitre 9)	38
Tableau 9 : Production de GES et consommation d'énergie finale à l'échelle nationale en 2012 (d'après SOeS 2014)	39
Tableau 10 : Rôle des principaux paramètres gouvernant le développement de l'ICU	50
Tableau 11 : Effets mortifères de canicules en France (adapté de Rey et al. 2007)	51
Tableau 12 : Actions de la Commission Européenne dans le domaine de l'adaptation aux effets du changement climatique	66
Tableau 13 : Suggestions d'améliorations pour une meilleure prise en compte des effets des AOC (source CSTB)	78

Liste des figures

Figure 1 : Echelles de temps géologique/climatique/anthropologique	12
Figure 2 : Evolution du flux/du stock de logements entre 1980/83 et 2014 (source Insee)	15
Figure 3 : Notion de vulnérabilité aux effets des AOC	19
Figure 4 : Indices des effets d'AOC sur le nombre de décès (quantitatif) et les impacts sur les ouvrages (qualitatif) (source CSTB)	20
Figure 5 : Exemple de carte d'aléa RGA (commune de Salagnac [Dordogne]), (source www.argiles.fr)	22
Figure 6 : Laisse de crue de la Seine en 1910 à Paris (photo CSTB)	26
Figure 7 : Courbe de Farmer adaptée (source Mission Risques Naturels [MRN])	28
Figure 8 : Projection de la surface de logements à horizon 2050 (source Carbone4 2014)	31
Figure 9 : Projection de la surface de bâtiments tertiaires chauffés à horizon 2050 (source Carbone4 2014)	32
Figure 10 : Adaptation et atténuation des émissions de GES (source CSTB)	37
Figure 11 : Estimation de l'incidence du changement climatique sur le montant d'indemnités d'assurances (d'après FFSA 2009)	42
Figure 12 : Installation sans aucune précaution de climatisation individuelle dans un immeuble de bureaux (source : CSTB)	45
Figure 13 : Interactions atténuation-adaptation.....	46
Figure 14 : Résultats de modélisation des canicules futures sur la région parisienne obtenus à l'aide de plusieurs modèles climatiques.....	47
Figure 15 : éléments du bilan énergétique diurne et nocturne d'un mur.....	49
Figure 16 : La formation de l'ICU (source CSTB).....	50

Figure 17 : Excès de décès observé quotidiennement et relevé de températures extérieures diurnes et nocturnes durant la canicule du 1 au 15 août 2003, (Source : Hémon, Jouglà, 2003).....	51
Figure 18 : Installation de climatiseurs dans des conditions sous-optimales dans des commerces.....	53
Figure 19 : Projets de recherche avec participation CSTB.....	55
Figure 20 : Tours à vent (<i>bâdgîr</i>).....	58
Figure 21 : Principe de circulation d'air par tirage thermique dans le vieux Nice	58
Figure 22 : Stores extérieurs et couleurs claires (Séville : source CSTB).....	59
Figure 23 : Toitures blanchies, faible surface vitrée et... forte inertie thermique (source CSTB)	59
Figure 24 : Environnement immédiat des bâtiments (Séville : source CSTB)	59
Figure 25 : Vélums couvrant rue et cour intérieure (Séville : source CSTB).....	60
Figure 26 : Répartition du parc résidentiel collectifs/individuels suivant période de construction (adapté de [Rage 2012])	62
Figure 27 : Mise en œuvre de mesures individuelles d'adaptation à des périodes chaudes à Séville (source CSTB)	69
Figure 28 : De l'usage perfectible des moyens dont disposent les constructeurs (Séville, source : CSTB).....	72
Figure 29 : Exemples de mesures d'adaptation à l'échelle du quartier (Séville, source : CSTB)	73
Figure 30 : Impact visuel de trois options technologiques possibles (source CSTB)	77

INTRODUCTION

Les bâtiments et les infrastructures (routes, ponts, gares, etc.) sont par nature exposés aux agents climatiques. Cette réalité incontournable est prise en compte de longue date par les constructeurs qui savent dimensionner des ouvrages offrant à leurs usagers des conditions d'occupation et d'utilisation à la hauteur de leurs attentes, notamment en matière de sécurité et d'ambiance (intérieure/extérieure).

Le climat est quant à lui, par essence, variable dans le temps et dans l'espace. Des mécanismes d'évolution naturels sont connus, que l'action anthropique ne saurait influencer comme les mouvements relatifs de la terre et du soleil, les nuages de poussières générés par des éruptions volcaniques, la collision avec des corps célestes.

Les échelles de temps de ces événements ne sont cependant pas celles de nos sociétés. Evènements fugitifs très rares ou bien à la dynamique très lente (sur plusieurs dizaines ou centaines de milliers d'années), leurs effets n'ont pas affecté durablement la vie des groupes humains depuis leur sédentarisation au néolithique. On ne saurait bien entendu nier les effets (bénéfiques et néfastes) de la variabilité naturelle du climat, mais la relative stabilité climatique des derniers siècles a indéniablement contribué au développement de nos sociétés (Le Roy Ladurie 2009).

Cette **dimension temporelle est essentielle** pour appréhender la question des impacts du changement climatique (CC) en cours sur les sociétés, en particulier par l'intermédiaire de ses effets sur les bâtiments, les infrastructures et les activités humaines qu'ils permettent d'exercer (Figure 1).

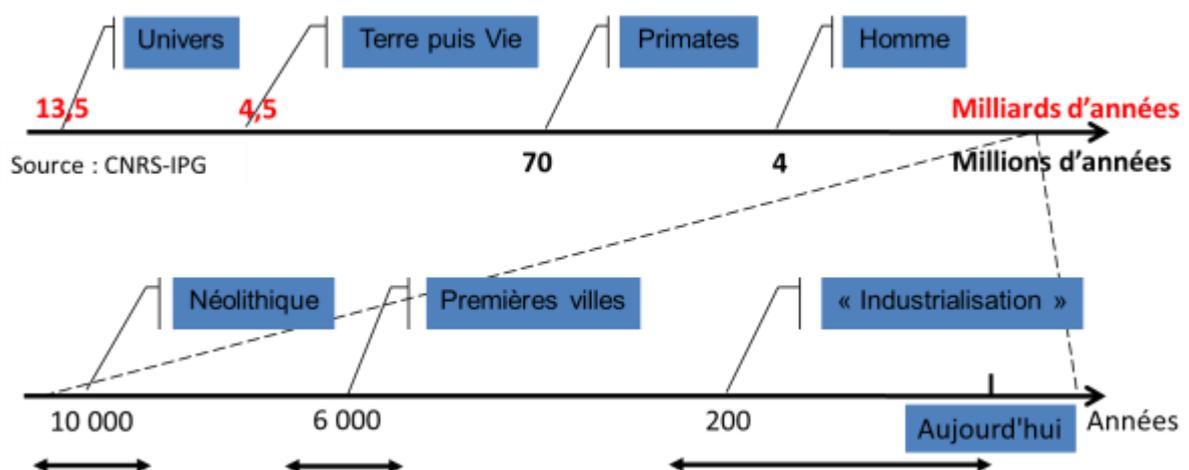


Figure 1 : Echelles de temps géologique/climatique/anthropologique

La dynamique contemporaine du CC devient quant à elle difficile à nier compte tenu de l'avancée des connaissances.

Synthèse du foisonnement de travaux scientifiques fondés sur des observations, des analyses, des simulations numériques, le cinquième rapport (Fifth assessment report : AR5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) vient conforter les conclusions des précédents rapports publiés par cette instance depuis sa création en 1988 et parmi elles, l'origine anthropique des changements en cours.

Le groupe de travail numéro un du Giec (WG1) s'intéresse à la compréhension des mécanismes physico-chimiques en jeu. Le rapport du WG1-AR5 du Giec résume ainsi les connaissances scientifiques actuelles (Giec-WG1 2013) :

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté.

Le forçage radiatif total est positif et a conduit à une absorption nette d'énergie par le système climatique. La plus grande contribution à ce forçage radiatif provient de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ depuis 1750.

Ces travaux n'épuisent bien évidemment pas le sujet et il est essentiel de les poursuivre pour améliorer la connaissance, confirmer ou éventuellement remettre en cause des résultats précédemment acquis.

« *Lutter contre le changement climatique* » est devenu en peu de temps une expression très médiatisée. Mais luttons-nous de la même manière contre un adversaire selon qu'il est indépendant de nous ou que son existence même résulte en grande partie de nos propres actions ?

Le premier chapitre de ce rapport traite du premier volet de cette question en exposant comment le climat, considéré jusqu'à un passé récent comme indépendant de l'activité humaine, a été et est encore pris en compte dans la construction des ouvrages.

Le deuxième chapitre traite du second volet de la question. Etant donné que « *la plus grande contribution à ce forçage radiatif provient de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ depuis 1750* » et que les ouvrages de construction sont, essentiellement par leur utilisation, des contributeurs massifs de gaz à effet de serre (GES), les possibilités d'actions pour contrer les effets induits par une nouvelle donne climatique y sont exposées et analysées.

La double nature des bâtiments, à la fois émetteur de GES et potentiellement vulnérables aux aléas d'origine climatique (AOC), induit une double orientation de la lutte contre le réchauffement climatique (atténuation et adaptation) dont la cohérence est au cœur des actions futures.

Parmi les évolutions possibles des AOC, celles relatives à la température ressortent des modèles climatiques avec un plus fort indice de confiance que pour d'autres (précipitations, vent par exemple). Ceci incite à un examen détaillé des conséquences, déjà observées en France, de périodes de chaleur intense, ainsi que des solutions apportées en divers lieux dans le monde où ces situations, parfois extrêmes, sont connues de longue date. C'est l'objet du chapitre 3.

La croissance observée et à venir de la population mondiale vivant en zone urbaine invite à examiner de manière critique au chapitre 4 différentes voies d'adaptation à des situations résultant de la conjonction de cette situation démographique et d'une augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur à horizon de quelques décennies.

Une série de recommandations clôt le rapport.

Ce document est nourri de la synthèse de recherches menées depuis 2002 au CSTB dans le cadre du projet interne IC3B (Impact du changement climatique sur le cadre bâti) en partenariat avec d'autres centres de compétences notamment à l'occasion de projets collaboratifs de recherche.

Le champ d'investigation du présent rapport concerne une partie du domaine « bâtiment-infrastructure », nommée « cadre bâti » et définie au chapitre 1.

1. CADRE BATI ET CLIMAT

1.1 LE CADRE BÂTI

Le cadre bâti, composé des bâtiments et des réseaux (aériens, de surface et souterrains) qui les relient fournit l'infrastructure nécessaire à toute activité des groupes humains.

Les bâtiments procurent de nombreux services permettant aux occupants de vaquer à leurs occupations dans une ambiance adaptée tout en étant protégés (jusqu'à un certain point), ainsi que leurs biens, des effets des aléas d'origine anthropique (explosions, incendies) ou naturels dont les AOC.

Les réseaux sont indispensables au transport des personnes, des biens, de l'énergie, de l'eau, des déchets, de l'information.

Au-delà des fonctions techniques, le cadre bâti est également fortement attaché à des dimensions culturelles dont l'architecture est l'une des expressions.

Le cadre bâti, résultat de l'accumulation au fil du temps des constructions privées et publiques, représente des actifs non financiers considérables. Fin 2013, la valorisation des logements, des autres bâtiments et des ouvrages de génie civil s'élevait à 6 100 milliards d'euros, soit 45 % des actifs non financiers et 17 % du total des actifs financiers et non financiers nationaux (Insee 2014).

La croissance en volume de cet actif avec le temps est faible. Pour le logement, le parc a ainsi augmenté de 1% par an en moyenne au cours des trente dernières années (Insee 2015) et le flux de constructions neuves est très sensible à la conjoncture (Figure 2), comme l'est également le flux des constructions non résidentielles.

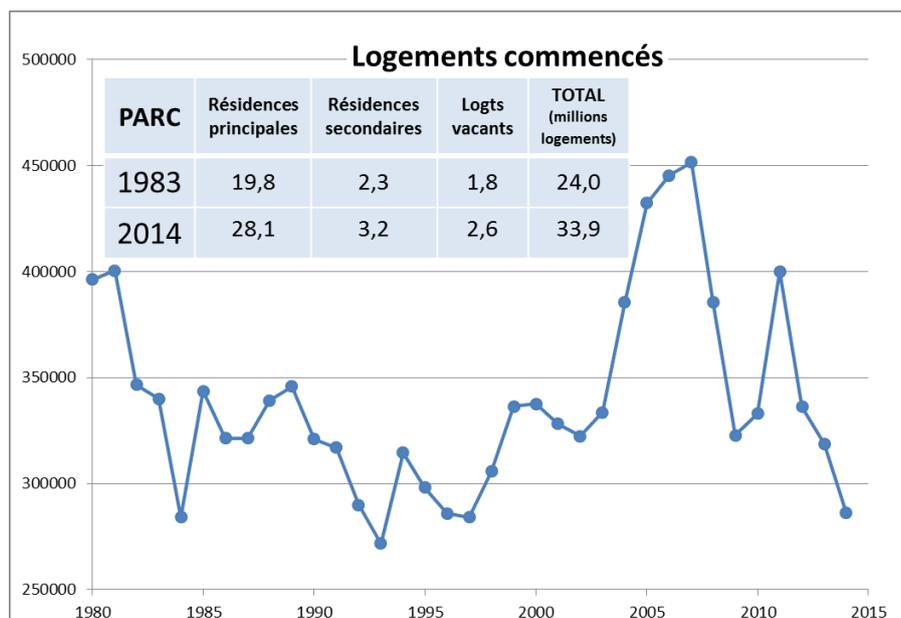


Figure 2 : Evolution du flux/du stock de logements entre 1980/83 et 2014 (source Insee)

Une caractéristique des éléments du cadre bâti est leur **longue durée de vie** qui s'étend de quelques décennies à plusieurs siècles. Durant ces longues périodes, ces éléments font l'objet de travaux d'entretien et de transformations parfois très importantes (restructurations, ajouts...). Une faible partie (mal documentée) est démolie (Berland-Berthon A. 2004).

La construction fait appel à une **large palette de procédés et de matériaux** suivant les époques et les lieux. Une grande ville comme Paris témoigne de cette variété comme le révèle le travail de datation et d'analyse du bâti réalisé par l'Agence parisienne d'urbanisme (Apur 2007).

Dans les zones périurbaines ou rurales où les maisons individuelles représentent plus de 50% des logements, les maçonneries de petits éléments en béton ou terre cuite, suivant les régions, sont largement majoritaires.

Construire est un acte risqué financièrement et techniquement. Concernant ce dernier aspect, l'Agence qualité construction (AQC) analyse les pathologies constatées dans le cadre du système assurantiel en vigueur en France. Il ressort des statistiques pluriannuelles une identification des conséquences et des causes des sinistres les plus fréquents et les plus coûteux, en fonction de la destination des bâtiments. (AQC-1 2013).

1.2 LES AOC ET LEURS EFFETS

1.2.1 PHÉNOMÉNOLOGIE

L'histoire est jalonnée de fréquents rendez-vous entre le cadre bâti et les AOC, comme les **tempêtes**, parfois concomitantes avec de fortes marées comme lors de l'évènement Xynthia les 27 et 28 février 2010, les fortes **crues** de la Garonne en juin 1875, de la Loire en septembre 1866, de la Seine en janvier 1910, en passant par les **orages violents** entraînant **inondation torrentielles** et **glissement de terrain** notamment dans des territoires du sud-est de la France (Nîmes le 3 octobre 1988, Draguignan le 15 juin 2010), sans oublier les **cyclones/ouragans** touchant les territoires ultramarins, ni la **tornade** d'Hautmont du 3 août 2008, ni les **vagues de chaleur** de 1947, 1976, 1989, 2003, 2006 et les **vagues de froid** de 1954, 1956, 1963, 1985.

Ces évènements fournissent une bonne connaissance qualitative des conséquences des AOC sur le cadre bâti. **L'entretien de la mémoire de ces évènements passés constitue un élément essentiel pour appréhender les évènements à venir.**

La combinaison des facteurs météorologiques fondamentaux (température, précipitations, vent) auxquels s'ajoutent selon les circonstances d'autres facteurs comme la foudre permet de décrire les principaux AOC.

Sans prétendre à l'exhaustivité les Tableau 1 et 2 présentent des effets qualitatifs observés des AOC sur les réseaux et sur les bâtiments. La suite du rapport concernera pour l'essentiel les bâtiments et incidemment les réseaux.

Tableau 1 : Effets sur les réseaux des principaux AOC (source CSTB)

Facteur météorologique fondamental	Température					Précipitations	Vent	Autres facteurs météorologiques	
Aléa impactant (combinaison facteurs fondamentaux)	Vague de froid	Canicule Îlot de chaleur urbain	Pluie Humidité / Salinité des ambiances	Neige	Pluie givrante Grêle	Mouvement de terrain	Inondation (crue, côtière, ruissellement urbain...) Pluie battante, cyclone	Vent fort Tempête Tornado	Foudre Rayonnement UV
Effets sur les réseaux aériens	Contraction éléments métalliques	Dilatation câbles, caténares	Corrosion	Rupture par surcharge pondérale	Déstabilisation des fondations des supports	Endommagement par fatigue / Destruction partielle ou totale			
Effets sur les réseaux de surface	Fissurations dues au gel	Déformation chaussée, voie ferrée	Perturbation de service (chaussée glissante, congères)		Déformation chaussée	Coupure de chaussées, voies ferrées	Perturbation	de service	
Effets sur les réseaux souterrains	Rupture				Rupture par déformation du sol	Ennoyage Rupture par poussée hydrostatique			

Tableau 2 : Effets sur les bâtiments des principaux AOC (source CSTB)

Facteur météorologique fondamental	Température					Précipitations	Vent	Autres facteurs météorologiques		
Aléa impactant (combinaison facteurs fondamentaux)	Vague de froid	Canicule Îlot de chaleur urbain	Pluie Humidité / Salinité des ambiances	Neige	Pluie givrante Grêle	Mouvement de terrain	Inondation (crue, côtière, ruissellement urbain...) Pluie battante, cyclone	Vent fort Tempête Tornado	Foudre Rayonnement UV	
Effets sur les usagers et le cadre bâti	Confort intérieur et extérieur Santé			Sécurité	Sécurité, santé					
	Consommation d'énergie		Condensation	Charges mécaniques,	Défaut de ventilation				Perturbations électromagnétiques, Dommages mécaniques, chimiques... Incendie	
	Contraintes mécaniques, dilatation		Infiltrations	Givrage	Charges mécaniques Destruction partielle ou totale (immobilier et mobilier)					
			Corrosion	Blocage de mécanismes						
	Sollicitations mécaniques sur structure (retrait-gonflement des argiles)			Infiltrations						
	Incendie (foyer externe)				Chocs/bris					

1.2.2 TYPOLOGIES DES EFFETS

1.2.2.1 Typologie par nature des effets

Les effets des AOC sur les bâtiments et leurs occupants relèvent de deux catégories :

1. **Effets essentiellement mécaniques** dus aux sollicitations des structures des bâtiments et des réseaux par des forces liées à la poussée/dépression du vent sur les parois, aux tensions/compressions dans les murs du fait du retrait/gonflement des argiles (RGA) ou du gel/dégel du sol, à l'accumulation d'eau ou de neige sur les toitures, à la poussée statique/dynamique de l'eau sur les murs, à l'affouillement des fondations, aux chocs de corps flottants lors d'inondations, à l'impact de grêlons, à la dilatation thermique de rails ou de caténares pour se limiter à ces seuls exemples.

Des ouvrages de bâtiment ou de réseaux peuvent être ruinés par de tels effets qui sont la plupart du temps concomitants à la manifestation de l'AOC. Des personnes peuvent être victimes lors d'effondrements d'ouvrages consécutifs à ces fortes sollicitations.

2. **Effets essentiellement non mécaniques** liés par exemple au contact prolongé des ouvrages avec l'eau (chargée de matières minérales et organiques) lors d'inondation ou à des ambiances extrêmes (froid/chaud).

Le contact prolongé des ouvrages et équipements avec l'eau occasionne des dégâts parfois différés (dissolution des sels minéraux pouvant affecter les propriétés des matériaux, développement de moisissures pouvant affecter la santé des occupants), en particulier à l'intérieur des bâtiments.

Les températures extrêmes affectent peu de manière directe les ouvrages de bâtiment. En revanche les occupants peuvent être durement touchés du fait des conditions de vie devenues temporairement difficiles.

1.2.2.2 Typologie par étendue spatiale

La spatialisation des effets des AOC est typique de leur nature. Les bassins versants ou les zones côtières sont les lieux privilégiés des inondations. La nature géologique du sous-sol renseigne sur la propension locale au risque RGA (Tableau 3).

Les cartes des zones de vent et des zones climatiques qui accompagnent les réglementations (neige et vent, thermique) sont basées sur des observations et des mesures pendant de longues durées, qui permettent d'accéder à une connaissance statistique des paramètres principaux des tempêtes (vitesse, direction du vent) ou des évolutions de température (moyennes sur des durées variables). Cependant, la survenue de tempêtes, de vagues de chaleur ou de froid peut s'écarter notablement de ces observations.

Tableau 3 : Typologie des AOC par étendue spatiale et effets sur les bâtiments (source CSTB)

	Effets mécaniques prépondérants	Effets mécaniques non prépondérants
Fortement spatialisé	RGA Inondation torrentielle Inondation côtière Précipitation neige	Crue lente
Faiblement spatialisé	Vent Précipitation grêle	Vague de froid Vague de chaud

Ces éléments doivent rendre prudent quant à la définition de mesures de réduction de la vulnérabilité du cadre bâti aux AOC. Même une forte spatialisation des aléas ne met pas à l'abri de survenue d'évènements à des endroits où ils n'étaient pas attendus. Des mesures de prévention et de protection peuvent dès lors être mises en défaut au moment où elles sont supposées être efficaces.

1.2.2.3 Typologie par conséquences humaines et matérielles

L'ensemble des bâtiments et réseaux composant le cadre bâti, ainsi que les personnes qui les utilisent constituent des **enjeux exposés** aux AOC dès lors qu'ils sont susceptibles d'être affectés et de subir des préjudices ou des dommages. Ces derniers sont fonction de la vulnérabilité des enjeux (Figure 3).

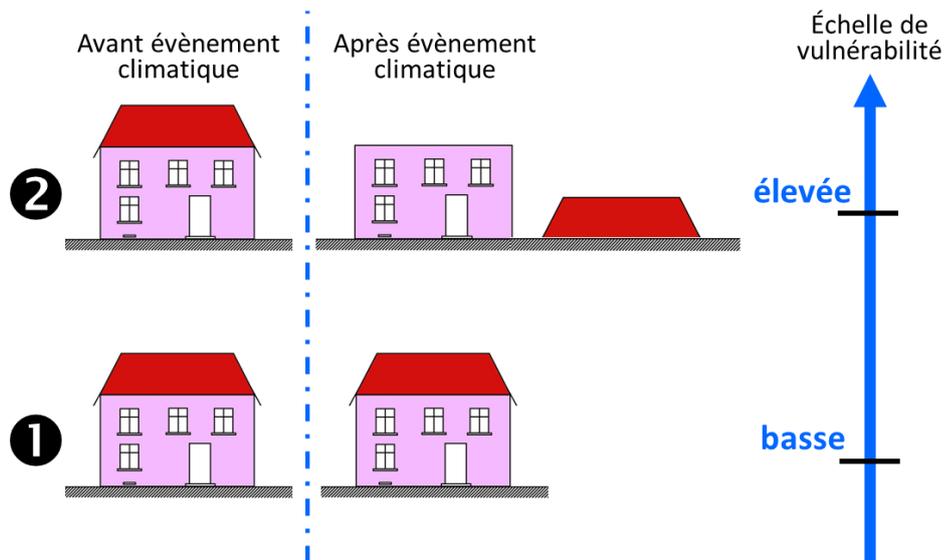


Figure 3 : Notion de vulnérabilité aux effets des AOC

Les deux enjeux sont exposés au même AOC. L'enjeu 1 subit moins de dommages que l'enjeu 2. Il est de ce fait moins vulnérable que l'enjeu 2 pour le niveau d'aléa considéré.

L'information des individus sur les AOC et leurs conséquences, leur comportement lors d'évènements climatiques, leur agilité à réagir sont parmi les facteurs conditionnant leur vulnérabilité.

La conception, la réalisation, l'entretien des ouvrages constituant le cadre bâti sont parmi les facteurs conditionnant leur vulnérabilité.

Ainsi, le nombre de décès occasionnés lors d'évènements climatiques est très variable en fonction des AOC et varie également lors d'AOC « comparables » comme présenté Figure 4 où est également indiquée une plage qualitative de niveaux de destruction des bâtiments.

Ce dernier indicateur concerne les seules atteintes aux bâtiments (et aux réseaux) en tant que construction mais n'intègre pas les effets induits par ces dommages aux biens sur l'activité du groupe humain (circulation des biens et des personnes, fonctionnement des réseaux, production et échange de biens ...).

Ces effets peuvent être plus ou moins importants localement mais également dans des zones éloignées non touchées directement par l'évènement climatique du fait de l'interaction et des liens de dépendance entre les territoires.

L'activité d'une région, voire d'une partie du monde, peut ainsi être fortement altérée du fait de la défaillance de la production d'un bien situé dans une zone touchée par un AOC (Gleyze et al. 2010).

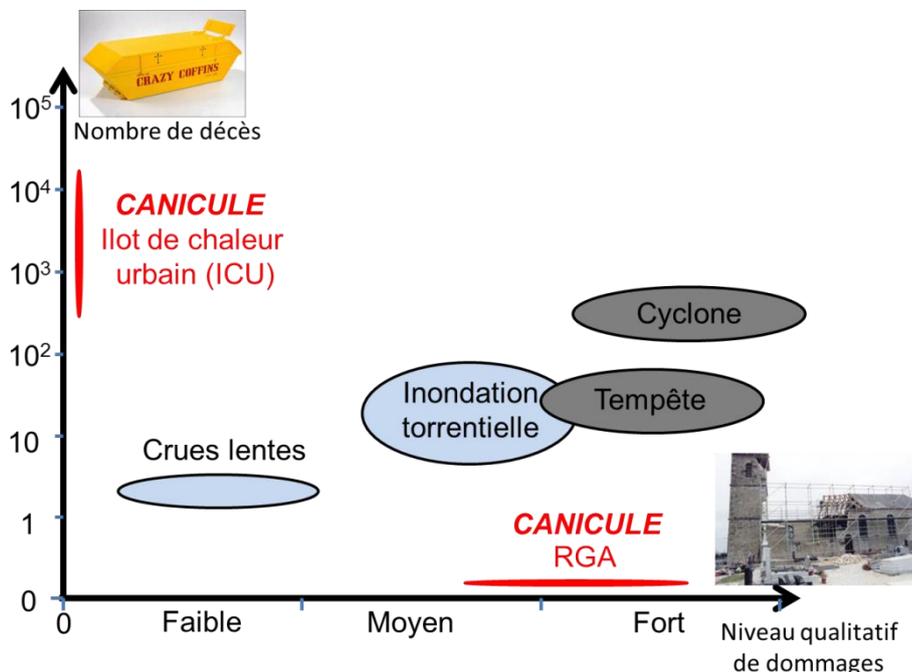


Figure 4 : Indices des effets d'AOC sur le nombre de décès (quantitatif) et les impacts sur les ouvrages (qualitatif) (source CSTB)

1.2.3 COÛTS DES DOMMAGES

La quantification des conséquences humaines et matérielles des AOC sur le cadre bâti sur le territoire national est documentée notamment par le biais de l'assurance (Tableau 4).

Une vision élargie au monde entier est fournie par la base de données Emergency Events Database (EM-Dat) créée en 1988 par le Centre for research on the epidemiology of disasters (Cred) (www.emdat.be)². Les réassureurs publient également des données sur ces événements à l'échelle mondiale comme par exemple le service NatCatSERVICE de Munich RE (www.munichre.com), Swiss-re (www.swissre.com/sigma/) ou la Scor (<http://scor.com/fr/sgrc/non-vie/cat-nat.html>).

En France, afin d'améliorer la connaissance des risques et de faciliter l'échange entre acteurs, l'Observatoire national des risques naturels (ONRN : www.onrn.fr) a été créé en 2012.

Tableau 4 : Conséquences humaines et assurancielles de quelques évènements récents
(source FFSA 2009, FFSA-Gema 2011, FFSA-Gema 2013)

Date	Evènement	Nombre de morts	Coût pour les assureurs (M€)	Estimation période de retour (ans)
Décembre 1999	Tempêtes Lothar et Martin	32	6 900	120
Août 2003	Canicule	15 000	1 100 (RGA*)	20
Janvier 2009	Tempête Klaus	12	1 600	-
Février 2010	Tempête Xynthia	53	1 500	>100
Juin 2010	Inondation dans le Var	23	500	10 à 20
* : en l'occurrence retrait et non gonflement				

Le cumul des coûts assurancielles sur la période 1988-2011 en France ressort comme suit (FFSA-Gema 2013):

- Tempêtes : 25 Md € au titre du régime d'assurance Tempête-Grêle-Neige (TGN)
- Inondation : 10 Md € au titre du régime d'assurance catastrophes naturelles (CAT-NAT),
- Retrait-gonflement des argiles (RGA) : 7 Md € au titre du régime d'assurance CAT-NAT.

Rappelons que les dommages assurés sont estimés à environ 40 à 60 % des dommages effectifs.

² Les URL cités dans ce rapport sont valides à la date du 20 juin 2015

1.3 PREVENTION DES EFFETS DES ALEAS D'ORIGINE CLIMATIQUE

1.3.1 PRINCIPES DE PREVENTION

Prévenir les conséquences des AOC est un objectif que s'assignent les groupes humains. De la limitation des dommages aux personnes et aux biens découle la pérennité de l'activité et de la vie en société.

La prévention repose sur plusieurs éléments dont :

- la **connaissance de l'aléa** notamment par le biais du traitement statistique de données historiques, de la mémoire individuelle et collective, de l'histoire locale, de la cartographie des niveaux probables d'aléa adaptée à chaque type d'AOC (Figure 5) ;

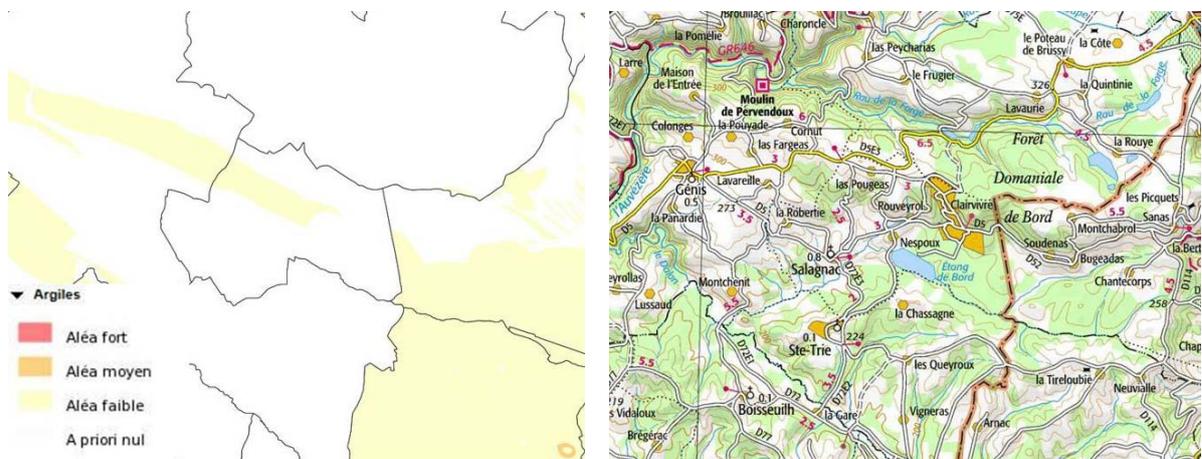


Figure 5 : Exemple de carte d'aléa RGA (commune de Salagnac [Dordogne]), (source www.argiles.fr)

- la **transmission de cette connaissance** à tous les acteurs impliqués dans un projet de construction et au cours de la vie des ouvrages notamment lors de mutations de propriété ;
- l'**évaluation des enjeux** et de leur **vulnérabilité** vis-à-vis des AOC locaux. L'évaluation des risques qui résultent de l'analyse de ces éléments doit être actualisée régulièrement pour tenir compte des évolutions du cadre bâti sous l'effet de l'évolution démographique et de l'activité économique, de l'évolution des technologies de construction et des moyens d'accès à l'information par les acteurs ;
- la définition de **règles de conception et d'entretien des ouvrages** permettant de limiter, **à un coût acceptable**, la vulnérabilité des enjeux ;
- la **diffusion de ces règles** auprès des acteurs de la construction et le **contrôle de leur application** afin d'apporter d'éventuels ajustements de conception/mise en œuvre ;
- la définition de **règles de gestion des événements** (avant, pendant, après), la **diffusion de ces règles** auprès des acteurs locaux et l'organisation de **retours d'expérience** permettant de tirer les enseignements de chaque événement afin d'améliorer la prévention.

A chacun de ces éléments correspond, en France et dans les pays de niveau de développement comparable, une abondance de textes réglementaires, de circulaires, de guides, de recommandations. En se limitant à la France et aux aspects touchant à la conception des seuls bâtiments, le Tableau 5 propose une présentation de tels documents et de leur objet pour les principaux AOC.

Par ailleurs, des sources d'informations générales sur les risques naturels (www.prim.net, <http://www.onrn.fr/>, <http://www.mrn.asso.fr/>, <http://afpcn.org/>) ou spécifiques à quelques AOC (inondation/RGA : www.georisques.gouv.fr, <http://cartorisque.prim.net/index.html>) sont aisément accessibles.

Des **dispositifs de diffusion d'information** sont destinés à alerter de l'imminence d'évènements météorologiques www.vigicrues.gouv.fr, <http://vigilance.meteofrance.com/>.

Sur la base de toutes ces informations, des plans d'actions sont éventuellement déclenchés aux échelles territoriales adaptées à un évènement particulier.

Bien qu'elle en constitue une composante fondamentale, **la seule technique constructive ne saurait cristalliser les principes de prévention**. La culture, les modes de vie font que chaque groupe humain apprécie ce qui est « acceptable » et ce qui est « inacceptable » en matière de conséquences des AOC locaux.

La **notion d'acceptabilité** se révèle en effet être centrale pour définir des mesures de prévention en un lieu donné. Le Comité de la prévention et de la précaution précise ces notions en distinguant deux niveaux d'acceptabilité définissant trois zones (CPP 2013) :

- *une zone dans laquelle le risque est en dessous d'un niveau largement considéré comme « acceptable », sous réserve des dispositions assurantielles et de premiers secours convenables (par exemple une inondation de 20 cm tous les vingt ans) ;*
- *à l'opposé une zone dans laquelle le risque est au-dessus d'un niveau unanimement considéré comme « intolérable » (par exemple, des morts par inondation tous les ans dans une zone donnée), et pour lequel l'ensemble des parties prenantes conviendrait de la nécessité de déployer des programmes de prévention, même si leur coût est élevé ;*
- *entre ces deux zones se situe le niveau de risque qu'on pourrait appeler « alarmant », suscitant la plus grande diversité de points de vue et dans l'abord duquel il n'est ni possible, ni nécessaire de chercher à supprimer ces divergences.*

Dans cette dernière zone se situent les évènements rares, mais aux conséquences possiblement graves ou au contraire de gravité plus modérée mais dont la fréquence de survenue serait élevée. C'est pour ces effets que la réponse à la question du niveau de ressources à mobiliser pour la prévention est la plus difficile à instruire.

Tableau 5 : Textes de référence pour la prise en compte des principaux AOC dans la conception des bâtiments

AOC	Textes de référence (liste non exhaustive)	Objet
Neige	Eurocode 1 partie 1-3	Détermination des actions de la neige pour le calcul structurel des bâtiments
Vent	Eurocode 1 partie 1-4	Détermination des actions du vent pour le calcul structurel des bâtiments
Température	Eurocode 1 partie 1-5	Détermination des actions thermiques et de leurs variations pour le calcul des bâtiments et structures
Inondation	Plan de Prévention des Risques Naturels (PPR)	Le PPR est un document réalisé par l'Etat qui réglemente l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions (par exemple, descente des fondations au-delà de la zone sensible à la dessiccation du sol)
Retrait-Gonflement des Argiles (RGA)	DTU 13-11	Conditions techniques applicables aux travaux de fondations superficielles
	DTU 13-12	Règles de calcul applicables aux travaux de fondations superficielles en béton, béton armé constituées par des semelles isolées, des semelles filantes, des radiers généraux et des massifs semi-profonds
	DTU 20-1	Clauses techniques types d'exécution d'ouvrages de parois et murs de bâtiments en maçonnerie traditionnelle de petits éléments.
« Température » (vague de froid/ de chaud)	RT 2012	<p>La réglementation thermique 2012 comporte :</p> <ul style="list-style-type: none"> • trois exigences de résultats : <ul style="list-style-type: none"> ○ besoin bioclimatique, ○ consommation d'énergie primaire, ○ confort en été. • quelques exigences de moyens comme l'affichage des consommations par exemple ou encore des baies avec une capacité minimale à se protéger du rayonnement solaire, et une surface minimale des baies qui doivent s'ouvrir pour évacuer la chaleur ; <p>Elle contient également des éléments de conception relatifs au confort thermique d'été comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • un indicateur sur le confort thermique estival (Tic) calculé sur la journée la plus froide parmi les cinq plus chaudes d'une année.

1.3.2 RÔLE DES PERSONNES DANS LA PRÉVENTION

Une utilisation judicieuse des outils de prévention est de nature à limiter les conséquences des AOC. Il est cependant irréaliste de penser éviter tout dommage ou tout préjudice : il reste une part aléatoire inéluctable liée à de multiples possibilités d'écart par rapport aux règles de prévention. Ecart dont les sources sont également foisonnantes : lacunes de connaissances (imperfection des règles), difficulté d'accès à l'information, mauvaise interprétation de l'information, non-respect de consignes, erreurs de conception, défauts de mise en œuvre, manque d'entretien des ouvrages pour se limiter aux plus courantes.

La prise en charge des conséquences matérielles et immatérielles d'un AOC peut dépasser les capacités des personnes concernées. Les mécanismes assuranciers permettent de transférer cette charge financière vers les sociétés d'assurance.

En France, le principe d'une contribution obligatoire de tout détenteur d'une police d'assurance de biens est introduit par la Loi. En assurant ses biens contre l'incendie, les dégâts des eaux..., l'assuré est automatiquement couvert contre les dégâts dus aux catastrophes naturelles (Cat-Nat). La couverture d'assurance Cat-Nat, les conditions de mise en œuvre de ces mécanismes assurantiels ainsi que leurs limites sont portés à connaissance des assurés (FFSA 2015).

Si chaque nouvel événement climatique rappelle les imperfections des mesures de prévention et surtout de leur mise en œuvre, il faut rappeler que les bâtiments composant le cadre bâti sont le résultat de décisions et d'actions conscientes de nombreux acteurs qui prennent part à l'acte de construire, occupent les bâtiments et les entretiennent.

L'implication de tous ces acteurs est très variable en fonction des AOC et intervient à des moments différents et pour toute une gamme de niveaux de compétences et de responsabilités comme le présente sommairement pour quelques exemples le Tableau 6.

Ce tableau rappelle que l'efficacité des mesures de prévention ne résulte pas des seules dispositions constructives mais dépend également fortement de l'organisation des acteurs, de leur préparation à la gestion des événements.

Les contraintes pesant sur tout projet de construction ne se limitent bien évidemment pas aux seuls effets potentiels d'AOC. Aussi, les actions de prévention sont-elles à définir en tenant compte de multiples facteurs propres à chaque opération dont l'économie du projet, les services attendus, la localisation, l'environnement sans oublier l'acceptabilité du risque (voir 1.3.1).

1.3.3 ÉVOLUTION DE LA PRÉVENTION

Les dispositions techniques et d'organisation prises pour limiter les dommages aux personnes et aux biens consécutifs aux effets des AOC ont été élaborées et ajustées au fil du temps en procédant par essais et correction des erreurs : chaque événement est en effet riche d'enseignements quant aux mesures de prévention qui s'avèrent être efficaces ou perfectibles.

Ce processus d'évolution, qui s'étale sur des siècles, participe indéniablement d'une démarche d'adaptation du cadre bâti et de ses occupants/usagers aux conditions climatiques qui prévalent en un lieu donné. La relative stabilité des climats locaux au cours des siècles passés a permis de définir des modes constructifs et d'organisation adaptés à ces conditions.

L'observation de la variété des formes architecturales et urbaines sur le globe atteste de la capacité d'adaptation sur le long terme des groupes humains à différents climats (Griffiths 1976). En combinant économiquement les ressources disponibles localement, ces formes ont pu être définies, testées, améliorées au cours des siècles jusqu'à composer les paysages traditionnels des différents territoires.

Les savoir-faire techniques associés se sont transmis entre les générations de constructeurs et ont évolué sous l'effet d'une meilleure compréhension des phénomènes en jeu par le biais des progrès des connaissances scientifiques et techniques. Il en est ainsi par exemple de l'élaboration des règles de dimensionnement des ouvrages (voir encadré Règles neige et vent en fin de partie).

Les comportements face aux risques se sont transmis entre les générations d'occupants/usagers du cadre bâti par le biais de l'éducation, de la formation, de l'information faisant référence, par exemple, aux événements passés dont les traces peuvent être (rendues) visibles dans l'environnement (Figure 6).



Figure 6 : Laisse de crue de la Seine en 1910 à Paris (photo CSTB)

Tableau 6 : Pour quelques AOC, possibilités d'actions des personnes suivant les phases d'un évènement en fonction de leur rôle

Phase évènement	Acteur	A O C	Effets mécaniques prépondérants			Effets mécaniques non prépondérants	
			Vent	Inondations avec effets dynamiques	RGA	Vague de froid/ de chaud	Inondations sans effets dynamiques
Avant	Maître d'ouvrage		Choix de l'implantation Plan masse		Reconnaissance nature sous-sol	Forme et environnement urbains	Choix de l'implantation
	Constructeurs		Respect des règles constructives (très peu développées pour les inondations ¹)				
	Occupants		Entretien courant des ouvrages pour pérenniser leurs performances (mécaniques)	Vérification périodique des conditions d'accès et de l'équipement des zones refuge	Limiter les actions aggravantes (choix des plantations)	Vérification périodique des installations de chauffage/ rafraichissement/ ventilation /protection solaire	Vérification et entraînement périodique au montage des dispositifs de protection.
Alerte			Préparation à rejoindre une zone refuge éventuelle		Sans objet	Préparation individuelle et collective (plan canicule)	Installation dispositifs de protections
Pendant			Attente en zone refuge de l'intervention des équipes de secours		Mesures conservatoires éventuelles	Importance du comportement individuel et de l'entourage	Evacuation (éventuellement maintien si conditions le permettent)
Après	Occupants/ Collectivité		Remise en état		Renforcement fondations/ structure	-	Remise en état
Après-après			Retour d'expérience / Amélioration règles et mise en œuvre des mesures de prévention				

¹ Voir (SALAGNAC et al. 2014)

La transmission au fil du temps de connaissances évolutives est un processus complexe qu'il est essentiel d'entretenir pour rendre efficaces les dispositions de prévention.

Compte tenu de la croissance continue des enjeux exposés aux AOC et dans la perspective d'une évolution climatique, les assureurs poursuivent leur réflexion et ont notamment défini des domaines d'intervention suivant la fréquence et la sévérité des évènements (Figure 7).

Ces différents niveaux d'intervention, qui vont de l'individu à la solidarité internationale en passant par l'assurance, ne sont pas sans rappeler les niveaux de risque acceptable définis par le Comité de la prévention et de la précaution évoqué précédemment (1.3.1).

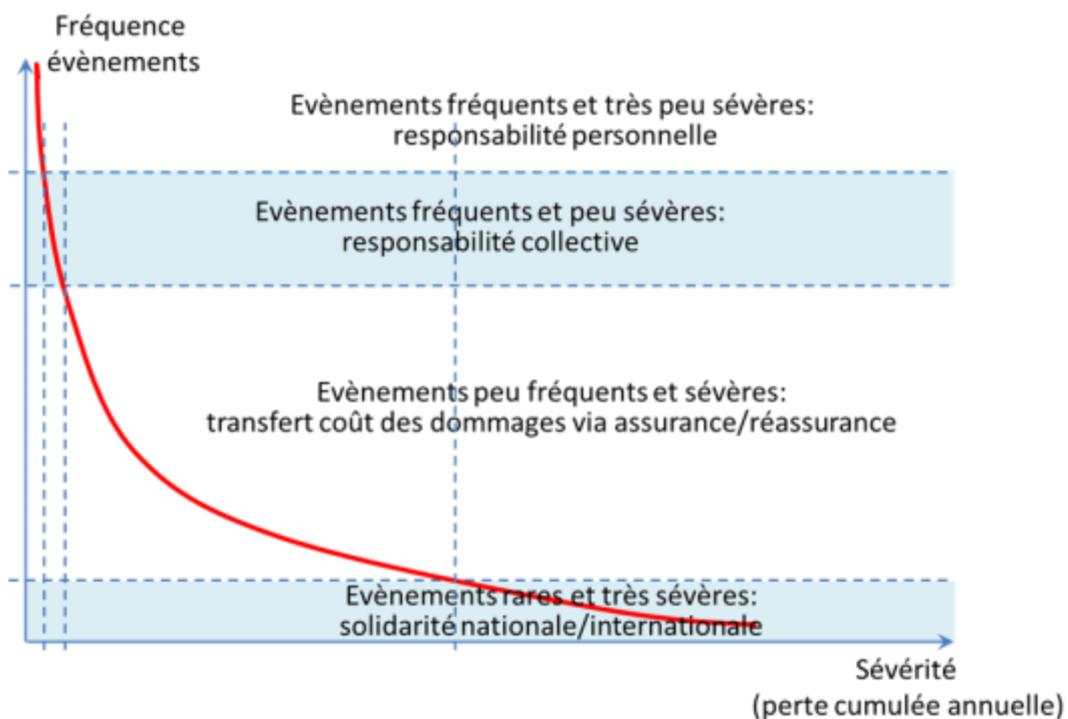


Figure 7 : Courbe de Farmer adaptée (source Mission Risques Naturels [MRN])

Brève histoire des fondements des règles « neige et vent » (volet vent)

Source : Jacques. Biétry, ingénieur retraité du CSTB et pionnier des travaux sur les effets du vent et de la neige sur les bâtiments et structures

Date	Etape/Règles	Description
1946	Première esquisse / Règles NV46	<ul style="list-style-type: none"> • Commission présidée par Albert Irénée CAQUOT (1881-1976) • Faute d'archives météorologiques, une carte des vents forts est établie à dire d'experts (l'approche probabiliste est donc absente) • Recours à des coefficients aérodynamiques mesurés en soufflerie (de type « aéronautique », sans turbulence)
1965	Révision et perfectionnement / Règles NV65	<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'esprit des théories de calcul aux états limites, introduction des notions de : <ul style="list-style-type: none"> • « vent normal » : fréquence journalière de 3/1000 • « vent extrême » : celui que la construction risque de subir → définition irréaliste ; d'où introduction d'un coefficient 1,75 sur les charges (V^2) entre vent extrême et vent normal • Révision de la carte de 1946 sur la base d'observations faites entre 1949 et 1961 • Elargissement de la gamme des coefficients aérodynamiques mesurés en soufflerie (toujours de type « aéronautique », sans turbulence)
Années 1970	Nouvelles méthodes d'étude	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de l'approche probabiliste du vent fort, et semi-probabiliste de la sécurité des constructions • Apparition des souffleries « atmosphériques » simulant le vent naturel et sa turbulence
2005-2008	Harmonisation européenne / Eurocode 1, Annexe nationale	<ul style="list-style-type: none"> • Vent de référence : atteint avec une probabilité annuelle de 2% (vent cinquantennal) • Meilleure fiabilité des mesures (collaboration Météo-France - CSTB) • Raffinement des approches statistiques ; cartographie par « krigeage » (méthode statistique développée par l'industrie pétrolière) ; prise en compte de la direction et de la saisonnalité du vent (études CSTB) • Etude spécifique des cyclones tropicaux: approche par simulation [Réunion] et données historiques [Antilles] • Recours à des coefficients aérodynamiques mesurés en soufflerie « atmosphérique » simulant le vent naturel • Meilleure prise en compte des phénomènes d'excitation dynamique par la turbulence et par les tourbillons dans le sillage des constructions

Cadre bâti et climat : l'essentiel

Le cadre bâti représente un actif non financier considérable dont la préservation et l'entretien sont essentiels au fonctionnement des groupes humains.

Il est par nature exposé aux phénomènes climatiques, évènements d'occurrence et d'intensité aléatoires.

Les conséquences humaines et matérielles de ces évènements climatiques peuvent être très importantes et concernent souvent des zones géographiques allant bien au-delà des zones directement touchées par les phénomènes météorologiques.

Les mécanismes d'assurance permettent un transfert, vers les compagnies d'assurance, des charges financières liées aux dommages difficilement supportables par les seuls individus

La prévention est indispensable pour réduire les conséquences des AOC. Elle contribue à réduire la vulnérabilité des enjeux et à permettre une application non biaisée des mécanismes assuranciers.

L'expérience au cours des siècles passés, dans un contexte climatique relativement stable, a conduit les groupes humains à adapter la conception et la réalisation des constructions de manière à limiter (mais pas à annuler) les effets destructeurs des AOC.

2. CADRE BATI ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

2.1 EVOLUTION DU CADRE BATI

2.1.1 EVOLUTION QUANTITATIVE

Si les tendances démographiques observées jusqu'ici se prolongent, la France métropolitaine comptera 73,6 millions d'habitants en 2060, soit 11,8 millions de plus qu'en 2007 (Insee 2010). En même temps que des nouveaux logements rendus nécessaires seront construits, une grande partie du parc existant sera rénovée alors qu'une petite partie sera démolie.

Au-delà du nombre de logements, leur surface est un paramètre conditionnant la croissance quantitative du parc. Le vieillissement de la population, l'évolution des modes de vie (pratique du télétravail, familles recomposées, taille des foyers, etc.) sont autant de facteurs influents.

Suivant les scénarios retenus dans le cadre du Débat national sur la transition énergétique (DNTE), la proportion de maisons individuelles (de surface statistiquement supérieure à celle des logements collectifs [Insee 2008]) influe fortement sur l'évolution quantitative du parc.

Une image de cette évolution est donnée Figure 8 suivant quatre scénarios sous-tendus par des stratégies d'évolution de la demande et de la production énergétique à l'horizon 2050.

La surface supplémentaire projetée en 2050 se situe entre 500 et 1100 millions de mètres carrés par rapport à 2010 où le parc de logements était de 2500 millions de m².

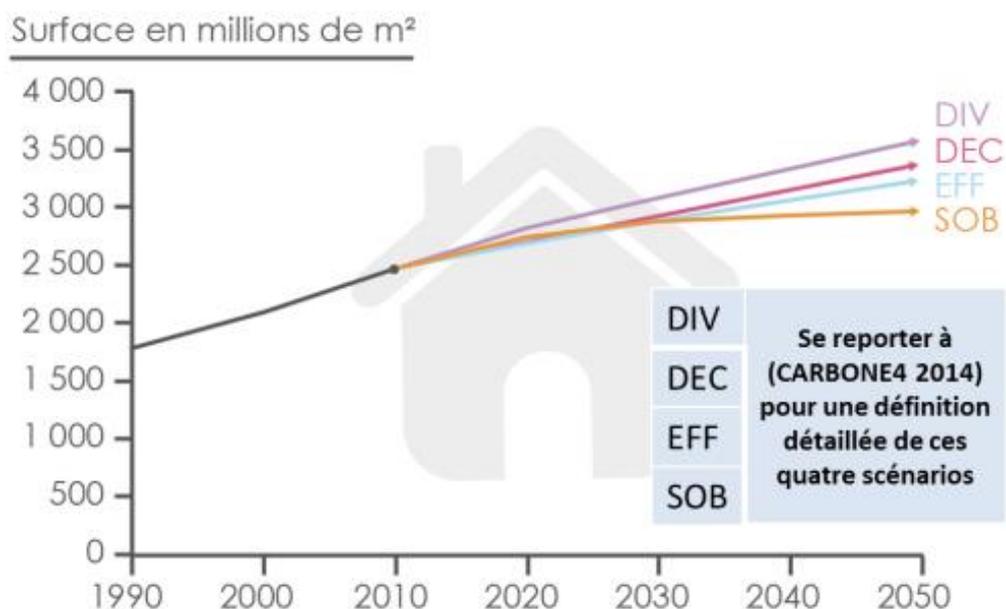


Figure 8 : Projection de la surface de logements à horizon 2050 (source Carbone4 2014)

Pour ce qui est du parc tertiaire la Figure 9 présente des projections d'évolution des surfaces de bâtiments chauffés suivant les même quatre scénarios. Des facteurs communs à ceux qui président à l'évolution du parc de logements (vieillessement de la population par exemple) ainsi que des facteurs propres au secteur (surface moyenne nécessaire à l'activité par employé) gouvernent ces évolutions.

De 900 millions de m² environ en 2010 les projections oscillent entre 950 et 1350 millions de m² à horizon 2050.

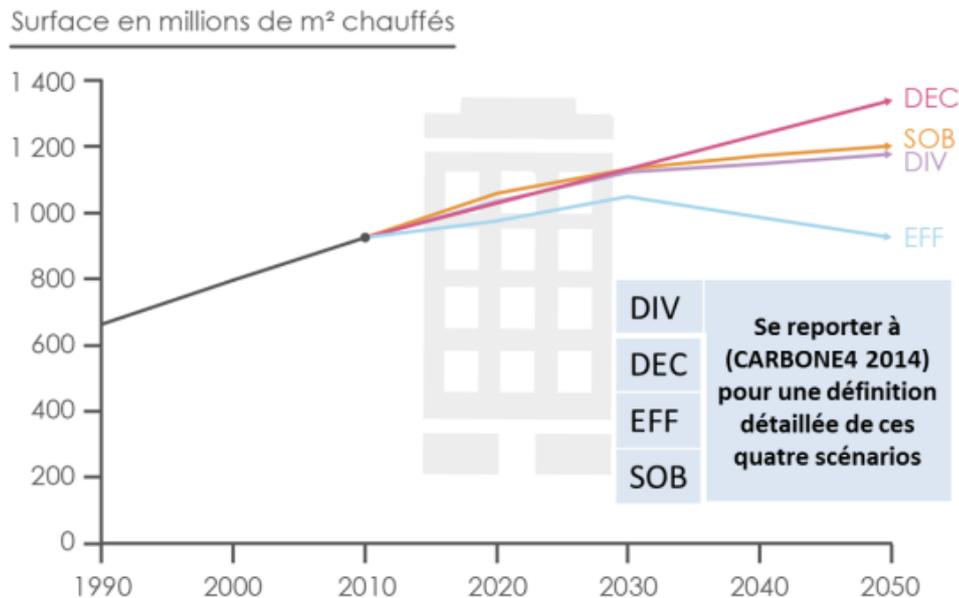


Figure 9 : Projection de la surface de bâtiments tertiaires chauffés à horizon 2050 (source Carbone4 2014)

2.1.2 EVOLUTION QUALITATIVE

Le bâtiment reste en apparence constitué des mêmes principaux éléments depuis des siècles voire des millénaires : des fondations, des murs, des portes, des fenêtres, des planchers, une toiture, des réseaux d'alimentation et d'évacuation, des équipements adaptés à la destination prévue par et pour les usagers/occupants.

Le recours à la notion de fonction d'usage permet de relier cette liste finie d'ouvrages à l'infinie variété des formes des bâtiments en service. Un jeu de sept fonctions d'usage a été proposé (Gobin 2003) qui permettent d'explicitier les fonctionnalités traduisant les attentes des usagers/occupants, indépendamment des contraintes constituées par les éléments extérieurs (climat, environnement géographique, social, réglementaire...) (Tableau 7).

Forts de ce jeu de fonctions explicitées, les acteurs du projet sont à même de définir un bâtiment, c'est-à-dire de préciser, pour chaque activité dont il sera le support, les niveaux de performance attendus pour chacune des sept fonctions d'usage.

Tableau 7 : Fonctions d'usage (adapté de [Gobin 2003])

Fonction	Description du service rendu par l'habitat
Fournir les espaces pour mener des activités	permet à l'utilisateur de disposer d'espaces nécessaires pour accomplir différentes actions menées soit à l'intérieur du groupe familial, soit avec des personnes extérieures
Protéger les biens et outils ainsi que le groupe humain	permet à l'utilisateur de préserver (mais aussi d'utiliser) ses biens et ses outils malgré les diverses agressions climatiques, d'environnement ou d'actions volontaires d'autres personnes.
Mettre à disposition les biens et outils	permet à l'utilisateur d'utiliser les outils nécessités par ses activités et de profiter de ses biens.
Fournir une ambiance	permet à l'utilisateur d'adapter l'ambiance intérieure en fonction de l'ambiance extérieure.
Maîtriser les relations	permet à l'utilisateur de filtrer, d'empêcher ou de favoriser ses contacts avec les autres personnes de l'extérieur et avec les éléments naturels de son environnement
Tirer parti du site	permet à l'utilisateur de vivre dans un site sans lui porter atteinte
Fonction sémiologique	qualité du vécu de l'habitat par l'utilisateur. C'est donc ce qui fait la différence entre une somme aride de composants techniques et l'appropriation de l'habitat.

Assurer ces fonctions relève pour partie de l'application des lois de la physique et pour partie de la prise en compte de données culturelles propres à chaque groupe humain, notamment pour ce qui est de l'expression des aspects « sensibles » qui lient l'occupant à l'espace (Chemillier 19935; Periañez 2013).

L'économie des projets ordinaires permet rarement la mise en œuvre complète d'une telle approche. La réglementation applicable aux bâtiments est un moyen économique de définir des réponses acceptables pour un « usager statistique » et reproductibles pour nombre de projets. Elle est un vecteur privilégié de l'évolution qualitative des bâtiments.

D'un côté, la réglementation concerne des caractéristiques de bâtiments quantifiables et vérifiables à la conception et éventuellement après construction (résistance mécanique, isolation thermique, isolation acoustique). De l'autre, elle traduit des attentes sociales telles l'amélioration de l'isolement acoustique entre logements voisins ou vis-à-vis de l'extérieur ou encore la limitation de la consommation d'énergie.

A une période où la préservation des ressources (énergie, matériaux, eau...) prend une importance croissante, l'approche par fonction d'usage pourrait cependant retenir l'attention des constructeurs pour définir les niveaux de performances. Ainsi, les ressources (techniques, financières...) seraient réparties au mieux dans le but d'en tirer le meilleur usage.

Dans la perspective qu'une telle approche « orientée usages » soutiendrait l'évolution qualitative des bâtiments, les paragraphes suivants proposent de revenir sur l'évolution de l'art de construire au XX^e siècle pour situer le chemin à parcourir.

L'ère industrielle a en effet apporté, dès la fin du XIX^e siècle, des techniques inédites permettant de nouvelles formes et des performances jusque-là insoupçonnées dans le bâtiment. Citons par exemple des percées technologiques majeures comme la climatisation (1902) introduite par Willis Haviland Carrier (1876-1950), le verre *float* (1960) innovation de Sir Alastair Pilkington (1920-1995), les isolants thermiques minéraux (Saint Gobain, vers 1930) et plastiques (vers 1960).

La relative abondance d'énergie à faible coût a accompagné ces développements qui ont conduit à radicalement modifier une partie des éléments du cadre bâti traditionnel, en particulier depuis le début de la seconde moitié du XX^e siècle (tours de bureaux et de logements survitrés, galeries commerciales climatisées en toutes saisons sous toutes latitudes par exemple, sans oublier la possibilité de créer une station de ski couverte en plein désert chaud). Ces projets ne sont-ils pas très éloignés d'une **approche fonctionnelle** au service d'une préservation des ressources, à moins bien sûr de considérer que le but recherché consiste à gâcher un maximum de ressources ?

Une autre partie importante du parc est restée proche des solutions traditionnelles, tirant toutefois parti des nouveaux produits et procédés de construction issus des innovations évoquées, au profit d'une amélioration des performances techniques et notamment énergétiques.

Des évolutions économiques et sociétales majeures ont également marqué de leur empreinte les changements observables du cadre bâti au cours des dernières décennies : chocs pétroliers des années 1970, remise en cause des modèles d'habitat des décennies 1970-1980, croissance des préoccupations environnementales des années 1990, émergence des problématiques liées au CC dans les années 2000.

D'autres éléments comme la croissance démographique et l'augmentation de la population urbaine ont par ailleurs contribué à faire évoluer le cadre bâti tant pour ce qui est de la forme et de l'aménagement intérieur des bâtiments que pour ce qui est des formes urbaines.

Au prix d'un investissement dans des systèmes techniques et d'une dépense d'énergie de fonctionnement indolore compte tenu du prix peu élevé de l'énergie, ces évolutions ont modifié l'état préexistant pour ce qui est des conditions d'ambiance intérieure. Ce n'est qu'à partir de 2001, avec la création de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI, www.oqai.fr) que la qualification de l'ambiance à l'intérieur des bâtiments est devenue un sujet d'étude scientifique. Les résultats de l'OQAI contribuent à éclairer d'un jour nouveau des problématiques essentiellement traitées jusqu'alors sous l'angle énergétique.

Le cadre bâti qui résulte de ces évolutions technologiques est-il pour autant mieux adapté qu'auparavant aux effets des AOC ? De fréquents événements (inondations, canicule, tempêtes...) viennent rappeler à nos sociétés la portée et les limites des mesures constructives et de planification urbaine ainsi que des mesures organisationnelles destinées à réduire la vulnérabilité du cadre bâti à ces aléas. Le cadre bâti est adapté jusqu'à une certaine limite.

2.2 EVOLUTION DES ALEAS D'ORIGINE CLIMATIQUE

2.2.1 CONNAISSANCES ACTUELLES

Les AOC fondamentaux (vent, précipitation, température) résultent de l'état thermodynamique du système atmosphère compte tenu notamment des conditions de forçage radiatif. Celles-ci venant à être modifiées sous l'effet de divers facteurs, au premier rang desquels l'augmentation de concentration des GES, il peut en résulter des variations des AOC fondamentaux et, partant, des AOC impactant le cadre bâti (tempêtes, ouragans/cyclones, vagues de chaleur, inondations...).

La très probable émergence d'une nouvelle donne climatique ne devrait ainsi pas modifier la nature des AOC que nous connaissons actuellement, mais ils pourront cependant être ici plus intenses, plus longs, plus fréquents et là moins intenses, moins longs, moins fréquents qu'actuellement sans que ceci compense cela pour autant.

Certains territoires pourront être le siège de manifestations climatiques inhabituelles localement mais actuellement connues dans d'autres lieux. Des recherches sont actuellement menées pour affiner ces projections spatiales et temporelles.

Dans l'état actuel des connaissances, les projections climatiques pour la France métropolitaine font ressortir les principales tendances suivantes (DGEC 2011, DGEC 2012-1, DGEC 2012-2, DGEC 2014, <http://www.drias-climat.fr/>) :

- une forte augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été ;
- une diminution des extrêmes froids ;
- un renforcement du taux de précipitations extrêmes sur une large part du pays, mais avec une forte variabilité régionale ;
- une augmentation des épisodes de sécheresse dans une large partie sud du pays, mais pouvant s'étendre à l'ensemble du pays ;
- pas d'augmentation marquée de la fréquence et de l'intensité des tempêtes avec des vents forts pouvant se renforcer dans certaines régions mais diminuer ailleurs sans variations importantes ;
- pour ce qui est des épisodes de pluies diluviennes du sud-est de la France, le message est complexe parce que les modèles climatiques régionaux ne permettent pas encore de reproduire les cumuls de précipitations observés en raison de leur résolution trop grossière (avec des dimensions de mailles d'au mieux une dizaine de kilomètres). Ils permettent cependant de simuler des événements réalistes à l'échelle de l'arc méditerranéen. Ces modèles indiquent une augmentation des événements extrêmes en intensité et en fréquence dans un climat plus chaud, comme dans la plupart des régions continentales de moyenne latitude, en accord avec ce qui est écrit plus haut concernant les taux de précipitations extrêmes (fraction des pluies tombant sous forme d'événements extrêmes). Cette augmentation est limitée, typiquement de quelques % par degré de réchauffement moyen en France pour ce qui concerne l'intensité.

Au-delà de la variabilité naturelle du climat, la manifestation de certains AOC est donc susceptible d'être significativement différente de celle à laquelle nous sommes habitués sur le territoire national. Au-delà de l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée de certains AOC, la proximité temporelle probable (quelques décennies) à laquelle ces changements sont susceptibles de survenir et de se maintenir aux cours des décennies et siècles à venir constitue un facteur inédit à l'échelle de nos sociétés désormais majoritairement urbaines (Véron 2007).

Cette rapidité contraste avec le temps long (des siècles) qui a prévalu lors de la mise au point des solutions actuelles utilisées par le secteur de la construction, si l'on fait exception bien sûr du siècle passé qui a vu, comme rappelé en 2.1.2, des évolutions rapides dans un contexte économique favorable, probablement furtif à l'échelle de l'Histoire.

2.2.2 ATTRIBUTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Nombreuses sont désormais disponibles les publications destinées à expliquer au plus grand nombre les mécanismes des changements climatiques, les incertitudes des projections à des horizons temporels qui paraissent lointains à l'échelle d'une vie humaine, les conséquences possibles des AOC futurs (Onerc 2014, Ademe 2012).

La communication relative à ces matières est chose difficile. Elle doit se positionner entre des récits extrêmes et opposés allant du négationnisme au catastrophisme. Ces extrêmes bornent un domaine de débats qui doivent avoir lieu afin de conforter les résultats pertinents issus des observations et des recherches et expliquer les raisons du rejet de certaines hypothèses.

En 2010, l'Académie des sciences a été saisie par la ministre de l'Enseignement supérieur et de la recherche de l'organisation d'un de ses débats (AcadSciences 2010). Les trois premiers points de la conclusion du rapport qui en est résulté articulent des faits qui confirment le rôle premier des GES et en particulier du CO₂ :

- *Plusieurs indicateurs indépendants montrent une augmentation du réchauffement climatique de 1975 à 2003 ;*
- *Cette augmentation est principalement due à l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère ;*
- *L'augmentation de CO₂ et, à un moindre degré, des autres gaz à effet de serre, est incontestablement due à l'activité humaine.*

Ces conclusions ont depuis été entérinées avec la publication du cinquième rapport du Giec. Si l'attribution, au moins partielle, des probables changements climatiques à l'activité de nos sociétés ne fait plus guère débat, l'attribution de tel événement extrême à ces changements climatiques reste un sujet de recherche.

Chaque AOC majeur impactant le cadre bâti a tendance à être présenté dans les médias comme une « preuve » du changement climatique. Le faible nombre d'occurrence ne permet pas scientifiquement de confirmer de telles affirmations. Des événements extrêmes ont eu lieu bien avant l'ère industrielle qui, eux, ne sont pas imputables aux mécanismes du CC (Le Roy Ladurie 2009).

2.3 ADAPTATION, ATTÉNUATION

La forte probabilité de l'existence d'un lien de causalité entre activité anthropique et perspective de CC, se manifestant par une évolution des AOC, dont certains extrêmes (avec les nuances exprimées dans la section 2.2), fonde les deux principaux domaines d'action de « lutte contre le changement climatique » :

- l'**atténuation** des émissions de GES qui vise à limiter un mécanisme moteur du CC ;
- l'**adaptation**, en l'occurrence du cadre bâti et de ses utilisateurs/occupants, qui vise à anticiper, pour en limiter les conséquences, les effets des AOC futurs tant sur les personnes que sur les biens.

La Figure 10 entend illustrer le positionnement relatif de ces deux domaines. Le cadre bâti (et notamment les bâtiments) est en effet par nature une cible obligée des AOC mais les activités humaines qu'il accueille sont par ailleurs génératrices de GES. Cette figure illustre également le **lien insécable entre atténuation et adaptation**.

Le cadre bâti pâtit directement des conséquences des émissions de GES qu'il génère. Les émissions de GES sont réparties sur tous les territoires (bien au-delà des frontières nationales) alors que les effets des AOC sont quant à eux localisés.

Adapter les bâtiments et les infrastructures aux effets d'une nouvelle donne climatique implique ainsi de prendre en compte la **double nature du cadre bâti** : fauteur de troubles et victime des conséquences de ses propres émissions de GES.

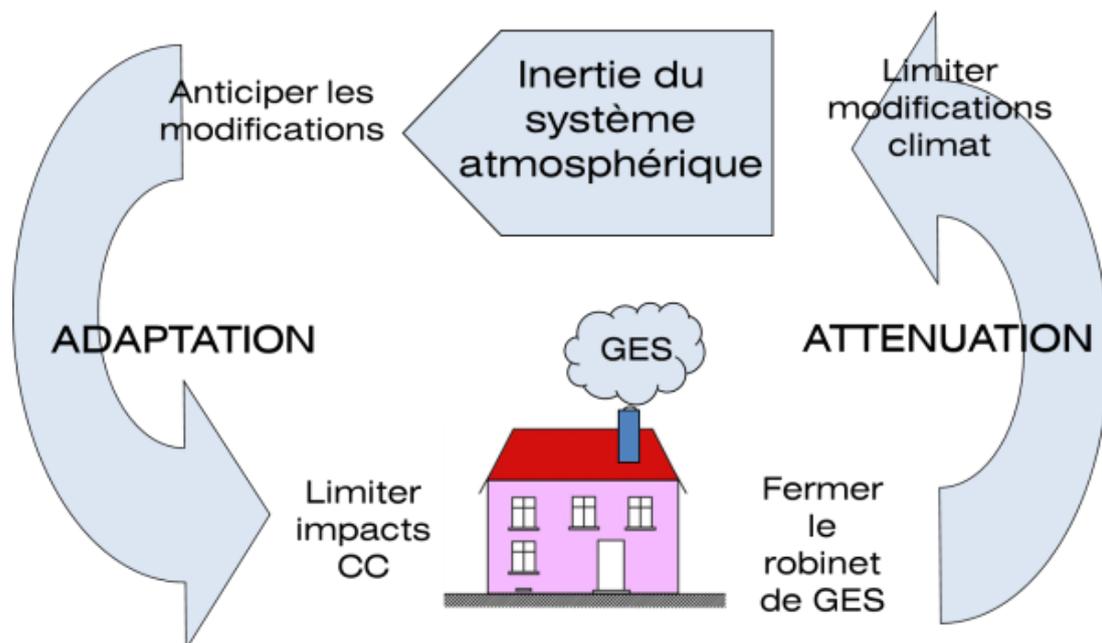


Figure 10 : Adaptation et atténuation des émissions de GES (source CSTB)

2.3.1 ATTÉNUATION : UNE DYNAMIQUE EN COURS

La notion d'atténuation s'explique, pour l'essentiel, au travers de deux points :

1. d'une part, le cadre bâti, dont le parc de bâtiments, est un contributeur majeur à la production de GES ainsi qu'un consommateur vorace d'énergie comme indiqué au Tableau 8 (échelle mondiale en 2010) et au Tableau 9 (échelle nationale en 2012) ;
2. d'autre part, moyennant des précisions quant au périmètre d'analyse, toute mesure dont peut résulter une baisse mesurable et vérifiable des émissions de GES peut être qualifiée de mesure d'atténuation (isolation thermique, recours aux énergies renouvelables [ENR], limitation du recours à la climatisation thermodynamique, amélioration du rendement des équipements, etc.).

L'obtention de ces réductions passe par des investissements dont l'espérance de retour à court-moyen terme peut être « démontrée » sur la base d'hypothèses fondées (pour x € investis [déduction faite d'éventuelles aides financières], l'économie d'énergie est y € par an, la réduction des émissions de GES est z kg par an).

Si l'analyse de l'atténuation est partagée par un grand nombre, la mise en œuvre de mesures efficaces nécessite de mobiliser de nombreuses ressources. Les outils d'analyse technico-économiques, les technologies, les outils réglementaires, les mécanismes d'incitation et de financement, la mobilisation associative et citoyenne, l'inscription de ces préoccupations dans la durée depuis le premier choc pétrolier sont autant de points d'appui à la diffusion (lente) de ces mesures.

Tableau 8 : Production de GES et consommation d'énergie finale à l'échelle mondiale en 2010 (d'après Giec-WG3 2014, chapitre 9)

Production GES	Résidentiel		Non résidentiel		Total	
	Gt CO ₂ éq.	%	Gt CO ₂ éq.	%	Gt CO ₂ éq.	%
Direct	2.18	4.4	0.84	1.7	49	100
Indirect	3.50	7.1	2.52	5.1		
Total bâtiment					9.0	18.4
Consommation énergie finale	PWh	%	PWh	%	PWh	%
	24	24	8	8	101.3	100
Total bâtiment					32.4	32

Tableau 9 : Production de GES et consommation d'énergie finale à l'échelle nationale en 2012 (d'après SOeS 2014)

	Résidentiel		Non résidentiel		Total				
	Mt CO ₂ éq.	%	Mt CO ₂ éq.	%	Mt CO ₂ éq.	%			
Production GES									
Direct / indirect	57.5	11.7	29.1	5.9	490.1	100			
Total bâtiment					86.6	17.6			
Consommation énergie finale	Mtep	PWh	%	Mtep	PWh	%	Mtep	PWh	%
	46.7	0.54	28.0	22.4	0.26	13.4	167	1.9	100
Total bâtiment					69.1	0.8	41.4		

Des méthodes (Iso 2006) et des dispositifs sont désormais en place à différentes échelles, du monde aux territoires nationaux (Medde 2012), pour collecter les émissions de GES et rapporter leurs évolutions (www.citepa.org, SOeS 2014).

L'annonce le 13 mars 2015 par l'Agence internationale de l'énergie d'une stabilisation des émissions de CO₂ en 2014 (IEA 2015) est un signal encourageant quant à la perspective de réduction des émissions. Toutefois, l'inertie du système atmosphérique rend illusoire la décroissance à brève échéance de la température du globe, même en cas d'un arrêt immédiat et total des émissions (Giec-WG1 2013, p. 171).

Même dans cette hypothèse irréaliste, la température continuerait à augmenter pendant quelques décennies du fait de la quantité de GES produite et stockée dans l'atmosphère au cours des décennies écoulées. Les observations futures permettront de conclure ou non à un effet durable de réduction des émissions de GES sous l'effet des politiques de réduction en vigueur et à venir.

2.3.2 ADAPTATION : DE QUOI PARLONS-NOUS?

Les paléontologues font de l'adaptation le moteur du développement de l'humanité.

Il y a 3 millions d'années un rafraîchissement du climat a fait s'assécher les tropiques. La savane arborée s'est dégradée, les arbres se sont faits rares, le tapis graminéen s'est développé et tout le monde animal que cet environnement contenait a dû s'adapter au nouveau milieu, ou disparaître. Le préhumain, bipède et arboricole, végétarien et à petit cerveau, s'est fait humain, bipède exclusif, omnivore à gros encéphale. Il a suffi d'un dérèglement du climat, d'un changement consécutif de l'environnement pour que la matière vivante se fasse pensante. (Coppens, 2014).

Il s'agit là d'une adaptation sur le (très) long terme en réaction (**adaptation réactive**) à des changements du climat. L'adaptation apparaît alors comme un mécanisme sélectif s'il en est : s'adapter ou disparaître. S'adapter demande en effet du temps comme évoqué en introduction.

Sous l'effet d'une modification du contexte climatique, cette adaptation conduit à modifier un état initial afin de continuer, en l'occurrence, à vivre. Le nouvel état est, ici, fondamentalement différent de l'état initial.

L'adaptation réactive est adoptée en permanence par les groupes humains plus contemporains, à la suite d'évènements qui viennent perturber le fonctionnement des sociétés concernées. Elle consiste à tirer les leçons de ces évènements de manière à limiter les effets indésirables lors d'une possible répétition d'évènements comparables.

La décision ne se résume cependant pas pour le groupe (ou l'individu) à se mettre systématiquement à l'abri des conséquences possibles et désormais connues d'expérience. En attestent par exemple l'existence et la persistance d'implantations humaines dans des zones notoirement inondables. Chaque groupe se décide en fonction des avantages (ici l'eau comme force motrice, voie de communication, apport de limons fertiles en bordure de cours d'eau, ressource de nourriture halieutique...) et des inconvénients (atteinte possible à l'intégrité des personnes et des biens) propres à chaque situation.

Décision éclairée qui suppose un accès à l'information relativement à tous les aspects de la question dont la fréquence d'occurrence, la saison la plus fréquente le cas échéant, les signes précurseurs, la disponibilité et les conditions d'accès à des zones de repli temporaire.

S'adapter à un changement possible conduit ainsi également à essayer de tirer parti des éventuels effets bénéfiques tout en tentant de limiter les effets néfastes.

S'adapter c'est aussi anticiper. L'expérience d'évènements passés et la mémoire de leurs conséquences viennent nourrir la définition et la mise en œuvre de mesures d'adaptation avant la survenance d'autres évènements de même nature. Il peut s'agir de mesures techniques (dimensionnement suffisant pour résister à des niveaux de sollicitations possibles) ou organisationnelles (choix de l'implantation d'un lieu d'activité, planification d'une zone de retrait pour les populations et les biens potentiellement exposés).

Le développement et l'entretien d'une culture du risque parmi les membres du groupe humain participent également de l'adaptation. La culture du risque permet en effet la transmission entre générations de la mémoire d'évènements et de « bonnes pratiques » (parmi lesquelles les actions à éviter) pour faire face aux effets possibles des divers aléas locaux (dont les AOC).

L'expérience permet aussi d'anticiper des niveaux de sollicitations supérieurs à ceux qui ont été expérimentés.

Qu'elle soit de nature réactive ou anticipatrice (aussi nommée proactive) la démarche d'adaptation vise à se prémunir d'effets susceptibles de perturber un état préexistant et accepté comme « adapté » aux exigences du groupe ou de l'individu en dehors des évènements perturbateurs. Il n'y a en effet pas de niveau absolu d'adaptation.

L'état projeté peut éventuellement être dégradé si les conditions (manque de moyens, de ressources) ne sont plus réunies pour maintenir l'état initial.

L'adaptation (**réactive ou proactive**) est donc très dépendante de chaque contexte, des habitudes du groupe qui définissent l'état préexistant à une perturbation par un évènement (par exemple climatique), de ce qu'il accepte ou peut accepter comme niveau de perturbation de cet état.

La capacité d'adaptation d'un groupe est aussi fonction des moyens qu'il peut mobiliser pour définir et mettre en œuvre des mesures ainsi que pour les pérenniser.

Ces considérations se retrouvent dans la définition que donne le Giec de l'adaptation aux effets du CC (Giec-WG2 2014), à laquelle il manque peut-être une référence au temps nécessaire à mettre en œuvre les actions décrites :

Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences.

2.3.3 ADAPTATION DU CADRE BÂTI

Les attendus, l'élaboration et l'expérience de la mise en œuvre de mesures de prévention contre les effets des AOC ont indéniablement contribué à l'adaptation du cadre bâti et de ses occupants/usagers aux conditions climatiques qui prévalent actuellement en un lieu donné.

Dans ce contexte, « adapter le cadre bâti à des conditions climatiques futures » se révèle difficile à appréhender et à (faire) partager, et ceci pour plusieurs raisons :

- le fait que le cadre bâti existant et en cours de constitution soit réputé être adapté au climat actuel n'incite guère à anticiper une évolution des AOC, d'autant que les opérations de construction sont soumises à des réglementations qu'il s'agit de respecter et qui n'anticipent pas ce futur climatique (Colombert M. et al. 2015) ;
- le coût de la mise en application de ces réglementations est régulièrement décrié si bien que des oppositions socio-professionnelles sont à prévoir dans la perspective d'ajout de nouvelles mesures ;
- les incertitudes restent grandes quant au climat futur, surtout à l'échelle locale, qui est celle intéressant les acteurs d'un projet donné ;
- des années, voire des décennies, peuvent s'écouler entre le moment de l'investissement dans des mesures d'adaptation et l'occurrence d'un AOC permettant d'apprécier la pertinence de ces mesures ;
- durant ces longs intervalles, la perte de mémoire collective peut faire oublier les raisons pour lesquelles des mesures d'adaptation ont été prises à un moment donné, si bien que les conditions de leur efficacité se dégradent (manque d'entretien, absence de maintenance, perte de vigilance dans le passage des consignes au fil du temps) ;

- les investissements nécessaires à des mesures d'adaptation peuvent être en concurrence avec d'autres dont les effets bénéfiques sont jugés plus proches dans le temps ;
- l'élaboration de mesures d'adaptation peut amener à expliciter un niveau d'acceptation des conséquences d'un AOC, ce qui nécessite de réunir les conditions pour un tel exercice au sein de la société.

Les assureurs et les réassureurs, qui explorent depuis plusieurs années les conséquences sur leur activité qui pourraient résulter d'une augmentation à la fois des enjeux (voir 2.1.2) et des AOC (voir 0), sont parmi les premiers mobilisés par ces perspectives.

Un travail exploratoire conduit en 2009 par la Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA 2009), concernant le seul territoire métropolitain, conclut à un doublement des indemnités d'assurance cumulées sur la période 2007-2030 par rapport à la période 1988-2007 pour les trois aléas les plus coûteux : tempêtes, sécheresse, inondation (Figure 11).

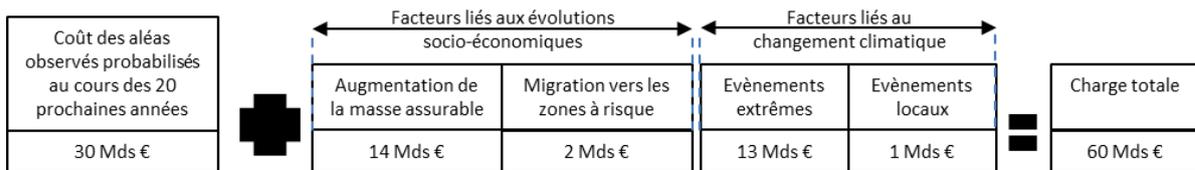


Figure 11 : Estimation de l'incidence du changement climatique sur le montant d'indemnités d'assurances (d'après FFSA 2009)

Les recommandations de cette étude visent un renforcement des principes de prévention précédemment exposés (voir 1.3.1) pour les trois AOC visés.

L'analyse qui suit est structurée suivant les catégories d'AOC introduites au chapitre 1.2.2.1.

2.3.3.1 AOC dont les effets sont essentiellement mécaniques

Pour ce qui est des AOC dont les effets sont essentiellement mécaniques, la limitation des dommages aux personnes et aux biens est principalement liée à la capacité des ouvrages à résister aux efforts dus par exemple au vent, à l'accumulation de neige ou aux variations de température.

Les édifices légués par nos ancêtres, pour autant qu'ils aient été entretenus, ont fait la preuve jusqu'à présent d'une telle capacité, qui est parfois associée à un surdimensionnement des ouvrages traduisant le savoir-faire de ces temps anciens.

La conception des ouvrages plus contemporains bénéficie de méthodes issues d'une meilleure connaissance des lois de la mécanique et du comportement des matériaux, qui permettent un dimensionnement plus ajusté des ouvrages, compte tenu des caractéristiques des procédés de construction désormais disponibles.

Les projections climatiques pour le XXI^e siècle concernant l'évolution des régimes de **vent** et de précipitations de **neige** permettent de considérer en première approche qu'il suffirait de modifier les conditions aux limites des règles de dimensionnement pour maintenir un cadre bâti adapté à un niveau comparable à celui qui est accepté aujourd'hui.

Il ne s'agit pas d'une relation déterministe mais, comme actuellement d'une relation statistique, qui donne accès à une probabilité de dommage/rupture pour une sollicitation donnée. La détermination de nouvelles conditions aux limites nécessite une concertation des parties prenantes dont les climatologues, les concepteurs, les entreprises, les assureurs, les maîtres d'ouvrage. Il s'agit de définir des conditions « acceptables » comme indiqué précédemment (voir 1.3.1).

La très probable croissance de la fréquence, de la durée et de l'intensité des **vagues de chaleur**, qui sont le moteur du phénomène de dessiccation des sols en surface, pourra occasionner une augmentation du phénomène de retrait des argiles concernées par le RGA (BRGM 2009). Les études récentes attestent que les importantes conséquences de cet AOC peuvent être fortement limitées moyennant une application soigneuse des règles de conception et de réalisation en vigueur (Heck 2010).

Cette situation ne rend pas prioritaire la révision à court-moyen terme de ces règles mais plaide pour la poursuite des campagnes de sensibilisation, information, formation menées notamment par l'AQC (AQC-2 2013). Ces efforts, relayés par ceux des constructeurs, peuvent conduire à améliorer la situation dans le futur ou du moins à ne pas la dégrader par rapport à ce qui est observé actuellement.

Dans la perspective de canicules plus longues, plus fréquentes, plus intenses, les pathologies attachées au RGA sont susceptibles de s'amplifier. Le Plan national d'adaptation au changement climatique (voir 4.1.3.1) préconise d'organiser l'observation des pathologies afin de renforcer le contenu des outils de sensibilisation aux pratiques de prévention et d'évaluer l'efficacité des techniques de fondation adaptées, notamment dans le cas des bâtiments ayant fait l'objet de travaux de renforcement suite à une précédente canicule (Pnacc 2011).

De même qu'il est possible de renforcer la structure d'un bâtiment existant ou de concevoir un bâtiment neuf résistant mieux à des sollicitations mécaniques déjà prises en compte par les codes de calcul (vent, neige, variations de température), il serait possible techniquement de concevoir un bâtiment résistant aux assauts de vagues ou à de courants forts consécutifs à une augmentation des **précipitations**.

Pour de raisons économiques et d'usage évidentes, de telles règles n'ont pas été développées et ne le seront probablement pas car la gestion du risque inondation passe en premier lieu par l'identification de zones à risque et l'interdiction d'exposer inutilement les occupants (et les secouristes) dans des endroits où l'accès/évacuation des personnes ne serait pas garanti dans de bonnes conditions de sécurité (Salagnac et al. 2014).

2.3.3.2 AOC dont les effets sont essentiellement non-mécaniques

La limitation des conséquences de **l'immersion prolongée** des matériaux et ouvrages de construction passe (Salagnac et al. 2014) :

- soit par un évitement d'une telle situation en implantant les bâtiments hors d'atteinte de l'eau ou bien en prévoyant d'installer des barrières qui peuvent temporairement limiter la pénétration de l'eau à l'intérieur des bâtiments ;
- soit par l'acceptation de l'occurrence d'un tel évènement et son anticipation par le choix de matériaux réparables aisément et à moindre frais et l'organisation des espaces intérieurs des bâtiments.

Sous les climats actuel et futur, l'efficacité de ces mesures est et sera bien entendu fonction des caractéristiques locales de l'inondation (temps d'alerte, hauteur et vitesse de montée et d'écoulement de l'eau), du respect des règles d'urbanisme tenant compte du risque inondation et de la capacité d'action des occupants (préparation à l'évènement, mise en place en temps voulu de dispositifs de protection, mise à l'abri des personnes et des biens).

L'adaptation du cadre bâti pour ces AOC pourra passer par une éventuelle révision des zones inondables et des autorisations de constructions afférentes.

Les **vagues de chaleur** très probablement plus fréquentes, plus longues et plus intenses sont porteuses de situations éventuellement inédites, au même titre que la canicule d'août 2003 était inédite en France au moment de sa survenue.

Les mesures d'adaptation relatives à cette perspective seront développées au chapitre 3. A ce stade, mentionnons que des dispositions concernant l'enveloppe et les équipements des bâtiments ainsi que leur environnement peuvent être envisagées en association étroite avec des mesures d'organisation comme celles consignées dans le Plan canicule élaboré au lendemain de la canicule d'août 2003 (voir 4.1.3.1).

2.3.4 ADAPTATION-ATTENUATION : UNE QUESTION DE COHERENCE

Une mesure d'adaptation dont la mise en œuvre occasionnerait un surcroît d'émissions de GES serait incohérente avec des actions d'atténuation visant à les réduire. De même, une mesure d'atténuation qui augmenterait la vulnérabilité du cadre bâti aux effets des AOC serait incohérente avec des actions visant à mieux adapter le cadre bâti aux effets des AOC.

Certains parlent de **mal-adaptation** dans de telles situations (Onerc 2013).

La première situation est illustrée par l'exemple désormais largement diffusé de l'adaptation à une situation de canicule par installation de climatisation, qui plus est, sans précaution minimale permettant de limiter le surcroît d'émissions de GES (Figure 12). Le fonctionnement du climatiseur contribue certes à créer une ambiance intérieure plus acceptable qu'en absence d'équipement dans un contexte de température extérieure élevée (de jour comme de nuit), mais au détriment d'un surcroît d'émission de GES résultant de la transformation d'une source d'énergie en électricité, qui est nécessaire au fonctionnement de la climatisation.



Figure 12 : Installation sans aucune précaution de climatisation individuelle dans un immeuble de bureaux (source : CSTB)

La seconde situation est un peu moins triviale à illustrer.

De manière avérée lors de sollicitations sévères et imprévues (explosion, tornade par exemple), les structures traditionnelles monolithiques en béton armé offrent par nature un comportement mécanique qui contribue à prévenir la ruine des ouvrages. Par ailleurs, ces mêmes structures présentent des ponts thermiques importants que la recherche de performances énergétiques toujours plus élevées conduit à limiter.

A cette fin, une des solutions proposées est l'utilisation de rupteurs thermiques qui, tout en assurant une jonction mécanique entre mur et plancher satisfaisant aux exigences réglementaires en la matière, réduisent les pertes thermiques le long de la zone de jonction. Une diminution des émissions de GES est attendue de la réduction afférente des consommations. Il s'agit ainsi d'une mesure d'atténuation.

Cependant, par conception, les bâtiments dotés de tels rupteurs n'offrent pas les mêmes performances mécaniques que les bâtiments à structure monolithique et des interrogations subsistent quant à leur comportement en cas de sollicitations mécaniques extrêmes. Les effets de l'aléa en cause (tornade par exemple) peuvent être renforcés par la présence de menuiseries modernes plus résistantes aux efforts mécaniques que des menuiseries anciennes. Ces dernières étaient en effet généralement plus fragiles du fait de leur plus grandes dimensions et de par le simple vitrage les équipant. Sous l'effet de la pression du vent, les menuiseries anciennes pouvaient ainsi se briser, ce qui avait pour effet de « soulager » les efforts sur la structure du bâtiment, alors que les menuiseries modernes sont susceptibles de transmettre à la structure les efforts auxquels elles sont soumises en plus de ceux qu'elle subit en propre (Baloche 2002).

Il y a donc lieu d'explorer ces questions afin qu'une mesure d'atténuation n'augmente pas la vulnérabilité de bâtiments à de situations extrêmes, éventuellement dues à des AOC (tornades par exemple) et, de ce fait, soit incohérente avec la recherche d'une meilleure adaptation à un nouveau contexte climatique.

Sans anticiper sur les chapitres suivants centrés sur les canicules, la Figure 13 propose une représentation de possibles incohérences entre mesures d'atténuation et mesures d'adaptation. Ce même graphique indique également les synergies possibles dont certaines seront examinées ultérieurement dans ce rapport.

Il importe d'inciter les parties prenantes à veiller à la cohérence entre atténuation et adaptation.

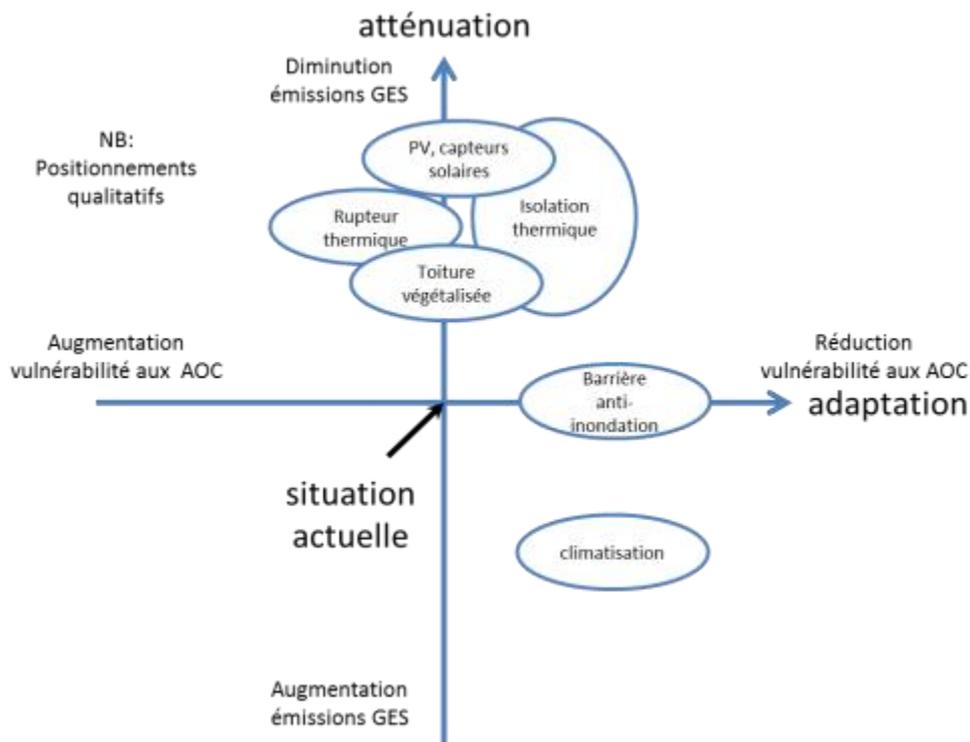


Figure 13 : Interactions atténuation-adaptation

Cadre bâti et changements climatiques : l'essentiel

Sous l'effet des évolutions socio-économiques, les enjeux exposés aux AOC sont appelés à croître au cours des décennies à venir.

Malgré des incertitudes sur l'ampleur des modifications à venir, la fréquence, l'intensité, la durée des événements le cas échéant, devraient également augmenter au même horizon temporel du fait du CC.

Ces perspectives plaident pour un renforcement des mesures de prévention déjà connues afin de mieux adapter le cadre bâti, c'est-à-dire de réduire sa vulnérabilité aux effets des AOC, en lien avec ce qui est acceptable dans un territoire donné ou ce qui peut le devenir.

Ces évolutions doivent se faire en cohérence avec les mesures d'atténuation des émissions de GES.

3. CADRE BATI ET CANICULES

3.1 CANICULE : DÉFINITION, ÉVOLUTIONS

Pour les météorologues, une **canicule** désigne un épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée (Météo-France 2015).

Le gestionnaire de risques ajoute une précision à visée opérationnelle concernant la durée de l'évènement : la période de très fortes chaleurs le jour et la nuit dure au moins trois jours consécutifs (SIG-risques 2015).

Les deux paramètres, chaleur et durée, gouvernent les effets observés tant sur les personnes que sur les ouvrages.

Tout en restant inévitablement entachées d'incertitudes spatiales et temporelles, les projections climatiques relatives aux canicules font ressortir une forte probabilité d'augmentation de leur fréquence, de leur durée et de leur intensité sur le territoire national au cours des décennies à venir (Figure 14).

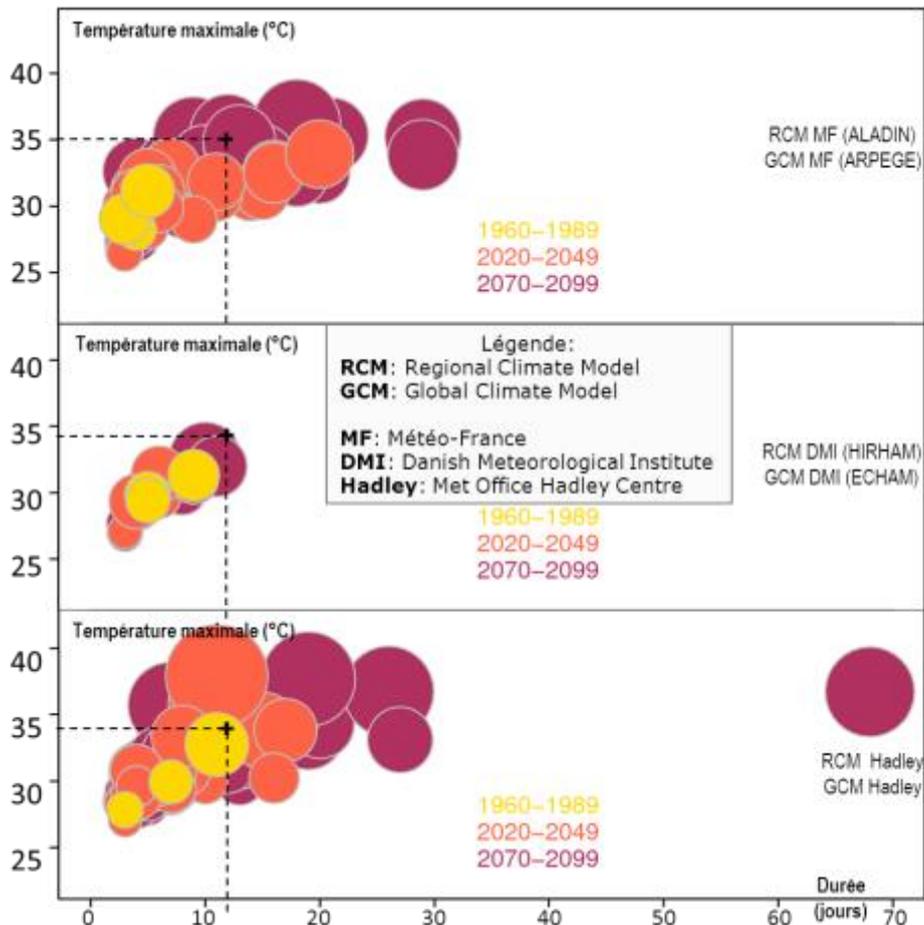


Figure 14 : Résultats de modélisation des canicules futures sur la région parisienne obtenus à l'aide de plusieurs modèles climatiques (source : Météo-France, projet FP6 Ensembles <http://ensembles-eu.metoffice.com/>)

Comme indiqué précédemment (voir 1.2.2.3), une période de canicule peut être à l'origine de conséquences très contrastées sur le cadre bâti par le biais de deux principaux mécanismes :

- **effets mécaniques** sur les structures de certaines constructions, du fait de la dessiccation des sols argileux (phénomène RGA) et de la dilation thermique (par exemple sur les infrastructures de transport). Ces effets sont a priori sans impact significatif direct sur l'intégrité physique des personnes ;
- **effets sanitaires** directement liés à la chaleur intense, renforcés en ville par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Les bâtiments où sont constatés ces effets sont quant à eux très peu impactés directement par la chaleur.

Les effets mécaniques, leur prévention et ses possibles évolutions dans la perspective de l'adaptation aux effets du changement climatique ont été traités au chapitre 1.2 et 2.3.3.1. Ce qui concerne les effets sanitaires est traité au chapitre 3.3.

Par ailleurs, les ressources en eau et en énergie sont fortement sollicitées durant ces épisodes météorologiques.

3.2 ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

Les effets du maintien pendant plusieurs jours de températures diurnes et nocturnes élevées pendant les vagues de chaleur qui ont lieu dans l'hémisphère nord (sud) durant l'été boréal (austral) sont exacerbés dans les zones urbaines du fait de la présence de la masse thermique constituée par les éléments constituant le cadre bâti.

Quiconque a marché en début d'une soirée d'été à proximité d'un mur resté exposé au soleil durant la journée a été saisi par une sensation de chaleur. Ressenti d'autant plus marqué que le marcheur a auparavant longé une zone non construite (parc, jardin).

Cet effet est à la base du phénomène d'ICU. Une partie de l'énergie solaire incidente est absorbée en surface du mur dans la journée et stockée au sein de celui-ci. Le soleil une fois couché, la chaleur stockée est restituée à l'environnement par convection et par rayonnement infrarouge ressenti par le passant. Les éléments qualitatifs du bilan énergétique d'un mur sont représentés Figure 15.

Toutes les surfaces exposées au soleil dans une ville se comportent de la sorte et notamment les couvertures. Le rayonnement infrarouge réémis la nuit par les couvertures regardant vers le ciel rencontre peu d'obstacles. Celui en provenance des murs trouve très fréquemment des obstacles constitués en particulier des murs en vis-à-vis.

Les échanges d'énergie entre ces surfaces en vis-à-vis « piègent » le rayonnement infrarouge. Il en résulte une évacuation de chaleur vers l'atmosphère moins rapide qu'en l'absence d'obstacle, ce qui contribue au maintien d'une température

nocturne élevée en zone urbaine. Ce phénomène est connu sous le nom de rue canyon, en référence à l'image de cette forme géologique.

Bien entendu, plus un canyon urbain est étroit, plus l'ombre portée par le bâtiment ensoleillé couvre le bâtiment en vis-à-vis et moins les murs de ce dernier sont directement réchauffés. La géométrie des rues, leur orientation, le ratio entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues sont autant de facteurs influant sur le bilan énergétique entre les surfaces verticales (Colombert 2008).

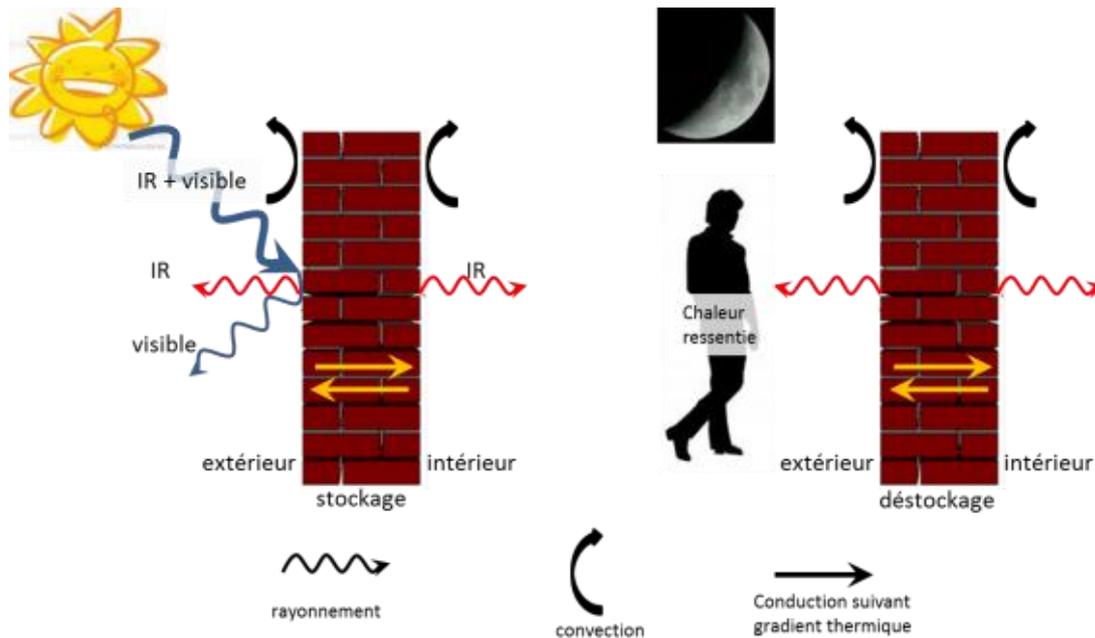


Figure 15 : éléments du bilan énergétique diurne et nocturne d'un mur

Dans les zones non construites entourant une zone urbaine, l'énergie solaire incidente est en partie transformée par la végétation (photosynthèse) et en partie « consommée » à évaporer de l'eau présente dans et en surface du sol. Par ailleurs, les émissions infrarouges des parois des bâtiments éloignés les uns des autres se font sans obstacle. Ces phénomènes limitent le stockage d'énergie dans le sol et dans les constructions si bien que la température nocturne reste modérée comparée à celle des zones urbaines (Figure 16).

Le bilan énergétique différencié entre zone densément construite et zone peu construite conduit à l'apparition d'un ICU caractérisé par :

- son étendue spatiale, fonction de l'importance de la zone urbaine ;
- son intensité, fonction des nombreux paramètres qui régissent les bilans énergétiques dans les deux zones ;
- sa durée, qui dépend directement de celle de la période de canicule.



Figure 16 : La formation de l'ICU (source CSTB)

Notons que le phénomène d'ICU n'est pas uniquement estival mais il est cependant plus marqué en été qu'aux autres saisons. Les facteurs qui gouvernent la contribution du cadre bâti au développement de l'ICU découlent de ce qui précède (voir Tableau 10).

Tableau 10 : Rôle des principaux paramètres gouvernant le développement de l'ICU

Paramètre	Rôle dans le développement de l'ICU
Morphologie de la ville	Gouverne l'exposition des surfaces au soleil Influence le bilan énergétique des échanges entre parois (rue canyon) Joue un rôle sur les échanges convectifs (vent, tirage thermique)
Propriétés radiatives des surfaces des matériaux de construction	Gouverne le bilan radiatif des surfaces et le bilan énergétique des ouvrages
Chaleur massique des ouvrages	Définit la capacité de stockage d'énergie des ouvrages (inertie thermique)
Résistances thermiques dans les ouvrages	Régit la dynamique des transferts de chaleur, notamment de l'extérieur vers l'intérieur des murs et toitures
Sources de chaleur : circulation, condenseurs de climatisation, process, pertes de réseaux	Apport d'énergie

La présence en ville de surfaces d'eau (rivière, lac) et de surfaces végétalisées (parcs, jardins, bois) joue également un grand rôle dans le développement local de l'ICU.

3.3 CANICULE ET SANTÉ

Le lien entre ambiance thermique et santé/confort fait l'objet d'une abondante littérature scientifique (INRS 2014, Besancenot 2007, InVS 2004).

Les épisodes caniculaires sont souvent associés à leur caractère hautement mortifère. Les milliers de morts en France consécutifs à la canicule d'août 2003 sont encore dans toutes les mémoires (Figure 17).

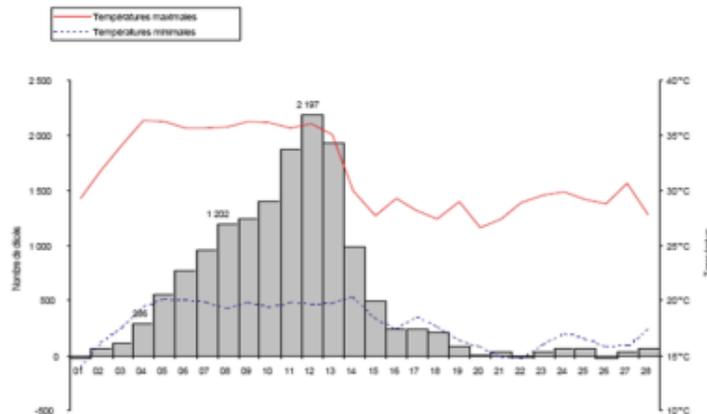


Figure 17 : Excès de décès observé quotidiennement et relevé de températures extérieures diurnes et nocturnes durant la canicule du 1 au 15 août 2003, (Source : Hémon, Jouglà, 2003)

Cet épisode particulièrement marquant est très documenté et a été précédé d'autres événements en France (Tableau 11) et dans le monde entier (Kalkstein et al. 2008). L'actualité rappelle la survenue régulière de tels événements à la surface du globe.

Tableau 11 : Effets mortifères de canicules en France (adapté de Rey et al. 2007)

	1975	1976	1983	1990	2001	2003
Canicule						
Nombre de jours chauds consécutifs	5	9	4	5	3	11
Période	01-07 /08	28/06-08/07	10-15 /07	01-07 /08	30/07-03/08	03-15 /08
Températures (°C)						
Moyenne maximum	32.4	32.8	31.6	33.5	30.8	36.4
Moyenne minimum	18.2	17.9	18.4	18.5	17.7	20.0
Mortalité						
Observée	12 507	20 560	10 301	10 838	7 814	31 431
Attendue	9 555	15 444	8 828	9 214	6 484	17 734
Excès	2 952	5 116	1 473	1 624	1 330	13 734
Part des 75 ans ou +	61.7 %	64.3 %	69.1 %	67.9 %	76.4 %	79.6%
Population						
Totale (millions)	52.7	52.9	54.8	56.7	59.2	59.8
Part des 75 ans ou +	5.1	5.2	6.1	6.7	7.5	7.8

L'analyse de ces événements et notamment de la canicule d'août 2003 confirme l'importance de la surmortalité en ville par rapport au niveau de mortalité sur une période donnée. L'observation révèle toutefois de grandes disparités : de 40 % dans les villes petites et moyenne, la surmortalité atteint 80% à Poitiers, Le Mans, Lyon et 141 % à Paris mais reste faible (4 %) à Lille (INVS, 2004), (Vandentorren et al., 2004).

Si la température élevée par rapport à la normale, notamment la nuit, et la durée de l'évènement sont indubitablement des causes d'accroissement de la mortalité, d'autres facteurs explicatifs sont à rechercher pour comprendre ces disparités. Ces facteurs concernent notamment (Ribéron et al. 2006), (Vandentorren et al. 2006) :

- les personnes (âge, état de santé, habitudes sociales, habitudes alimentaires, comportement...) ;
- les caractéristiques du lieu de vie (orientation des ouvertures, protections solaires, qualité de l'isolation thermique, niveau de l'étage, position sous les toits, possibilité de ventiler...) ;
- l'environnement (type et niveau de pollution, proximité d'un parc...).

Les nombreux décès consécutifs aux canicules sont autant de drames humains mais ont également un coût. On pourrait dès lors s'interroger sur la place des mécanismes d'assurance pour traiter les aspects pécuniaires de ces situations. En fait, ces coûts relèvent de la santé publique et non pas de l'assurance des personnes. Dans quelques cas, des contrats d'assurance décès peuvent éventuellement être activés.

3.4 CANICULE ET CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

3.4.1 ENSEIGNEMENTS DE LA CANICULE 2003

Au-delà de son caractère dramatique sur le plan humain, la canicule d'août 2003 a montré jusqu'à la caricature l'impact que pourrait avoir la seule adaptation spontanée des occupants de lieux de travail et de logements, par installation de climatiseurs individuels dans des conditions notoirement sous-optimales (Figure 12). Ces pratiques se rencontrent également hors de périodes de canicule dans des commerces durant l'été (Figure 18).

La croissance des ventes de tels équipements qui en est résulté en 2003 a été temporaire. L'augmentation des ventes s'est confirmée en 2004 (15 % de plus qu'en 2003) pour diminuer considérablement en 2005 (43 % de moins au cours des neuf premiers mois de l'année) (Salagnac 2007). Ces achats étaient motivés par l'urgence de créer une ambiance acceptable dans les bâtiments.

La réglementation thermique (RT) 2000 avait introduit des dispositions destinées à limiter le recours à la climatisation pour les maisons individuelles (DGUHC 2001). Très peu nombreuses étaient en août 2003 les maisons individuelles réalisées

selon ces règles et la majorité des situations problématiques concernaient les bâtiments existants, notamment en zone urbaine.



Figure 18 : Installation de climatiseurs dans des conditions sous-optimales dans des commerces

Le surcroît de consommation électrique résultant de ces achats et du fonctionnement des installations de climatisation préexistantes a été sensible (4.2 % de plus qu'à la même période en 2002) malgré les messages de l'Ademe à modérer l'installation de climatiseurs individuels dans de mauvaises conditions de fonctionnement.

L'outil de production d'énergie électrique de l'époque a été fortement sollicité au moment où certains cours d'eau présentaient un débit faible (diminution de la production hydraulique) et des températures égales ou supérieures aux températures maximales autorisant l'usage de l'eau pour le refroidissement des centrales nucléaires (Salagnac 2007).

Cet épisode alors exceptionnel a permis d'entrevoir les conséquences à venir lors de futures canicules dont il est très probable qu'elles soient plus intenses, plus longues et plus fréquentes (voir 3.1).

3.4.2 RÉPONSES RÉGLEMENTAIRES

Au cours des années suivantes, les réglementations thermiques (RT-2005, RT-2012) ont évolué en renforçant notamment les préoccupations relatives au confort d'été tout en limitant, sans toutefois l'interdire, le recours à la climatisation (www.rt-batiment.fr).

Il faut noter que **ces réglementations ne concernent pas les situations de canicule** telles que définies en 3.1. Toutefois, elles peuvent être considérées comme des exemples de recherche d'un équilibre entre des mesures d'atténuation (par la limitation des consommations d'énergie) et des mesures d'adaptation

(créer les conditions d'une ambiance thermique acceptable par les occupants durant des périodes chaudes).

Par nécessité, ces dernières sont « calibrées », notamment en durée, afin de permettre la comparaison des calculs pour diverses options techniques : « *la température la plus chaude atteinte dans les locaux (Tic), au cours d'une **séquence de 5 jours très chauds** d'été, ne doit pas excéder un plafond (Ticref) » (RT-2012 2011). Ces séquences conventionnelles n'ont pas été définies pour représenter une période de canicule*

Pour des périodes plus longues, et **quelles que soient les options sans climatisation**, la température intérieure atteint un niveau voisin de celui des températures extérieures diurne/nocturne et le confort ne peut plus être assuré. En période de canicule, on ne pourrait pas non plus compter sur l'effet d'une surventilation nocturne pour rafraîchir les ouvrages intérieurs du fait du niveau élevé de la température de l'air extérieur.

3.4.3 PROJETS DE RECHERCHE

La canicule d'août 2003 et la publication du quatrième rapport du Giec (Giec 2007), projetant déjà un renforcement probable des événements caniculaires, ont été suivies de nombreux projets de recherche visant à évaluer les conséquences de futures canicules sur le cadre bâti et à explorer diverses voies d'adaptation.

La richesse du sujet justifie des approches très variées. Quelques projets abordent essentiellement les implications en matière de consommation d'énergie mais cette même question ne peut être ignorée d'autres projets qui mettent l'accent sur le confort (intérieur/extérieur), les facteurs de vulnérabilité ou sur les moyens d'atténuer l'intensité de l'ICU par exemple.

Le CSTB a participé à plusieurs de ces projets dont quelques mots-clés et une référence bibliographique sont indiqués Figure 19. L'horizon temporel de ces projets est la fin du XXI^e siècle ce qui oblige à explorer des scénarios dont la proximité avec ce qui adviendra réellement reste très difficile à évaluer.

Néanmoins, le choix de scénarios contrastés, associant données économiques, évolutions technologiques, projections climatiques, permet d'éclairer des futurs possibles et fournit des éléments pour explorer des effets induits par la mise en œuvre de mesures d'adaptation. Ces mesures peuvent être de nature technique (renforcement des performances énergétiques des bâtiments, modification des propriétés radiatives des surfaces des murs et couvertures, développement des toitures végétalisées...) ou de nature organisationnelle et comportementale (gestion des apports solaires, fixation des consignes de température des équipements de chauffage et climatisation...).

Le champ d'exploration reste immense mais ces premiers projets auront permis d'élaborer des méthodes de travail et de créer des outils robustes pour éclairer, à terme, les décisions politiques d'adaptation.

Ils auront également permis d'esquisser les contours de thèmes de réflexion qui vont au-delà des aspects techniques et organisationnels. Ainsi, différentes facettes

de **l'acceptabilité de ces solutions** ont été identifiées, comme la modification des paysages urbains ou la prise en charge de la maintenance des dispositifs techniques participant aux solutions d'adaptation.



Figure 19 : Projets de recherche avec participation CSTB

Les outils de simulation numérique se révèlent être essentiels pour conduire ces projets de recherche. Le projet Epicea a par exemple conclu à la validité de l'approche numérique en « reconstituant » le déroulement de la canicule d'août 2003 par le biais du couplage du modèle de ville Town Energy Balance (TEB) (Masson 2000) et des modèles d'atmosphère développés par Météo-France.

Ces succès, évalués à l'aune de la comparaison des résultats simulés avec les données météorologiques enregistrées, ont été rendus possibles grâce à la disponibilité de données constituées d'une part de la description fine du bâti parisien apportée par l'Agence parisienne d'urbanisme (APUR) et d'une caractérisation des propriétés physiques des matériaux de construction apportée par le CSTB. Ils donnent confiance dans la validité des outils dont les résultats ne peuvent toutefois être pris en toutes circonstances comme des vérités absolues.

La pertinence des résultats de simulation repose en effet en grande partie sur celle des données d'entrée, dont certaines sont issues d'expérimentations comme, par exemple, celles menées lors du projet Vegdud relativement aux impacts de la végétation sur plusieurs systèmes urbains en interaction : le climat, les ambiances, l'énergie, l'hydrologie, à différentes échelles spatiales mais aussi temporelles.

Il doit être noté que des efforts ont été faits par les équipes de ces projets pour en communiquer les résultats au plus grand nombre. Ces efforts participent de l'organisation d'une indispensable consultation/concertation pour la définition et la mise en œuvre de mesures d'adaptation.

Cadre bâti et canicules : l'essentiel

Tout en restant inévitablement entachées d'incertitudes spatiales et temporelles, les projections climatiques relatives aux canicules font ressortir une forte probabilité d'augmentation de leur fréquence, de leur durée et de leur intensité sur le territoire national au cours des décennies à venir.

Compte tenu des effets potentiellement mortifères de tels évènements, l'adaptation du cadre bâti aux effets de canicules est une priorité notamment en ville où le phénomène d'îlot de chaleur urbain vient renforcer les caractéristiques des AOC.

Un mode d'adaptation spontané de la population est le recours à des climatiseurs. Installés dans des conditions sous-optimales, ces équipements peuvent certes contribuer à aider la population à supporter les fortes chaleurs mais au prix d'une dépense d'énergie inconsidérée.

Cette dépense est elle-même contre performante puisqu'elle occasionne un surcroît d'émissions de GES qui vient renforcer les mécanismes du CC.

Face à cette situation des actions à caractère opérationnel (Plan Canicule) ont été lancées suite notamment à la canicule d'août 2003 et font l'objet d'évaluation.

Des actions de recherche sont également ce cours qui visent à éclairer les choix à effectuer tant en matière d'organisation de la société qu'en matière de techniques constructives.

4. ADAPTATION DU CADRE BATI AUX EFFETS DES CANICULES

Une des conclusions du premier chapitre du présent rapport est que le cadre bâti actuel a été progressivement adapté aux conditions climatiques locales, restées stables suffisamment longtemps pour développer des savoir-faire transmissibles. Il en ressort que cette expérience acquise en tous lieux au cours des siècles est un précieux capital où puiser l'inspiration pour la définition de solutions d'adaptation à des situations climatiques inédites en d'autres lieux.

Après avoir rappelé, sans viser l'exhaustivité, quelques principes sur lesquels reposent des solutions d'adaptation ancestrales, la manière dont sont transposés ces principes dans le contexte actuel sera explorée.

4.1 PRINCIPES D'ADAPTATION AUX EFFETS DES CANICULES

4.1.1 ADAPTATION ANCESTRALE

Des groupes sociaux ont déjà dû faire face et continuent de faire face à des périodes de canicule dans de nombreux endroits de la planète. Vivre avec des chaleurs intenses est même une situation courante pour nombre de sociétés. Les dispositions qu'elles ont adoptées pour ce faire associent solutions techniques et organisation de la société y inclus les comportements individuels de ses membres.

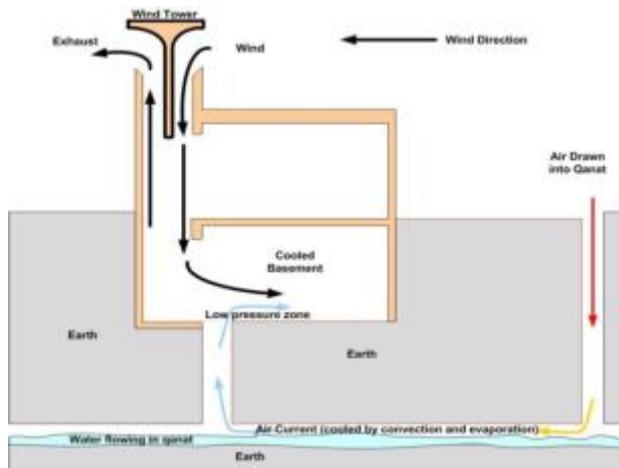
4.1.1.1 Solutions techniques

Des témoignages de solutions techniques ancestrales d'adaptation à ces contextes climatiques nous sont parvenus et certaines sont encore en application.

Ces solutions sont de deux types selon qu'elles reposent sur l'usage parfois très habile et subtil des **mouvements d'air**, de l'**eau** sous forme liquide ou vapeur, de l'**ombre** ou bien sur la **gestion des apports solaires**.

Le Livre des Merveilles de Marco Polo (Polo 2004) témoigne de solutions du premier type avec cette description de dispositifs qui évoquent les tours à vent (*bâdgîr*) des Perses (Figure 20) :

Curmos [Ormuz] est une grande et noble cité qui est sur la mer. [...] Il y fait une très grande chaleur, à cause de laquelle ils ont muni leurs maisons de manches à air pour prendre le vent : de quelque côté sur le vent souffle, ils tournent la manche à vent dans ce sens et font aller le vent en leur maison. Et ce font-ils parce qu'ils ne pourraient souffrir la grande chaleur qu'il y a...



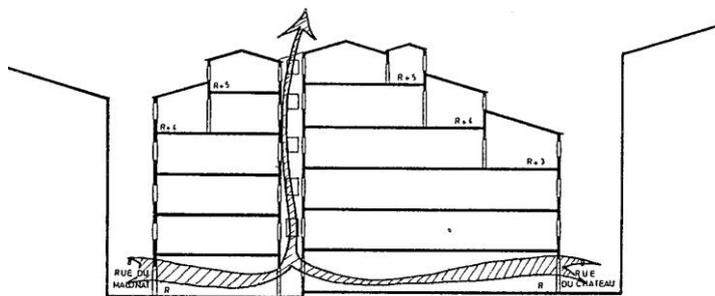
Principe des tours à vent (source web)



Tours à vent (source : F. Bougrain, CSTB)

Figure 20 : Tours à vent (bâdgîr)

La morphologie urbaine joue également un rôle important en créant des ombrages, des circulations d'air par tirage thermique comme dans le vieux Nice entre les rues et le cœur des îlots (Petitcollot 1990). L'air des rues non ensoleillées pénètre par des clairairs situés en imposte des portes donnant sur rue, circule dans des cheminées ménagées au cœur de l'îlot pour ressortir en point haut (Figure 21).



Coupe sud-nord (source : Petitcollot 1990)



Clairair (source CSTB)

Figure 21 : Principe de circulation d'air par tirage thermique dans le vieux Nice

La gestion des apports solaires passe traditionnellement par la taille des ouvertures en façade complétée par des dispositifs d'occultation du rayonnement solaire (stores, volets) installés à l'extérieur (Figure 22).

Les propriétés radiatives de l'enveloppe des bâtiments contribuent également à cette gestion. Une analyse qualitative des échanges d'énergie entre un élément opaque d'enveloppe de bâtiment et l'atmosphère environnante (Figure 15) conduit à la conclusion que l'énergie stockée dans l'élément est d'autant plus faible que d'une part l'énergie solaire incidente est faiblement absorbée et d'autre part que le rayonnement infrarouge émis vers l'atmosphère est intense.

En d'autres termes, limiter le stockage de l'énergie (et donc la température de l'élément) passe par les conditions suivantes en surface des éléments exposés au rayonnement :

- un faible coefficient d'absorption, autrement dit un fort coefficient de réflexion du rayonnement solaire sur tout le spectre (albédo élevé) ;
- un fort coefficient d'émission infrarouge (émissivité élevée).

La blancheur des bâtiments construits sur le pourtour méditerranéen témoigne de l'application de ces principes physiques (Figure 23).

Les parois très épaisses de bâtiments anciens (originellement pour des raisons structurales et non pour des raisons de confort) associées aux dispositions précédentes contribuent également à la gestion des apports solaires.



Figure 22 : Stores extérieurs et couleurs claires (Séville : source CSTB)



Figure 23 : Toitures blanches, faible surface vitrée et... forte inertie thermique (source CSTB)

Confort intérieur et confort extérieur ne sont pas disjoints et des solutions connues de très longue date visent à créer des conditions confortables à l'extérieur et à proximité immédiate des bâtiments comme :

- les jardins, cours, patios associant végétation et présence d'eau (Figure 24) ;
- les vélums (le Colisée à Rome en était déjà pourvu il y a deux mille ans) au-dessus des rues ou des cours (Figure 25) ;



Cours ombragée



Patio

Figure 24 : Environnement immédiat des bâtiments (Séville : source CSTB)



Figure 25 : Vélums couvrant rue et cour intérieure (Séville : source CSTB)

Les solutions techniques ancestrales évoquées dans ce sous-chapitre ont en commun d'avoir été mises au point sur de très longues périodes ce qui permet d'en bien apprécier la portée et les limites. Toutes apportent temporairement et localement une amélioration de confort en période chaude mais certaines d'entre elles seraient, seules, peu efficaces en période de canicule telle que définie dans ce rapport (voir 3.1).

La gestion des apports solaires (stores, vélums) est certes efficace pour limiter l'incidence directe du rayonnement solaire mais aurait peu d'effet sur la température ambiante, en cas d'utilisation sur un bâtiment à faible inertie thermique.

La forte inertie de certaines constructions est en effet un facteur pouvant retarder de plusieurs jours (selon l'épaisseur et les matériaux) l'onde de chaleur sur son trajet de l'extérieur vers l'intérieur. Le choix de parois à fort albédo vient renforcer cet effet. Cette solution technique peut être efficace en période de canicule et éviter (suivant la durée et l'intensité de la canicule) des surchauffes importantes.

L'expérience des groupes humains exposés à ces conditions climatiques les a instruits sur la manière d'associer ces solutions techniques sans recours à des moyens de climatisation thermodynamique.

4.1.1.2 Organisation et comportement

L'efficacité des solutions techniques est bien entendu liée à des savoir-faire assurant la révélation de leurs performances. Ainsi, les stores extérieurs ne sont-ils pas seuls les garants d'une ambiance intérieure acceptable. Encore faut-il que la gestion des apports solaires par les occupants soit pertinente, à savoir que les stores soient baissés lorsque le soleil frappe la façade, et relevés à d'autres moments pour faciliter la circulation d'air, pour autant que la température de l'air extérieur ne soit pas excessive.

Il peut paraître curieux de rappeler de tels truismes mais l'expérience montre que l'application de comportements de « bon sens » nécessaire au bon fonctionnement des solutions techniques est en butte à divers obstacles. Sinon, pour quelle raison

les clairairs sont-ils désormais occultés et les cheminées à l'intérieur des îlots du vieux Nice sont-elles obstruées à leur extrémité haute par des verrières ?

L'organisation de la société ainsi que des règles de vie sont également convoquées pour s'adapter à des chaleurs extrêmes :

- activité matinale et vespérale contrastant avec une activité réduite en milieu de journée comme il est courant de le constater dans des pays d'Afrique ou du sud de l'Europe ;
- habillement ;
- habitudes alimentaires.

4.1.2 ADAPTATION SPONTANÉE

Les solutions ancestrales ont été mises au point sur le temps long dans des régions de climat chaud. Dans des régions du monde où les canicules sont peu fréquentes, les ressources technologiques actuellement à disposition permettent d'accéder à des dispositifs de mise en œuvre quasi-instantanée ainsi qu'à l'énergie nécessaire à leur fonctionnement, comme l'illustrent les observations issues de la canicule d'août 2003 (voir 3.4.1).

L'incohérence de ces solutions d'adaptation avec les mesures d'atténuation a été soulignée (voir 2.3.4). Ceci étant, il serait injuste d'accabler les occupants pour avoir effectué ces choix contre-productifs en matière de réduction des émissions de GES car ils ont de fait peu de solutions autres à leur disposition dans des bâtiments qui n'ont pas été conçus pour ménager un confort intérieur « acceptable » pendant des périodes de canicule.

Le parc immobilier actuel en France métropolitaine est en effet constitué de bâtiments qui n'ont pas été conçus pour de telles situations climatiques. Par exemple, suivant les époques de construction, les logements présentent fréquemment une ou plusieurs des caractéristiques suivantes (Figure 26) :

- faible isolation ;
- inertie moyenne ;
- fortes surfaces de vitrage.

Ces constats sont la marque des choix effectués au XX^e siècle dans un contexte caractérisé temporairement par la nécessité de constructions en masse et pendant des périodes d'énergie bon marché. Une fois encore, il est hors de propos de stigmatiser ces choix qui paraissaient optimum économiquement et socialement acceptables dans ces contextes.

Par ailleurs, la **rareté des périodes de canicule** (malgré des événements sévères comme en 1976 sur tout le territoire métropolitain ou en 1983 dans la région de Marseille [Sénat 2004]) n'est pas propice à **l'acquisition et à la transmission de comportements** judicieux permettant de limiter la vulnérabilité des individus.

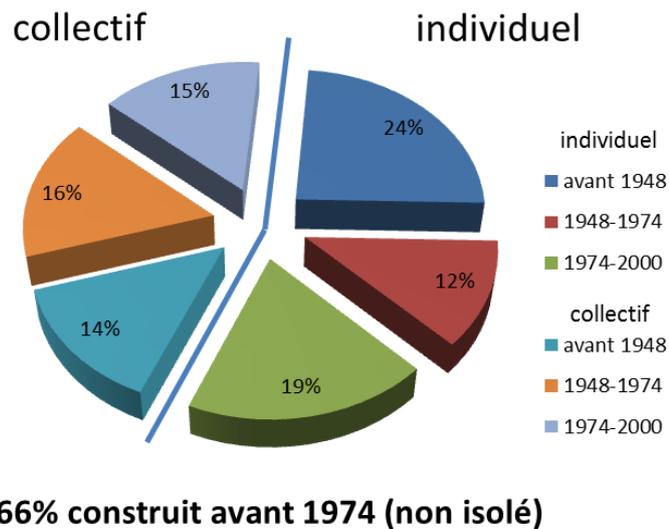


Figure 26 : Répartition du parc résidentiel collectifs/individuels suivant période de construction (adapté de [Rage 2012])

4.1.3 ADAPTATION PLANIFIÉE

L'émergence très probable d'une nouvelle donne climatique à court terme à l'échelle d'une société (horizon temporel de quelques décennies à un siècle) pour ce qui est des périodes de canicule, amène les pouvoirs publics à organiser l'élaboration de mesures d'adaptation.

Nous distinguerons les actions déjà engagées, sous forme de plans opérationnels, visant majoritairement des mesures d'organisation, d'actions plus prospectives.

4.1.3.1 Adaptation organisationnelle

Face aux situations d'adaptation spontanée constatées lors de la canicule d'août 2003 (voir 3.4.1), les autorités françaises ont rapidement réagi en mettant en place un plan canicule dès 2004 et en ouvrant fin 2009 le chantier d'un plan national d'adaptation changement climatique.

Dans le sillage de la remise du rapport de l'Inspection générale des affaires sociales (Igas 2004), relatif à la prise en charge sociale et médico-sociale des personnes âgées face à la canicule de l'été 2003, la première version du **plan national canicule (PNC)**, présentée en mai 2004 par Philippe Douste-Blazy, ministre de la Santé et de la protection sociale et Hubert Falco, ministre délégué aux personnes âgées, a défini quatre niveaux de mobilisation (vigilance, alerte, intervention, réquisition) des services concernés à des échelles territoriales allant de la commune à la nation (MSPS 2004). Le déclenchement des niveaux croissants de mobilisation/intervention est décidé sur la base des informations fournies par Météo-France et l'Institut de veille sanitaire.

Outre des mesures d'organisation destinées à mobiliser les services, le PNC comprend une fiche de « *recommandations pour lutter contre la canicule dans les*

établissements d'accueil des personnes âgées » qui renvoie à des dispositions touchant à la conception et à la gestion des bâtiments.

Cette fiche rappelle quelques fondamentaux de construction et insiste sur l'importance de la **maintenance des équipements de climatisations** qu'il peut être indispensable d'installer pour ménager « *une température de l'ordre de 25 ou 26° C pour l'espace climatisé [qui] semble [être] raisonnable* »

Tout en conservant l'objectif principal « *d'anticiper l'arrivée d'une canicule, de définir les actions à mettre en œuvre aux niveaux local et national pour prévenir et limiter les effets sanitaires de celle-ci et d'adapter au mieux les mesures de prévention et de gestion au niveau territorial en portant une attention particulière aux populations spécifiques* », le PNC a été mis à jour en 2013 après dix ans d'expérience pour notamment renforcer l'adéquation entre les niveaux de vigilance météorologique et les niveaux du plan dans une logique opérationnelle (DGS 2013, HCSP 2014).

Un comité de suivi et d'évaluation du Plan national canicule et du Guide national de prévention et de gestion des impacts sanitaires et sociaux liés aux vagues de froid (CSEP) a été mis en place à l'occasion de cette mise à jour.

La préparation à l'horizon 2011 d'un **plan national adaptation changement climatique (Pnacc)** était inscrite à l'article 42 du chapitre premier (l'environnement et la santé) du titre III (prévention des risques pour l'environnement et la santé, prévention des déchets) de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

Publié en juillet 2011, le Pnacc couvre la période 2011-2015. Il traduit en actions à mener, les travaux conduits en 2010 par des groupes d'experts. Les vingt fiches d'actions du Pnacc concernent de nombreux secteurs d'activités sensibles au climat dont une relative au thème « Urbanisme et cadre de vie ».

La mesure phare associée à ce thème est de « *renforcer l'exigence de confort d'été dans les bâtiments* », libellé qui traduit bien la priorité donnée à l'anticipation des effets de futures canicules sur les personnes. Les réflexions à mener visent en particulier à faire évoluer le critère d'exigence sur le confort d'été de la réglementation thermique compte tenu des caractéristiques des futures canicules.

Cette approche vise notamment à éviter le recours systématique à la climatisation pour le confort d'été. Elle s'inscrit ainsi parfaitement dans la recherche d'équilibre entre atténuation et adaptation présentée en 2.3.4.

La mise en œuvre du Pnacc a fait l'objet d'une évaluation à mi-parcours en décembre 2013 (DGEC 2013). Cette évaluation fait état de la lente maturation du concept d'adaptation aux effets du CC et de sa progressive appropriation par les acteurs de la construction. En conséquence, l'intégration dans des documents d'urbanismes de mesures d'adaptation prendra plus de temps qu'escompté.

Une des raisons majeures à ce retard relatif est le manque de retour d'expérience dans des domaines qui relèvent encore du domaine de la recherche. Ce constat

d'une faible mobilisation de fond relative aux impacts des canicules sur la société avait été effectué par Jean-François Mattéi, ministre de la Santé, lors des travaux d'une commission sénatoriale qui avait analysé la situation d'août 2003 (Sénat 2004). Le rapport de la commission notait « *Il [J-F Mattéi] a indiqué que l'ampleur des défaillances signifiait que les systèmes étaient en cause, et non les individus. Il a de même observé qu'aucune conclusion n'avait été tirée au plan national de la canicule de 1983 intervenue à Marseille et que la chaleur n'avait pas constitué un thème de réflexion au moment de la discussion de la loi relative à la veille sanitaire en 1998.* »

Le rapport d'évaluation à mi-parcours du Pnacc met en avant le rôle que le programme EcoQuartiers (MLETR 2014) peut jouer comme support de réflexion à l'adaptation.

4.1.3.2 Anticipation des performances dans un climat futur

Sans préjuger de l'émergence éventuelle d'innovations de rupture dans les décennies à venir, les constructeurs et les usagers ont accumulé au fil des siècles passés un riche savoir-faire permettant de concevoir, construire, exploiter et entretenir des bâtiments adaptés à des climats chauds sans toujours avoir recours en permanence à des dispositifs énergivores.

A l'échelle des quartiers et des villes, des acquis sont également potentiellement mobilisables. Ainsi, les travaux relatifs à l'incidence de la morphologie urbaine (géométrie, orientation des bâtiments, des rues, des places, des parcs et connexions entre ces éléments) sur les échanges d'énergie entre le cadre bâti et l'atmosphère fournissent des éléments de réflexion (Colombert 2008), (Salat 2011).

La mobilisation de ces connaissances en vue d'en étudier la transposition dans des conditions climatiques futures en tant que moyen opérationnel de s'adapter aux effets d'une nouvelle donne climatique nécessite **au préalable de disposer de données météorologiques** préfigurant de possibles contextes climatiques.

Les données journalières accessibles à partir du portail Drias (<http://www.drias-climat.fr/>, voir 2.2.1) ne sont pas utilisables à des fins de simulation numérique fine à l'échelle du cadre bâti, qui requièrent des données au pas de temps horaire. Pour pallier ce manque, des travaux sont en cours, sous l'égide de l'Ademe, pour explorer la faisabilité de mise à disposition de telles données aux spécialistes du confort thermique et de l'énergétique des bâtiments, notamment du CSTB. A l'horizon 2016, il sera possible de simuler le comportement énergétique de bâtiments sur une année météorologique complète représentative de climats futurs dans plusieurs scénarios du Giec (RCP 8.5, 6.0 et 4.5) (Alessandrini 2015). Ces travaux visent à explorer les futures conditions de confort d'été mais ne visent pas spécifiquement les périodes de canicule.

Ceci ouvre des perspectives intéressantes de simulation de multiples solutions techniques dont certaines pourront s'inspirer de modes d'adaptation ancestraux. Au-delà des seuls résultats énergétiques, un examen de ces solutions sera à approfondir pour s'assurer qu'elles permettent bien d'atteindre et de pérenniser

les autres performances attendues d'un bâtiment et que leur gestion et leur entretien sont bien compatibles avec les usages et l'économie des projets.

4.1.3.3 Evolution du champ normatif

Suivant des premières réflexions lancées par la Commission Européenne au sujet des « *politiques et mesures proposées par l'UE pour réduire les émissions de gaz à effet de serre : vers un programme européen sur le changement climatique (PECC)* » (EC 2000), plusieurs documents ont été publiés jusqu'à l'annonce de la mise en place d'une instance chargée de **cartographier les normes susceptibles d'être révisées pour adapter les secteurs** suivants aux impacts du changement climatique :

- infrastructure transport ;
- infrastructure énergie ;
- **bâtiments/construction.**

Le Tableau 12 présente les principales étapes de ce cheminement qui a abouti en 2014 à la mise en place d'une organisation Iso-Cen-Afnor aux travaux de laquelle le CSTB participe au sein du groupe « Groupe de coordination français "Changement climatique (GCCC)" animé par l'Afnor.

Un rapport présentant des priorités de révisions normatives est prévu mi 2016.

4.2 (RETRO)-INNOVATION

L'évocation, dans les chapitres précédents, des principes d'adaptation dans les régions connaissant régulièrement de fortes chaleurs, concerne des échelles de mise en œuvre allant de l'individu à la ville en passant par le bâtiment et le quartier. Les mesures d'adaptation ancestrales fondées sur ces principes ont été développées sur le long terme dans ces régions et intégrées comme éléments culturels (habillement, architecture, savoir-faire constructifs, organisation des activités...) des différents groupes humains.

Compte tenu de l'expérience acquise dans ces régions relativement à la conception, la réalisation, l'exploitation et l'entretien d'ouvrages contribuant à l'adaptation du cadre bâti aux effets des canicules, il peut être tentant de songer à transposer ces savoir-faire dans des régions actuellement tempérées, comme la France métropolitaine, et susceptibles de connaître des canicules intenses, fréquentes et de longue durée à horizon de quelques décennies.

Cette démarche de « **rétro-innovation** » consisterait à concilier les performances avérées de solutions d'adaptation à des situations de canicule avec des performances répondant aux exigences des habitants des régions actuellement tempérées.

Tableau 12 : Actions de la Commission Européenne dans le domaine de l'adaptation aux effets du changement climatique

source	contenu/extrait
<p>29.6.2007 - COM(2007) 354 final (EC 2007)</p>	<p>Plaidoyer multisectoriel pour une prise de conscience européenne du changement climatique et de ses conséquences. Le secteur de la construction est bien évidemment cité :</p>
<p>Livre vert Présenté par la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social européen et au comité des régions Adaptation au changement climatique en Europe: les possibilités d'action de l'Union européenne</p>	<p>« Parmi les exemples de mesures envisageables, on peut citer [...] l'adaptation des normes et règlements du secteur de la construction aux futures conditions climatiques et phénomènes météorologiques extrêmes, la construction de murs contre les inondations et l'augmentation de la hauteur des digues face à l'élévation du niveau de la mer... l'élaboration de plans d'aménagement de l'espace... »</p> <p>Les rédacteurs ont introduit des notions qui suscitent la méditation :</p> <p><i>L'adaptation créera également de nouvelles perspectives économiques, et notamment de nouveaux emplois et de nouveaux marchés pour les produits et services innovants tels que :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>les techniques, matériaux et produits de construction résistants au changement climatique.;</i> <p>Le document explicite la question de la cohérence entre atténuation et adaptation.</p>
<p>1.4.2009 - COM(2009) 147 final (EC 2009)</p>	<p>Actualisation du livre vert.</p>
<p>Livre blanc Adaptation au changement climatique: vers un cadre d'action européen</p>	<p>Explicitation de l'intérêt d'explorer le champ normatif construction :</p> <p><i>Actions à mener (UE et États membres) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Évaluer la possibilité d'intégrer les incidences du changement climatique dans les normes de construction (par ex. les eurocodes)</i>

<p>16-04-2013 - COM(2013) 216 final</p>	<p>Actualisation du livre blanc et plan d'actions dont :</p>
<p>Communication de la commission au parlement européen, au Conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions</p> <p>Stratégie de l'UE relative à l'adaptation au changement climatique</p> <p>(EC 2013)</p>	<p>Action 7: améliorer la résilience des infrastructures</p> <p>En 2013, la Commission chargera les organismes européens de normalisation d'entreprendre un inventaire des normes industrielles dans les domaines de l'énergie, des transports et du bâtiment afin de repérer celles devant être révisées pour permettre une meilleure prise en compte de la question de l'adaptation. Dans le cadre de la stratégie, la Commission élaborera également des lignes directrices à l'intention des promoteurs de projets chargés des infrastructures et des actifs physiques, en vue de garantir le «climate-proofing» des investissements vulnérables.</p> <p>Sur la base des résultats de sa communication sur l'infrastructure verte, la Commission examinera la nécessité de prévoir des orientations supplémentaires pour les autorités et les décideurs, la société civile, les entreprises privées et les professionnels de la conservation de la nature afin de tirer pleinement parti des approches fondées sur écosystèmes en matière d'adaptation.</p>
<p>26-03-2014</p> <p>mise en place GCCC</p>	<p>Le Groupe de coordination français "Changement climatique" (GCCC) a été mis en place en décembre 2013 sous l'égide de l'Afnor agissant en tant que secrétaire. Il est géré par le Comité stratégique Environnement et Responsabilité sociétale. Il élabore et consolide les positions françaises à porter au niveau des groupes Cen et Iso sur le changement climatique.</p> <p>Il a également pour mission la coordination française sur les normes génériques et sectorielles sur les gaz à effet de serre, ainsi que l'harmonisation des approches et le lien entre les empreintes carbone et les empreintes environnementales</p>

Le secteur du bâtiment intègre en effet en permanence des innovations techniques provenant pour l'essentiel des industriels producteurs de produits et de procédés pour le secteur (Ancre 2015).

La « lutte contre le changement climatique » suscite déjà la mise sur le marché de produits et procédés innovants présentés le plus souvent comme éléments de solutions techniques à des questions d'atténuation. Ainsi des isolants thermiques et des vitrages (réduction des déperditions thermiques), des panneaux photovoltaïques (substitution d'une production d'électricité générant des GES) et des pompes à chaleur (réduction de la consommation d'énergie primaire) pour ne prendre que ces exemples.

Afin de satisfaire les attentes des maîtres d'ouvrage, tout en luttant contre le CC, dans les conditions économiques actuelles et dans le respect des budgets, ces innovations sont à la disposition des concepteurs qui les incorporent dans leurs projets et des entreprises qui les mettent en œuvre.

Apparaissent également des solutions techniques dont l'argumentaire de vente insiste sur l'adaptation, en particulier à des situations de canicule en zone urbaine. Elles reposent pour l'essentiel sur les principes physiques exposés aux chapitres précédents.

Parmi les très nombreuses publications relatives à ces solutions, notons la compilation réalisée par l'Environmental protection agency américaine (Epa 2008) en partant d'une classification par type d'intervention à différentes échelles du cadre bâti : arbres et végétation, toitures végétalisées, toitures rafraichissantes (*cool-roof*), chaussées rafraichissantes (*cool-pavement*).

Les deux approches, rétro-innovation et innovation sont étroitement liées du fait qu'elles reposent sur les mêmes principes physiques. Elles se déclinent de manière plus ou moins développée à diverses échelles.

4.2.1 ECHELLE INDIVIDUELLE

Les conseils abondent pour aider les individus, notamment dans les logements, à adopter d'un comportement adapté pendant les « *périodes de chaleur accablante ou extrême* » (Portail Québec 2015) ou les vagues de chaleur (MASSDF 2015).

Ces conseils rappellent l'importance de l'hydratation (boire, de l'eau de préférence à l'alcool), du rafraichissement (douche, brumisateurs, linge humide, station dans une pièce fraîche), de la limitation des efforts physiques et du port de vêtements légers sans oublier d'éviter les stations prolongées au soleil.

A ces actions purement individuelles, s'ajoutent des conseils relatifs aux relations avec les autres membres du groupe humain : prendre des nouvelles des tiers vulnérables, se signaler aux autres, être à l'écoute des messages météo, des annonces par voies diverses (radio, internet, affiches).

Ces conseils de « bon sens », issus de l'expérience, semblent être appliqués naturellement dans des pays où la chaleur intense est habituelle (Figure 27). Leur mise en œuvre intègre des habitudes de vie dont la transposition dans d'autres

régions demande cependant un apprentissage qui nécessite du temps et la répétition des consignes.

Par le biais du développement du numérique dans le bâtiment, il faut s'attendre à voir émerger des innovations associant capteurs (température, humidité, rayonnement...), traitement des informations fournies par ces capteurs en vue de délivrer des messages (information, alerte...) aux occupants ou de nourrir des dispositifs automatiques d'ouverture/fermeture de fenêtres/stores ou de déclenchement/arrêt de dispositifs de rafraîchissement/humidification/circulation d'air.

Les conseils à destination des occupants de logements sont également présents dans des documents relatifs à l'activité professionnelle. Bien « [qu'] *il n'existe pas de définition réglementaire du travail à la chaleur* », certaines dispositions relatives aux ambiances particulières de travail répondent au souci d'assurer des conditions de travail adaptées en cas de fortes chaleurs (INRS 2014).

Par exemple, pour le travail sur chantier en période de canicule, des mesures préventives contribuent à remédier aux effets de la chaleur (travail durant les heures les moins chaudes, mise à disposition d'eau fraîche à proximité des postes de travail, aménagement de zones d'ombre...). Ces mesures doivent être accompagnées d'actions d'information et de formation des ouvriers et de l'encadrement.



Brumisateurs extérieurs



Station dans les zones ombragées



Circulation à l'ombre privilégiée



« Climatiseur individuel » : éventail

Figure 27 : Mise en œuvre de mesures individuelles d'adaptation à des périodes chaudes à Séville (source CSTB)

4.2.2 ECHELLE DU BATIMENT ET DE SON ENVIRONNEMENT IMMEDIAT

Les possibilités d'adaptation des bâtiments à des situations de canicule visant à créer des conditions acceptables d'occupation pour les usagers ont pour beaucoup d'entre elles déjà été explorées dans le passé et en des lieux très divers.

Compte tenu du fait qu'un bâtiment est un système complexe devant assurer de multiples fonctions (voir 2.1.2), la transposition de certaines de ces possibilités en d'autres lieux et dans un autre contexte culturel nécessite une analyse détaillée pour apprécier l'incidence de cette éventuelle adoption sur d'autres performances attendues (solidité, acoustique, sécurité incendie...).

Les façades et la toiture sont naturellement les ouvrages de bâtiments propices à une intervention visant à limiter les incursions de température à l'intérieur des bâtiments lors de périodes de canicules.

Le principe des solutions ancestrales est toujours d'actualité et sa mise en œuvre donne lieu au développement de « toitures rafraichissantes » (*cool roofs*) et de toitures végétalisées. L'évolution des vitrages participe également de ces innovations techniques. Par ailleurs, le rôle des panneaux photovoltaïques en tant que solution d'adaptation peut également être exploré.

4.2.2.1 Cool-roofs

Ces solutions techniques visent à limiter le réchauffement à l'intérieur des bâtiments. Pour ce faire, les matériaux placés en surface externe de l'enveloppe présentent un fort albédo et une forte émissivité infrarouge (voir 4.1.1.1).

Les solutions actuelles visent principalement des couvertures d'où le nom générique de « *cool-roof* » qui leur est donné. Plusieurs options sont proposées (Epa 2008, chapitre 4) :

- membranes, qui assurent également (et en premier lieu) l'étanchéité des couvertures ;
- produits liquides/pâteux appliqués au rouleau sur une couverture étanche ;
- petits éléments de couverture.

Tous ces produits de couverture ne sont pas de couleur blanche. Certains d'entre eux, notamment des petits éléments de couverture, présentent un aspect coloré (absorption sélective du spectre solaire dans le domaine visible) tout en réfléchissant la partie du spectre située dans l'infrarouge proche (700 à 2500 nm). Comme cette dernière représente environ 50% de l'énergie incidente, les « *cool colored roofs* » stockent moins d'énergie que des éléments de couvertures traditionnelles en terre cuite, en béton ou en ardoise qui, elles, absorbent plus fortement le rayonnement infrarouge (Cool colors project 2002)

4.2.2.2 Toitures végétalisées

Nombreux sont les avantages potentiels attribués à ces ouvrages (SCHL-CMHC 2005) :

- efficacité énergétique (climatisation l'été et isolation supérieure l'hiver) ;
- augmentation de la durabilité de l'étanchéité ;
- isolation acoustique par rapport aux bruits extérieurs ;
- capacité de transformer la toiture inutilisée en divers types d'aire de détente pour les occupants d'un immeuble ;
- filtration des particules aéroportées ;
- rétention et dépollution des eaux pluviales ;
- préservation de la biodiversité ;
- avantages esthétiques ;
- contribution à la réduction de l'ICU.

Comme pour tout produit ou procédé destiné à être incorporé dans un ouvrage de bâtiment, la révélation des potentiels annoncés passe par leur évaluation, la délimitation du domaine d'emploi, la définition et le respect (notamment via des contrôles) de règles de conception et de mise en œuvre ainsi que par un entretien adapté.

L'effet de rafraîchissement repose sur l'évapotranspiration de la végétation. L'énergie solaire incidente est en partie « consommée » par l'évapotranspiration, ce qui conduit à limiter le réchauffement de la toiture et, partant, du bâtiment, par rapport à une situation sans végétation. L'effet recherché est donc d'autant plus marqué qu'il y a de l'eau à évaporer. Une toiture végétalisée sèche n'évapore pas et l'effet escompté ne se manifeste pas (Musy 2014).

En période de canicule, il peut y avoir concomitamment un déficit de précipitation qui peut limiter l'effet attendu. Certains procédés de végétalisation de toiture intègrent d'ailleurs un dispositif d'irrigation. L'eau d'irrigation peut provenir d'une réserve ou d'un réseau d'alimentation.

4.2.2.3 Vitrages

Les caractéristiques thermiques des vitrages ont considérablement évolué au cours des décennies récentes (www.verreonline.fr). Ces évolutions permettent d'envisager des usages potentiels au bénéfice d'un confort thermique « acceptable » y compris en période de forte chaleur.

Ce ne sont bien entendu pas les seules caractéristiques des vitrages qui font ces performances mais leur usage judicieux dans le cadre de la conception de bâtiments présentant par exemple de fortes surfaces vitrées en façade nord ménageant un éclairage naturel confortable et contribuant à limiter les incursions de la température intérieure lors de canicules (Alessandrini et al. 2014).

Même avec des verres très performants, une large baie exposée au sud ou à l'ouest (qui plus est, sans stores extérieures) conduira inéluctablement à des surchauffes à l'intérieur du bâtiment. La parade actuelle à cette erreur de conception est le recours à une climatisation « bien » dimensionnée (Figure 28)



Figure 28 : De l'usage perfectible des moyens dont disposent les constructeurs (Séville, source : CSTB)

4.2.2.4 Panneaux photovoltaïques

En transformant une partie du rayonnement solaire en électricité, ces équipements peuvent contribuer à limiter l'échauffement à l'origine de l'ICU. Cet effet est néanmoins marginal comme le montrent les simulations (Masson et al. 2014).

De plus, ces considérations théoriques ne prennent pas en compte l'incidence sur les performances des panneaux de l'encrassement inévitable qui sera rarement compensé par un nettoyage adéquat des surfaces compte tenu des conditions courante d'entretien des ouvrages des bâtiments ordinaires.

4.2.2.5 Biomimétisme

La Nature est une source d'inspiration avérée pour l'innovation dans de nombreux secteurs. Que l'on pense par exemple aux extrémités d'aile d'avion retroussées (winglets) conçues à l'image des rémiges de certains rapaces.

Bien que la filiation soit difficile à établir (pour autant qu'elle soit exacte), les soies blanches argentées et réfléchissantes à la lumière dont sont recouverts les corps de certaines fourmis vivant dans des déserts chauds a peut-être inspiré les constructeurs. Que cette relation soit vraie ou fausse, favoriser la réflexion du rayonnement solaire n'en reste pas moins un des principes de base de l'adaptation du cadre bâti aux canicules.

S'inspirant de la possible capacité de la surface des pétales de certaines fleurs à rétro-réfléchir le rayonnement solaire, il a été par exemple proposé d'explorer le développement de revêtements d'enveloppe de bâtiments agissant comme des catadioptrés (Han et al. 2015). Ces propriétés de surface devraient théoriquement annuler la réflexion diffuse des surfaces courantes et ainsi limiter l'interception des

rayons réfléchis par d'autres surfaces. Dans des configurations géométriques simplissimes, des premières simulations numériques concluent à une diminution des charges thermiques des bâtiments ainsi revêtus.

D'autres propositions sont faites comme de reproduire des motifs imitant les rayures de zèbre sur les toitures au motif que ces rayures participeraient à la régulation thermique de ces animaux vivant en pays chauds.

Nul doute que de multiples voies seront proposées pour « lutter contre le réchauffement climatique » à l'échelle des bâtiments en s'appuyant sur une réflexion biomimétique. **Certaines solutions issues de ces réflexions seront peut-être prometteuses mais toutes devront être compatibles avec les caractéristiques du secteur du bâtiment, à savoir être peu coûteuses, faciles à mettre en œuvre, présenter des performances peu sensibles à un entretien généralement défaillant, être pérennes.**

4.2.3 ECHELLE DU QUARTIER

La végétation et la présence d'eau ont été utilisées de tout temps pour créer de l'ombre et ménager très localement une zone de fraîcheur. L'arrosage des chaussées est également une pratique répandue qui contribue à créer une ambiance acceptable à l'extérieur des bâtiments pendant des périodes chaudes (Figure 29).



Arrosage des chaussées



Parc urbain

Figure 29 : Exemples de mesures d'adaptation à l'échelle du quartier (Séville, source : CSTB)

La surface des chaussées représente une large part de la surface d'une zone urbaine (2 650 ha sur 10 533 ha à Paris (Colombert 2008)). En fonction de la morphologie de la ville, ces surfaces sont pour partie exposées au soleil. Les matériaux (bitume, béton, pavés) recouvrant ces surfaces présentent un albédo faible (de l'ordre de 0,1 à 0,3) et une émissivité infra rouge de l'ordre de 0,9.

Afin d'abaisser la température de surface des chaussées et de limiter ainsi le stockage d'énergie thermique qui résulte de leur exposition au soleil, il est dès lors tentant de chercher à augmenter leur albédo, pour réaliser des « cool pavements » à l'image des « cool roofs ».

Cependant, ces surfaces sont en contact avec le sol dont l'humidité varie fortement en fonction du temps ne serait-ce que du fait des précipitations. De ce fait, les échanges radiatifs en surface des chaussées sont couplés à des échanges de chaleur latente associée à l'évaporation/condensation de l'eau.

L'effet d'une augmentation de l'albédo de ces surfaces sur le bilan énergétique d'une ville ne peut être déduit simplement d'un raisonnement qualitatif. Des travaux en cours tendent au développement de revêtement de chaussée retenant l'eau afin de tirer parti des effets « rafraichissants » de l'évaporation (Santamouris 2013).

De fortes interrogations subsistent sur la pérennité des propriétés recherchées (fort albédo en particulier) du fait des conditions de circulation notamment.

4.2.4 ECHELLE DE LA VILLE

La ville ne se réduit pas à l'assemblage de bâtiments formant des îlots et à la connexion de ces derniers par des réseaux souterrains, de surface et aériens. Il s'agit d'une construction beaucoup plus subtile dont l'élaboration demande du temps, de la concertation, des ajustements et des arbitrages permanents reflétant son caractère évolutif.

Les chapitres précédents ont montré que des dispositifs organisationnels sont déjà opérationnels, comme le Pnacc (voir 4.1.3.1), afin de limiter les conséquences dommageables pour la population lors de canicules. Ces dispositifs sont évalués et seront améliorés au fil du temps. Le développement du numérique en ville participera très certainement de ces évolutions par le traitement d'informations provenant de capteurs (caméras, température...) répartis sur le territoire urbain.

La morphologie de la ville jouant également un rôle (voir 4.1.3.2), une meilleure compréhension des paramètres influençant le climat urbain pourra être source d'innovations mais l'échelle de temps est *a priori* beaucoup plus longue que pour la définition et la mise en œuvre d'innovations concernant des dispositifs technologiques tels qu'évoqués au paragraphe précédent.

Les travaux prospectifs menés par de nombreuses villes (voir par exemple pour Paris <http://www.apc-paris.com/>) laissent entrevoir des villes vertes de végétation, bleues de pièces et de cours d'eau. D'autres aspects visuels sont également convoqués comme le réfléchissant, le blanc pour contribuer à rejeter vers l'atmosphère une partie importante de l'énergie solaire incidente.

Les modèles énergétiques des villes sont un support à des décisions d'intervention sur **la ville mais celle-ci ne se réduit pas à un système énergétique, pas plus qu'à une machine thermodynamique.**

Au-delà de la communication sur les « bonnes pratiques » issues des expériences dans telles ou telles ville, il serait tout aussi utile et riche d'enseignements de communiquer sur les échecs. N'est-ce pas en tombant que l'on apprend à marcher ?

Par ailleurs, au-delà de leur coût de mise en œuvre et de fonctionnement ainsi que de leurs performances, les bonnes pratiques ou les succès devraient être présentés dans leur contexte culturel car ce qui est acceptable ici peut ne pas l'être là.

A l'intérieur d'une même zone urbaine, les conditions d'acceptation peuvent varier de manière très fine. Ainsi, une étude sociologique dans le Vieux Nice (Petitcollot 1990) a montré que les habitants étaient très attachés à leur quartier et n'envisageaient pas de déménager sauf éventuellement pour occuper un étage plus élevé afin de bénéficier d'une meilleure luminosité que dans les étages bas.

CONCLUSION-RECOMMANDATIONS

La négation du CC n'est plus une option et il s'agit de réfléchir dès aujourd'hui aux conséquences d'une nouvelle donne climatique à l'horizon de quelques décennies. Horizon temporel très proche dans le secteur de la construction, où la décennie est l'unité de temps pour nombre de projets, notamment les projets urbains d'envergure : une décennie de gestation, une de réalisation et plusieurs d'exploitation.

L'adaptation aux effets du changement climatique n'est pas un « choc » pour la construction, c'est en revanche un défi. Nombre d'outils et de savoir-faire sont à portée de main compte tenu de l'expérience acquise par les constructeurs au fil du temps pour réaliser un cadre bâti adapté aux effets des AOC actuels. Un saut qualitatif est cependant rendu nécessaire pour construire des ouvrages offrant de manière pérenne des performances plus élevées que celles des bâtiments actuels, du fait de la modification probables des AOC.

La perspective du CC peut être ainsi vue comme une chance pour le secteur en « obligeant » à mieux construire (accroissement des exigences réglementaires relatives aux performances des ouvrages, « éducation » des clients à être plus exigeants).

Le climat futur se dessine mais reste encore trop incertain pour pouvoir comparer différentes options et faire des choix. Cependant, quelques chantiers pourraient être ouverts sans attendre et certains le sont d'ailleurs déjà, comme ceux visant à mettre à disposition des données météorologiques permettant d'anticiper de futures réglementations (voir 4.1.3.2) ou à cartographier les normes nécessitant une révision dans une perspective d'adaptation au CC (voir 4.1.3.3).

Le Tableau 13 reprend la structure générale des tableaux ayant servi à cadrer les possibles impacts du CC sur le cadre bâti au premier chapitre. Y sont présentées des suggestions d'actions qui concernent tous les acteurs des projets de construction. Ces suggestions ne comportent pas de rupture par rapport aux pratiques actuelles, il s'agit essentiellement de renforcer la vigilance des acteurs concernés à toutes les étapes de la vie des projets.

On notera que ces actions concernent pour une grande part des sujets d'organisation et pour une moindre part des sujets techniques. Il est en effet peu probable que la réflexion sur l'adaptation du cadre bâti aux effets du CC débouche sur des innovations fortes remettant en cause des savoir-faire élaborés au cours des siècles. Le tissu professionnel et l'économie du secteur sont profondément structurés par cette histoire qui avance à son propre pas. En revanche, le développement du numérique peut déboucher sur des améliorations des savoir-faire et de l'organisation de la prévention (via par exemple la collecte et l'accès/le partage de données [pratiques/observations/mesures]).

Insistons enfin sur la question de l'acceptabilité des solutions d'adaptation qu'elles soient organisationnelles ou techniques.

Modifier (temporairement) des rythmes de vie aura des incidences sur l'économie des zones urbaines : décalage des plages quotidiennes de transport, décalage des

horaires des services... Par ailleurs, la modification de l'aspect du cadre bâti induit par des choix technologiques est un sujet qui ne pourra pas être ignoré comme tente de l'illustrer les trois visions d'un toit parisien actuel suivant trois options tranchées proposées en Figure 30. Rappelons que « *L'architecture est une expression de la culture.* » comme le rappelle la première phrase de l'article 1 de la loi sur l'Architecture (Architecture 1977).

Un autre aspect plus politique de l'acceptabilité est la définition de « seuils de tolérance » relativement au nombre de victimes. Ces seuils sont aujourd'hui implicites. La société est-elle prête à ouvrir un débat sur cette question ?

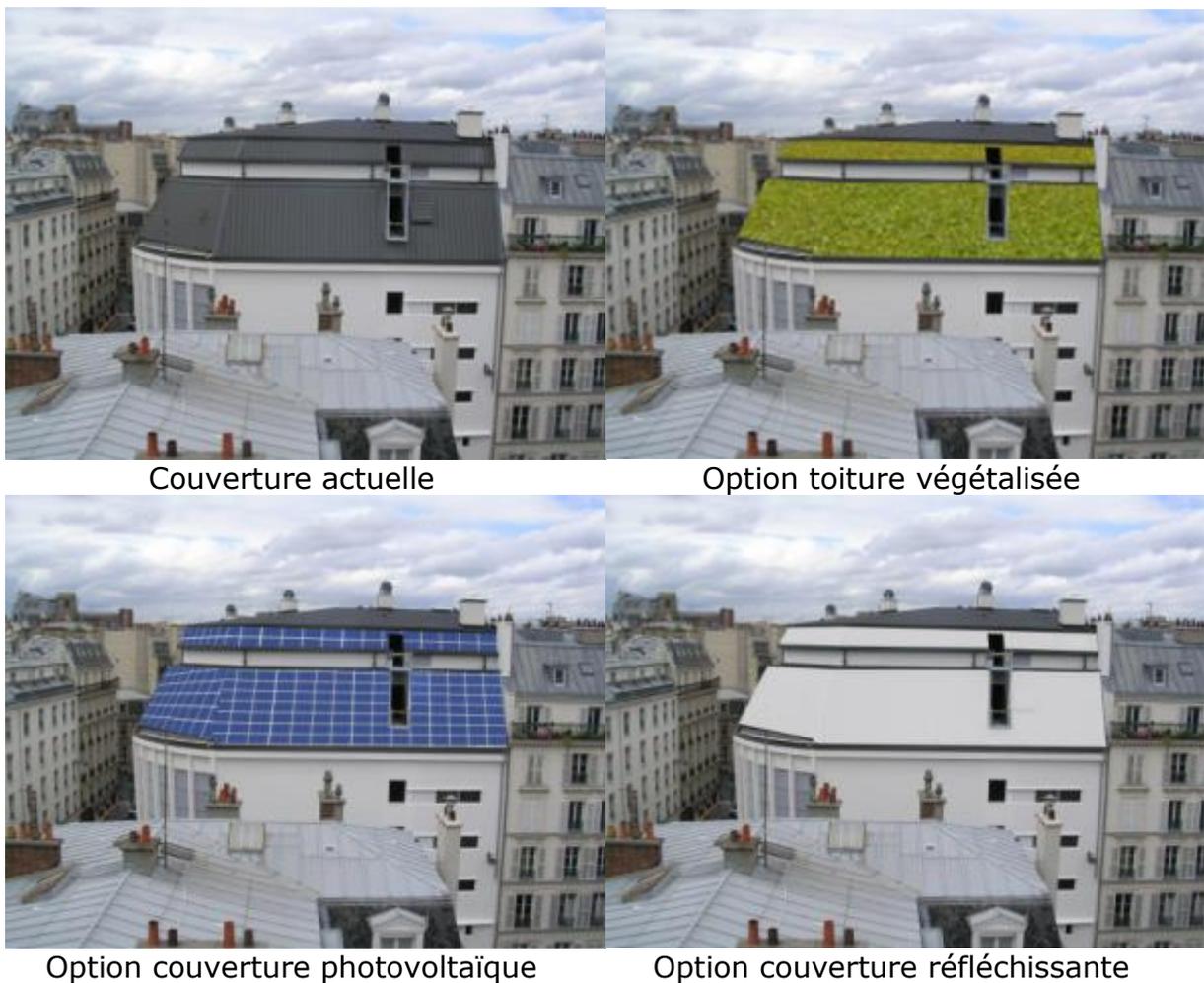


Figure 30 : Impact visuel de trois options technologiques possibles (source CSTB)

Tableau 13 : Suggestions d'améliorations pour une meilleure prise en compte des effets des AOC (source CSTB)

Facteur météorologique fondamental	Température		Précipitations					Vent	
Aléa impactant (combinaison facteurs fondamentaux)	Vague de froid	Canicule Îlot de chaleur urbain	Pluie Humidité / Salinité des ambiances	Neige	Pluie givrante Grêle	Mouvement de terrain	Inondation (crue, côtière, ruissellement urbain...)	Pluie battante, cyclone	Vent fort Tempête Tornade
Services d'alerte	Amélioration de la précision et de la compréhension des messages								
Observateurs/chercheurs	Croisement des observations climatologiques et des performances des bâtiments (pathologie, énergie, GES, usage) Identification, analyse multicritères et porté à connaissance de la portée et des limites des mesures d'adaptation								
Champs réglementaire et normatif (Administration, professions)	Favoriser les expérimentations en matière d'adaptation et organiser le partage de leur évaluation Attention portée à la cohérence atténuation – adaptation Information sur les conséquences de mesure d'adaptation en matière d'usage des bâtiments.								
	Anticipation des conditions climatiques futures (scénarios) Définition de seuil de risques pour les personnes		Anticipation des conditions climatiques futures (scénarios) Révision des conditions aux limites des règles actuelles						
	Renforcement des contrôles : Urbanisme, conception, mise en œuvre, exploitation								
Maître d'ouvrage	Renforcement des exigences (de performances) : expression des performances, observation, suivi, contractualisation Organisation de la maintenance								
Professionnels	Amélioration de la conception et de la mise en œuvre Amélioration de l'information à destination des acteurs (usagers inclus)								
Assureurs	Collecte et analyse de données relatives aux modes de survenue des dommages en fonction des AOC. Vigilance accrue sur le respect des réglementations ?								
Usagers	Amélioration de l'utilisation et de la maintenance des ouvrages et dispositifs de prévention								
	Entraînement à la mise en œuvre des mesures de prévention								

LISTE DES REFERENCES

AcadSciences, 2010. *Le changement climatique*, rapport de l'Académie des Sciences, octobre 2010, [en ligne, consulté le 5 janvier 2015, <http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rapport261010.pdf>]

Ademe, 2012. *Le Changement climatique : mieux comprendre les phénomènes, les anticiper et s'y adapter*, juin 2012, [en ligne, consulté le 8 septembre 2013, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-changement-climatique.pdf>]

Alessandrini J-M. et al., 2014. *L'exigence énergétique entre contrainte et innovation*, février 2014 [en ligne, consulté le 24 juin 2015, http://www.urbanisme-puca.gouv.fr/IMG/pdf/exigence-energetique_1-2.pdf]

Alessandrini J-M., 2015. *Travaux complémentaires de recherche en vue de l'accompagnement des dispositifs réglementaires*, Lot 1 : Changement climatique, adaptation des fichiers météorologiques, disponibilité des données météorologiques à l'horizon 2030-2050, CSTB, Rapport final d'étude pour le compte de l'Ademe, janvier 2015 [rapport DEE/PEB-2015.010RE, diffusion confidentielle]

Ancre, 2015. *Etude CVT ANCRE : bâtiment H2020*, mai 2015

Apur, 2007. *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes décembre 2007* [en ligne, consulté le 23 janvier 2015, <http://www.apur.org/etude/consommations-energie-emissions-gaz-effet-serre-liees-chauffage-residences-principales-parisie>]

AQC-1, 2013. *Tableau de bord Sycodès 2013 : les indicateurs d'évolution de la qualité des constructions*, mai 2013 [en ligne, consulté le 5 juin 2015, <http://www.qualiteconstruction.com/fileadmin/medias/observation/tdb-sycodes/tbs13.pdf>]

AQC-2, 2013. *Maisons individuelles : des fondations encore trop souvent superficielles*, Qualité Construction, n° 136, janvier-février 2013 [en ligne, consulté le 5 juin 2015, <http://www.qualiteconstruction.com/fileadmin/medias/revue/gratuits/136/qc136-07.pdf>]

Architecture, 1977. *Loi n° 77-2 du 3 janvier 1977 sur l'architecture*, Journal officiel du 4 janvier 1977

Baloche C., 2002. *Tornades + Rupteurs thermiques + Fenêtres solides = DANGER*. Note interne CSTB, 18 mars 2002

Berland-Berthon A., 2004. *La démolition des ensembles de logements sociaux : l'urbanisme entre scènes et coulisses*, thèse de l'Université de Bordeaux III - Michel de Montaigne, soutenue le 20 décembre 2004 [en ligne, consulté le 28 mai 2015, https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/759732/filename/THESE_ABB-HAL.pdf]

Besancenot J-P., 2007. *Changement climatique et impacts sanitaires : une évolution déjà observable ?*, Air Pur, n° 72, deuxième semestre 2007, [en ligne, consulté le 29 juin 2014, http://www.appa.asso.fr/docs/7/fckeditor/file/Revue/AirPur/Airpur_72_Besancenot.pdf]

BRGM, 2009. *Projet ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions)*, rapport final, Projet ANR-05-PRGCU-005, mai 2009

Carbone4, 2014. *Etude des 4 trajectoires du Débat National sur la Transition Energétique (DNTE)*. Etude réalisée pour le compte du Medde-CGDD-SEEIDD, février 2014

Chemillier P., 1993. *Le progrès technique et la satisfaction des exigences humaines dans l'habitat*, Cahiers du CSTB n° 2631, livraison 336, janvier-février 1993

Colombert M., 2008. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*, thèse de l'Université Paris-Est, soutenue le 8 décembre 2008 [en ligne, consulté le 28 mai 2015, http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/47/05/36/PDF/2008PEST0233_0_0.pdf]

Colombert M. et al., 2015. *Intégration de l'adaptation au changement climatique dans la conception des projets d'aménagements urbains : nouveau(x) outil(s) et nouveau(x) métier(s)*. Rapport scientifique du projet Adaptatio, réalisé pour le compte du GICC, février 2015

Cool colors project, 2002. *Development of cool colored roofing materials* [en ligne, consulté le 27 mai 2015, <http://coolcolors.lbl.gov/>]

Coppens Y., 2014. *Pré-Ludes, autour de l'homme préhistorique*, Odile Jacob, 2014

CPP, 2013, *Avis du Comité de la prévention et de la précaution, Adaptation aux changements climatiques : acceptabilité et gouvernance des risques*, juin 2013

DGEC, 2011. *Le climat de la France au XXIe siècle. Volume 1, Scénarios régionalisés* : édition 2011, janvier 2011 [en ligne, consulté le 15 mai 2015, www.developpement-durable.gouv.fr/Volume-1-Scenarios-regionalises.html]

DGEC, 2012-1. *Le climat de la France au XXIe siècle. Volume 2, Scénarios régionalisés : Indices de référence pour la métropole*, 1ère édition, février 2012 [en ligne, consulté le 15 mai 2015, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Volume-2-Scenarios-regionalises.html>]

DGEC, 2012-2. *Le climat de la France au XXIe siècle. Volume 3, Evolution du niveau de la mer*, février 2012 [en ligne, consulté le 15 mai 2015, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Volume-3-Evolution-du-niveau-de-la.html>]

DGEC, 2013. *Évaluation à mi-parcours du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC)*, décembre 2013 [en ligne, consulté le 21 mai

2015, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Rapport_evaluation_miparcours_PNACC_VF_web.pdf]

DGEC, 2014. *Le climat de la France au XXI^e siècle. Volume 4, Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer*, août 2014 [en ligne, consulté le 14 mai 2015, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Volume-4-Scenarios-regionalises.html>]

DGS, 2013. *Instruction interministérielle n° DGS/DUS/DGOS/DGCS/DGSCGC/DGT/2013/152* du 10 avril 2013 relative au Plan national canicule 2013

DGUHC, 2001. *Solution technique RT 2000 : maisons individuelles non climatisées*. DGUHC, Les outils, juin 2001

EC, 2000. *Vers un programme européen sur le changement climatique (PECC)*, Communication de la Commission au Conseil et au Parlement Européen, 8 mars 2000 [en ligne, consulté le 15 décembre 2014 http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128185_fr.htm]

EC, 2007. *Adaptation au changement climatique en Europe: les possibilités d'action de l'Union européenne*, Livre vert, juin 2007 [en ligne, consulté le 15 décembre 2014, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0354&from=EN>]

EC, 2009. *Adaptation au changement climatique : vers un cadre d'action européen*, Livre blanc, avril 2009 [en ligne, consulté le 15 décembre 2014, [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/com/com_com\(2009\)0147/com_com\(2009\)0147_fr.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/com/com_com(2009)0147/com_com(2009)0147_fr.pdf)]

EC, 2013. *Stratégie de l'UE relative à l'adaptation au changement climatique*, avril 2013 [en ligne, consulté le 15 décembre 2014, <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2013/FR/1-2013-216-FR-F1-1.Pdf>]

Epa, 2008. *Reducing Urban Heat Islands: compendium of strategies*, October 2008 [en ligne, consulté le 29 mai 2015, <http://www.epa.gov/heatislands/resources/compendium.htm>]

Epicea, 2011. *Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne*, projet soutenu par la Ville de Paris [en ligne, consulté le 4 mars 2015, <http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article271>]

FFSA, 2009. *Synthèse de l'étude relative à l'impact du changement climatique et de l'aménagement du territoire sur la survenance d'événements naturels en France*, Colloque Impacts du changement climatique, Paris, 29 avril 2009

FFSA, GEMA, 2011. *Inondations du Var des 15 et 16 juin 2010*, Bilan chiffré au 31 mai 2011, Enquête, juin 2011 [en ligne, consulté le 9 novembre 2014,

https://www.ffsa.fr/sites/upload/docs/application/pdf/2011-06/bilan_var_au_31_mai_2011m_2011-06-15_15-29-10_49.pdf

FFSA, GEMA, 2013. *L'assurance des catastrophes naturelles en 2011*, Etude, avril 2013

FFSA, 2015. *L'assurance des catastrophes naturelles. Fiche pratique du 17/12/2014* [en ligne, consulté le 13 avril 2015, http://www.ffsa.fr/sites/jcms/c_50639/fr/lassurance-des-catastrophes-naturelles?cc=c_51675]

Giec, 2007. *Changement climatique 2007*, rapport de synthèse, 2008 [en ligne, consulté le 15 juin 2015, https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf]

Giec-WG1, 2013. *Changements Climatiques 2013, les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Foire aux questions*, 2013 [en ligne, consulté le 15 juin 2015, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf]

Giec-WG2, 2014. *Changements Climatiques 2014 Incidences, adaptation et vulnérabilité, Résumé à l'intention des décideurs*, 2014 [en ligne, consulté le 15 mai 2015, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf]

Giec-WG3, 2014. *Climate Change 2014, Mitigation of climate change. Summary for policy makers*, 2014 [en ligne, consulté le 15 mai 2015, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf]

Gleyze J-F., Reghezza M., 2010. *La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement*, Géocarrefour, 82/1-2, 2007 [en ligne, consulté le 31 mars 2015, <http://geocarrefour.revues.org/1411>]

Gobin C., 2003. *Analyse fonctionnelle et construction*. Techniques de l'Ingénieur, référence C3052, novembre 2003

Griffiths, J. F., 1976. *Climate and the environment, The atmospheric impact on man*, London: Paul Elek, 1976

Han, Y. et al. 2015. *Toward mitigating urban heat island effects: Investigating the thermal-energy impact of bio-inspired retro-reflective building envelopes in dense urban settings*, Energy and Buildings, 102, September 2015, p. 380-389

Heck V., 2010. *Etude relative à l'adaptation au sol des constructions : effets de la sécheresse sur le bâti de type maison individuelle*. Etude CSTB menée pour le compte de la DGALN/QC, octobre 2010

Hémon D., Jouglu E., 2003. *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003*, rapport d'étape, Inserm, septembre 2003

HCSP, 2014. *Recommandations sanitaires du Plan national canicule 2014*, mai 2014 [en ligne, consulté le 12 juin 2015
http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/Recommandations_sanitaires_Plan_canicule_2014.pdf]

IEA, 2015. *Global energy-related emissions of carbon dioxide stalled in 2014*, March 2015 [en ligne, consulté le 15 avril 2015:
<http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2015/march/global-energy-related-emissions-of-carbon-dioxide-stalled-in-2014.html>]

Igas, 2004. Leger A.M., Lacaze D., Laroque M., Noury D., Igas, *La prise en charge sociale et médico-sociale des personnes âgées face à la canicule de l'été 2003*, , janvier 2014

INRS, 2014. *Dossier Travail à la chaleur*, octobre 2014 [en ligne, consulté le 23 avril 2015, <http://www.inrs.fr/risques/chaleur/ce-qu-il-faut-retenir.html>]

Insee, 2008. *Les logements en 2006 : le confort s'améliore, mais pas pour tous*, Insee Première, n° 1202, juillet 2008 [en ligne, consulté le 5 juin 2015, <http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1202/ip1202.pdf>]

Insee, 2010. *Projections de population à l'horizon 2060, un tiers de la population âgé de plus de 60 ans*. Insee Première, n° 1320, octobre 2010 [en ligne, consulté le 5 juin 2015, <http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1320/ip1320.pdf>]

Insee, 2014. *Le patrimoine économique national en 2013*, Insee Première, n° 1529, décembre 2014 [en ligne, consulté le 5 juin 2015, http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1529]

Insee, 2015. *Le parc de logements en France au 1er janvier 2014*, Insee-Focus, février 2015, [en ligne, consulté le 30 mars 2015, http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&ref_id=if16]

InVS, 2004. *Vague de chaleur de l'été 2003 : relations entre températures, pollution atmosphérique et mortalité dans neuf villes françaises*, rapport d'étude, septembre 2004 [en ligne, consulté le 10 novembre 2014, http://www.invs.sante.fr/publications/2004/psas9_070904/rapport.pdf]

Iso, 2006. *ISO 14064-1:2006, Gaz à effet de serre – Partie 1 : spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre*,

Kalkstein et al., 2008. *Analog european heat waves for U.S. cities to analyze impacts on heat-related mortality*, Bulletin of the American Meteorological Society, January 2008

Le Roy Ladurie E, 2009. *L'histoire humaine et comparée du climat*, Tome 1 : Canicules et glaciers XIIIe-XVIIIe siècles, Tome 2 : Disettes et révolutions (1740-1860), Tome 3 : Le réchauffement de 1860 à nos jours, Fayard

MASSDF, 2015. Vague de chaleur : recommandations pour la population, mai 2015 [en ligne, consulté le 10 juin 2015, <http://www.sante.gouv.fr/vague-de-chaleur-recommandations-pour-la-population.html>]

Masson V., 2000. *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*, Boundary-Layer Meteorology, 94, 2000, p. 357-397

Masson V. et al., 2014. *Solar Panels reduce both global warming and Urban Heat Island*, Frontiers in Environmental Science, section Atmospheric Science, June 2014 [en ligne, consulté le 6 mars 2015, <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2014.00014>]

Medde, 2012. *Les différentes méthodes de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre d'une collectivité à l'échelle d'un territoire*. Medde-Ademe, septembre 2012, [en ligne, consulté le 17 mai 2015, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/note_bilan_mise_en_page6.pdf]

MLETR, 2014. *Les Eco-quartiers*, décembre 2014 [en ligne, consulté le 12 juin 2015, <http://www.territoires.gouv.fr/les-ecoquartiers>]

Météo-France, 2015. *Les canicules* [en ligne, consulté le 21 avril 2015, <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/canicules>]

MSPS, 2004. *Plan Canicule : dossier de présentation par le Ministère de la Santé et de la protection sociale*, mai 2004 [en ligne, consulté le 27 mai 2015, http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/cerca_doc/calore/piano_francia_dossier.pdf]

Mucsade, 2013. *Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique*. projet ANR-09-VILL-0003, rapport final [en ligne, consulté le 4 mars 2015, <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique48>]

Musy M. et al., 2014. *Une ville verte, les rôles du végétale en ville*, Editions QUAE, 2014

Onerc 2013. *Le concept de mal-adaptation*, 20 juin 2013 [en ligne, consulté le 10 juin 2015, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-concept-de-mal-adaptation.html>]

Onerc, 2014. *Comprendre le changement climatique*. Plaquette d'information, novembre 2014, 12 p. [en ligne, consulté le 5 mars 2015, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/14188_journal-expo-CLIMAT_BATweb.pdf]

Periañez M, 2013. *L'habitat évolutif : du mythe aux réalités (1993-2013)*, Rapport au Plan Construction et Architecture dans le cadre du Programme Cité-Projets, éd. révisée, 2013 [en ligne, consulté le 16 mars 2015, <http://mpzga.free.fr/habevol/evolutif2013.html>], page]

Petitcollot C., 1990. *Etude climatique du Vieux Nice : les qualités thermiques d'un tissu urbain*. Rapport intermédiaire d'étude pour le compte du Puca, juillet 1990

Pnacc, 2011, *Plan National d'Adaptation au Changement Climatique*, Medde, juillet 2011 [en ligne, consulté le 30 mai 2015, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Contenu-du-plan-national-d>]

Polo M., 2004. *Le devisement du monde : le livre des merveilles*, chapitre CXCIX, Editions La Découverte, 2004

Portail Québec 2015. *Prévenir les effets de la chaleur accablante et extrême* [en ligne, consulté le 23 avril 2015, <http://sante.gouv.qc.ca/conseils-et-prevention/prevenir-les-effets-de-la-chaleur-accablante-et-extreme/>]

Rage, 2012. *Analyse détaillée du parc résidentiel existant*, septembre 2012 [en ligne, consulté le 26 mai 2015 [http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles de l Art/Rapports/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf](http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles_de_l_Art/Rapports/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf)]

Rey et al., 2007. *Vagues de chaleur, fluctuations ordinaires des températures et mortalité en France depuis 1971*, INED, Population-F, 62/3, 2007, p. 533-564

Ribéron J. et al., 2006. *Building and urban factors in heat related deaths during the 2003 heat wave in France*, HB2006, Proceedings of Healthy Buildings, Lisbon, Portugal, 4–8 June 2006

RT-2012, 2011. *Réglementation Thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs*, avril 2011 [en ligne, consulté le 25 mai 2015 http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/plaquetteRT2012_avril2011.pdf]

Salagnac J-L, 2007. *Lessons from the 2003 heat wave: a French perspective*, Building Research & Information, June 2007, p.450-457, [en ligne, consulté le 11 mai 2015, <http://dx.doi.org/10.1080/09613210601056554>]

Salagnac J-L et al., 2014. *Impacts des inondations sur le cadre bâti et ses usagers*, CSTB, 2014 [en ligne, consulté le 4 mai 2015, <http://hal-cstb.archives-ouvertes.fr/hal-01064721>]

Salat S., 2011. *Les villes et les formes*. CSTB, Hermann Editeurs, 2011

Santamouris M., 2013. *Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, October 2013, p. 224–240

SCHL-CMHC, 2005. *Lignes directrices de conception de toits verts*, 2005 [en ligne, consulté le 2 juin 2015, <http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/prin/coco/toenha/peinar/upload/Lignes-directrices-de-conception-de-toits-verts.pdf>]

Sénat, 2004. *La France et les Français face à la canicule : les leçons d'une crise*, rapport d'information, n° 195, février 2004

SIG-Risques, 2015. *Canicule* [en ligne, consulté le 21 avril 2015, <http://www.risques.gouv.fr/risques-naturels/canicule>]

SOeS, 2014. *Chiffres clés du climat : France et Monde*, Édition 2015. SOeS, DGEC, CdC Climat Recherche Collection Repères, novembre 2014 [en ligne, consulté le 2 juin 2015, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2113/1072/chiffres-cles-climat-france-monde.html>]

VANDENTORREN S et al., 2004. *Mortality in thirteen French cities during the August 2003 heat wave*, American Journal of Public Health. 94/9, September 2004, p. 1518-1520

VANDENTORREN S et al., 2006. *August 2003 Heat Wave in France: risk factors for death of elderly people living at home*, European Journal of Public Health, 16/6, October 2006, p. 583–591

Véron J., 2007. *La moitié de la population mondiale vit en ville*. Population & sociétés, n° 435, juin 2007, [en ligne, consulté le 16 mai 2015, <http://www.ined.fr/fr/publications/population-et-societes/la-moitie-de-la-population-mondiale-vit-en-ville/>]

VURCA, 2013, *Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation*, projet ANR-08-VULN-013, rapport final [en ligne, consulté le 4 mars 2015, <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique45>]

SIEGE SOCIAL

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | www.cstb.fr



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS