



HAL
open science

Bâtiments tertiaires à énergie positive : analyse critique et perspective pour 2020, et au-delà

Denis Fréhel

► **To cite this version:**

Denis Fréhel. Bâtiments tertiaires à énergie positive : analyse critique et perspective pour 2020, et au-delà . Construction durable. 2013. dumas-01143120

HAL Id: dumas-01143120

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01143120>

Submitted on 16 Apr 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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

PARIS

MEMOIRE

PRÉSENTÉ EN VUE D'OBTENIR LE

DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION, AMÉNAGEMENT

OPTION : BÂTIMENT

PAR

DENIS FRÉHEL

**BÂTIMENTS TERTIAIRES À ÉNERGIE POSITIVE :
ANALYSE CRITIQUE ET PERSPECTIVES POUR 2020, ET AU-DELÀ.**

SOUTENU LE 16 DÉCEMBRE 2013

JURY

PRÉSIDENT : M. LE PROFESSEUR FRANCIS GUILLEMARD

MEMBRES : M. MICHEL CAZENAVE
M. GABRIEL BAJEUX
M. JOSEPH PAIS
M. XAVIER CESPEDES
M. JEAN-SÉBASTIEN VILLEFORT
M. ISSA JAFFAL

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le fruit d'une réflexion menée depuis cinq années au sein de l'équipe d'Arcora, agence d'ingénierie spécialisée dans la conception d'enveloppes et de structures de bâtiments.

Mes remerciements vont tout particulièrement à Dominique Queffelec, Jean-Pierre Cœur, Vincent Morael, Antoine Maufay, Emmanuel Viglino, et Alain Boccato, ainsi qu'à tous les collaborateurs et partenaires de cette aventure architecturale et humaine.

Ce sont les années passionnantes et intensives d'études passées au CNAM qui m'ont permis d'apprendre les sciences de l'ingénieur en bâtiment, et de rejoindre cette équipe, aussi, j'adresse mes remerciements chaleureux aux enseignants du CNAM pour leur enseignement, ainsi qu'aux membres du Jury pour leur attention.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

DPEB	Directive sur la P erformance É nergétique des B âtiments
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>
NZEB	<i>Nearly ou Net Zero Energy Building</i>
BEPOS	B âtiment à É nergie POS itive
ENR	Énergie d'origine renouvelable
Tep et MTép	Tonne et M éga Tonne équivalent p étrole
VMC	Ventilation M écanique C ontrôlée
GIEC	G roupe d'experts Intergouvernemental sur l' É volution du C limat
GES	G az à E ffet de S erre
TéCO ₂	Tonne équivalent CO ₂
PRG	P ouvoir de R échauffement G lobal
GteqC/an	M illiards de Tonne de C arbone par an
S _{env}	Surface de l' e nveloppe
SU	Surface U tile
FDES	Fiche de D éclaration E nvironnementale et S anitaire
INIES	I nventaire N ational des I mpacts E nvironnementaux et S anitaires
ppm	p arties p ar m illion

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	6
ARCORA, ET L'« INGÉNIERIE DES ENVELOPPES »	6
OBJECTIF DE CE MÉMOIRE.....	8
PRÉSENTATION DU PLAN	9
A HUMANITÉ, ÉNERGIE, ET ENVIRONNEMENT	10
INTRODUCTION	10
I HISTOIRE DE L'ÉNERGIE	11
I.1 Origines	11
I.2 Croissance démographique.....	12
I.3 Consommation d'énergie.....	12
II ENJEUX ACTUELS	14
II.1 Épuisement des ressources fossiles	14
II.2 Cycle du carbone.....	15
II.3 Effet de serre.....	17
II.4 Changement climatique	18
III TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	20
III.1 Réduction des émissions de GES.....	20
III.2 Substitution des énergies fossiles	22
III.3 Énergie nucléaire.....	25
III.4 Énergie solaire.....	26
CONCLUSION.....	27
B ÉNERGIE ET BÂTIMENT.....	29
INTRODUCTION	29
I SITUATION AU PLAN INTERNATIONAL	30
I.1 Prise de conscience du risque climatique.....	30
I.2 Place du bâtiment dans les bilans énergétiques	31
I.3 Formalisation d'une définition du Bâtiment à Énergie Zéro.....	33
I.4 Revue des opérations pilote à travers le monde.....	45
II VOLONTARISME DE L'UNION EUROPÉENNE.....	59
II.1 Paquet <i>climat-énergie</i>	59
II.2 Directive pour la Performance Énergétique du Bâtiment	60
II.3 Application de la DPEB dans les pays membres	61
III VALSE-HÉSITATION EN FRANCE.....	63
III.1 Contexte énergétique	63
III.2 Contexte politique.....	66
III.3 Label Bepos-effinergie 2013.....	69
III.4 Revue des projets pilotes français.....	85
CONCLUSION.....	94

C	SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE APPLIQUÉE AUX FAÇADES	96
	INTRODUCTION	96
	I OPTIMA, UNE STD SPÉCIALISÉE SUR L'ENVELOPPE	96
	I.1 Intérêt et limite de la Simulation Thermique Dynamique	96
	I.2 Présentation de l'outil OptimA.....	97
	II MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE.....	98
	II.1 Modèle de référence.....	99
	II.2 Résultats du calcul de référence	101
	III PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE	103
	III.1 Influence de l'orientation	103
	III.2 Réduction du besoin froid	104
	III.3 Réduction du besoin chaud	109
	III.4 Modification de l'espace de travail	112
	IV EXPLOITATION DES RÉSULTATS	115
	CONCLUSION.....	117
	CONCLUSION GÉNÉRALE	118

INTRODUCTION GÉNÉRALE

ARCORA, ET L'« INGÉNIERIE DES ENVELOPPES »

Il est nécessaire d'introduire en quelques lignes l'équipe à laquelle appartient l'auteur, afin d'expliquer le parti pris de ce travail et la valeur ajoutée attendue de cette étude. ARCORA, est une société d'ingénierie créée en 1976, qui se présente comme un *traducteur de concepts architecturaux*. Elle trouve ses origines dans la volonté de créer une entité de conception capable d'étudier et de développer des solutions originales et innovantes à toute sorte de problème de structure et d'enveloppes, en collaboration étroite avec les architectes.

Arcora rejoint le groupe Ingerop en 2010, et y apporte son identité spécifique, celle d'une équipe dont la pluridisciplinarité exprime le lien étroit qui existe entre Architecture et Ingénierie. La demande des partenaires d'Arcora est majoritairement axée sur les enveloppes de bâtiments tertiaires, et en premier lieu ceux à usage de bureau, comme le montre cet histogramme de répartition du CA.

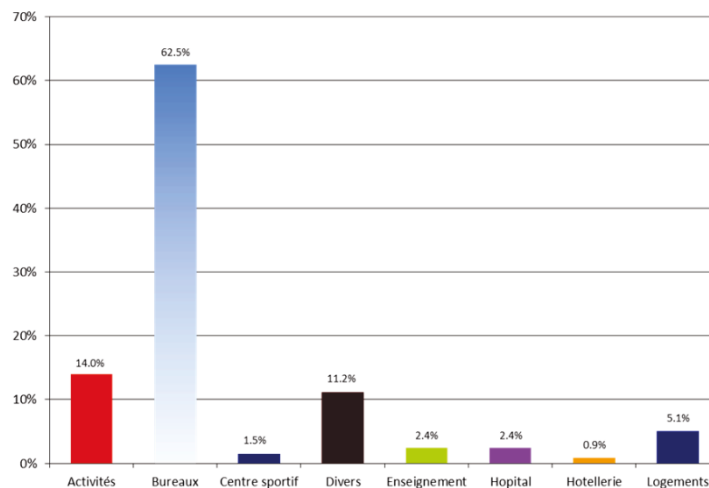


Figure 1 : Répartition par programme du CA (en %)

L'agence travaille sur 190 projets actifs à ce jour, dont plus de la moitié dispose d'un label, à caractère énergétique (HPE, THPE, BBC), ou environnemental (HQE, BREAM, LEED). Seuls 3 de ces projets sont dits à *énergie positive*, mais c'est une tendance nouvelle qui est appelée à se généraliser, nous allons le voir. Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire de diplôme est donc une étude prospective de ce concept en

cours de maturation, afin d'anticiper les éléments clés de la conception de l'enveloppe de ces bâtiments.

En effet, l'évolution actuelle des architectures, qu'elles soient *anatomiques* ou *métaboliques*, place la conception des enveloppes au cœur des projets. Ces enveloppes, autrefois composées et ordonnées, constituent aujourd'hui des *peaux*, des *réseaux*, des *tissus*, ou même un *milieu*¹. Or les façades d'un bâtiment, ne sont pas simple décor de théâtre, mais également porteuses de nombreuses fonctions structurelles, acoustiques, thermiques, etc.

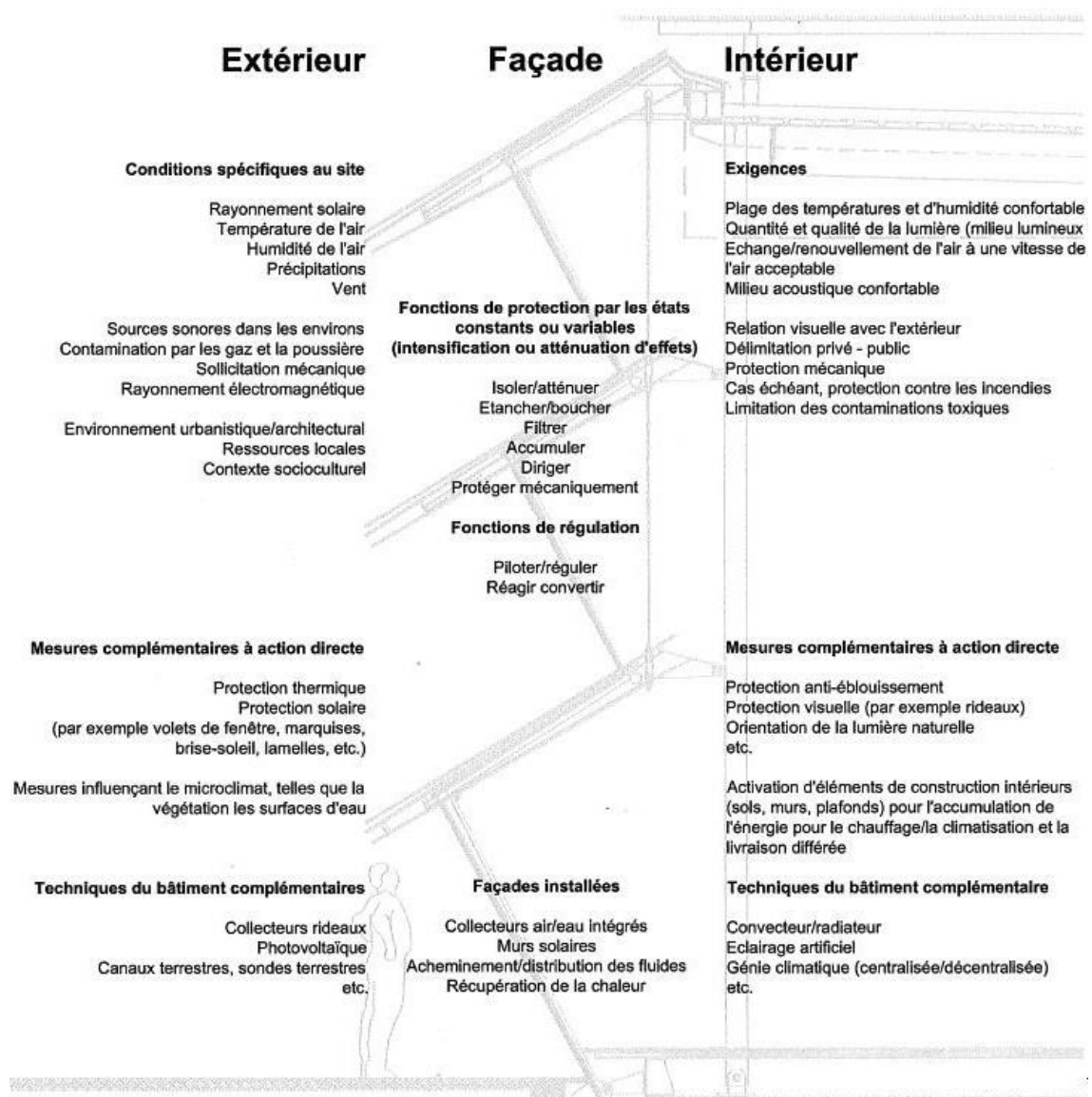


Figure 2: Schéma analytique fonctionnel des façades de bâtiments

¹ Jacques Lucan. *Composition, non-composition*, PPUR, 2013.

Ces fonctions, notamment thermiques, sont en plein développement avec l'avènement des bâtiments à basse consommation, et demain des fonctions de captage de l'énergie solaire et de production d'énergie sont à attendre. Ainsi, l'enveloppe se trouve au centre de l'attention du thermicien, de l'utilisateur, et de l'architecte, et la tâche du concepteur est de faire coïncider ces différentes considérations.

OBJECTIF DE CE MÉMOIRE

L'objectif premier de ce mémoire est d'établir des repères pour guider la conception des enveloppes de *Bâtiment à Énergie Positive*, notamment celles des immeubles à usage de bureau. Après cinq années passées à développer des immeubles à *basse consommation*, généralisés depuis peu par la RT2012, et maintenant qu'est annoncée la prochaine génération de bâtiments, dits à *énergie positive*, il est temps de se pencher sur ce nouveau concept pour être en mesure de proposer un vocabulaire architectural et des solutions techniques en cohérence avec les enjeux programmatiques, architecturaux et environnementaux à venir.

Pour l'ingénieur concepteur, c'est un défi formidable que cette remise en question des réflexes et présupposés acquis de la construction traditionnelle : la conception architecturale s'appuie sur des références, lointaines ou proches, soit de bâtiments construits, soit d'exemples fournis par la nature. Or le fonctionnement hygrothermique du bâtiment ultra isolé, et plus encore celui d'un bâtiment qui produit en même temps de l'énergie n'est plus appréhendable, faute d'expérience suffisante, par la seule intuition du concepteur. En l'absence de repère, on a recours à la simulation, pour prévoir le comportement du bâtiment dans son environnement, et décrypter des fonctionnements caractéristiques. Outil puissant d'exploration de solutions inédites, mais lourd à mettre en œuvre, la *Simulation Thermique Dynamique* ne peut se généraliser à la conception de l'ensemble des constructions. Pour s'imposer, le concept de *Bâtiment à Énergie Positive* doit se banaliser pour les concepteurs.

Le travail initial effectué dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, a donc été une revue des premières opérations-pilotes déjà réalisées, en France et à travers le monde, ainsi que l'analyse des différentes définitions existantes proposées pour le bâtiment à

énergie positive. Cependant, durant l'élaboration de ce travail, et suite à la lecture de nombreuses publications critiques, il a paru indispensable d'élargir le spectre de recherche initial. D'abord pour situer précisément l'objectif de *Bâtiment à Énergie Positive* dans le contexte plus global du monde d'aujourd'hui, ensuite afin de vérifier la pertinence de cette réponse au regard des enjeux actuels.

PRÉSENTATION DU PLAN

La première partie de ce mémoire, *Humanité, Énergie et Environnement*, est l'exposé rapide des liens intenses qui existent entre l'humanité et la consommation d'énergie, et des impacts de cette consommation sur notre environnement. Cette synthèse des travaux de climatologues et énergéticiens dépasse le domaine de la construction, mais est indispensable pour la compréhension des enjeux globaux auxquels le concept de *Bâtiment à Énergie Positive* tente de répondre à sa mesure.

La deuxième partie, *Énergie et bâtiment*, est l'état de l'art du *Bâtiment à Énergie Positive* : action politique des états fixant cet objectif, éléments de définition du concept, revue critique des projets construits, recensement des caractéristiques et dispositions constructives, permettent de commencer d'appréhender l'enveloppe des bâtiments que l'on projette de développer. Cette étude sera déclinée à trois échelles successives, celle de la communauté internationale, de l'union européenne, puis de la France.

La troisième et dernière partie est une approche par simulation de l'enveloppe des bâtiments à énergie zéro. Grâce à l'application de Simulation Thermique Dynamique « TrnSys », équipé d'une interface spécifique à la façade, développée au sein d'Arcora, il est possible de comparer les besoins chaud et froid d'une pièce typique d'un immeuble de bureau. C'est l'occasion d'un travail d'optimisation de la façade, mais aussi d'une réflexion sur le programme standard de promotion immobilière.

Une longue conclusion viendra clore ce mémoire et ouvrir des pistes de réflexion.

A HUMANITÉ, ÉNERGIE, ET ENVIRONNEMENT

INTRODUCTION

L'énergie est au cœur de la problématique de développement durable : sans énergie il n'y a pas de développement économique et social. À tout moment de leur existence, les êtres humains ont besoin d'énergie, pour se chauffer, s'éclairer, se déplacer, mais aussi pour produire des objets manufacturés de plus en plus élaborés. Cependant, la poursuite des schémas énergétiques actuels n'est plus soutenable. Elle conduit à l'accélération du changement climatique, à l'aggravation des pollutions urbaines liées aux transports, et à la réduction inexorable des ressources fossiles qui constituent encore aujourd'hui plus des trois quarts des sources énergétiques mondiales. Un changement de conduite de l'humanité concernant sa consommation d'énergie, mais plus largement son rapport aux ressources non renouvelables est aujourd'hui impératif. Cette prise de conscience guide depuis plusieurs années à une politique ambitieuse de l'énergie, qui dans le bâtiment, mène à l'avènement prochain du *Bâtiment à Énergie Positive*.

Il est indispensable de poser les enjeux environnementaux majeurs liés à l'usage de l'énergie par l'Homme. C'est cette mise en perspective qui permettra au lecteur d'apprécier, dans la suite de ce mémoire, la pertinence du concept de *Bâtiment à Énergie Positive*.

I HISTOIRE DE L'ÉNERGIE²

I.1 ORIGINES

L'homme, comme toute autre espèce vivant à la surface de la terre, ne peut vivre sans énergie. En premier lieu, celle de notre propre corps, peut fournir une puissance comprise entre 100 Watts au repos et 1000 Watts pendant un effort intense³. Aux alentours de - 500 000 ans nous avons domestiqué le feu. Puis, 5000 ans avant notre ère, la domestication du cheval et de la vache (un âne attelé développe plusieurs centaines de watts) permet de développer l'agriculture. D'autres énergies sont connues et exploitées depuis l'antiquité : le vent propulse d'abord les premiers bateaux à voiles (- 3000 ans), puis les moulins, et aujourd'hui nos éoliennes ; la force hydraulique a été utilisée pour lever les pierres des pyramides, puis pour moulin le grain, et Archimède met en évidence les propriétés de l'énergie solaire. La civilisation mésopotamienne connaît le pétrole et la Chine brûle du charbon depuis 5000 ans. C'est au XIX^{ème} siècle qu'apparaît le concept moderne d'énergie, avec l'invention de la machine à vapeur par James Watt, qui a donné son nom à l'unité de mesure de la puissance du flux énergétique⁴. Ainsi, l'énergie désigne les caractéristiques que possède un système de produire du travail, autrement dit, son aptitude à changer le monde qui nous entoure : l'énergie nous permet de créer de la chaleur, de déplacer des objets, des personnes, de modifier la structure de la matière.

C'est cette capacité à produire du travail qui a permis le développement de nos sociétés. En utilisant une énergie qui permet de multiplier son travail, l'homme libère un temps qu'il pourra alors consacrer à l'apprentissage, à l'exploration, à la construction, à l'art, à la culture, en somme, au développement d'une civilisation⁵.

Aussi pourquoi envisager aujourd'hui de limiter notre consommation d'énergie, pourtant libératrice du genre humain ?

² JANCOVICI, Jean-Marc. *L'homme et l'énergie, des amants terribles*. www.x-environnement.org, 2004

³ Puissance mécanique moyenne développée du vainqueur du tour de France 2013 : 413W.

⁴ ALTIER, Christine. *L'énergie grise des matériaux et des ouvrages*. Arene Ile de France & ICEB, les guides Biotech, 2012

⁵ Civilisation : État de développement économique, social, politique, culturel auquel est parvenu une société (définition du dictionnaire Larousse)

I.2 CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE⁶

Le premier élément d'explication est la croissance démographique mondiale : après quelques millénaires d'une très lente évolution, la population mondiale est passée de 1 à 7 milliards en deux petits siècles.

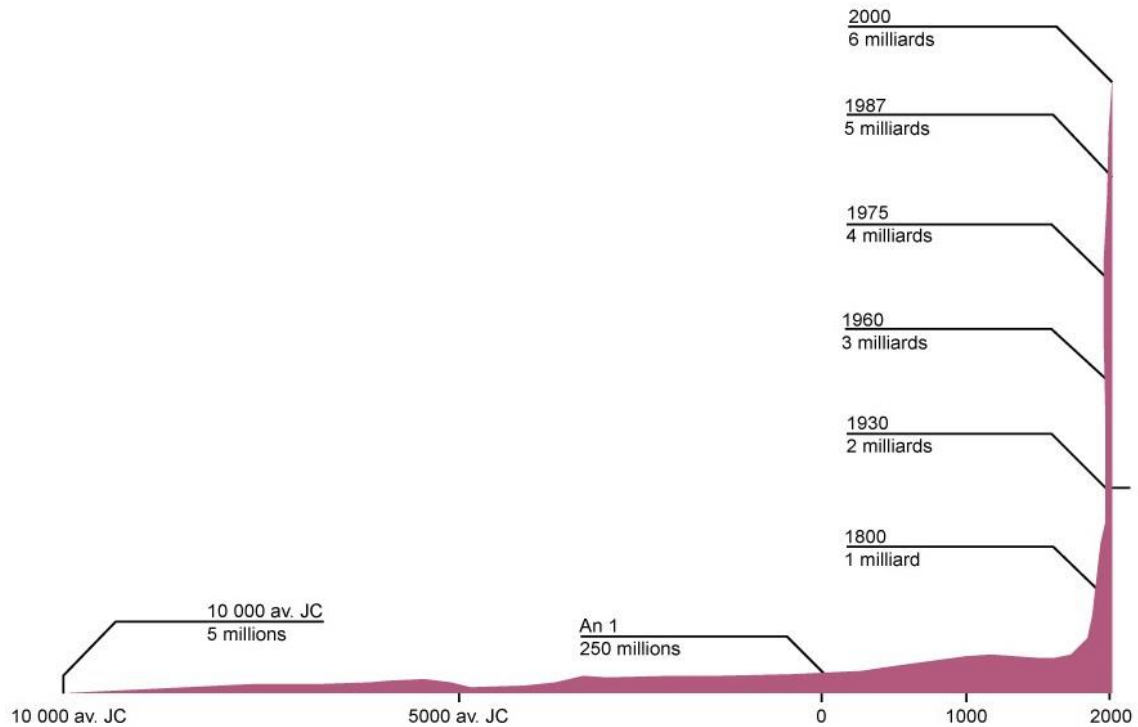


Figure 3 : Croissance de la population mondiale depuis 2000 ans⁷

La croissance démographique, bien que toujours élevée, n'est plus exponentielle aujourd'hui. Elle indique un net ralentissement et son pic pourrait être atteint en 2050 au-delà de 9 milliards d'habitants⁸.

I.3 CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Le second élément est l'accroissement de notre recours aux énergies : La consommation d'énergie par individu a été multipliée par 8 depuis 200 ans. La puissance moyenne dont chacun sur terre dispose en permanence aujourd'hui s'élève à 2,5 kilowatts.

⁶ JANCOVICI, Jean-Marc. *L'homme et l'énergie, des amants terribles*. www.x-environnement.org, 2004

⁷ Shilling & al (1977), IEA (1997)

⁸ REKACEWITZ, Philippe. *L'explosion démographique n'aura pas lieu*. Le monde diplomatique, octobre 2011

C'est l'équivalent du travail physique de 10 individus chacun, qui est utilisé sous forme de chauffage, d'éclairage, etc.

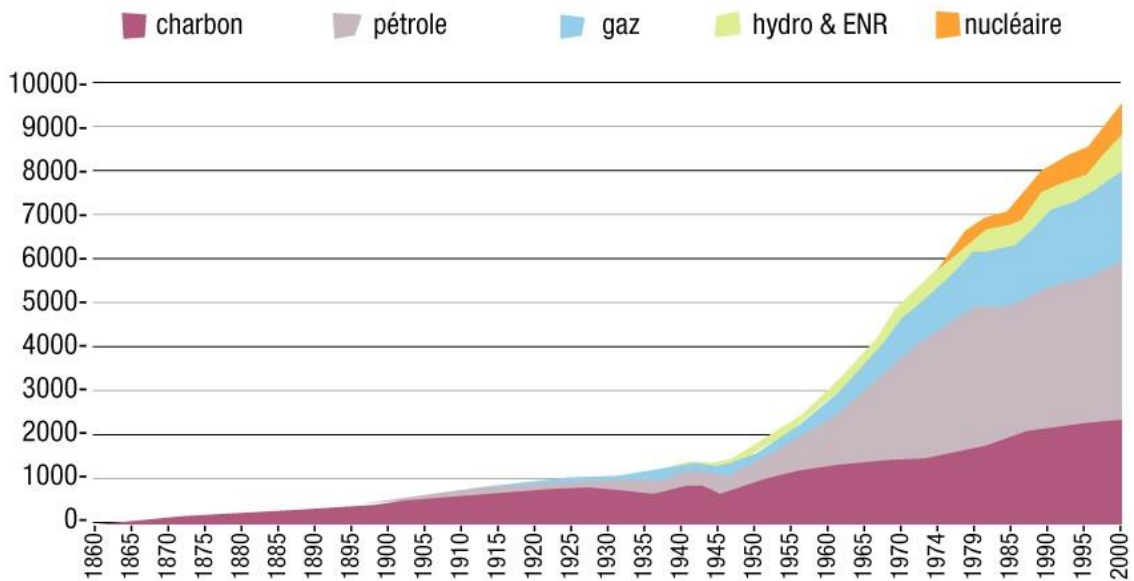


Figure 4 : Contribution des différentes formes d'énergie depuis 1860, en millions de Tep⁹

Il est intéressant de noter que les énergies se superposent plus qu'elles ne se remplacent, et que l'apparition du pétrole est très récente à l'échelle historique.

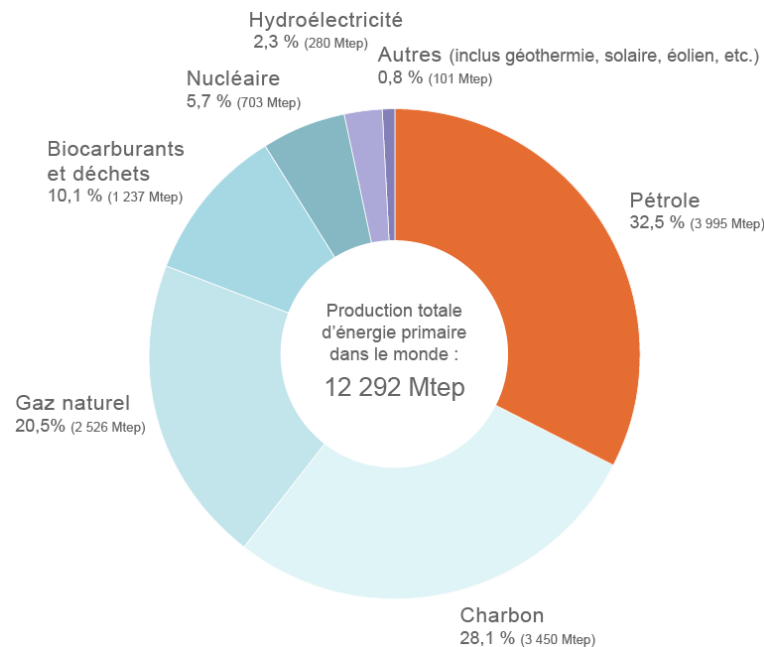


Figure 5 : Répartition de la production d'énergie primaire dans le monde en 2009¹⁰

⁹ Shilling & al (1977), IEA (1997). Valeurs en énergie finale. Note: 1 Tep = 11 700 kWh.

¹⁰ Agence Internationale de l'Energie, 2011.

La consommation totale d'énergie finale dans le monde atteint aujourd'hui 8 353 MTep¹¹, nécessitant une production de 12 292 MTep en énergie primaire, dont l'approvisionnement est assuré à plus de 80% par les hydrocarbures.

II ENJEUX ACTUELS

II.1 ÉPUISEMENT DES RESSOURCES FOSSILES

L'importance stratégique et géopolitique des approvisionnements en énergie est telle que la communication même du niveau des réserves pétrolières et gazières d'un pays revêt une importance capitale, et l'information se trouve alors très incertaine, d'autant qu'on ne peut estimer que les ressources connues.

Néanmoins, une loi de comportement mathématique proposée depuis les années 40¹², peut s'appliquer à la production d'une matière première finie, et en particulier aux énergies fossiles. Cette courbe, symétrique, non gaussienne, et en forme de cloche, croît jusqu'à par un pic, dit *de Hubbert*, avant de décroître inexorablement. Le caractère relativement symétrique de la courbe permet d'extrapoler la première partie de la courbe, de la tracer en totalité, et par intégration, d'en déduire les réserves d'une région donnée, ainsi que le maximum de production.

	Production annuelle (en unité spécifique)	Réserves mondiales (en GTep)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en GTep)	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole	1 653 GBl	234	23%	4	58
Gaz naturel	208 Tm3	187	18%	3,3	57
Charbon	861 Gt	564	56%	3,95	145
Uranium ¹³	3,3 Mt	30	3%	0,59	48
Total conventionnel		1015		12,9	83

Figure 6 : Réserves mondiales d'énergie prouvées, et production annuelle 2011¹⁴

¹¹ La consommation d'énergie finale dans le monde en 2009 est de près de 8,4 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (d'après Key World Energy Statistics 2011, AIE)

¹² Marion King Hubbert, géophysicien, introduit cette notion dans une présentation officielle à l'American Petroleum Institute en 1956.

¹³ L'isotope de l'uranium ²³⁵U, utilisé dans les centrales nucléaires, est le seul isotope naturel fissile. Or, il se forme uniquement lors des supernovae. Sur terre, l'uranium est donc une ressource fossile limitée.

¹⁴ BP Statistical Review of World Energy 2012 (chiffres 2011). Nota : les niveaux des différentes ressources varient de manière importante suivant la source (AIEA, IFP, BP...) et les hypothèses retenues. Les valeurs de ce tableau sont donc à prendre avec beaucoup de précautions.

Malgré les incertitudes qui pèsent sur les réserves d'énergie et les nombreux débats qui entourent ce sujet, un consensus semble s'établir sur le fait que le pic de Hubbert, annonçant la fin des réserves d'énergie fossile, est en train d'être passé. Ainsi, notre production d'énergie mondiale est assurée à 80% par le prélèvement d'une ressource existant en quantité limitée sur notre planète.

II.2 CYCLE DU CARBONE

Outre le caractère limité en quantité de ces ressources, l'autre caractéristique des énergies d'origine fossile, est que la combustion est libératrice de dioxyde de carbone à l'état gazeux. Cette libération, dans les quantités évoquées précédemment et correspondant à la consommation d'énergie de l'humanité, est de nature à modifier significativement la composition gazeuse de l'atmosphère, et à terme rompre le délicat équilibre du *cycle du carbone* de la terre.

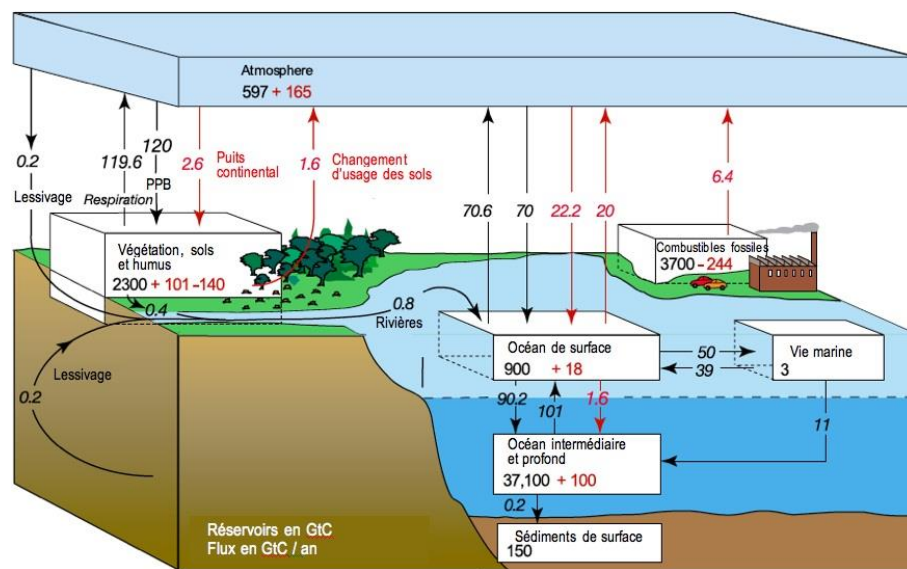


Figure 7 : Représentation des stocks de carbone de la terre¹⁵

Les réservoirs et échanges sont nombreux et variés. L'ensemble de ces flux est appelé *cycle du carbone*, et la plus grosse partie de ces flux sont naturels. Il est important de noter que ces échanges naturels, ou préindustriels, entre l'atmosphère et le reste de la

¹⁵ GIEC, 4^{ème} rapport d'évaluation, 2007. Ce diagramme représente les réservoirs de carbone susceptibles d'alimenter les échanges entre la planète et l'atmosphère à l'échelle du siècle et les flux annuels de carbone. N'est pas représenté le stock le plus important de la planète, qui est le carbone contenu dans le calcaire. Les flux en noir représentent les échanges "naturels", autrement dit ceux qui étaient les seuls à exister avant le début de l'ère industrielle, et les valeurs en noir pour les stocks représentent l'état (reconstitué) de 1750, avant le début des activités industrielles. Les flux en rouge représentent l'effet des activités humaines (flux renforcés, diminués, ou créés), pour la moyenne de la décennie 1990, et les valeurs en rouge pour les stocks représentent la variation de 1750 à 1994.

planète s'équilibrent. C'est l'activité humaine¹⁶ (combustion des énergies fossiles, déforestation, labourage des terres cultivées, production de ciment), qui fait toute la différence, en assurant un solde positif au taux de carbone contenu dans l'atmosphère, tous échanges soldés. Chaque année l'atmosphère augmente son stock de CO₂ d'environ 50% de nos émissions directes, soit 3.5GtC/an. C'est la raison pour laquelle il faut diviser les émissions de CO₂ par 2 au moins.¹⁷

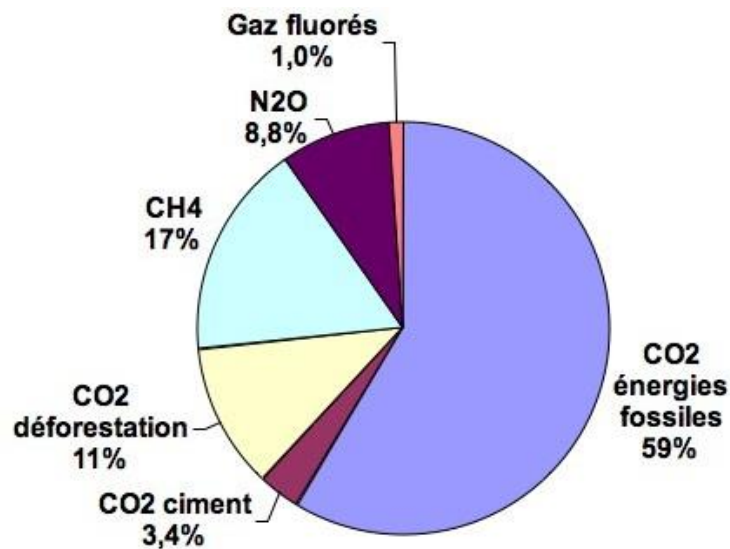


Figure 8 : Contribution des activités humaines et émissions en % équivalent CO₂

Au vu de la répartition des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine, une division par deux suppose forcément une diminution de la consommation d'énergie fossile.

¹⁶ Le dernier rapport du GIEC paru le 30 septembre 2013 confirme le rôle de l'activité humaine dans le réchauffement climatique.

¹⁷ Dès 1996, le GIEC publie la conclusion suivante : pour arrêter d'enrichir l'atmosphère en gaz carbonique, il faut que les émissions humaines se limitent à la moitié des émissions de 1990. Par rapport au niveau de 2010, cela signifie désormais une division par trois.

II.3 EFFET DE SERRE

Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre, c'est-à-dire qu'il intercepte le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre. L'effet de serre en soi ne constitue pas un danger pour l'humanité, bien au contraire. Il permet un chauffage du sol en capturant une partie de l'énergie solaire reçue chaque jour par la terre.

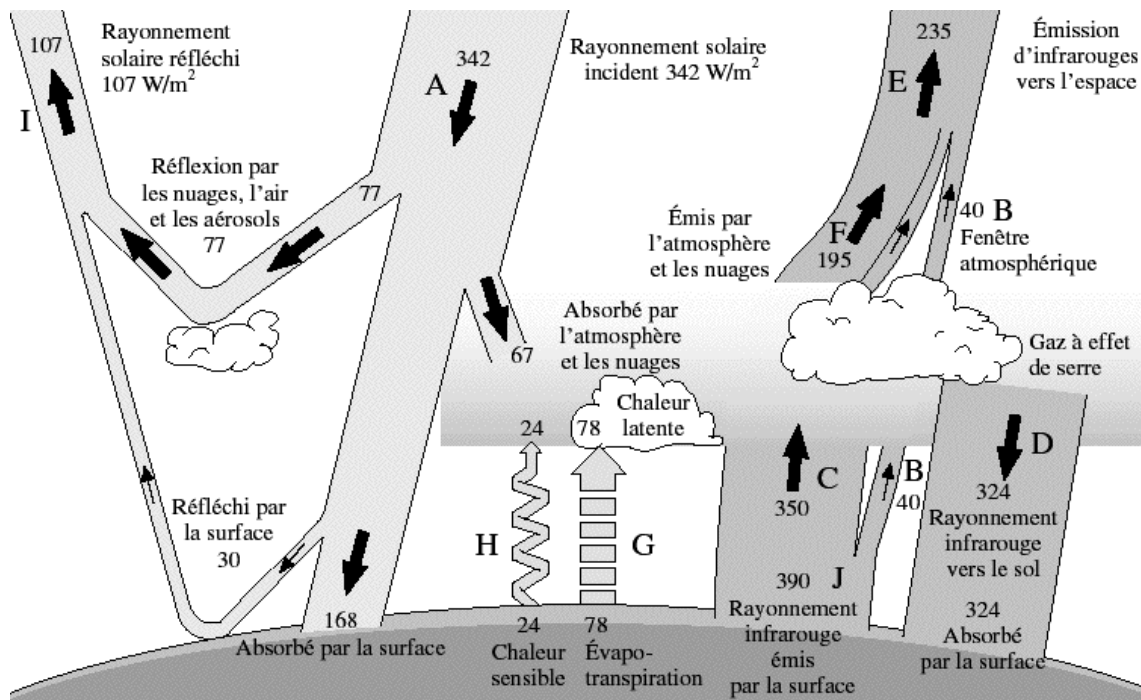


Figure 9 : Fonctionnement général simplifié de l'atmosphère¹⁸

Chaque jour, notre soleil nous envoie une quantité considérable d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Lorsqu'il arrive sur notre planète, 30% est directement réfléchi (20% par les nuages, 6% les différentes couches de l'atmosphère, 4% la surface de la terre), le reste est absorbé par les différents composants de notre planète, puis finalement réémis sous forme de rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de serre, qui avaient laissé passer le rayonnement solaire initial, vont alors intercepter ce rayonnement dans le domaine infrarouge et s'échauffent. Ce faisant, ils conduisent (entre autre) à un réchauffement de la surface de la terre. L'augmentation du taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère fait donc simplement que l'équilibre

¹⁸ JANCOVICI, Jean-Marc. *L'avenir climatique*. Editions du seuil, 2002. Les chiffres représentant la valeur moyenne, temporelle (sur l'année) et géographique (sur la surface de la planète) en Watts par mètre carré, de chaque flux d'énergie représenté.

énergétique de la terre s'effectue à une température légèrement plus élevée, et c'est ce qui est en train de se passer.

II.4 CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le climat est en train de changer. Au cours du XX^{ème} siècle, la température moyenne de la planète s'est élevée de 0.6°C, et celle de l'Europe a augmenté de plus de 0.9°C. En France, les relevés de température moyenne en France depuis 1990 sont en forte augmentation.

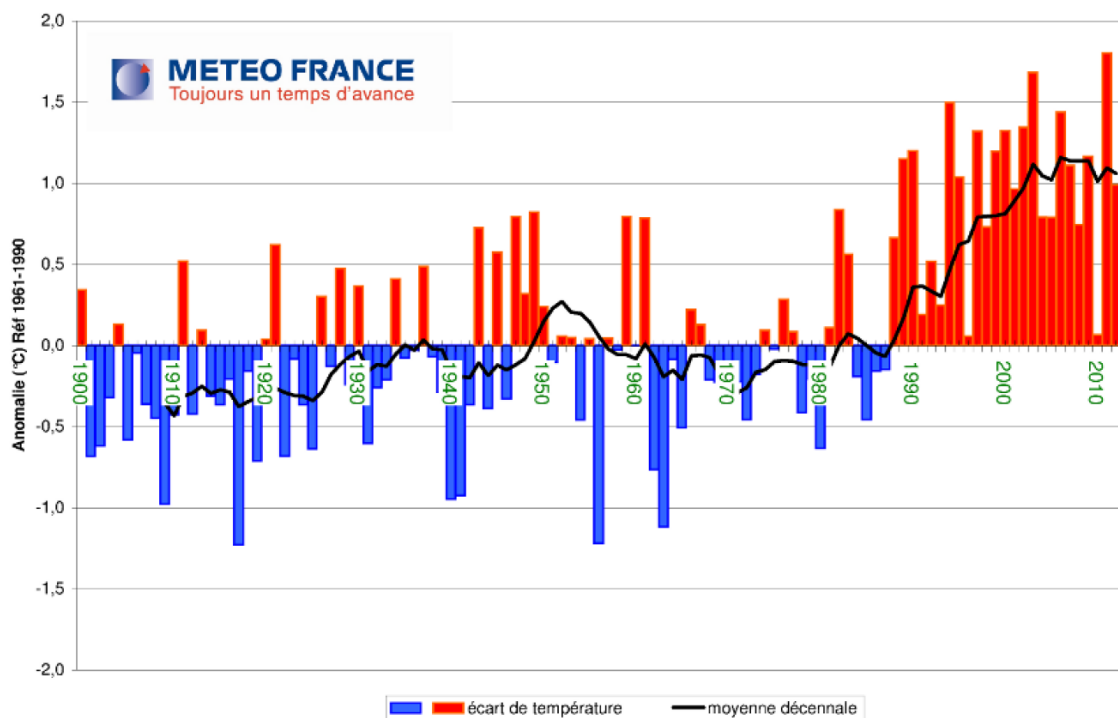


Figure 10 : Écart à la moyenne des températures de la période 1900-2010 en France (°C)

Ces valeurs peuvent sembler abstraites, et une augmentation de température de quelques degrés peut sembler inoffensive, mais elle correspondrait en réalité à un changement climatique majeur. La prolongation de la tendance actuelle d'augmentation de nos émissions de CO₂ pourrait conduire à une élévation de température comprise entre 1,4 °C et 5,8 °C au XXI^{ème} siècle¹⁹, ce que l'homme n'a jamais vécu.

¹⁹ Prévisions du GIEC, 2007

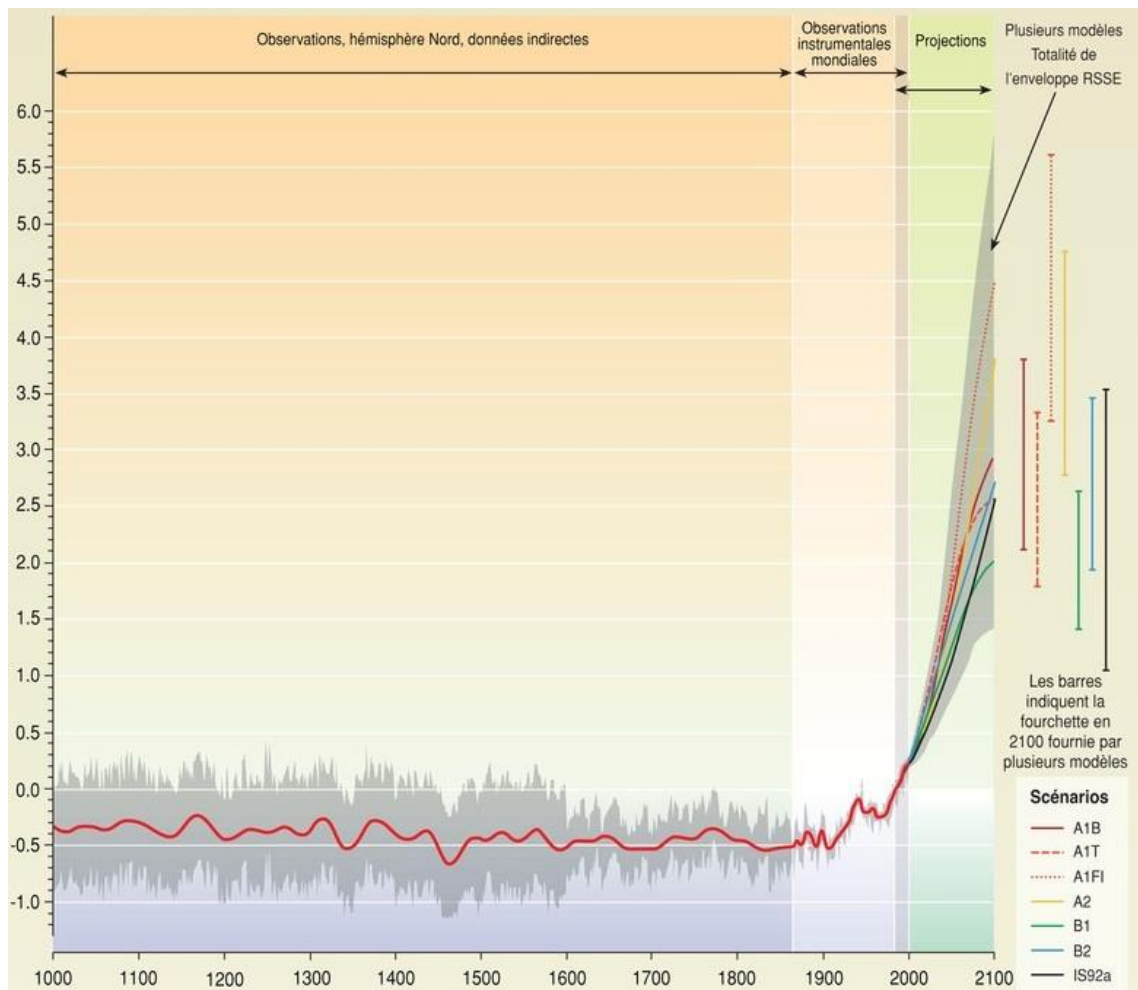


Figure 11 : Évolution de la température moyenne de l'hémisphère nord depuis l'an mille²⁰

La seule comparaison possible pour se représenter l'ampleur de ce changement est de se avec la dernière période glaciaire : il y a 21000 ans, la température moyenne de l'air à la surface de la Terre était inférieure de 5 °C à celle d'aujourd'hui. Les deux tiers de l'Europe et de l'Amérique du Nord étaient alors recouverts de glaciers de deux à trois kilomètres d'épaisseur et que le niveau des mers était 120 mètres plus bas que de nos jours. Une augmentation de la température moyenne de 5 °C au cours du XXI^{ème} siècle conduirait à un changement climatique de la même ampleur que celui de la dernière période glaciaire à aujourd'hui, soit un saut climatique suffisant pour rendre la majeure partie de la Terre inhabitable.

²⁰ GIEC, 2001

III TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La double question posée par l'épuisement des ressources d'énergie d'origine fossile et le réchauffement climatique, dépasse le cadre du progrès technologique et de la substitution des énergies. Sa résolution porte sur un vaste registre de sujets : capacité à une gouvernance mondiale, éthique, rapport de l'homme à la planète, développement économique et démographique, répartition des ressources, évolutions technologiques... Par conséquent, la solution ne sera sans doute pas unique et simple, mais portera sur l'ensemble de ces valeurs.

Malgré toutes ces incertitudes, une chose semble certaine, c'est que l'activité humaine va devoir se faire sans les énergies fossiles, et ce, dans un horizon proche (quelques décennies). La consommation d'énergie finale dépendant à 80% des hydrocarbures, la transition énergétique est un virage radical pour l'humanité qu'il faut prendre maintenant, ou bien subir les conséquences catastrophiques d'un réchauffement global non contrôlé de la planète.

III.1 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES

Pour limiter le réchauffement climatique, et préserver un environnement qui soit vivable, il est indispensable et urgent de réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Le niveau d'émission retenu²¹ par la communauté internationale correspond à la moitié du niveau d'émission de 1990, soit le tiers de celui d'aujourd'hui, et l'échéance pour cela est environ 2050. Tenir cet objectif permettrait de limiter à une valeur proche de 550 parties par million la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, contre 380 ppm actuellement et 280 ppm avant l'ère industrielle, c'est-à-dire contenir le réchauffement climatique à environ trois degrés. Plus tard nous arriverons à juguler ces émissions, et plus catastrophiques seront les conséquences.

Pour comprendre quels leviers sont à notre portée pour réduire ces émissions, observons les rapports entre développement planétaire et émission de CO₂, exprimée dans l'équation suivante :

²¹ Objectif retenu lors des négociations autour du protocole de Kyoto.

$$CO_2 = POP \cdot \frac{PIB}{POP} \cdot \frac{ENERGIE}{PIB} \cdot \frac{CO_2}{ENERGIE}$$

L'équation de Kaya²² relie les facteurs de production par l'homme de dioxyde de carbone. Elle indique que le niveau total d'émission peut s'exprimer comme le produit de 4 facteurs : la population, le PIB par habitant, l'intensité énergétique par unité de PIB produite, et l'intensité d'émission de CO₂ par unité d'énergie consommée. Réduire par trois nos émissions de GES, c'est donc réduire par 3 le produit de ces 4 variables :

- *POP* : Diviser par trois notre population humaine en 40 ans, de manière concertée est inimaginable, et de manière forcée serait un génocide. Citons simplement les premières pages de l'ancien testament pour nous conforter dans l'idée qu'un contrôle des naissances n'est pas à l'ordre du jour : « *Soyez féconds et multipliez-vous, remplissez la terre et soumettez-là ; ayez autorité sur les poissons de la mer et sur les oiseaux des cieux, sur tout ce qui est vivant et qui remue sur la terre* »²³. De plus, la natalité est perçue comme un atout majeur dans la compétition entre états, et les cycles de croissance économique sont intimement liés aux cycles de croissance démographique, et de renouvellement des générations. La population mondiale, on l'a vu, va même sans doute augmenter d'un facteur 1.3 d'ici 40 ans. C'est donc par conséquent d'un facteur 4 qu'il faut réduire le produit des termes restants de l'équation.
- $\frac{PIB}{POP}$: Diviser par 4 le PIB par habitant, serait un choix délibéré de récession. Bien que cet indicateur ne fasse que tendre vers zéro depuis les années 60 dans les pays développés, les politiques ne cessent de prédire un retour de la croissance, et la population d'un pays comme la France semble loin d'adhérer à un objectif de réduction assumée de la croissance du PIB par individu. À l'échelle mondiale, le développement de nouvelles grandes puissances comme la Chine et l'Inde, laisse envisager une croissance moyenne de 2% par habitant pendant 40 ans, ce qui correspondra à une multiplication par 2.2, tout autre facteur considéré égal par ailleurs. Il faudrait alors réduire d'un facteur 9 ou 10 le produit des 2 termes restants.

²² KAYA, Yoichi. *Environment, Energy, and Economy : strategies for sustainability*. 1993.

²³ La bible, ancien testament, Genèse 1,28

- $\frac{ENERGIE}{PIB}$: L'intensité énergétique a déjà baissé de 35% en 35 ans dans le monde. C'est le résultat d'une politique volontariste de recherche de compétitivité et de productivité, mais aussi le résultat de la délocalisation de quantité de production industrielle vers des pays offrant une main d'œuvre à meilleur marché, et moins mécanisé, donc moins consommateur d'énergie. En étant optimiste, on peut espérer encore une diminution de 50% d'ici 2050, ce qui nous ramène à l'objectif de réduction d'un facteur 4 à 5²⁴ du dernier terme.
- $\frac{CO_2}{ENERGIE}$: Réduire par 4 à 5 le contenu en carbone de l'énergie, sans contredire les hypothèses, certes fortes, émises précédemment ; ce serait donc l'enjeu à relever. Et il faut le relever tout en doublant l'approvisionnement en énergie puisque le produit des 3 premiers termes n'est autre que la consommation d'énergie.

En considérant attentivement les différents termes de cette équation de Kaya, on mesure ainsi la difficulté inédite du changement à opérer au XXIème siècle par l'humanité dans son ensemble.

III.2 SUBSTITUTION DES ÉNERGIES FOSSILES

Il est urgent de substituer notre consommation d'énergies d'origine fossile, en faveur de sources d'énergies qui soient abondantes et non émettrices de gaz à effet de serre. On parle communément alors d'énergie renouvelable, bien que le lien avec les émissions de GES ne soit pas contenu dans la définition. Une énergie d'origine renouvelable, se définit comme une énergie dont le prélèvement ne diminue pas la ressource, à l'échelle humaine. Plusieurs sont exploitées par l'homme, et leurs usages conjugués représentent même 13% de la production d'énergie primaire dans le monde.

²⁴ C'est ce raisonnement, tenu par le GIEC devant la communauté internationale lors du sommet de la terre de Rio en 1992 qui a abouti à l'engagement « facteur 4 » : réduire en 40 ans d'un facteur 4 les émissions mondiales de GES.

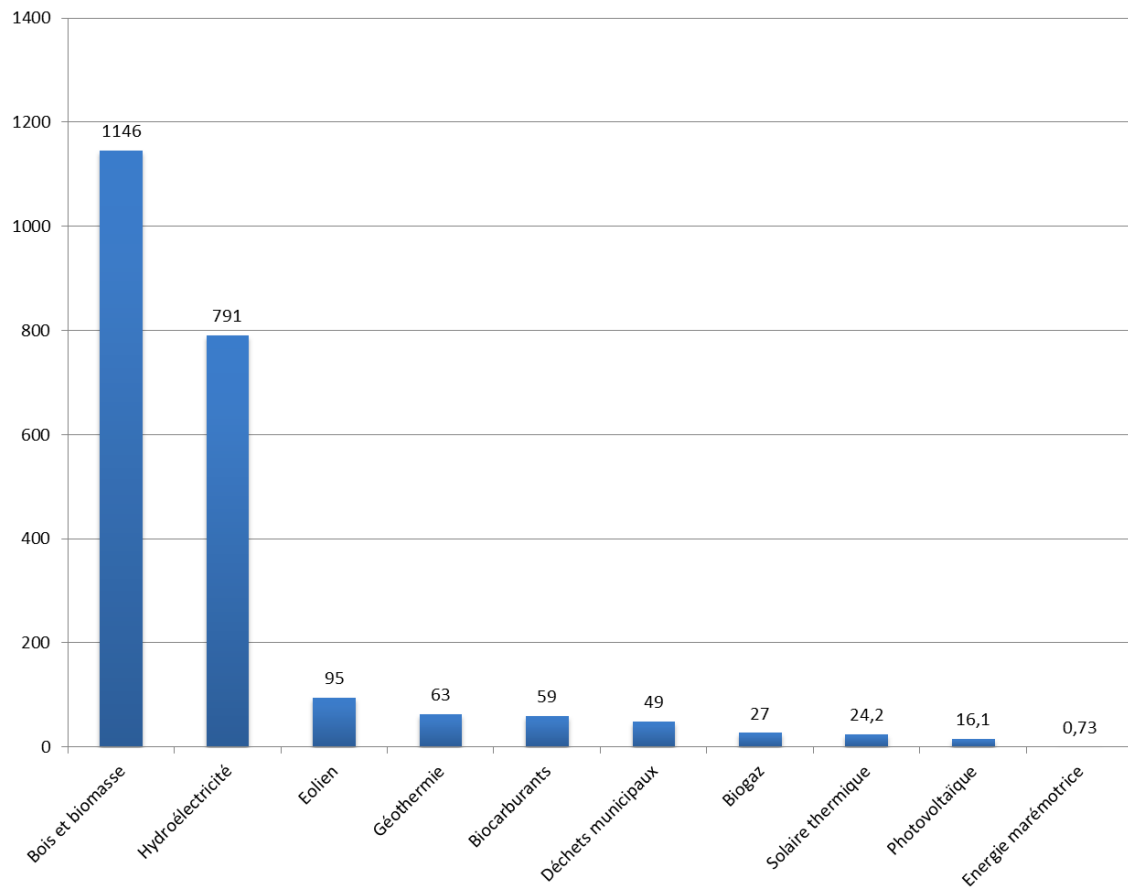


Figure 12 : Production d'énergie renouvelable dans le monde par type, en 2011, en MTEp

L'électricité photovoltaïque ne produit à priori pas de CO₂. A l'instant de la production, aucun dégagement de GES n'est constaté, mais le contenu en carbone d'une énergie doit tenir compte de tout son cycle de vie, en incluant dans notre exemple la fabrication des panneaux et des batteries. En effet, le contenu en carbone des énergies doit intégrer les émissions nécessaires à la transformation des énergies primaires pour leur mise à disposition de l'utilisateur. Pour le photovoltaïque, cette intégration amène d'ailleurs à un résultat surprenant et mitigé. Le niveau d'émission du photovoltaïque aujourd'hui est à la moitié de celui du gaz naturel. Suivant la provenance (et le contenu carbone) de l'énergie utilisée pour la fabrication des panneaux, le contenu carbone est très différent. En suivant une filière complètement décarbonée et en réduisant le besoin de stockage, le niveau pourrait alors être fortement réduit.

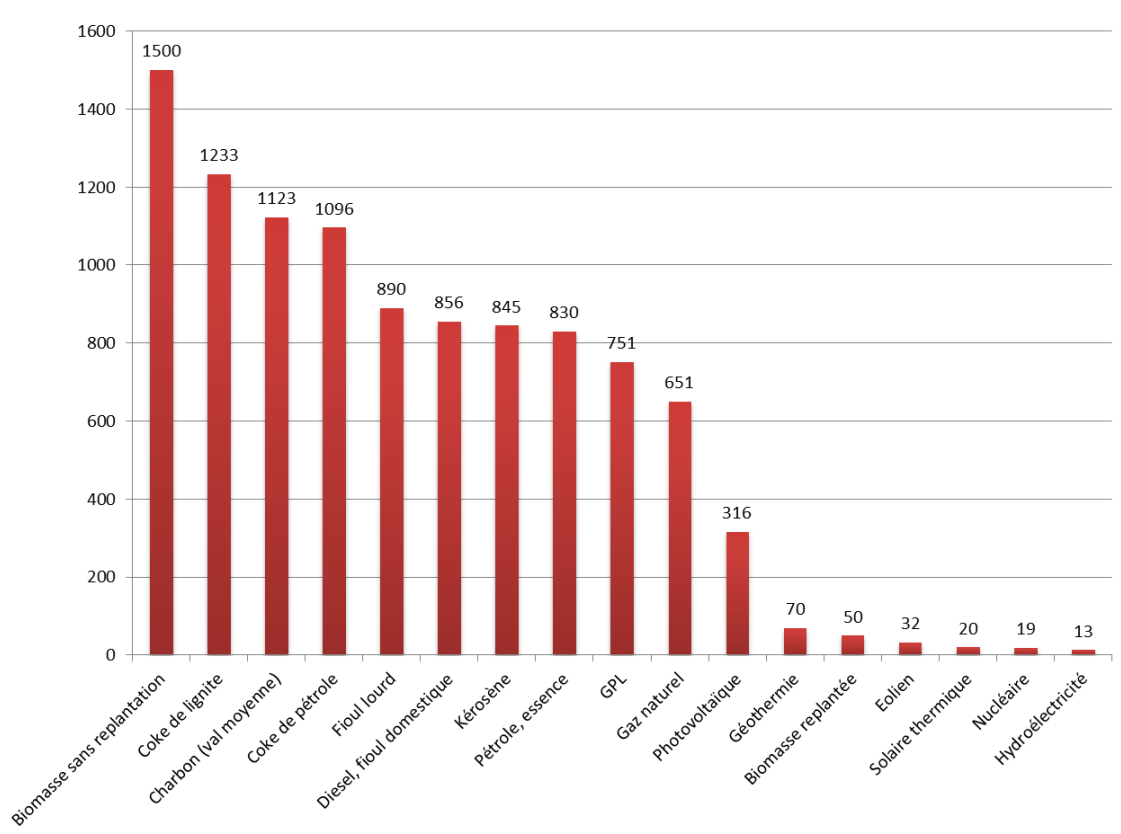


Figure 13 : Contenu en carbone des diverses énergies (en kgeqC/tep), par ordre décroissant²⁵

On constate un changement d'ordre de grandeur (facteur 10 à 100) entre les niveaux d'émission des hydrocarbures et ceux des autres sources d'énergie. On note que l'utilisation de la biomasse sans reimplantation est à proscrire, et que parmi les énergies fossiles, la moins émettrice est le gaz naturel.

Le biocarburant n'apparaît pas dans le tableau. Ses conséquences en termes de changement d'affectation des sols (autrement dit, déforestation) seraient aujourd'hui telles que le niveau d'émission serait de l'ordre du double de celui du pétrole.

On dispose donc aujourd'hui pour se substituer aux énergies fossiles de :

- L'électricité photovoltaïque (quand les panneaux seront produits avec de l'énergie faiblement carbonée)
- La géothermie (pour le chauffage essentiellement)
- La biomasse reimplantée (chauffage et cogénération)
- L'éolien (dont le potentiel est très limité)

²⁵ Source Ademe et EDF, via Jancovici Jean-Marc, www.manicore.org. Nota : les valeurs concernant le solaire thermique, la biomasse reimplantée et la géothermie sont estimées par l'auteur.

- Le solaire thermique (eau chaude domestique, ou vapeur dans une centrale à concentration)
- L'électricité nucléaire (U_{235} en quantité limitée, donc surgénérateur, ou fusion d'ici 50 à 100 ans)
- L'hydroélectricité (dont le potentiel est déjà largement exploité)

De toutes ces sources d'énergies, seules l'hydroélectricité, le solaire thermique, et la géothermie présentent une capacité de stockage non problématique.

III.3 ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'électricité d'origine nucléaire, malgré les risques environnementaux liés à son utilisation, pourrait répondre à nos besoins actuels, en raison de l'absence d'émission de GES liée à sa production en centrale. Cette qualité a d'ailleurs un poids considérable dans la question de la transition énergétique pour un pays comme la France, dont la production d'électricité majoritairement d'origine nucléaire, peut de ce fait être qualifiée de faiblement carbonée²⁶. Cependant, en dépit de l'opacité qui règne sur les flux et les réserves d'uranium 235 dans le monde, certains signes tendent à montrer que sa raréfaction est prochaine (doublement du prix depuis 2010, décuplement depuis 2001, avec un approvisionnement actuel mondial issu à 40% du démantèlement des armes nucléaires et déstockage, montée en puissance du nucléaire civil chinois).

La production d'électricité nucléaire ne peut pas être une énergie de remplacement des énergies d'origine fossile. En revanche, un autre procédé d'utilisation de l'énergie issue de la radioactivité, la surgénération, utilisée pour Superphénix, peut puiser dans un réservoir beaucoup plus large, puisque qu'il peut utiliser tout l'uranium, quand l'isotope 235 utilisable dans les centrales classiques ne représente que 0.5% des réserves mondiales. Cela représenterait plusieurs milliers d'années de consommation. Une autre piste est la recherche d'un procédé exploitant la fusion (projet de recherche ITER), qui s'il aboutit, pourrait répondre à la question, dans 50 ou 100 ans.

²⁶ Le nucléaire couvre, en 2004, 79% de la production électrique en France, soit 18,4% de la consommation totale d'énergie finale en France.

Ainsi, force est de constater que le débat environnemental autour de la transition énergétique ne peut exclure l'énergie nucléaire par principe, excepté par application du principe de précaution, au regard des dégâts humains et environnementaux associés à son utilisation.

III.4 ÉNERGIE SOLAIRE

Fort heureusement, la principale source d'énergie dans le monde, le soleil, a une durée de vie de plusieurs milliards d'années, son rayonnement solaire est abondant, et ne dégage pas de gaz à effet de serre.

Le flux solaire incident en dehors de l'atmosphère est en moyenne de 1367W/m^2 . L'énergie reçue par la Terre en un an est donc de $5,54 \cdot 10^{24}$ Joules, dont 30% sont réfléchis et renvoyés dans l'espace, 23% sont utilisés dans le cycle d'évaporation/précipitation de l'eau, et moins de 1% pour le cycle du carbone (croissance de la biomasse). Le reste est absorbé par l'air, les continents et les océans et transformé en chaleur, ce qui représente plus de 62 000 GTep/an, soit plus de 6000 fois la consommation d'énergie mondiale d'énergie primaire.

On conçoit ainsi aisément l'enjeu pour l'humanité de pouvoir transformer quelques millièmes ou même quelques dix millièmes de cette quantité d'énergie pour assurer son approvisionnement énergétique, et ce de manière durable, étant donné que ce prélèvement, destiné in fine à se dégrader lui aussi en chaleur à basse température, ne changerait pas le bilan énergétique de la planète. Ce serait un changement de modèle profond que le passage d'une énergie de stock, éloignée, à une énergie de flux locale.

En fait, à l'exception de la géothermie, toutes nos énergies d'origine renouvelable sont dérivées de l'énergie solaire :

- L'énergie éolienne, c.-à-d. du vent, vient des différences de température (sous l'effet du soleil) entre masses d'air
- biomasse générée par photosynthèse
- solaire thermique et photovoltaïque bien sûr
- l'énergie hydraulique est conséquente de la pluie

- courants marins

L'énergie solaire est également, même si cela peut sembler paradoxal, à l'origine de nos ressources fossiles, en permettant de fabriquer par photosynthèse la biomasse nécessaire à la formation de ces hydrocarbures, à la suite d'un processus long de plusieurs millions d'années. Comparé au long chemin permettant de transformer le rayon de soleil en pétrole, le recours aux énergies renouvelables d'origine solaire, revient donc à emprunter une trajectoire plus directe entre radiation solaire et consommation d'énergie.

CONCLUSION

Ce début de XXI^{ème} siècle annonce de grands changements. La dépendance de notre modèle de développement à des énergies fossiles en déclin, l'adaptation au changement climatique enclenché par l'activité anthropique, et l'absolue nécessité de limiter celui-ci, sont des questions que l'humanité doit résoudre, au risque de voir des forces de rappel se manifester d'une manière bien plus désagréable encore que les actions que nous tardons à prendre. Ces enjeux sont d'ampleur planétaire, et la résolution de l'équation de Kaya²⁷ passe par une remise en question de nos modes de vies et de développement. C'est certainement sur les quatre termes à la fois que l'humanité va devoir exercer une réflexion, et trouver des solutions : contrôle de la natalité, redéfinition de la notion de croissance, dépendance énergétique de notre développement, contenu en carbone de l'énergie.

$$CO_2 = POP \cdot \frac{PIB}{POP} \cdot \frac{ENERGIE}{PIB} \cdot \frac{CO_2}{ENERGIE}$$

Il est urgent de rompre avec certains modes de pensée et de remettre en question l'imaginaire alimentant la culture qui imprègne nos sociétés,²⁸ car comment des sociétés, organisées politiquement et économiquement pour produire plus et consommer plus pourraient-elles s'accorder avec une culture de la sobriété et de la responsabilité collective ? Peut-on encore aujourd'hui dire : « *Le mode de vie des*

²⁷ KAYA, Yoichi. *Environment, Energy, and Economy : strategies for sustainability*, 1993.

²⁸ P. SQUARZONI, *Saison Brune*, Delcourt, 2012

américains n'est pas négociable »²⁹ ? Cette liberté individuelle, vantée par le modèle libéral, est le déguisement d'un individualisme forcené, le refus de toute contrainte, de toute limite, le refus du collectif. Si la Chine, l'Inde, l'Afrique adopte le mode de vie américaine, il faudra les ressources de l'équivalent de 9 planètes supplémentaires.

La résolution de la crise actuelle passe le collectif, par le savoir partager, car nous vivons dans un monde fini. Dès 1945, dans *Regards sur le monde actuel*, Paul Valéry écrivait : « *Le temps du monde fini commence.* » Il est aujourd'hui urgent de tirer les conséquences de ce constat : nous entrons dans une phase nouvelle de l'histoire des êtres humains. C'est ce récit que raconte Jérémy Rifkin dans son ouvrage « *La troisième révolution industrielle* ». L'économiste américain y montre comment la convergence des technologies de l'internet et des énergies renouvelables peut créer une puissante dynamique économique de *troisième révolution industrielle*. Cette révolution est le passage d'une structure centralisée de nos modes de gouvernance liée à celle de la distribution de l'énergie, à une logique décentralisée et transversale.

Cette révolution serait possible en mettant en œuvre simultanément cinq piliers :

- Abandon des hydrocarbures pour les énergies renouvelables
- Transformation des bâtiments en microcentrales énergétiques
- Déploiement de la technologie de l'hydrogène et d'autres techniques de stockage dans les bâtiments et dans le réseau
- Transformation du réseau électrique en réseau continental de partage de l'énergie sur le modèle d'internet (échange de pair à pair de l'énergie).
- Remplacement des moyens de transport par véhicules électriques.

C'est ce schéma de développement, envisageant une sortie de crise par le haut, qui a été retenue par nombre de dirigeants politiques à travers le monde, et notamment dans l'Union Européenne. Le *bâtiment à énergie positive*, s'il n'est pas nommé par Rifkin, est déjà esquissé dans ce projet, et est au cœur de ce nouveau projet de développement.

²⁹ Georges Bush, au sommet de la terre à Rio, 1992.

B ÉNERGIE ET BÂTIMENT

INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment a souvent été mis en avant dans les politiques environnementales comme doté d'un potentiel d'économies d'énergies facilement réalisables. Qu'en est-il réellement ?

Quel est le poids du secteur du bâtiment dans les consommations d'énergie primaire et émissions de gaz à effet de serre ? Si les processus de construction, de démolition des bâtiments, de fabrication et d'acheminement des matériaux de construction, sont grandement consommateur d'énergie, les bâtiments, une fois construits, ne consomment pas d'énergie. Ce sont les hommes et les femmes qui les habitent, celles et ceux qui y travaillent, qui consomment.

Le rapport entre énergie et bâtiment constitue un élément essentiel de mise en perspective des enjeux de la mise en application du concept de *bâtiment à énergie positive*.

L'idée de base est remarquablement simple : c'est celle d'un bâtiment qui produit autant, ou plus d'énergie qu'il n'en consomme. Pourtant, une définition cohérente tarde à voir le jour, ce qui freine son apparition.

Un état des lieux de la législation à ce sujet, une revue structurée des opérations pilotes déjà bâties, ainsi qu'une analyse des tentatives de formalisation du concept de bâtiment à énergie positive, vont permettre de saisir les enjeux apparents et sous-jacents de cette définition sans cesse repoussée. Cet exposé s'organisera suivant trois échelles successives : internationales, européennes et nationales.

I SITUATION AU PLAN INTERNATIONAL

La prise de conscience de la communauté internationale de l'urgence environnementale et climatique, aboutit à un objectif précis dans le secteur du bâtiment : le *bâtiment à énergie zéro*, pendant international du *bâtiment à énergie positive* français. Un important travail préparatoire de structuration de la réflexion a été mené, des opérations de démonstration ont été édifiées et le retour d'expérience effectué, afin d'accompagner le passage à l'action des états.

I.1 PRISE DE CONSCIENCE DU RISQUE CLIMATIQUE

C'est au sein de l'Organisation des Nations Unies qu'ont eu lieu les premières discussions concernant le changement climatique, mais c'est aux états qu'incombent la charge d'agir concrètement. Aujourd'hui, le consensus est établi sur la situation environnementale de notre planète.

I.1.1 CONVENTION DE RIO

En raison du lien direct avec la politique énergétique des pays, sujet stratégique majeur s'il en est, les données scientifiques concernant le réchauffement climatique et les émissions de GES ont été très controversées. Il a fallu attendre 1988 pour que soit créé le GIEC - Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat - chargé de fournir des données scientifiques objectives sur le climat planétaire. Dès 1990, il confirme dans son premier rapport les informations scientifiques à l'origine des préoccupations sur le changement climatique et incite l'ONU à établir la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) adoptée en 1992 au sommet de la Terre à Rio de Janeiro, par presque tous les pays du globe³⁰. L'une des conclusions essentielles de cette convention sur le climat était qu'il fallait « *stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute*

³⁰ 175 états signataires, et la communauté européenne. Entrée en vigueur en 1994, elle ne comprend aucune mesure contraignante. Les pays signataires de la Convention Climat sont séparés en deux catégories :

- Ceux qui sont prêts officiellement à s'engager à réduire leurs émissions font partie de l' « *annexe 1* » ; il s'agit principalement des pays développés et d'Europe de l'Est.
- Ceux qui ne sont pas prêts à s'engager à réduire leurs émissions ; pays en développement, ainsi que quelques autres comme la Corée du Sud.

perturbation anthropique dangereuse du système climatique », mais sans fixer de mesures concrètes permettant d'arriver au but fixé.

Cette formulation comprend un mot essentiel : celui de « *stabilisation* », ce qui suppose la division par 2 au moins de nos émissions par rapport au niveau de 1990. Pour les mesures concrètes, la Convention Climat renvoie à des négociations ultérieures faisant l'objet de « protocoles », annexes détaillant justement les points laissés de côté à Rio. Le plus important d'entre eux est le protocole de Kyoto.

I.1.2 PROTOCOLE DE KYOTO

Le GIEC fournit ensuite en 1995 les bases scientifiques de négociation du protocole de Kyoto, premier et seul engagement international à ce jour en faveur de la limitation des émissions de gaz à effet de serre fixant un objectif chiffré et une échéance, c.à.d. davantage qu'une déclaration d'intention.

Le protocole signé à Kyoto en 1997 est le premier pas indispensable d'une politique mondiale de l'énergie et du climat. Malheureusement non suivi par les États-Unis et la Chine - premier et second émetteurs au monde de l'époque - l'objectif du protocole de Kyoto, première étape dans la poursuite du *facteur 4*, était de parvenir durant la période d'engagement 2008-2012 à la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique de 5,5% en moyenne des pays de l' *annexe 1*, par rapport aux niveaux de 1990. A l'issue de la période d'engagement, fin 2012, l'union européenne a globalement atteint, et dépassé, cet objectif. Cependant, au niveau mondial, cette faible diminution est largement compensée par l'augmentation prodigieuse des émissions de GES des pays émergents, et de quelques autres³¹.

I.2 PLACE DU BÂTIMENT DANS LES BILANS ÉNERGÉTIQUES

Les différents états ayant pris position en faveur d'une réduction globale des émissions de GES ont décliné leur engagement en autant d'actions dans tous les domaines d'activité, et en particulier dans le secteur du bâtiment, perçu comme une priorité. Au niveau mondial, les premiers postes de consommation d'énergie finale sont le

³¹ Croissance des émissions de GES entre 1990 et 2007, classement par ordre décroissant d'émission : Chine +170%, États-Unis +18.6%, Russie -27%, Inde +124%, Japon +16%, Allemagne -16%, Canada +32%, Royaume-Uni -5%, Corée du Sud +113%, Iran +165%, Mexique +49%.

bâtiment (résidentiel + tertiaire), ainsi que l'industrie à peu près à égalité, suivis de près par les transports.

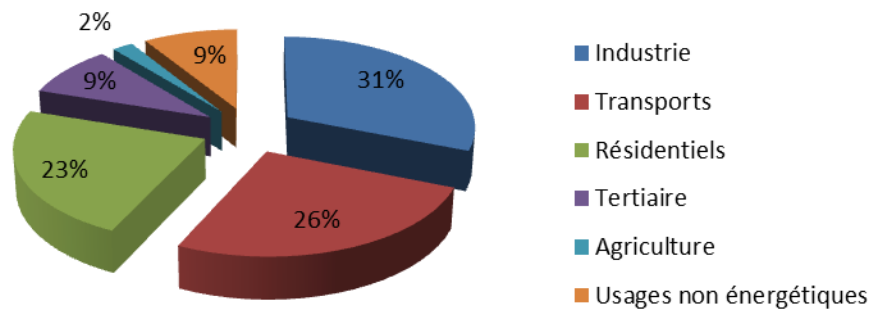


Figure 14 : Consommation d'énergie finale dans le monde, 2011³²

En revanche, si l'on examine la répartition des émissions de GES, le secteur du bâtiment est un contributeur très modeste.

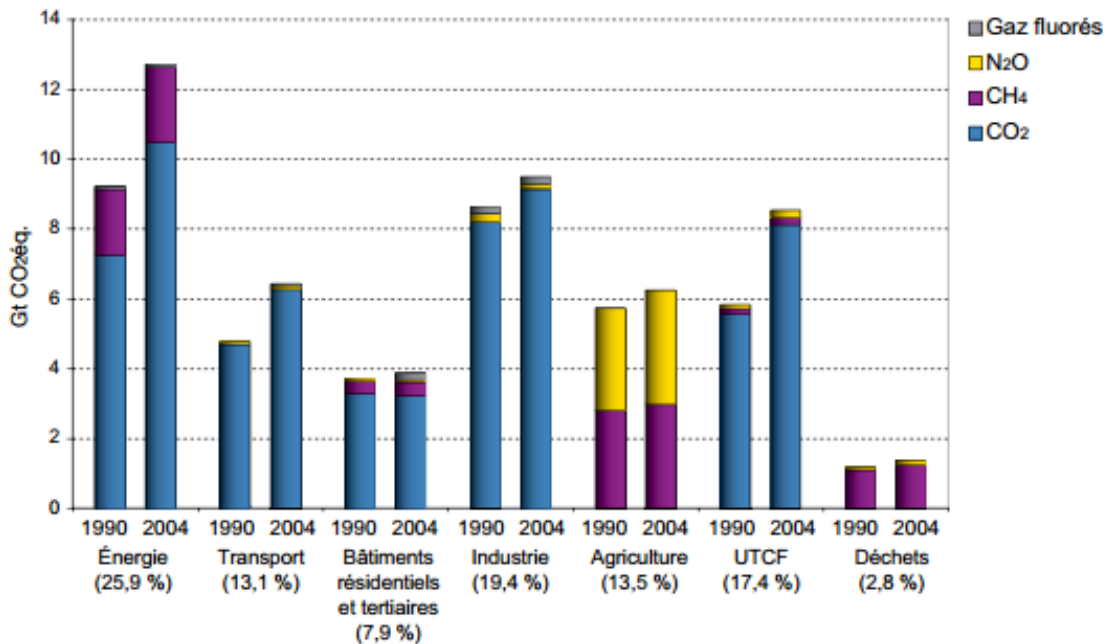


Figure 15 : Répartition des émissions mondiales de GES par secteur d'activité

La combustion d'énergie fossile est la première source de GES, suivie par l'activité industrielle et l'Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt (c.-à-d. la déforestation). Le secteur du bâtiment est le seul à rester stable sur la période considérée (excepté en ce qui concerne les émissions de gaz fluorés liés à l'utilisation croissante de la climatisation). L'effort demandé au secteur du bâtiment sert donc à première vue davantage à la limitation de la consommation d'énergie, enjeu

³² Global chance, contribution au débat sur la transition énergétique, février 2013

économique de premier plan, qu'à la limitation des émissions de gaz à effet de serre, enjeu environnemental vital.

Cependant, en imaginant une production délocalisée d'énergie au niveau de chaque bâtiment, qui soit de source renouvelable et faiblement carbonée, on éviterait le recours à la production centralisée d'électricité, premier poste d'émissions de GES. C'est ainsi que se développe le raisonnement en faveur d'une *Troisième Révolution Industrielle*, dont le *Bâtiment à Énergie Zéro* est l'un des cinq piliers.

En plus de l'effet technique recherché, la réussite du *Bâtiment à Énergie Zéro* suppose l'implication de chaque citoyen dans la considération de ses propres consommations énergétiques domestiques, et de ses impacts environnementaux associés. Le bilan énergétique et environnemental autrefois national, abstrait et dilué, devient un bilan familial, concret et immédiat, et une affaire personnelle. Cet effet de sensibilisation et de responsabilisation est un levier potentiel, indirect mais puissant, d'atteindre à terme la cible recherchée.

I.3 FORMALISATION D'UNE DÉFINITION DU BÂTIMENT À ÉNERGIE ZÉRO

L'idée d'un *Bâtiment à Énergie Zéro* se conçoit facilement : celle d'un bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme. Cette idée fait écho avec la philosophie des années 70 autour de l'habitat autonome, revendique une certaine lignée avec l'architecture solaire³³ et la conception bioclimatique³⁴, et se combine avec le concept plus récent de PassivHaus. Ces deux visions coïncidentes quant à l'objectif d'économiser l'énergie s'opposent pourtant conceptuellement, et cette difficile conjugaison peut être l'une des explications aux difficultés rencontrées dans la formalisation d'une définition robuste et consensuelle. Dans un cas, la priorité est mise sur la captation des ressources à disposition d'un site (soleil, éolien, rayonnement, géothermie), dans l'autre, la priorité est la minimisation des échanges avec l'extérieur et la conservation de la chaleur interne, jugée suffisante.

³³ *Quelle architecture solaire ?*, l'Architecture d'aujourd'hui, n°192, Sept.1977

³⁴ *Le guide de l'énergie solaire passive*, Edward Mazria, Ed. Parenthèses (première édition en 1979) & *Solar Envelope Concepts*, Ralph Knowles, Solar Information Data Bank, Avril 1980.

Nombre de projets se revendiquent dès à présent à *Énergie Zéro*, à *Énergie Positive*, *Zéro Énergie Fossile*, Neutre climatiquement, *Zéro Liquide Frigorigène*, les états légifèrent autour de ces concepts, et au lieu d'une définition unique qui peine à émerger, c'est finalement un faisceau de définition qui est en train de voir le jour.

C'est que la façon dont on définit l'objet va déterminer la façon dont on va le concevoir et le construire³⁵, aussi la définition dépend-elle du résultat attendu. Les différents états ou intervenants sur le sujet ne se posent pas les mêmes questions, et trouvent donc autant de réponses, qui sont autant de définitions du *Bâtiment à Énergie Zéro*. Qu'aucune définition consensuelle construite autour d'une réflexion scientifique ne se détache montre l'étendue des questions résidant derrière l'apparente simplicité du concept. C'est un enjeu important cependant, que de construire un concept, autour de dénominateurs communs intelligibles, qui puisse faire consensus, et susciter l'adhésion.

À ce jour, le dénominateur commun des différentes approches est l'idée d'un décompte des intrants et des sortants du bâtiment, associé à un système de pondération. Ce n'est pas d'autonomie en énergie dont il s'agit, mais d'un équilibre entre approvisionnement et production énergétique sur une période donnée. Il est important de noter ce postulat initial : il s'agit de définir le Bâtiment à Énergie Zéro par le biais d'un calcul conventionnel, pas par une obligation de moyen (approche prescriptive) ou de résultat.

Des travaux universitaires³⁶ ont tenté de structurer cette réflexion en effectuant le recensement des critères d'appréciation de l'équilibre développés dans les premières tentatives de définition du *Bâtiment à Énergie Zéro*.

I.3.1 CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME CONSIDÉRÉ

I.3.1.1 Taille du système

La détermination claire des limites du système est cas un élément essentiel à l'identification et à la quantification des flux énergétiques qui les traversent.

³⁵ *Nearly Zero, Net Zero, ans Plus Energy Buildings – how definitions and regulations affect the solutions*, K. VOSS, I. SARTORI, R. Lollini, HVAC Journal, 2012.

³⁶ I. SARTORI, A. NAPOLITANO, K. VOSS. *Net Zero Energy Buildings : A Consistent Framework*, Energy and Building, 2012.

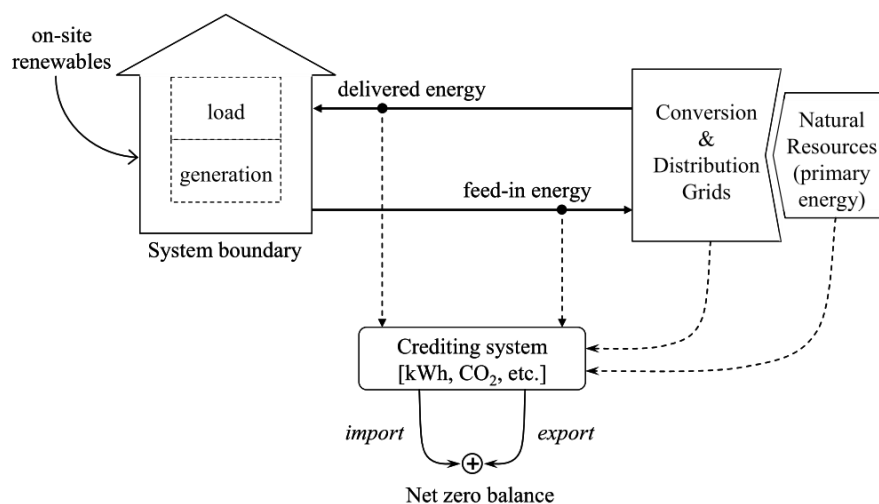


Figure 16 : Raccordement entre bâtiment et réseaux de distribution énergétiques

Le cas le plus simple et intuitif est celui d'un bâtiment à usage unique. Cependant, un bâtiment peut présenter plusieurs usages (lieux de travail, logement, crèche, commerce...) qui favorisent les échanges, et une mutualisation des équipements, comme le projet BedZeD, en Grande Bretagne :

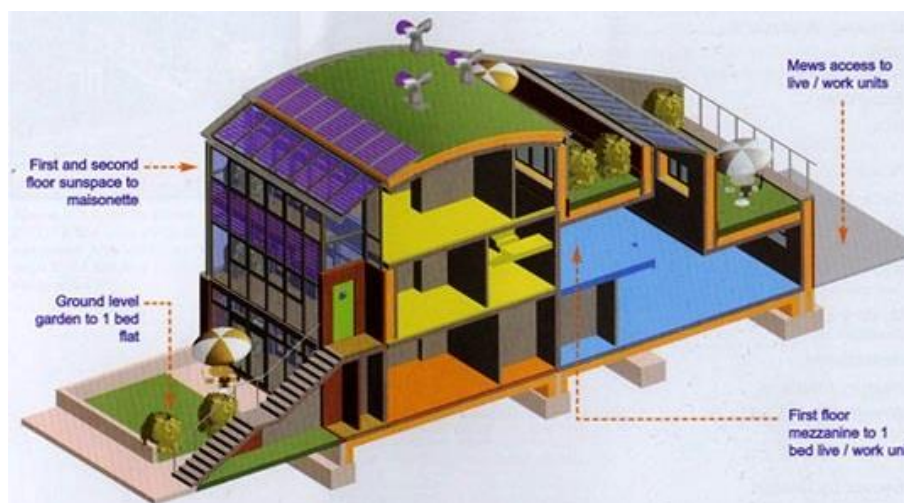


Figure 17 : Axonométrie fonctionnelle du projet BedZeD, Wallington

Le même raisonnement peut être tenu, avec davantage de souplesse, pour un ensemble de bâtiments, et peut permettre grâce à des synergies l'atteinte plus aisée de l'équilibre au niveau de l'ensemble.

Cette notion est au cœur de nombre de réflexions actuelles en France notamment³⁷.

³⁷ Appel à manifestation d'intérêt de l'Ademe autour de la notion d'« ilot à énergie positive ».

I.3.1.2 Périmètre de comptage

Définir un périmètre de comptage consiste à définir les consommations liées aux usages pris en compte dans le calcul de consommation-production.

Habituellement, ceux-ci incluent les usages immobiliers du bâtiment (chauffage, refroidissement, ventilation hygiénique, ECS, éclairage) et les usages mobiliers (bureautique, électroménager).

Les différents standards et règlements nationaux incluent différentes combinaisons de ces usages. En France par exemple, les usages conventionnels, au nombre de cinq, ne couvrent que les consommations immobilières.

Sont exclues systématiquement les consommations liées à des *process* (serveurs, *data center*, chaîne de fabrication industrielle) non attribuées au secteur du bâtiment mais à l'activité pratiquée ; celles-ci sont à considérer dans les consommations du secteur industriel et sont laissées à l'écart des préoccupations actuelles.

D'autres usages peuvent être considérés par soucis d'efficacité, même s'ils ne sont pas à proprement parlé partie prenante de la performance d'un bâtiment ; on peut citer :

- La consommation d'un véhicule électrique,
- Le besoin de mobilité lié à l'activité pratiquée dans le bâtiment qui est fonction de son emplacement.

D'autres aspect de la consommation d'énergie, qui ne sont pas attribuables à l'usage mais plutôt au cycle de vie du bâtiment peuvent être inclus également :

- l'énergie et les émissions de CO₂ nécessaires à la fabrication des matériaux de construction,
- l'énergie consommée par le chantier, de construction et de déconstruction, même si leur importance relative est peu importante.

I.3.1.3 Hypothèses de référence

Pour pouvoir comparer deux bâtiments entre eux, ainsi qu'entre un projet de bâtiment et le résultat construit, il est important que les écarts éventuels puissent être identifiés et attribués (erreur de conception, défaut technique, différence entre le modèle et la réalité de l'utilisation de l'ouvrage). Pour cela, il est nécessaire d'explicitier un

ensemble de conditions de référence, concernant l'usage, la densité, le climat, et le niveau de confort.

- Usage

L'usage décrit les activités pour lesquelles le bâtiment est prévu, comme un logement, un bureau, une école ou un hôpital. Cela sous-tend un scénario conventionnel et une catégorisation sommaire du fonctionnement d'un bâtiment.

- Densité

Il peut s'agir de la densité de personnes au m², ou du ratio de consommation d'énergie par personne. L'amplitude de la variation en la matière est difficilement appréhendable par un calcul prédictif.

- Conditions climatiques

Il est nécessaire de spécifier un climat de référence pendant la phase de conception. Cependant, l'amplitude de la variabilité climatique annuelle, saisonnière est très importante et l'établissement de fichier météorologique de référence est à discuter. Notamment, la prise en compte des évolutions climatiques futures pour des ouvrages dont la durée de vie va s'étaler sur des décennies est à considérer.

- Niveau de confort

Le niveau de confort exigé est un élément déterminant pour l'équilibre recherché. C'est même une fonction primaire d'un bâtiment, que d'assurer un niveau de confort par rapport à une ambiance extérieure quand elle est considérée comme agressive. Aussi, l'établissement de ce niveau de confort est un sujet critique et culturel, et les indicateurs tentant d'en attester sont multiples (température de l'air, opérative, diagramme de Givoni, confort hydrique, approche statistique de la satisfaction) et imparfaits. Les normes internationales en la matière ont fait l'objet de révisions récentes³⁸ pour introduire les critères de confort adaptatif et de plages de confort. Cependant, ce niveau de confort est un élément fortement subjectif, et ne correspond

³⁸ EN15251 : 2007 incorporent la notion de confort adaptatif pour les bâtiments ventilés naturellement, ainsi que des plages acceptables différentes pour l'indicateur PMV (Predictable Mean Vote), fonctions de différentes catégories de confort.

pas à un « besoin » physiologique³⁹. Concernant les lieux de travail, cet élément est souvent relié à la performance, et au taux d'absentéisme des travailleurs.

L'établissement de l'ensemble de ces hypothèses de référence est un véritable point faible de l'approche par simulation. Les hypothèses climatiques, mais plus encore celles concernant la manière dont l'utilisateur final va s'approprier et utiliser le bâtiment sont des hypothèses fortes. Il est cependant indispensable d'étalonner les consommations par rapport à un niveau de référence pour apprécier l'influence comportementale de l'usage fait du bâtiment, et pouvoir effectuer des comparaisons.

I.3.2 CHOIX DES GRANDEURS MESURÉES

L'évaluation de l'atteinte de l'équilibre du système suppose de disposer d'une grandeur unique qui caractérise les différents flux énergétiques entrant et sortant du système. Quatre grandeurs peuvent être envisagées : la consommation en énergie finale, la consommation en énergie primaire, la consommation d'énergie non renouvelable, le niveau d'émission de gaz à effet de serre.

Le choix de la grandeur mesurée peut être fortement influencé par une volonté politique visant à favoriser le choix d'une filière particulière, en lien avec des engagements pris à l'échelon international (comme le plan énergie-climat au niveau européen).

I.3.2.1 Énergie finale

C'est l'énergie approvisionnée et transformée, directement utilisable et consommée dans un équipement ou une installation (comme une ampoule, un moteur, une chaudière) qui la « dégrade » définitivement. C'est la plus facilement mesurable pour l'utilisateur final, mais elle masque tous les processus de conversion, distribution, et les rendements des différentes filières.

I.3.2.2 Énergie primaire

C'est l'énergie extraite d'une source d'énergie primaire (le soleil, le sol). Après conversion sous forme utilisable, cette énergie devient secondaire jusqu'à consommation finale. Elle représente bien le prélèvement de ressource énergétique à

³⁹ MOESEKE, Turn the Gas Off - Zero-Energy Achievement based on Free Floating Internal Conditions between Health-related Limits, 2011.

l'environnement, mais son comptage n'est pas direct et sa lisibilité pour l'utilisateur difficile. Le comptage de sa consommation, nécessite des conventions de conversion, qui bien sûr sont imparfaites, et font l'objet de débats permanents.

I.3.2.3 Part d'énergie renouvelable et non renouvelable

Il s'agit de considérer la part d'énergie non-renouvelable contenue dans l'énergie distribuée par le réseau d'une part, et la production locale d'énergie de source renouvelable d'autre part. L'intérêt de cette grandeur est qu'elle permet d'intégrer l'évolution du contenu énergétique du réseau, et favorise le développement des énergies renouvelables produites de manière diffuse. Le défaut de cette évaluation est qu'elle occulte complètement le contenu en carbone des énergies.

I.3.2.4 Émission de GES

C'est la grandeur significative de l'influence d'une consommation d'énergie sur le réchauffement climatique. Comme l'énergie primaire, son comptage n'est pas direct, et la question suscite de nombreux débats.

I.3.3 ATTEINTE DE L'OBJECTIF

L'équilibre peut être déterminé de différentes manières, selon les grandeurs auxquelles on s'intéresse, et la durée sur laquelle on effectue le bilan.

I.3.3.1 Période considérée

La durée conventionnelle de calcul de l'équilibre est implicitement l'année. Cela est pertinent pour intégrer les variations saisonnières importantes. Ainsi s'équilibrent, selon ce principe, la consommation dédiée au chauffage hivernal, avec le surplus de production photovoltaïque d'un été chaud.

Une période plus courte, la saison ou le mois, serait une exigence beaucoup plus sévère sur la conception du bâtiment et de ses systèmes, et se rapprocherait du cas des bâtiments autonomes en énergie. Une période plus longue, en revanche, de l'ordre de plusieurs décennies nécessiterait d'intégrer l'énergie intrinsèque du bâtiment sur tout son cycle de vie. Une annualisation de ces consommations diffuses viendrait en surplus des consommations de fonctionnement, et serait à compenser par un surplus de production cédé au réseau, sur la durée de vie du bâtiment.

I.3.3.2 Nature de l'équilibre

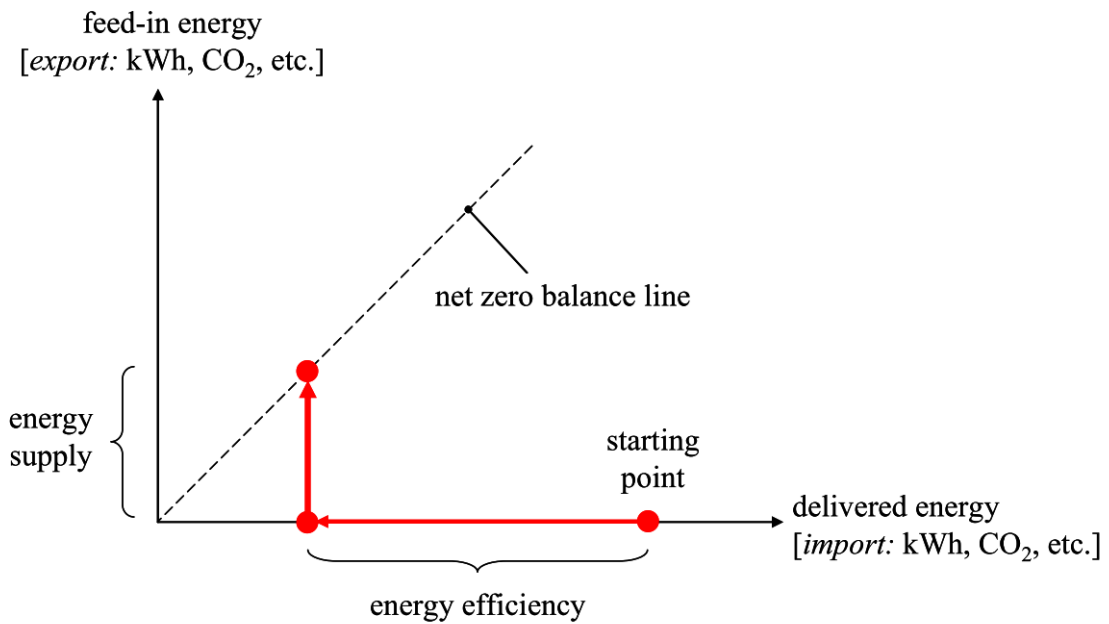


Figure 18 : Graphique représentant l'équilibre d'un Bâtiment à Energie Zéro

La notion d'équilibre est centrale pour établir le cadre de la définition, et deux types d'équilibre se distinguent :

- L'équilibre entre import et export, ou entre énergie délivrée, et énergie exportée, peut s'écrire ainsi :

$$\sum_k e_k \times c_{e,k} - \sum_i i_k \times c_{i,k} = E - I \geq 0$$

Où **e** et **i** sont les énergies exportées et importées, **c** le coefficient de conversion, **k** pour le type d'énergie échangée. Cette définition ne fait pas apparaître directement la consommation dans l'équilibre, qui peut être assurée avec des valeurs élevées d'énergie importées, si elles sont compensées en conséquence.

- L'équilibre entre production et demande :

$$\sum_k p_k \times c_{g,k} - \sum_k d_k \times c_{d,i} = P - D \geq 0$$

Où **p** et **d** sont la production et la demande d'énergie de type **k**, **c** le coefficient de conversion. Cette forme de comptabilité omet complètement un lien possible entre besoin et production. Toute la production peut être exportée tandis que toute l'énergie nécessaire est importée du réseau.

Ces deux équilibres n'impliquent pas que l'énergie produite puisse être consommée sur place, au lieu d'être injectée sur le réseau. Pourtant en raison de la très prochaine - voire déjà effective - *parité réseau* de l'énergie photovoltaïque, il sera plus économique de consommer son énergie que de la vendre celle produite et d'acheter celle consommée.

I.3.3.3 Efficacité énergétique

Une définition peut comprendre des exigences d'efficacité énergétique, qu'elles soient de moyen, de performance, ou une combinaison des deux. On peut fixer une valeur garde-fou pour les niveaux d'isolation U des parois, ou sur la perméabilité à l'air par exemple.

En l'absence de prérequis sur la qualité du bâtiment et les équipements de production d'énergie, le champ est laissé libre au concepteur de trouver toute optimisation technico-économique. Cependant, on verra que l'ensemble des bâtiments recensés disposent de mesures fortes d'efficacité énergétique, avant de produire de l'énergie.

Cependant, il faut noter que ce sont deux approches totalement différentes. Dans un cas, on laisse le concepteur libre de déterminer une solution optimale, tandis que l'obligation de prescription prédétermine le type de solution. L'avantage de la deuxième solution est de s'affranchir de la phase lourde de calcul, en se référant à des solutions techniques classiques.

I.3.3.4 Approvisionnement énergétique

C'est la qualification de la provenance des approvisionnements énergétiques en fonction de la distance entre production et consommation (sur site, hors site) :

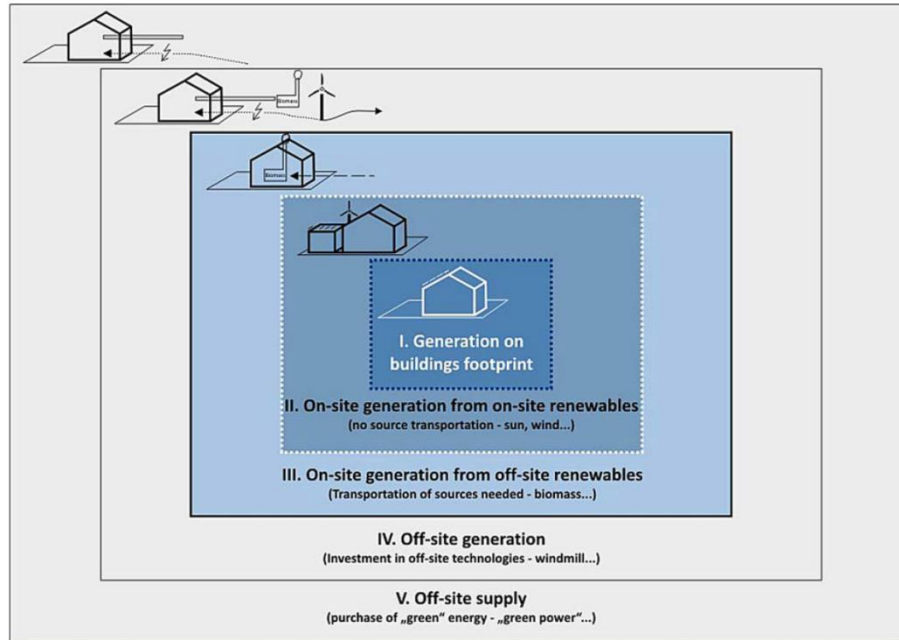


Figure 19 : Diagramme des approvisionnements sur et hors-site⁴⁰

I.3.4 CONNEXION AU RÉSEAU

La disponibilité de réseaux à simple ou double voies aux bornes du système est indissociable du cadre de définition discuté. Par deux voies il faut entendre un réseau capable de délivrer et de recevoir de l'énergie. Un raccordement à un réseau à deux voies au moins pour un type d'énergie (électricité, chaleur) est indispensable pour compenser les prélèvements.

Des spécifications particulières sont exigées par les opérateurs de réseau pour pouvoir incorporer ces productions d'énergies exportées, comme la fréquence et le voltage de l'électricité délivrée, ou le niveau de température pour un réseau de chaleur.

⁴⁰ A. MARSZAL, J. BOURELLE, E. MUSALL, P. HEISELBERG, A. GUSTAVSEN, K. VOSS. *Net Zero Energy Buildings, Calculations Methodologies versus National Codes*. Eurosun

1.3.4.1 Courbe de réponse à la demande

Le pourcentage de couverture de la demande par la production à un instant t peut être exprimé comme ceci :

$$f_{demande}(t) = \min\left[1, \frac{P(t)}{D(t)}\right]$$

L'amélioration de cette correspondance contribue à une diminution du besoin de transport et de stockage de l'énergie par le réseau. En revanche il faut être attentif au fait que seule l'énergie produite sur site doit être considérée dans cette correspondance. En sus, la présence d'une capacité de stockage $S(t)$ permet d'améliorer la courbe de réponse en lissant les périodes de pics, de demande et de génération :

$$f_{demande}(t) = \min\left[1, \frac{G(t) + S(t)}{D(t)}\right]$$

Il peut, en dehors du stockage, exister deux types de stratégie pour améliorer cette correspondance entre génération d'énergie et demande. Soit, on ajuste la demande à la production, soit on ajuste la production à la demande. La recherche d'une optimisation de cette correspondance a des conséquences sur le choix des systèmes. Par exemple, nombre de BEZ disposent de pompes à chaleur dont la demande augmente quand l'ensoleillement disponible est le plus faible et donc la production d'électricité photovoltaïque la plus réduite.

1.3.4.2 Solde échangé au réseau

$$f_{grid}(t) = \text{STD}\left[\frac{G(t) - D(t)}{\text{MAX}(G(t) - D(t))}\right]$$

Une valeur positive correspond à une exportation d'énergie. Ce solde exprime le taux d'utilisation du réseau par le bâtiment dans l'atteinte de son équilibre. Un flux constant d'énergie importé ou exporté au lieu de fortes fluctuations est caractérisé par une valeur faible de f_{grid} sur une année.

1.3.4.3 Symétrie

Chaque réseau à deux voies peut être pondéré symétriquement, ou asymétriquement, suivant que les coefficients pour l'énergie délivrée, ou importée soient identiques ou différenciés.

Des coefficients symétriques supposent qu'une énergie exportée évitera la génération d'une quantité équivalente d'énergie ailleurs sur le réseau. L'énergie délivrée a une valeur de substitution équivalente au coefficient de pondération du réseau. En revanche, une pondération asymétrique suppose que l'énergie produite sur site, et celle délivrée, n'ont pas la même valeur. Une modulation où l'énergie délivrée est davantage pondérée peut intervenir afin de favoriser l'autoconsommation et de réduire les échanges avec le réseau. Le choix d'une modulation favorable à l'export peut être adopté pour aider à la diffusion d'une technologie nouvelle (comme les tarifs de rachat de l'électricité photovoltaïque en France jusqu'en 2010).

1.3.4.4 Comptabilité dynamique

En raison de la complexité des infrastructures de réseau, il n'est souvent possible d'établir que des coefficients de conversion moyens sur une durée convenue, et qui s'appliquent à l'énergie primaire et aux émissions de GES.

Mais les coefficients varient selon l'instant et le lieu, selon la disponibilité des ressources. Une actualisation régulière des taux de conversion doit être effectuée afin de traduire l'évolution du contenu des flux véhiculés par les réseaux.

Il est possible d'envisager une pondération à un rythme horaire, ce qui aboutirait à une comptabilité dynamique des échanges avec le réseau. Une approche intermédiaire, quasi-statique pourrait proposer des valeurs moyennes mensuelles, ou saisonnières, avec des plages quotidiennes type heure pleine/heure creuse correspondant aux pics de demande. Ces fluctuations, communes pour les tarifs de l'électricité, pourraient se généraliser dans l'avenir aux taux de conversion intervenant dans le calcul de l'énergie primaire ou du niveau d'émission de GES.

Ce calcul dynamique ou quasi-statique favorise à priori l'émergence de bâtiments conçus pour optimiser leurs interactions avec le réseau. En revanche, la détermination de l'équilibre augmente en complexité, et sa prévisibilité devient beaucoup plus faible. Il semble préférable de pratiquer des coefficients de conversion statiques ou quasi-statiques, et d'introduire une composante dynamique pour caractériser la correspondance besoin-production.

I.4 REVUE DES OPÉRATIONS PILOTE À TRAVERS LE MONDE

L'Agence Internationale de l'Énergie a effectué un recensement des opérations se réclamant à zéro énergie, et publié un recueil fin 2011⁴¹ décrivant en détail une sélection de projets significatifs.



Figure 20 : BeDZeD, Wallington



Figure 21: Greenoffice, Meudon

Parmi eux, les ensembles BedZeD à Wallington, et Greenoffice, à Meudon ont fait l'objet d'une importante couverture médiatique, mais de nombreux autres se répartissent à travers le monde.

⁴¹Net Zero Energy Buildings : International Projects of Carbon Neutrality in Buildings, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling, Task 40 : Net Zero Energy Solar Buildings

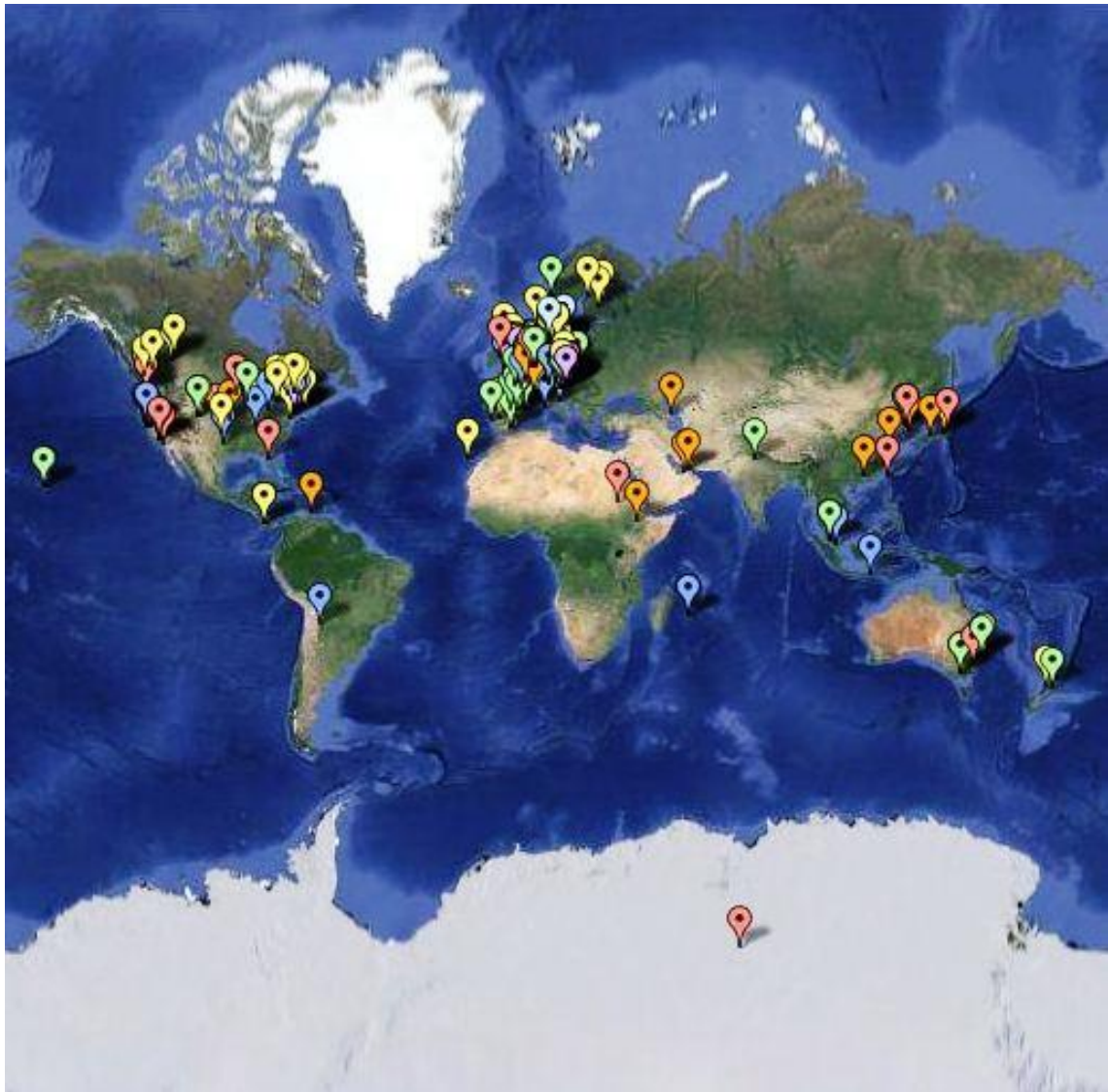


Figure 22 : Carte des Bâtiments à Énergie Zéro à travers le monde

L'analyse de ces projets est riche d'enseignements. Cette analyse sera ici limitée aux dispositions touchant à l'enveloppe, et quand la distinction mérite d'être faite, sur les ouvrages tertiaires. Qui plus est, la réflexion menée ici porte sur la conception d'ouvrages dans un contexte français, donc on écartera les situations trop éloignées climatiquement.

Le premier enseignement vient du nombre de projets recensés : 282 bâtiments construits à travers le monde se réclamaient en 2011 à *Énergie Zéro*. C'est la preuve de la réalité et du réalisme de l'objectif de *Bâtiment à Énergie Zéro*, et de l'engouement international pour ce projet.

Les premiers exemples à voir le jour ont été des maisons individuelles bâties sur le concept du label *Passiv Haus* allemand, disposant de plus d'une production d'électricité photovoltaïque. Avec le développement des techniques efficaces énergétiquement, des ouvrages plus importants ont pu voir le jour, tels de petits immeubles collectifs ou des lotissements. Des entreprises de taille moyenne et des promoteurs ont ensuite investi le secteur des bâtiments *environnementaux*. Pour supporter l'image d'une entreprise ou bénéficier d'un avantage concurrentiel sur le marché immobilier, des bureaux et autres lieux de travail ont vu le jour. Ces ouvrages sont souvent certifiés également par un label environnemental, tel BREEAM, LEED, HQE, Minergie-P, ce qui souligne le bénéfice d'image visé. Les premières grandes entreprises impliquées dans ces projets ne se distinguent d'ailleurs pas par leur engagement en faveur de l'environnement (Burger King ou Wal Mart).

Le type de programme est varié, ce qui démontre la possibilité de généralisation du BEZ à toutes les constructions. En revanche, l'absence de définition commune et de critères précis d'élection au statut de BEZ limite les comparaisons.

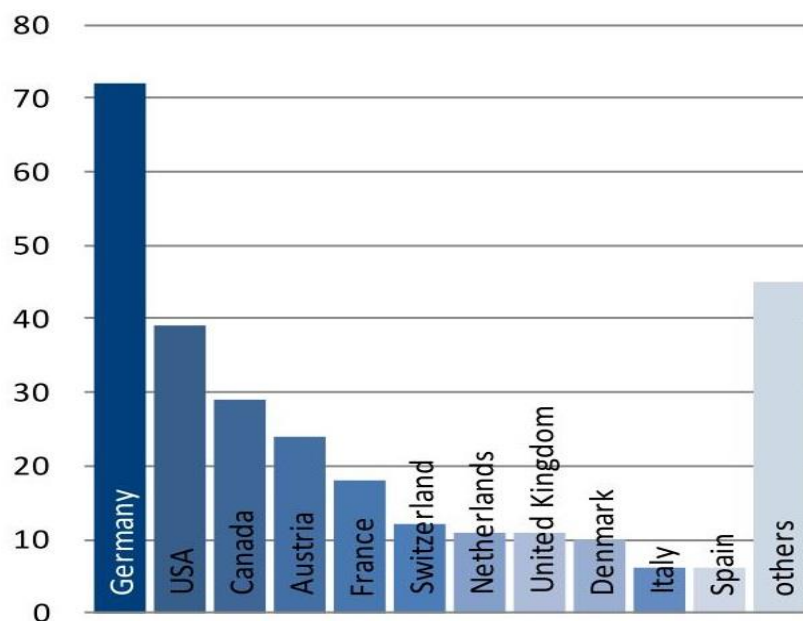


Figure 23 : Nombre de bâtiments à énergie Zéro identifiés par pays

L'Allemagne mène au classement des pays pour le nombre d'opérations, et si l'on y ajoute l'Autriche et la Suisse, qui partagent la même tradition constructive, l'ensemble atteint 100 bâtiments, soit plus d'un tiers des exemples construits. Il est intéressant de noter que les États-Unis se placent tout de même en deuxième place du classement,

malgré la non-ratification du protocole de Kyoto et le mauvais bilan global du pays en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'énergie. Aucun pays émergent ne se distinguent dans cette représentation.

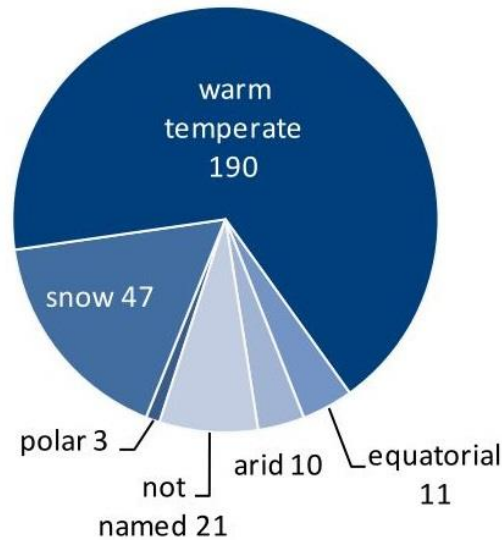


Figure 24 : Occurrence par type de climat

Autant de climats, d'usages, et de définitions, produisent une variété de projets et de solutions adoptées, qui en font une base riche d'enseignement, et sont une démonstration éclatante de la faisabilité de la généralisation des *Bâtiments à Énergie Positive*. Une majorité s'inscrit dans un climat tempéré, ce qui reflète la dominance du modèle allemand, et leur avancée dans ce domaine.

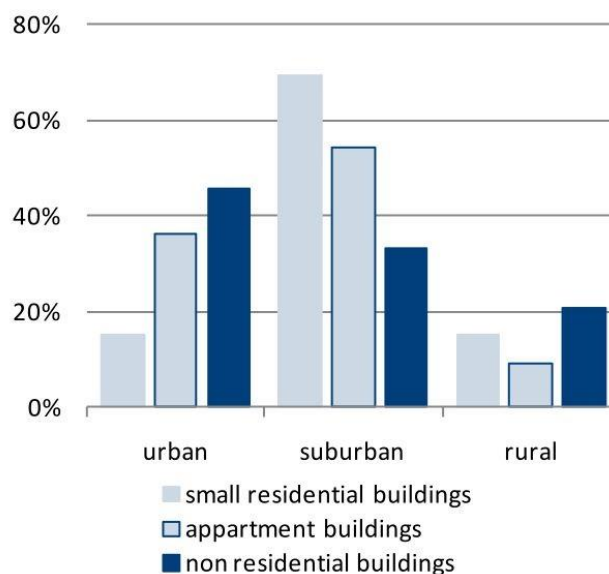


Figure 25 : Contexte urbain des 282 ouvrages connus

Peu d'opérations se présentent en milieu rural. La majorité des ouvrages est construite en milieu urbain ou péri-urbain, où l'importance des masques urbains peut avoir une influence forte sur la conception de ces ouvrages⁴².

I.4.1 CONDITIONS CLIMATIQUES

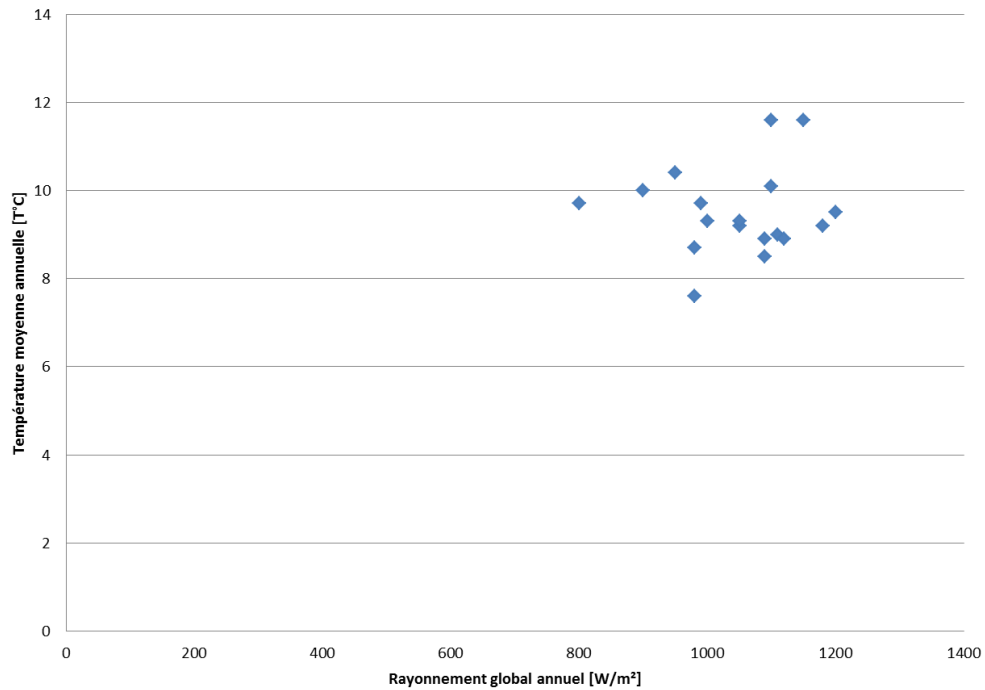


Figure 26 : Corrélation rayonnement et température moyenne

Les climats réunionnais (1929kWh/m².an, 25°C), australien (1600kWh/m².an, 13.5°C), et canadien (1270kWh/m².an, 6°C) se distinguent de l'ensemble, aussi on les mettra de côté pour la suite de l'étude, et on retiendra les plages climatiques sélectionnées pour tirer expérience de ces opérations.

	Rayonnement global annuel kWh/m ² .an	Température moyenne annuelle T°C
Valeur min	800	7.6
Valeur max	1200	11.6
Valeur moyenne	1046.7	9.5

Figure 27 : Corrélation rayonnement température moyenne

⁴² M. MAÏZIA, 2007. *L'énergétique urbaine et la morphologie des villes*, Les annales de la recherche urbaine, n°103.

Notons que le climat français est plus doux et plus ensoleillé que la moyenne des pays considérés ici.

I.4.2 CARACTÉRISTIQUES DES ENVELOPPES

I.4.2.1 Niveau d'isolation

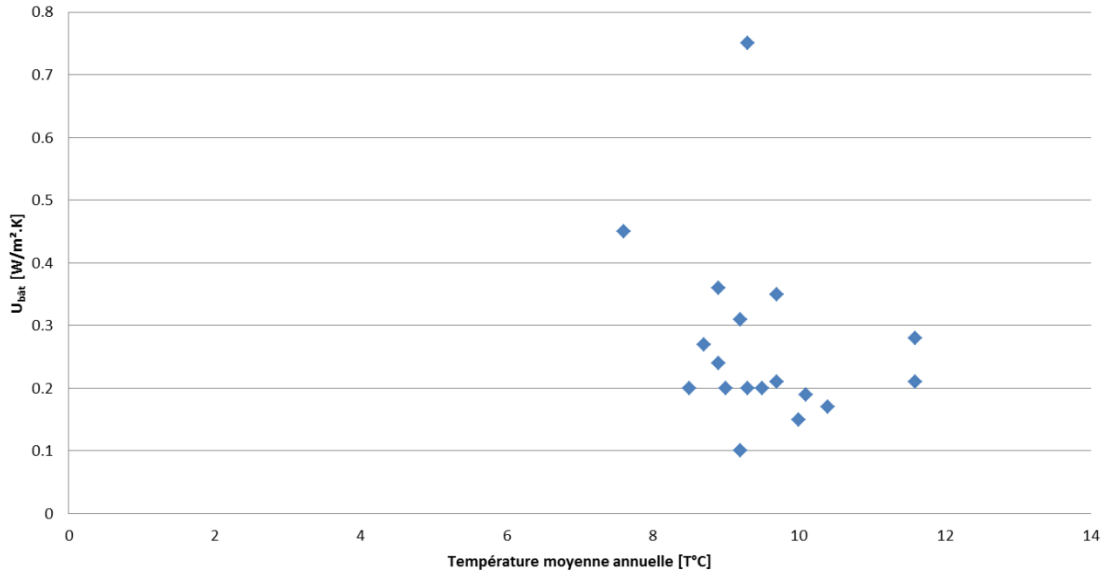


Figure 28: Nuage de corrélation entre $U_{bât}$ et Température moyenne annuelle

La corrélation n'est pas parfaite, et l'on ne dispose pas d'un lien direct entre les deux grandeurs. En écartant les valeurs extrêmes, qui correspondent à des valeurs de $U_{bât}$ élevées, on retrouve un nuage de points bien groupés, traduisant la bonne cohérence du modèle allemand. On constate que les valeurs de $U_{bât}$ pratiquées sont très basses, concentrées entre 0.15 et 0.35 $W/m^2.K$. Par comparaison, les U moyen exigés en Europe⁴³ et en Amérique du Nord par les différentes réglementations nationales sont plutôt homogènes, et beaucoup plus élevés.

	$U_{bât}$
Suède	0,7
Danemark	0,77
Norvège	0,84
Ontario	0,93
Finlande	0,94

⁴³ Etude réalisée par LAUSTSEN, 2008. *Energy efficiency requirements in buildings codes, energy efficiency for new buildings*, IEA Information paper.

I.4.2.2 Performance thermique par élément

	U, murs ext	U, part vit	U, toit	U, roof lights	U, pl bas	U, bât
Valeur min	0.09	0.48	0.07	0.72	0.07	0.15
Valeur max	1.2	1.2	0.23	1.6	0.95	0.75
Valeur moyenne	0.2	0.9	0.1	1.1	0.2	0.3

Figure 29: Niveaux d'isolation des parois extérieures

En regardant dans le détail les performances de l'enveloppe, par élément, on constate que les performances sont très élevées (c.à.d. les valeurs de U très faibles).

I.4.2.3 Étanchéité à l'air

	n_{50} [vol/h]	eq. Q_4 [m ³ /(h.m ²)]
Valeur min	0.18	0.12
Valeur max	0.8	0.53
Valeur moyenne	0.52	0.34
Valeur médiane	0.40	0.27

Figure 30: Perméabilité à l'air sous 50 et 4 Pa

Là encore, les valeurs de perméabilité à l'air sous 50 Pascal sont très performantes. La colonne de droite indique la valeur convertie du débit de fuite équivalent - pour une HSP de 2.70 - sous 4 Pascal. Pour comparaison, la valeur la plus performante exigée en France - dans le cadre du label Effinergie+ - s'élève à 1.2 m³/h.m², soit le double de la valeur maximale relevée.

I.4.2.4 Facteur de compacité S_{env}/SU

A forme constante, le rapport S_{env}/SU est totalement indépendant de la taille. Il qualifie donc la géométrie d'une architecture, sans avantager les ouvrages de grande taille. Les surfaces des bâtiments recensés varient de quelques dizaines à dix mille m². En mettant de côté les valeurs correspondant aux surfaces inférieures à 1000m², pour lesquelles une variation en plan a un effet accentué, les valeurs sont comprises entre 0.08 et 0.25, ce qui correspond à des ratios extrêmement faibles. La géométrie de ces bâtiments est particulièrement compacte.

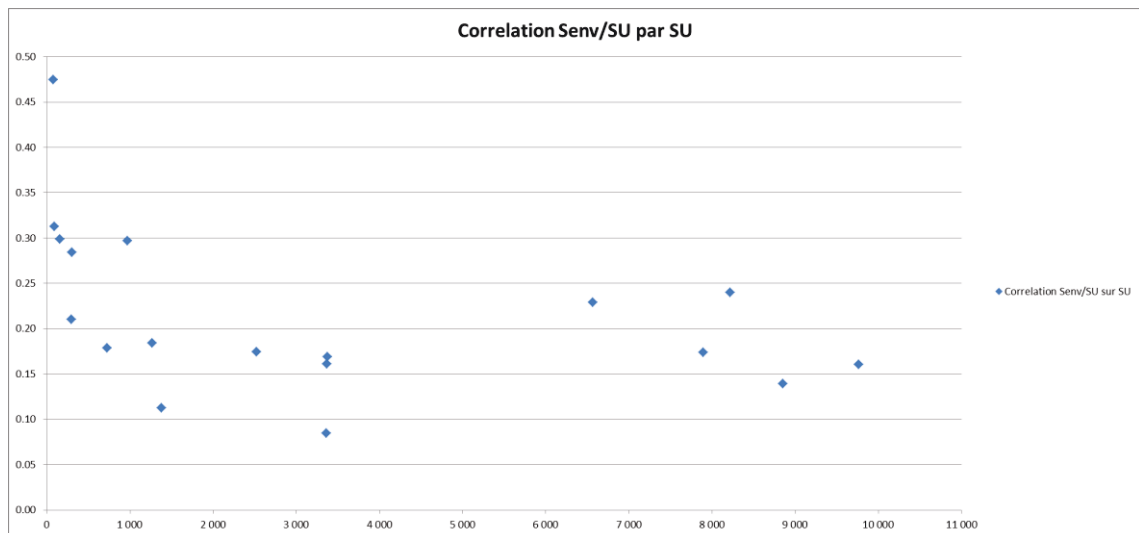


Figure 31: Valeurs de S_{env}/SU suivant la surface utile

L'ensemble des performances de l'enveloppe est caractéristique des bâtiments de tradition constructive allemande, type *Passiv Haus*. La priorité est mise sur la limitation du besoin de chaleur, par la mise en œuvre d'une enveloppe très compacte, présentant des niveaux d'isolation très performants pour tous les éléments de l'enveloppe, et une étanchéité à l'air sans faille. Ces niveaux de performance sont inconnus jusqu'à présent en France.

I.4.3 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

On peut atteindre ce niveau excellent de performance en ayant recours à des matériaux ordinaires, avec cependant de remarquables exemples de technologies innovantes.

I.4.3.1 Parois verticales opaques

L'échantillon évalué est faible, et peu représentatif au sens statistique. Le sujet du recensement n'étant pas directement les processus constructifs de façade, ils ne sont pas toujours renseignés, et la revue des dispositions constructives de qui suit est partielle et les conclusions prudentes.

- Matériaux de structure de la façade

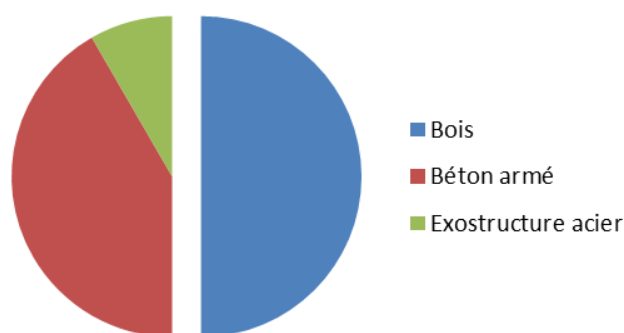


Figure 32 : Matériau et type de structure employés

Deux systèmes constructifs sont essentiellement utilisés, qui diffèrent radicalement par leur nature :

- Le bois est utilisé en filière sèche, en modules préfabriqués. Une ossature contreventée par des panneaux de particules formant caisson vient encloisonner un isolant. Un film freine vapeur est nécessaire, ainsi que des dispositions de protection contre l'incendie (plaques de plâtre, tôles acier). Les éléments sont autoporteurs, mais la façade n'est pas porteuse des planchers. L'inertie de la façade est faible, et l'isolation de type *répartie*.
- Le béton armé est coulé en place entre banches, et porte les planchers. Un isolant, ventilé par une lame d'air, est agrafé par l'extérieur, habillé et protégé par un parement extérieur. L'inertie mobilisable de la façade est importante.

Il est notable qu'aucun projet ne mette en œuvre d'isolation par l'intérieur. C'est sans doute la préoccupation de l'inertie structurelle utilisée comme volant thermique qui motive cette disposition, ce qui en revanche pose la question de la pertinence d'une isolation répartie en façade bois. On peut supposer que le bilan environnemental positif du bois en construction (stockage de CO₂, et faible énergie grise) favorise son utilisation au-delà d'un intérêt direct thermique.

Une conception originale et innovante est le choix d'une exo-structure en acier pour un des exemples. L'argument (thermique) est, en enlevant du volume intérieur la structure porteuse, de réduire le volume chauffé au strict volume utile. Cependant, les traversées du plan d'isolation par les éléments porteurs est un sujet délicat techniquement, et le lieu de ponts thermiques et de points de condensation quasi inévitables qui viennent réduire l'intérêt de ce type de solutions.

- Matériau isolant

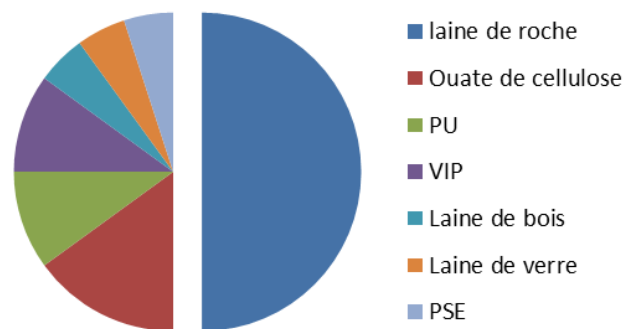


Figure 33 : Matériau isolant employé

La variété des isolants utilisés montrent l'étendue des solutions disponibles. Les isolants organiques sont encore peu présents, et toujours associés à une structure bois. La laine de roche est présente dans la moitié des projets. Ses qualités thermiques, acoustiques et de sécurité incendie en fait un matériau performant.

- Parement extérieur

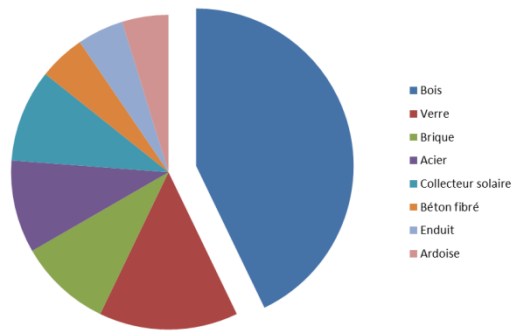


Figure 34 : Matériau de parement extérieur

Le bois, en bardeau, lames verticales ou horizontales, ou en panneaux, est très utilisé. C'est pourtant un matériau dont le choix d'essence et la mise en œuvre doivent être effectués avec un grand soin pour présenter une certaine pérennité. Si son utilisation générale dans le bâtiment est justifiée pour les arguments déjà évoqués de faible énergie grise et de stockage de CO₂, les volumes mis en œuvre en façade sont relativement faibles. L'association de l'image du bois à un bâtiment écologique pèse sans doute sa forte présence.

Le verre vient en deuxième position, avec une utilisation en parement, ou dans un exemple original mis en œuvre en triple vitrage opalescent comme une partie opaque. La faible performance thermique du triple vitrage comparée à celle d'un matelas isolant est compensée par la présence d'un remplissage d'aérogel dans les interstices entre les verres, ou d'un matériau à changement de phase.

Seuls deux projets présentent des collecteurs solaires en façade. L'un avec des panneaux photovoltaïques non ventilés disposé en allège, l'autre avec des collecteurs thermiques. Les ouvrages restants présentent des parements classiques, bien que l'absence de parement en cassette aluminium soit notable.

I.4.3.2 Couvertures

- Pente

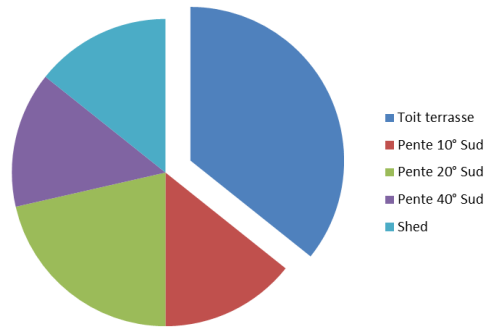


Figure 35 : Pente et orientation des toitures

Une majorité de projets comportent des toitures orientées au Sud avec des pentes de 10 à 40°, pour optimiser un captage solaire thermique ou photovoltaïque. La toiture plate reste bien utilisée, pour permettre une végétalisation.

- Matériau

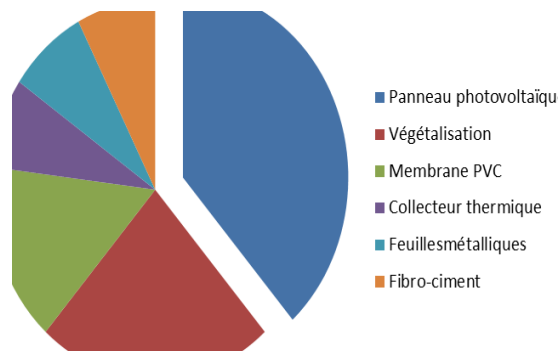


Figure 36 : Matériau du revêtement de toiture

Les panneaux photovoltaïques constituent le premier revêtement de toiture utilisé, ce qui est un changement radical par rapport à la construction traditionnelle. Le choix d'une intégration architecturale des panneaux photovoltaïques est privilégié, avec des éléments qui combinent les fonctions de toiture, et de production d'électricité. L'autre alternative la plus pratiquée est la toiture végétalisée, à faible pente ou pente nulle, avec éventuellement ajout de capteurs solaires thermiques ou de panneaux PV disposés en *shed* sur une ossature séparée.

- Matériau isolant

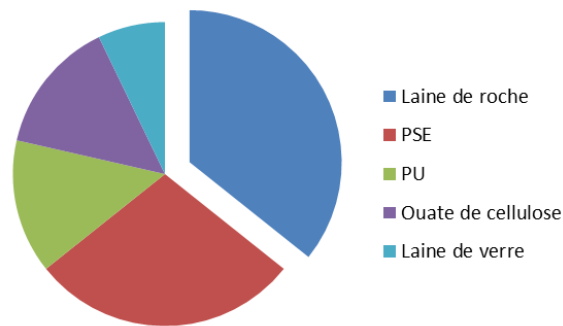


Figure 37 : Matériau isolant utilisé en toiture

On ne note pas d'évolution particulière des matériaux isolants en toiture. Les isolants d'origine organique n'ont pas trouvé la place qu'ils occupent en paroi verticale. La résistance à la compression, les fortes variations de température et l'exposition potentielle à la pluie liées à cette mise en œuvre en couverture ne sont pas les atouts principaux de ces isolants.

I.4.3.3 Parties vitrées

- Menuiseries

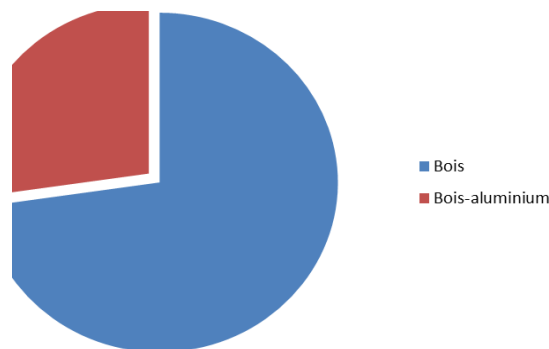


Figure 38 : Matériau de menuiserie

Pour les menuiseries, on ne trouve qu'un seul matériau utilisé : le bois. Quantités de projets ont fait le choix d'un placage en aluminium extérieur sur la menuiserie bois, afin de se prémunir de la nécessité d'un entretien régulier des parties exposées aux intempéries. C'est un changement fort quand on considère la représentation variée (PVC, alu, bois, bois-alu, acier) des menuiseries en France, par exemple.

▪ Vitrages

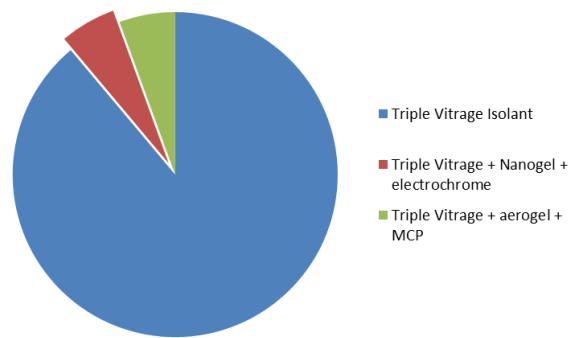


Figure 39 : Remplissages vitrés

Le triple vitrage est utilisé dans la totalité des projets.

Quelques projets disposent de technologies réellement innovantes (vitrages prismatiques + MCP, aérogels et nanogels, électrochrome), malgré les difficultés techniques d'intégration de fonctions complémentaires (poids des verres, difficultés d'assemblage, manque de transparence, élévations de températures) que l'on peut rencontrer en assemblage triple vitrage.

I.4.3.4 Protections solaires

Cette information n'est le plus souvent pas mentionnée. C'est pourtant à priori un sujet majeur pour des bâtiments super-isolés. En effet, à la fois la protection solaire se doit d'être très efficace en été, et présenter une variabilité suffisante pour autoriser des apports solaires en hiver.

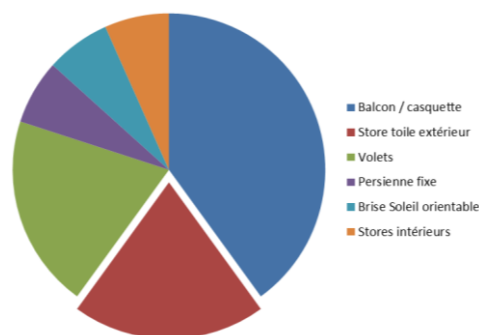


Figure 40 : Protections solaires

L'utilisation de balcon, ou d'un élément faisant casquette est très fréquemment utilisée dans les projets, et souvent combinés avec des protections solaires extérieures. La combinaison est surprenante. Car l'avantage de la protection extérieure mobile est la très forte efficacité et la variabilité, tandis que la protection

fixe est à la fois peu efficace l'été (protège essentiellement du rayonnement direct, mais pas du diffus), et pénalisante en hiver (apports solaires et lumineux réduits).

II VOLONTARISME DE L'UNION EUROPÉENNE

L'Union Européenne se montre extrêmement active au plan international pour convaincre ses alliés de la communauté internationale de s'engager en faveur de la lutte contre le réchauffement climatique, de la préservation de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Sans ce volontarisme, sans doute qu'aucun engagement international n'aurait vu le jour. C'est un atout considérable que la première zone économique mondiale se soit engagée dans cette voie, et une chance pour les états membres. Si la traduction de ces engagements en mesures concrètes, laissée à la responsabilité des états, se heurte aux intérêts particuliers des états et des pouvoirs économiques en place, il faut reconnaître à l'Union Européenne la paternité de plusieurs textes fondateurs de la prochaine *troisième révolution industrielle*.

II.1 PAQUET CLIMAT-ÉNERGIE

L'Europe, fer de lance des négociations internationales sur la limitation des émissions de GES, s'est dotée le 23 janvier 2008 d'un ensemble de loi, dit *climat-énergie*. Peu connu du public, ce paquet législatif s'est fixé deux priorités :

- Mettre en place une politique européenne commune de l'énergie pour assurer son approvisionnement,
- Lutter contre le changement climatique.

Le paquet *climat-énergie* a pour objectif les 3 fois 20 à l'horizon 2020 :

- part de 20% d'énergie d'origine renouvelable dans la consommation de l'Union Européenne⁴⁴,
- réduction de 20% des émissions de GES⁴⁵,
- gain de 20% de l'efficacité énergétique.

⁴⁴ Part des énergies renouvelables en Europe dans la consommation finale en 2008 à hauteur de 8,5%. Pour la France, la part d'énergie d'origine renouvelable s'élevait à 10,3% en 2005, et l'objectif fixé par la directive *Énergies renouvelables* 2009/28/CE, est de 23% en 2020.

⁴⁵ La directive 406/2009/CE fixe à la France comme objectif une réduction de -14% de ses émissions de GES concernant le secteur industriel.

Les deux premiers objectifs sont contraignants, tandis que le troisième est une intention.

II.2 DIRECTIVE POUR LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT

Le Parlement Européen adopte en 2002 une directive relative à la performance énergétique des bâtiments (DPEB) en application de l'engagement pris dans le protocole de Kyoto, et afin de réduire la trop forte dépendance énergétique de l'Union Européenne.

Trop peu ambitieuse à l'origine, elle fait l'objet d'une refonte en mai 2010 : la Directive 2010/31/UE du parlement et conseil européens sur la Performance Énergétique des Bâtiments (DPEB), introduit un nouvel objectif de performance énergétique des bâtiments : *le bâtiment dont la consommation est quasi nulle*.

Article 2 : Définitions⁴⁶

« Bâtiment dont la consommation d'énergie est quasi nulle », un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées déterminées conformément à l'annexe I. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelable sur place ou à proximité ;

L'échéance pour les états membres pour se doter de ces bâtiments est définie dans l'article 9 :

1. Les États membres veillent à ce que:

- a) d'ici au 31 décembre 2020, tous les nouveaux bâtiments soient à consommation d'énergie quasi nulle;*
- b) après le 31 décembre 2018, les nouveaux bâtiments occupés et possédés par les autorités publiques soient à consommation d'énergie quasi nulle.*

L'interprétation de la définition et des méthodes de calcul est laissée à l'appréciation des états membres. La DPEB, en ne répondant pas clairement à la question de la définition, laisse un vaste terrain à l'interprétation, au détournement et à la complexification de l'objectif. L'abandon, en court d'adoption de la directive, du terme

⁴⁶ DPEB 2010/31/UE Articles 2 et 9

Bâtiment à Énergie Zéro, considéré comme trop ambitieux, est à cet égard regrettable en ce qu'il était d'une simplicité louable. Son remplacement par la désignation *Bâtiment dont la consommation est quasi nulle* confine ici au ridicule technocratique. La France, en adoptant le terme *Bâtiment à Énergie Positive*, ou BEPOS, fait bénéficier le concept - quoi qu'il contienne - d'une image très favorable à son adhésion par le public et les professionnels.

II.3 APPLICATION DE LA DPEB DANS LES PAYS MEMBRES

Le constat d'avancement de la transcription de la DPEB, trois ans après son adoption, est alarmant étant donné l'échéance fixée⁴⁷.

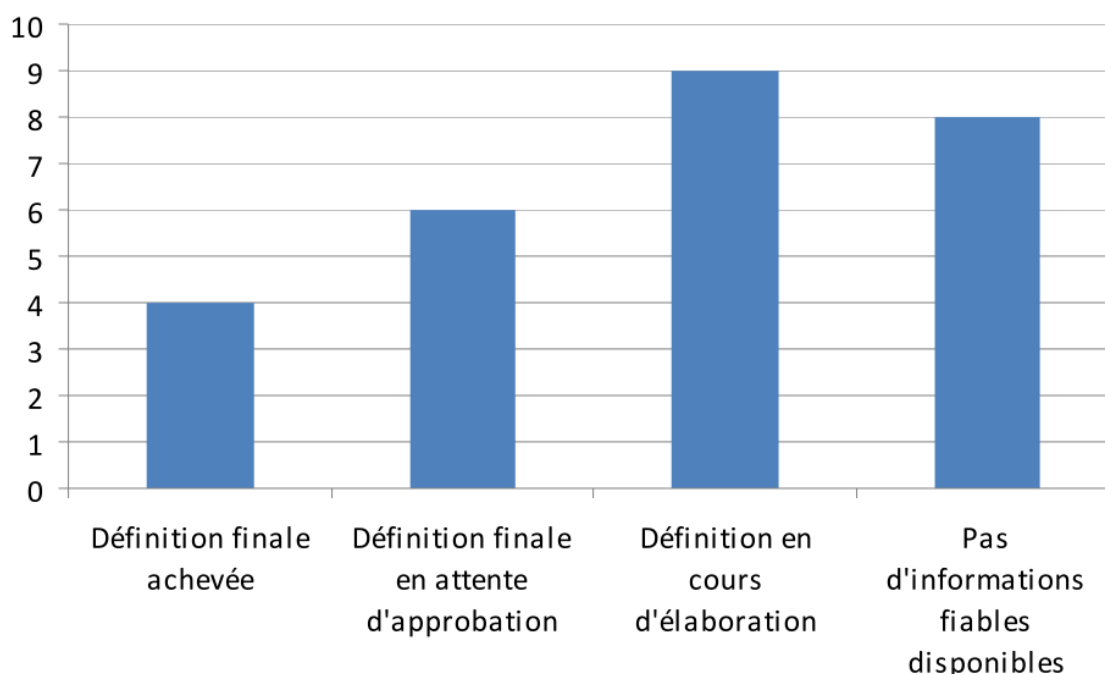


Figure 41 : Etat d'avancement de la définition des "bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi nulle » dans les états membres

Seuls 4 pays (BE, CY, DK, LT) ont fourni une définition précise avec des objectifs chiffrés, tandis que la majorité des 27 est encore en cours d'élaboration d'un projet, malgré le cadre de définition fourni⁴⁸. Quand elles existent, les exigences varient grandement, entre 0 et 220kWh_{ep}/m² par an, au point que l'on peut se demander si les

⁴⁷ Progrès réalisés par les états membres vers des bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi-nulle, rapport de la commission au parlement européen et au conseil, juin 2013.

⁴⁸De nombreuses publications scientifiques traitent du sujet de la définition, dont un des plus aboutis est : I. SARTORI, A. NAPOLITANO, K. VOSS. *Net Zero Energy Buildings : A Consistent Framework*, Energy and Building, 2012

niveaux les plus élevés sont réellement compatibles avec la définition de *bâtiment dont la consommation est quasi nulle* telle que formulée dans la DPEB.

Certains pays ont cependant défini des objectifs qui dépassent les exigences du texte : à *énergie zéro* aux Pays-Bas, à *énergie positive* au Danemark et en France, à *incidence climatique nulle* en Allemagne, *zéro émissions de GES* au Royaume-Uni.

En ce qui concerne la part d'énergie renouvelable, les différents rapports sont tout aussi différents, et seuls quelques états membres ont défini un pourcentage minimal spécifique (BE, CY, DK et LT). D'autres ne se prononcent que sur le plan qualitatif (BE, DE, EL, IE, LT, NL, SE et UK).

En conclusion, les états membres de l'Union Européenne ont réalisé à ce jour trop peu de progrès par rapport aux objectifs fixés pour 2020. Ces efforts trop lents et partiels, l'absence de définitions claires, d'objectifs intermédiaires et de mesures de soutien engendrent une incertitude dans le secteur de la construction qui reporte les investissements nécessaires à ce processus. Par ailleurs, une partie de la contribution que les bâtiments doivent apporter pour atteindre ses objectifs climatiques et énergétiques à long terme est en train d'être perdue. Étant donné l'importance de cette contribution, cet écart ne pourra vraisemblablement pas être comblé par des économies réalisées dans d'autres secteurs d'activité⁴⁹.

⁴⁹ Paragraphe largement inspiré de : *Progrès réalisés par les états membres vers des bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi-nulle*, rapport de la commission au parlement européen et au conseil, juin 2013.

III VALSE-HÉSITATION EN FRANCE

La notion de maîtrise de l'énergie n'est pas une idée nouvelle en France.

Elle est née en 1974, au lendemain du choc pétrolier avec la première réglementation thermique, qui ouvre un processus continu d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments jusqu'à la dernière RT2012. Parallèlement, s'effectue le choix du développement de l'électricité nucléaire, et avec lui l'encouragement continu de l'implantation du chauffage électrique. Le résultat de ces politiques est une structuration particulière de la filière énergétique, et le maintien de la consommation globale du secteur depuis quarante ans.

Politiquement, et en dépit des nombreux discours volontaristes, la France est en retard sur les engagements pris au niveau Européen, et l'état tarde à prendre des mesures fortes et cohérentes. Pourtant, l'adhésion des citoyens français au projet de transition énergétique et écologique est forte, les entreprises du bâtiment appellent à l'action politique, et les municipalités, les régions et le milieu associatif sont force de proposition et à l'initiative de nombreux projets innovants.

C'est l'association Effinergie, qui propose au printemps 2013 la première définition du *Bâtiment à Énergie Positive*, sous la forme d'un label de performance énergétique. Cette première définition apporte de nouvelles prises en compte énergétiques, et va permettre d'organiser la réflexion et les initiatives.

Nombre de projets ont devancés cette définition tant attendue, qui sont autant d'expérimentations concrètes du bâtiment à énergie positive, dont l'analyse est riche d'enseignement.

III.1 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

En 1973, le fioul est la première source d'énergie électrique et permet de couvrir près de la moitié des besoins en France. Le premier choc pétrolier de 1974 fait basculer la France dans le *presque tout nucléaire* avec le choix de Pompidou en 1974 de lancer la construction de 13 centrales nucléaires supplémentaires, choix par la suite confirmé par Giscard en 1975. Parallèlement est établie la première réglementation thermique dans le bâtiment, la **RT1974** qui s'applique à l'ensemble des bâtiments neufs

d'habitation et vise à limiter la facture énergétique française liée aux importations pétrolières.

Première du genre, elle fixe un objectif de réduction de 25% de la consommation de chauffage des bâtiments par rapport à l'usage de l'époque. C'est ce qui lancera sur le marché l'isolation thermique, les doubles vitrages et la ventilation mécanique. Le deuxième choc pétrolier de 1979 voit l'histoire se répéter, aboutit de la même manière à la **RT1982** avec un nouvel abaissement de 20% des consommations. Se succèdent ensuite les **RT1988**, **RT2000**, **RT2005** et maintenant la **RT2012**. Entretemps, la RT s'est généralisée à tous les bâtiments résidentiels et non résidentiels et a élargi sa base de consommation énergétique en introduisant les consommations d'eau chaude sanitaire (ECS), des équipements de climatisation et de ventilation en plus des consommations de chauffage. Plus ou moins régulièrement, le palier visé par chaque nouvelle réglementation est en moyenne une réduction de 20% de consommation, avec l'inclusion de nouveaux usages.

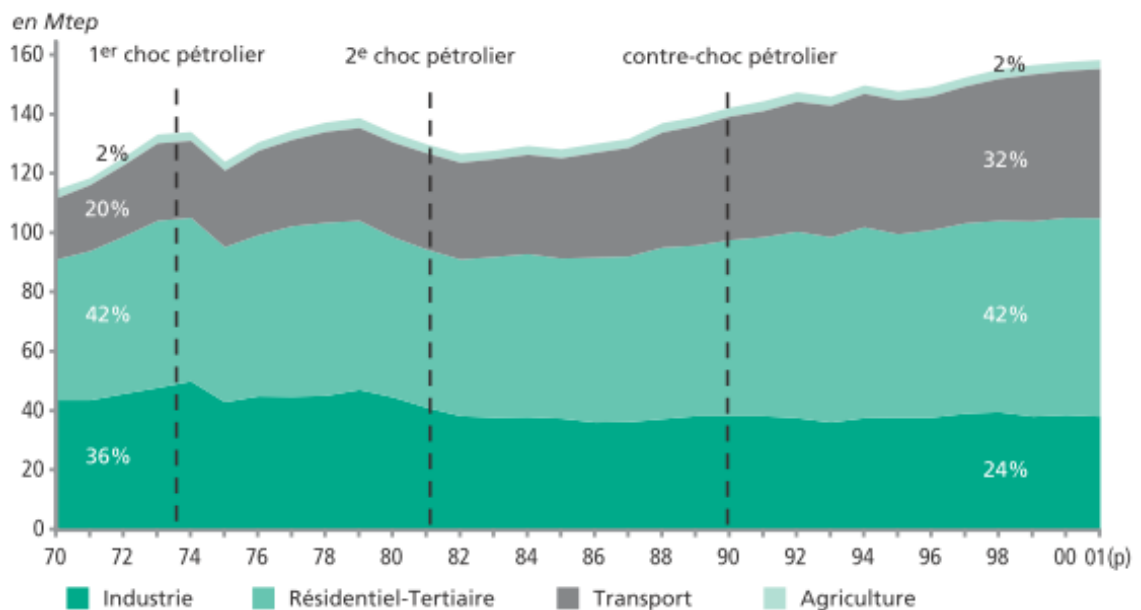


Figure 42 : Évolution de la demande d'énergie finale par secteurs (France 1970-2000)⁵⁰

La consommation française augmente globalement de 25% de 1970 à 2000. La politique d'économie d'énergie dans le bâtiment aura permis de stabiliser la part du

⁵⁰ Source Ademe, Datamed

secteur dans le bilan global. L'analyse du bilan énergétique actuel de la France, par énergie et par secteur permet de visualiser les particularités du pays :

Unité : [Mtep]	CHARBON	PETROLE	PRODUITS PETROLIERS	GAZ	URANIUM	HESG*	ELECTRICITE	CHALEUR	BIOMASSE	TOTAL
PRODUCTION PRIMAIRE	0.09	1.3		0.5		5.43		0.19	16.14	23.65
Importation	10.08	64.38	40.94	40.89	114.9		0.71		0.43	272.33
Exportation	-0.36	-0.15	-19.67	-3.31			-5.59		-0.07	-29.15
Sources maritimes et aériennes			-8.44							-8.44
Variation de stocks	0.26	0.66	-1.16	-1.46					0.02	-1.68
CONSOMMATION PRIMAIRE	10.08	66.19	11.67	36.63	114.9	5.43	-4.88	0.19	16.51	256.72
Raffineries		-70.6	71.62							1.02
Centrales électriques	-4.1		-2.05	-6.06	-114.9	-5.43		3.69	-2.54	-131.39
Autoconsommation, pertes	-0.5	4.41	-11.02	-3.08			-7.77	0.11	-1.11	-18.96
CONSOMMATION FINALE	5.48		70.21	27.49			35.85	3.99	12.87	155.89
ENERGETIQUE	5.42		57.91	26.16			35.85	3.99	12.87	142.2
Industrie	5.09		4.01	7.59			9.17		2.34	28.2
Transport			41.12	0.15			1.08		2.79	45.14
Résidentiel	0.3		6.5	13.31			14.77	0.13	6.99	42
Tertiaire			3.47	4.92			10.55	3.86	0.71	23.51
Agriculture			2.79	0.18			0.29		0.04	3.3
NON-ENERGETIQUE	0.06		12.3	1.33						13.69

* HESG : hydraulique, éolien, solaire, géothermie.

Figure 43 : Bilan énergétique de la France, répartition sectorielle, 2011 (Mtep)⁵¹

Les constats qui s'imposent à la lecture de ce bilan sont que :

- L'approvisionnement en énergie primaire de la France repose à 92% sur des ressources importées : uranium, pétrole, gaz, charbon⁵².
- 45% de cet approvisionnement est constitué à lui seul par de l'uranium importé.
- La production d'énergie primaire française représente 8% de la consommation, celle-ci étant constituée à 92% d'énergie dite renouvelable,
- Les processus de transformations introduisent des pertes importantes, en particulier pour l'électricité. Ces pertes absorbent 40% du total de l'énergie primaire consommée.
- Le pétrole (et ses dérivés) est l'énergie finale la plus utilisée.
- L'électricité, second produit final, arrive loin derrière les produits pétroliers.

Spécifiquement dans le secteur du bâtiment :

- La part de l'électricité est très forte dans le tertiaire (44%) et le résidentiel (35%).

⁵¹ Global chance, *La Situation Énergétique de la France : Etat des Lieux*. Contribution au Débat National sur la Transition Énergétique, 18 février 2013.

⁵² L'ensemble de ces importations représente 90% du déficit commercial de la France en 2011.

- Présence forte du gaz naturel (27%).
- Le charbon et le fioul n'est quasiment plus utilisé.

III.2 CONTEXTE POLITIQUE

La France adopte dès 2000 un *Programme National de Lutte contre le Changement Climatique*, dont le bilan, dressé en 2002 a conclu que ce plan n'avait pas atteint ses objectifs en matière de réduction des émissions de GES.

Un *Plan Climat* a ensuite été adopté en 2004, visant à :

susciter l'adhésion de la société tout entière et encourager les gestes citoyens par la sensibilisation et l'information ; favoriser les sources d'énergie non émettrices de carbone ; insérer l'écologie dans l'économie grâce à des mécanismes novateurs, efficaces et flexibles ; préparer l'avenir au travers d'efforts de recherche qui mettent la France sur la voie d'une société sobre en carbone ; rendre le secteur public exemplaire ; accompagner les collectivités locales pour qu'elles réalisent leurs propres plans pour le climat.

Depuis, ce *Plan Climat* est devenu, en 2011, un *plan d'atténuation*. Celui-ci vise à l'atténuation de l'impact sur l'environnement, et l'adaptation du pays aux changements climatiques en cours.

En 2007, le Grenelle de l'environnement se propose des objectifs plus ambitieux et plus rapidement concrétisés. La loi couvre de larges secteurs de l'environnement : agriculture, pêche, forêt, biodiversité, eau, bâtiment, urbanisme, déchets, risques, entreprises, santé... En innovant par la méthode de consultation des différents acteurs, ce processus entraîne l'adhésion et aboutit au vote quasi-unanime⁵³ de la loi programmatique, dite *Grenelle I*, portant engagement de la France pour l'environnement.

La loi dite *Grenelle II* décline et précise en 2010 les différents sujets par objectif, chantier et secteur : 201 décrets seront nécessaires pour la pleine application de cette loi. Au global, le processus comprend un important catalogue de mesures, mais pas de

⁵³ Adoption de la loi « Grenelle I » à l'Assemblée Nationale le 21 octobre 2008 par 526 voix sur 530.

cohérence d'ensemble, de l'avis de l'ensemble des associations environnementales. L'abandon du projet de taxe carbone, ainsi que nombre d'autres mesures comme le bonus-malus pour l'automobile montrent l'affaiblissement considérable de l'élan initial, né il est vrai par l'engouement soudain et surprenant, autant qu'éphémère, du président sortant pour l'environnement⁵⁴.

Son successeur annonce de manière tout aussi surprenante la diminution de la part du nucléaire de 75 à 50% pendant la dernière campagne présidentielle, puis propose de prolonger de 10 ans les centrales nucléaires, conçues pour une durée de 40 ans. Le report du *débat national sur la transition énergétique* après les prochaines échéances électorales vient achever le tableau de cette grande valse-hésitation et confirmer la fébrilité du monde politique face aux enjeux en question.

Ainsi se répètent au gré des gouvernances les déclarations de bonnes intentions, suivies de leur relégation au second plan, au profit de préoccupations de court terme. Pendant ce temps-là, le retard de la France dans le domaine se creuse.

III.2.1 RÉGLEMENTATION ACTUELLE

Annoncée après le *Grenelle de l'environnement* et présentée comme une révolution des habitudes constructives, la réglementation en vigueur, la **RT2012** se contente de suivre la feuille de route de la DPEB, avec retard.

Elle tend à généraliser le niveau de performance du label *Bâtiment Basse Consommation* (BBC). Déjà largement anticipée par les constructeurs et nombre de maître d'ouvrage, la RT2012 entérine le niveau BBC qui était déjà entré dans les habitudes pour les programmes importants.

Pour les enveloppes des bâtiments tertiaires, c'est même un fléchissement de l'exigence par rapport au précédent label BBC. L'exigence sur le $U_{\text{bât}}$ disparaît ainsi que le bâtiment de référence, et les garde fous sont transférés des parties courantes de l'enveloppe aux singularités que sont les ponts thermiques, sans fixer un niveau réellement restrictif pour les techniques contemporaines usuelles.

⁵⁴ « *L'environnement, ça commence à bien faire !* », Nicolas Sarkozy, mars 2010.

En matière de calcul, la RT2012 marque l'abandon du bâtiment de référence, et le retour de la notion de besoin datant de 1988, mais cette fois-ci qualifié de *bioclimatique*. Finalement, cette nouvelle réglementation ne poursuit pas l'élan initial constaté depuis la RT2005, et ne soutient pas la dynamique existante chez les acteurs du bâtiment.

Une nouveauté réside cependant dans *l'obligation de résultat* induite par l'obligation de mesure de perméabilité à l'air pour les habitations. C'est un changement de fond car l'obligation réglementaire avait auparavant toujours été une obligation de moyen. On peut y voir un signe de l'arrivée d'une future obligation de résultat aujourd'hui demandée par les maîtres d'ouvrages, réticents d'investir dans la performance énergétique conventionnelle qui ne soit pas réelle. Le passage de l'obligation de moyen à l'obligation de résultat serait un bouleversement des habitudes contractuelles des métiers de la construction, mais est certainement une idée qui fait son chemin.

III.2.2 DÉFINITION ISSUE DU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT

Extrait de la loi Grenelle 1 du 3 août 2009 :

Article 4 : Toutes les constructions neuves faisant l'objet d'une demande de permis de construire déposée à compter de la fin 2020 présentent, sauf exception, une consommation d'énergie primaire inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite dans ces constructions, et notamment le bois-énergie

Le texte est simple, ambitieux puisqu'il va au-delà des objectifs de la DPEB, bénéficie d'un nom qui favorise son adhésion en soulignant une volonté optimiste plutôt qu'une restriction. Sont définis certains points quand d'autres manquent :

- Le type d'équilibre recherché est bien défini : $C_{ep} - Prod_{ENR} > 0$
- La provenance de l'ENR : *dans les constructions*
- Le *bois-énergie* est logiquement intégré dans les énergies d'origine renouvelable.
- Le périmètre des consommations pris en compte n'est pas précisé, ni la méthode d'évaluation.
- Le terme *sauf exception* laisse la porte ouverte à nombre de dérogation.

Cette définition est limitée au stade du concept, et est loin d'être suffisante pour concevoir un Bâtiment à Énergie Positive.

III.3 LABEL BEPOS-EFFINERGIE 2013

Proposé par l'association Effinergie, avec comme intitulé *Bepos-Effinergie 2013*, ce nouveau label propose un cadre pour les maîtres d'ouvrages volontaires afin d'anticiper les prochaines exigences réglementaires. Il s'applique aussi bien au résidentiel, qu'il soit individuel ou collectif, qu'au non résidentiel, et concerne la France métropolitaine.

Cette proposition de définition vise à considérer l'exigence de *bâtiment à énergie positive* sur l'ensemble des constructions et non pas projet par projet. Les bâtiments ayant un fort potentiel de production d'énergie d'origine renouvelable devront l'exploiter plus qu'il ne serait nécessaire pour avoir un bilan nul et les bâtiments ayant un faible potentiel l'exploiteront autant qu'ils le peuvent sans arriver à obtenir un bilan nul.

III.3.1 EXPRESSION DE L'EXIGENCE DU LABEL

Elle se veut simple et s'appuie sur la réglementation nationale, à laquelle viennent s'ajouter cinq exigences complémentaires :

- Conformité à la RT2012
- Conformité au label Effinergie +
- Bilan d'énergie positif exprimé ainsi :

La consommation d'énergie primaire non renouvelable entrant dans le projet, diminuée de la production locale d'énergie sortant du projet doit être inférieure ou égale à un écart autorisé : $BilanepNR < \text{Écart autorisé}$

- Évaluation de l'énergie grise
- Évaluation du potentiel d'écomobilité

Déclinons ces différentes exigences, et examinons l'impact qu'elles vont avoir sur les constructions à venir.

III.3.1.1 Conformité à la RT2012

La conformité à la RT2012 comporte trois exigences générales :

- Limitation du besoin bioclimatique :

$$B_{\text{bio}} < B_{\text{biomax}} = B_{\text{biomaxmoyen}} \times (M_{\text{bgéo}} + M_{\text{balt}} + M_{\text{bsurf}})$$

- Limitation de la consommation d'énergie :

$$C < C_{\text{ep max}} = 50 \times M_{\text{ctype}} \times (M_{\text{cgéo}} + M_{\text{calt}} + M_{\text{csurf}} + M_{\text{CGES}})$$

- Maîtrise de la température en été

$$T_{\text{ic}} < T_{\text{icref}} \text{ (défini par Th-BCE, pour les locaux de type CE1)}$$

Parce que le label BBC pour la RT2005 a été une véritable réussite, ce niveau d'exigence s'est généralisé, pour devenir un standard, non pas réglementaire mais commercial, de l'immeuble tertiaire. Le passage, pour les immeubles tertiaires, à la RT2012 s'est traduit en fin de compte par un léger relâchement de la performance exigée⁵⁵. Cependant, le moteur de calcul n'est semble-t-il toujours pas stabilisé, et il est encore aujourd'hui difficile d'obtenir un retour d'expérience solide de la part des bureaux d'études qui effectuent cette vérification réglementaire.

En ce qui concerne l'enveloppe, en particulier, la RT 2012 se caractérise par trois exigences spécifiques, trois valeurs *garde-fous* à respecter :

- Limitation des ponts thermiques de l'ensemble de l'enveloppe

$$\text{Ratio}_{\psi} \leq 0.28 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

- Limitation des ponts thermiques de plancher

$$\Psi_{\text{plancher}} \leq 0.6 \text{ W/m.K}$$

- Isolation des parois de locaux à occupation discontinue

$$U \leq 0.36 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

⁵⁵ La RT2012 a été appliquée en anticipation au secteur tertiaire dès le 28 octobre 2011. Le moteur de calcul n'étant pas prêt à l'époque, les maîtres d'ouvrages ont « bénéficié » d'une période pendant laquelle l'un ou l'autre des calculs (RT2005BBC ou RT2012) a été possible et considéré comme équivalent. On a pu constater pendant cette période de transition de 1 an prévue par le législateur que des projets dont le niveau était inférieur au niveau RT2005 BBC ont été repêché et obtenu la conformité à la RT2012.

Le respect de ces valeurs *garde-fous* ne constitue à priori pas une difficulté en soi, excepté dans des cas d'isolation par l'intérieur avec de multiples ponts thermiques de plancher, et des balcons faisant un effet de radiateur.

III.3.1.2 Conformité au label Effinergie +

- Réduction de 20 % du B_{biomax}

$$B_{\text{bio}} = 0.8 \times B_{\text{biomax}}$$

- Réduction supplémentaire du $C_{\text{ep max}}$ en fonction de l'usage :

-20% pour les MI et les établissements d'enseignement.

-40% pour les bâtiments à usage tertiaire

- Mesure de la perméabilité à l'air obligatoire en phase chantier

$$I_4 \leq 1,2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \text{ en tertiaire } < 3000\text{m}^2$$

$$0,8 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \text{ en logement collectif}$$

L'évaluation des consommations non réglementaires et l'affichage des consommations à destination des utilisateurs sont également exigés pour l'obtention du label Effinergie+.

Il faut noter que l'exigence sur la consommation $C < C_{\text{ep max}} -40\%$ n'est pas triviale à accomplir. Par ailleurs, parmi les 190 projets actifs sur lesquels Arcora travaille, aucun ne revendique l'obtention de ce label Effinergie+, qui est resté totalement confidentiel et inutilisé.

III.3.1.3 Exigences spécifiques du label Bepos-effinergie 2013

L'exigence principale s'exprime ainsi :

La consommation d'énergie primaire non renouvelable entrant dans le projet, diminuée de la production locale d'énergie sortant du projet doit être inférieure ou égale à un écart autorisé

On peut s'étonner de voir introduit dès la définition générale un écart autorisé. Le *Bâtiment à Énergie Positive* tel que défini ci-dessus, peut être qualifié de bâtiment à consommation d'énergie positive. Ce label a néanmoins le mérite d'exister et de proposer la première définition concrètement applicable en France du BePOS.

Cette définition peut s'écrire :

$$\text{Bilan}_{\text{epNR}} < E_{\text{cartautorisé}} = C_{\text{epref}} + A_{\text{ueref}} - P_{\text{roref}}$$

L'écart autorisé, en dessous duquel la consommation en énergie primaire non renouvelable doit se situer, dépend donc :

- de la consommation conventionnelle de référence C_{epref} , réduite de 20% par rapport à l'exigence de la RT2012 :

$$C_{\text{epref}} = 40 \times M_{\text{ctype}} \times (M_{\text{cgéo}} + M_{\text{calt}} + M_{\text{c surf}})^{56}$$

- de la consommation d'énergie *hors postes RT* A_{ueref} , déterminée de façon forfaitaire à :

70 kWh_{ep}/m².an pour le logement,

100 kWh_{ep}/m².an pour le tertiaire,

30 kWh_{ep}/m².an pour l'enseignement.

- de la production d'énergie renouvelable de référence :

$$P_{\text{roref}} = 110 \times M_{\text{pgeo}} \times M_{\text{pniv}}$$

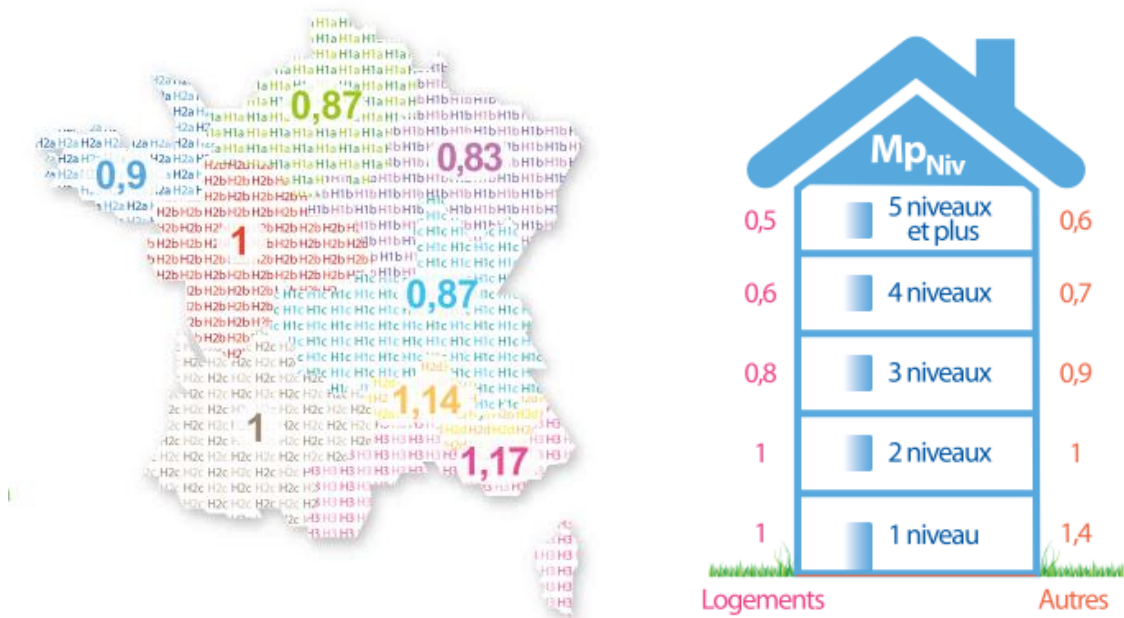


Figure 44 : Valeurs de M_{pgeo} et M_{pniv}

⁵⁶ Sachant que l'obtention du label Effinergie+ exige que $C < C_{\text{epmax}} = 30 \times M_{\text{ctype}} \times (M_{\text{cgéo}} + M_{\text{calt}} + M_{\text{c surf}} + M_{\text{cGES}})$

Il faut noter que la valeur de Mpniv ne correspond pas au nombre de niveau de la construction, mais du nombre de niveau autorisé par les documents d'urbanisme.

A cela s'ajoutent deux exigences qualitatives nouvelles, qui ne comportent pas d'exigence quantitative mais dont l'accomplissement, permettra de préparer une future obligation chiffrée :

- l'évaluation de l'énergie grise de la construction du bâtiment

L'énergie grise est une préoccupation qui était jusqu'à présent relativement occultée. Dans la mesure où les bâtiments ont une forte consommation d'énergie, la part liée à la construction du bâtiment ne compte que peu dans le bilan global. Avec la diminution des besoins en énergie des bâtiments, cette part prend de l'importance, d'autant que cette diminution des besoins s'accompagne de la mise en œuvre d'une plus grande quantité de matériaux (isolant, équipements techniques).

Il existe une norme de calcul, la NF P 01-010, qui impose la rédaction de FDES qui seront mises à disposition dans une base de données appelée INIES. Cependant, la méthode de calcul ne fait pas consensus, et le CSTB déclare que seuls 30% environ des matériaux disposent d'une documentation évaluant leur impact environnemental via une analyse de cycle de vie. Après consultation de la base INIES, c'est sans doute beaucoup moins de 30% qui sont diffusés de manière effective. Cela fait deux ans qu'Arcora travaille sur ce sujet, sans pouvoir disposer d'éléments suffisants pour effectuer une analyse en énergie grise des différentes typologies de façade. Il est vrai que ce sujet, touchant directement aux filières constructives est très sensible, et que les avancées en ce domaine sont très ralenties.

- l'évaluation du potentiel d'écomobilité du site en fonction de l'usage.

Cette cible vise à faire prendre conscience et à qualifier l'importance des consommations engendrées par les déplacements des utilisateurs d'un bâtiment.

Pour effectuer cette évaluation, l'association Effinergie met à disposition un outil en ligne dont le principe de calcul est celui-ci :

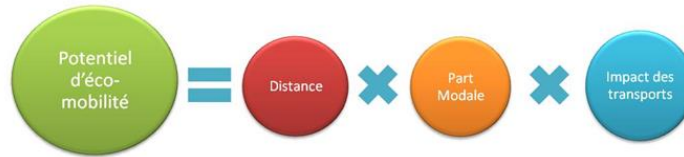


Figure 45 : Méthodologie de calcul du potentiel d'ecomobilité d'un bâtiment

Le potentiel d'écomobilité est simplement évalué à partir des distances de déplacement, des pourcentages de chaque mode de transport (voiture, transport en commun, modes doux...) et de la consommation d'énergie liée à chaque mode (part modale).

Cette évaluation est une notion importante pour les enjeux urbains et de transport, mais n'est cependant pas a priori liée à l'enveloppe du bâtiment.

III.3.2 IMPACT DE L'EXIGENCE DU LABEL SUR LE BÂTIMENT

III.3.2.1 Hypothèses de calcul

Le bilan des énergies entrantes et sortantes est fait aux limites du projet. Les énergies récupérées au sein du projet n'apparaissent donc pas dans la formule du bilan.

Énergies prises en compte

En entrée, les énergies qui traversent la limite du projet sont comptées. Elles sont généralement achetées (gaz, fioul, électricité, chaleur provenant d'un réseau de chaleur, bois...) ou obtenues parfois gratuitement (bois, biomasse...). En sortie, on compte l'électricité qui sort du projet. Elle est généralement revendue (électricité d'origine photovoltaïque ou énergie produite par cogénération).

Énergies non prises en compte

On ne prend pas en compte dans le bilan :

- L'énergie échangée directement avec l'ambiance extérieure du bâtiment :
 - L'énergie solaire qui rentre par les fenêtres, qui est captée par un panneau solaire thermique.
 - L'énergie captée à l'extérieur par une pompe à chaleur ou un groupe froid.

- Les énergies récupérées et valorisées à l'intérieur des limites du projet (électricité photovoltaïque autoconsommée, chaleur récupérée par un système de ventilation double flux ou sur les eaux usées...).
- Les ressources biomasse potentiellement exploitées sur le site et qui sortent des limites du projet (forêt, culture dédiée à la production d'agro-carburant...).
- Les panneaux photovoltaïques au sol sauf s'ils ont une fonctionnalité autre que la production d'énergie (ex : ombrière photovoltaïque).
- La chaleur valorisée hors des limites du projet. Si elle est injectée dans un réseau de chaleur, elle doit être prise en compte dans le calcul du coefficient de conversion énergie primaire en énergie finale du réseau de chaleur.

III.3.2.2 Écart accepté à l'énergie positive

L'écart accepté à l'énergie positive est fonction, d'une part, de la plus ou moins grande difficulté à réduire les consommations et, d'autre part, de la plus ou moins grande difficulté à produire du renouvelable localement.

Pour un immeuble de bureau, l'écart se décline ainsi :

Zone	Ecart autorisé			Cepref				A_{uerref}		P_{roref}
	CE1	CE2		CE1		CE2				
H1a	143	171	=	100	ou	128	+	100	-	57
H1b	149	173	=	104	ou	128	+	100	-	55
H1c	143	171	=	100	ou	128	+	100	-	57
H2a	141	169	=	100	ou	128	+	100	-	59
H2b	130	162	=	96	ou	128	+	100	-	66
H2c	126	162	=	92	ou	128	+	100	-	66
H2d	113	161	=	88	ou	136	+	100	-	75
H3	111	159	=	88	ou	136	+	100	-	77

Figure 46 : Récapitulation des écarts autorisés à l'énergie positive [$kWh_{ep}/m^2.an$]

Réduction des consommations réglementaires

La réduction des consommations est calée sur le niveau de référence du label Effinergie+ pour les usages réglementés :

Usage	C _{epref} /max	Auref	Type	M _{geo}		M _{type}	M _{alt}	M _{surf}	M _{res}	Réseau de chaleur/froid					
				CE1	CE2					CO ₂ ≤ 50	50 ≤ CO ₂ ≤ 100				
Logement	45	70	CE1	1.4	H2d	0.8	1.2	1.14	0 à 400m	0	100 ≤ CO ₂ ≤ 150	0.1			
Enseignement	40	30	CE2	2.2	H3	0.8	1.2	1.17	401 à 800m	0.1	150 ≤ CO ₂	0			
Bureau	30	100							801m et +	0.2	Pas de réseau	0			
USAGE			M_{type}	M_{geo}	M_{alt}	M_{surf}	M_{res}								
Bureau			CE1	H3	0 à 400m	SHON _{ext} /N _{ext}	25	Pas de réseau							
C_{epmax}		= 30		x	1.4	x	(0.8	+	0	+	0	+	0) = 66 kWh _{ep} /m ² _{SHONRT/an}
C_{ep} hors prod elec		≤ 66		+	12	x	1.4	= 82.8 kWh _{ep} /m ² _{SHONRT/an}							

Figure 47 : Feuille de calcul de l'exigence Effinergie+ sur C_{ep}

L'exigence sur le C_{ep} varie suivant la localisation géographique et le type (CE1 ou CE2⁵⁷) du local considéré :

Zone géographique	C _{epmax}		Permis de climatiser	
	CE1	CE2		
H1a	75	96	21	+ 28%
H1b	78	96	18	+ 23%
H1c	75	96	21	+ 28%
H2a	75	96	21	+ 28%
H2b	72	96	24	+ 33%
H2c	69	96	27	+ 39%
H2d	66	102	36	+ 55%
H3	66	102	36	+ 55%

Figure 48 : Calcul du C_{epmax} par localisation et type

La colonne de droite correspond au bonus forfaitaire autorisé pour climatiser un local en zone simultanément trop ensoleillée, chaude et bruyante, pour que le confort d'été soit assuré par ventilation naturelle.

⁵⁷ Dans le calcul RT20122, les locaux sont par défaut de type CE1, et le confort d'été doit y être respecté (Tic<Ticref), notamment par la ventilation naturelle. Dans le cas où le bâtiment est situé en zone chaude, ensoleillée et bruyante, on autorise un forfait de consommation dédié à la climatisation. Ce biais a été exploité dès la RT2005, ce qui a favorisé l'obtention de label pour des bâtiments climatisés, donc consommant plus, par rapport à des bâtiments ventilés naturellement en été, consommant moins.

À cela s'ajoute pour les petits bâtiments (<3000m²) l'exigence d'une étanchéité à l'air de : $I_4 \leq 1,2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$

Repères issus de la revue de projets internationaux	n ₅₀	I ₄	Repères RT et label	Classe d'étanchéité du CETE de Lyon
	vol/h	m ³ /(m ² .h)		
Meilleure performance	0.18	0.12	Effinergie+ Valeur par défaut	Excellent
Moyenne	0.52	0.34		
Label Passivhaus	0.6	0.4		
Moins bonne performance	0.8	0.53		Bon
	1.82	1.2		
	2.58	1.7		
	3.33	2.2		
	4.09	2.7	Moyen	
			Mauvais	
				Très mauvais

Figure 49 : Équivalence des classes d'étanchéité à l'air en tertiaire⁵⁸

Cette exigence, si elle peut être qualifiée d'excellente, est tout de même à relativiser. Les progrès réalisables en France sur le sujet de l'étanchéité à l'air sont encore importants.

Consommation de référence des usages non pris en compte par la réglementation

L'association Effinergie ne fournit aucun élément expliquant les hypothèses prises en ce domaine. C'est un sujet de fond, car l'écart en consommation conventionnelle et consommation réelle est abyssale, comme en témoignent les services exploitation des sociétés de promotion immobilière. Une étude récente publiée par le bureau d'étude Manexi traite en profondeur de ce sujet⁵⁹. Quelques extraits permettent de se faire une idée de la faible pertinence de la valeur de 100kWh_{ep}/m².an prise en compte dans le label.

⁵⁸ Les valeurs de classe d'étanchéité du CETE de Lyon sont issues de la campagne de mesure de perméabilité à l'air de 12 bâtiments tertiaires de grands volumes, réalisé en 2001.

⁵⁹ Situation énergétique d'un échantillon d'immeubles de bureaux du parc privé, synthèse des résultats d'audit énergétiques, 2008-2012. Paul Carlberg-Ellen, Manexi, décembre 2012.

À partir des relevés de consommation des 64 immeubles audités, la répartition entre consommation réglementaire, écart sur cette consommation réglementaire, et consommation des postes non réglementés se décompose ainsi :

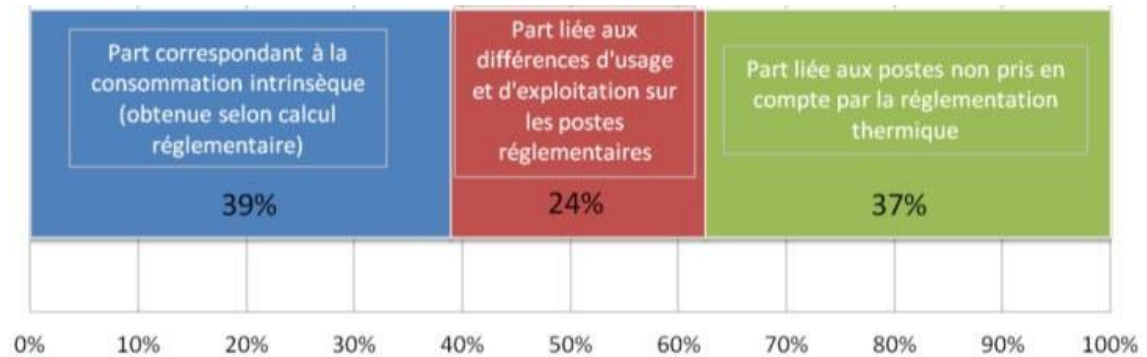


Figure 50 : Consommation réelle totale d'énergie primaire

La part de consommation réelle mesurée liée aux postes non réglementaires est de même grandeur que la consommation conventionnelle calculée, et ceci, sur un échantillon d'immeubles dont les profils de consommation sont très variés :

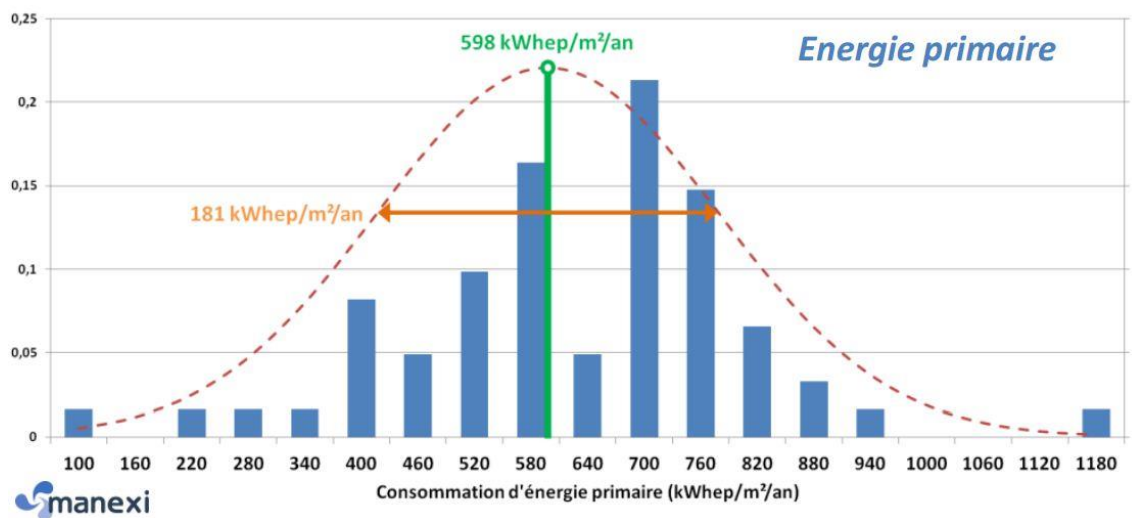


Figure 51 : Distribution de la consommation réelle d'énergie primaire et loi normale

La consommation moyenne réelle totale d'énergie primaire s'élève à 598 kWh_{ep}/m².an.

En considérant la corrélation entre consommation réelle et consommation réglementaire établie précédemment, et en la rapprochant de la valeur de C_{epmax} , on peut estimer la consommation des postes non réglementaires à partir de cette valeur de C_{epmax} :

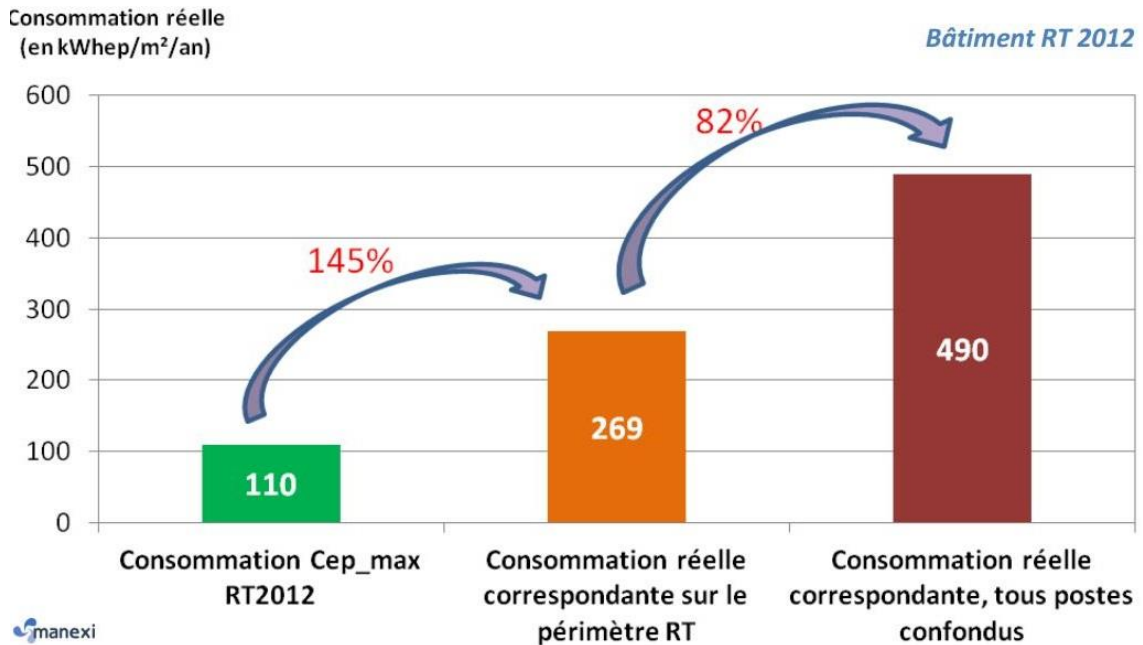


Figure 52 : Extrapolation de la consommation réelle à partir de la valeur de C_{epmax}

La consommation des postes *hors RT* représenterait ainsi 201% du C_{epmax} .

En comparaison avec la valeur référence de 100 kWh_{ep}/m².an prise dans la formulation de l'écart autorisé, on peut imaginer une consommation réelle de ces postes *hors RT* comprise dans une fourchette allant de 177 à 274 kWh_{ep}/m².an.

L'équation de l'écart autorisé permet de dire que :

- soit les consommations réelles *hors RT* excèdent très largement la valeur d' $A_{ue,ref}$, et une compensation est nécessaire,
- soit un effort est à réaliser sur ces postes de consommation, ce qui consiste à repenser en profondeur les modes de fonctionnement des lieux de travail.

Production d'énergie renouvelable

La valeur de la production d'énergie renouvelable de référence est basée sur une production assurée exclusivement par des panneaux photovoltaïques incorporés au

bâti. Le niveau de production de référence est de $110 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$. Ce potentiel est établi sur la base du potentiel disponible sur le toit d'un bâtiment de 3 niveaux.

Une correction pour le nombre de niveau constructible autorisé par les règles d'urbanisme est applicable, ainsi qu'un coefficient reflétant le niveau d'ensoleillement lié à la situation géographique. Ce critère basé sur le niveau constructible et non pas sur le niveau construit est étonnant. Il ferme la voie à une optimisation de la forme bâtie pour bénéficier du meilleur ensoleillement⁶⁰, et présuppose une valorisation de la densité urbaine qui n'a pas de lien évident avec un critère concernant la production d'énergie renouvelable d'un bâtiment.

On fait également l'hypothèse d'un rendement de de panneau photovoltaïque moyen de 16% et des pertes de rendement de 15%.

S'il n'est pas possible, sans préalablement effectuer le calcul de consommation réglementaire, de déterminer la quantité de panneaux photovoltaïques nécessaire pour équilibrer le bilan en énergie primaire non renouvelable, on peut néanmoins estimer les surfaces nécessaires pour atteindre la production de référence de l'équation d'équilibre.

On détermine par une méthode simplifiée⁶¹ la production d'un capteur photovoltaïque en fonction de son implantation géographique, de sa mise en œuvre (inclinaison, orientation, ventilation), et de sa technologie (amorphe, polycristallin, monocristallin).
On obtient en synthèse :

⁶⁰ *Solar Enveloppe*, Ralph Knowles, 198...

⁶¹ *Méthode calcul simplifié pour intégration de capteurs photovoltaïques*, Ademe, 2006. Cette méthode, intégrée dans les règles Th-BCE a été développé à partir des résultats du logiciel PVSystem.

Zone	Prod _{ref}	Implantation idéale en toiture (Sud, 30°)		Implantation idéale en façade (Sud, S-E, S-O)	
		150	120	150	120
H1a	57	16%	20%	37%	47%
H1b	55	15%	19%	36%	45%
H1c	57	14%	18%	34%	43%
H2a	59	15%	18%	35%	43%
H2b	66	16%	21%	39%	49%
H2c	66	15%	19%	36%	45%
H2d	75	16%	20%	38%	47%
H3	77	14%	18%	34%	43%
	[kWh _{ep} /m ² .an]	[m ² _{PV} / m ² _{SHON}]		[m ² _{PV} / m ² _{SHON}]	

Figure 53 : Approche simplifiée du ratio m^2_{PV}/m^2_{SHON} pour atteindre $Prod_{REF}$

Il faut par exemple 16-20% de la *Surface Hors Œuvre Nette* en panneaux photovoltaïques polycristallins disposés en toiture pour atteindre la production d'énergie renouvelable de référence. Pour une implantation moins favorable (bien qu'optimisée) en façade, le ratio monte alors à 37-47% de la SHON pour l'île de France. Ces ratios sont assez équilibrés suivant les différentes localisations géographiques, mais sont très élevés en valeur.

Le niveau pris comme référence interroge l'architecture des bâtiments porteurs du label : plus le nombre de niveaux d'un bâtiment augmente, plus il est difficile d'atteindre la valeur de $Prod_{REF}$ avec la surface disponible de la seule toiture. En considérant que les ratios habituels de Surface de façade par *Surface Hors Œuvre Nette* évoluent entre 0.45 et 0.65, que les façades Nord, Nord-Est, Nord-Ouest ne sont pas exposées significativement, et que les façades sont couvertes à 50% par des parties vitrées, il est impossible d'atteindre la $Prod_{REF}$ avec l'implantation de panneaux sur les seules façades.

Prenons un exemple, et considérons 4 géométries basiques de plans de bureau, avec des caractéristiques courantes, telles que distance entre façades 18m, hauteur de plancher à plancher de 3.5m, Ratio opaque-vitré de 50%, hauteur inférieure à 28m

(non IGH). Les ratios $S_{FAC}/SHON$ valent respectivement 0.38 pour le plan à patio, 0.47 pour la barre droite, 0.57 pour le plan en baïonnette et 0.62 pour le plan en redans. Les bâtiments ont été orientés de manière à présenter une proportion maximale de surface de façade non orientée au Nord.

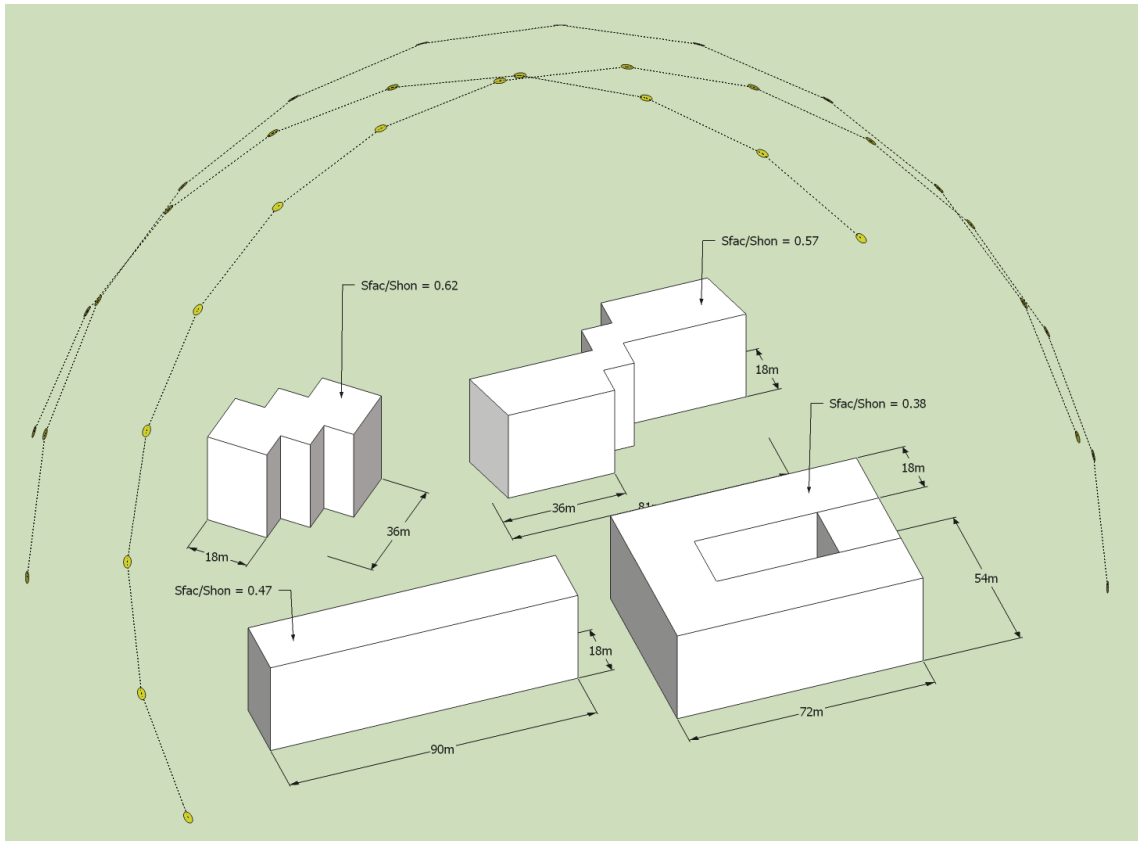


Figure 54: Modèles de principe des 4 géométries de bureau sélectionnées

Suivant le nombre de niveau du bâtiment, on peut déterminer la surface de toiture disponible, ainsi que les surfaces exposées et disponibles en façade.

	Aire en plan [m ²]	Périmètre [m]	$S_{FAC}/SHON$	Linéaire orientations défavorables [m]	$S_{FAC EXPO}/SHON$	$S_{FAC DISPO}/SHON$
Redans	810	144	0.62	72	31%	16%
Baïonnette	1372	225	0.57	76	38%	19%
Barre	1620	216	0.47	90	27%	14%
Patio	3240	360	0.38	108	27%	14%

Figure 55 : Surfaces en plan et surfaces disponibles en façades exposées

On voit qu'une compacité élevée, si elle est défavorable du point de vue des déperditions thermiques, présente en compensation des atouts pour atteindre le BEPOS en disposant d'une surface support de production photovoltaïque potentiellement plus importante.

On considère que seulement 80% de la surface de toiture est exploitable, ce qui est une hypothèse optimiste à la fois en raison de l'importance de l'occupation des terrasses des projets tertiaires par des équipements techniques, et également en raison de la nécessité de circulation pour effectuer l'entretien des panneaux. Suivant cette hypothèse, et quels que soient le nombre d'étage et la localisation géographique, la toiture disponible doit être occupée en totalité, même avec un rendement de panneau de 15%. Le taux d'occupation des façades disponibles et exposées peut être représenté comme ceci :

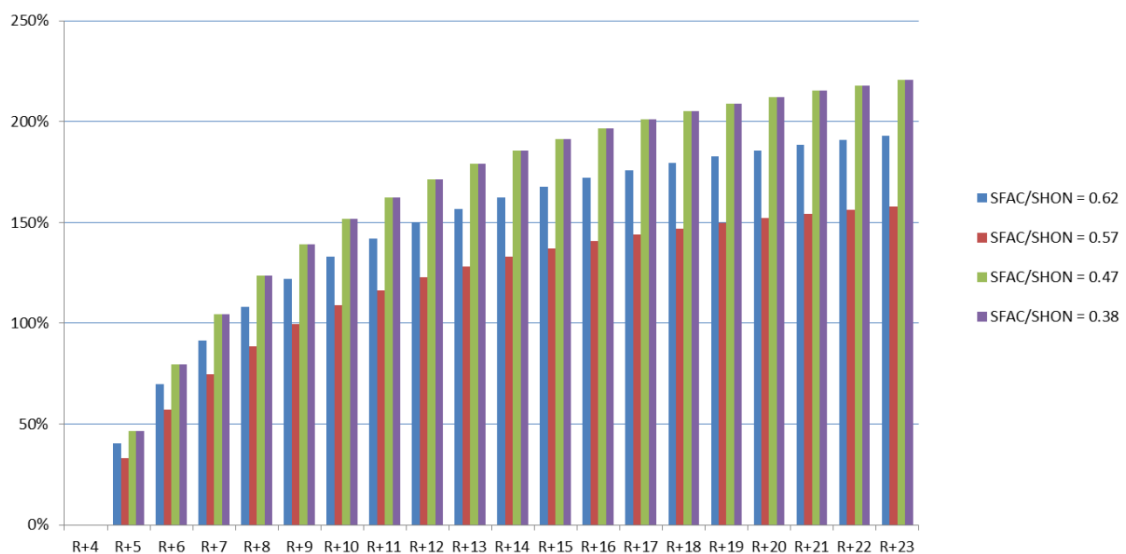


Figure 56 : Taux d'occupation des façades exposées et disponibles pour atteindre $Prod_{REF}$

Les volumes à faible compacité arrivent à saturation à partir de R+7, et la totalité des volumes atteint 100% à partir de R+9. Il faut noter que la valeur de 100% correspond à seulement 50% de la façade, l'autre partie étant occupée par des baies vitrées dans notre hypothèse. Cette approche ne prend pas en considération la présence éventuelle de masques lointains, du bâtiment sur lui-même, ou d'éventuelles disparités du tissu urbain, pourtant fréquentes.

III.3.3 ANALYSE DU LABEL EFFINERGIE BEPOS 2013

Cette synthèse n'est pas évidente à effectuer, d'abord, parce qu'aucun bâtiment construit ne s'est encore fait connaître qui corresponde à cette définition. Ensuite, parce que l'équilibre entre consommation et production n'est pas facilement lisible :

$0 = 100 - 100 = 1000 - 1000$. C'est pourquoi il est important d'isoler chaque critère et de le comparer à quelque repère connu par ailleurs.

Cette définition a plusieurs mérites, à commencer par celui d'exister : ce label vient combler une véritable attente du monde de la construction, qui était en attente d'un nouvel objectif depuis la banalisation du BBC. Cette définition prend également en compte pour la première fois les postes de consommation *hors RT*, et prépare le travail à venir sur l'énergie grise et l'écomobilité.

Cependant, une chose est frappante en analysant la définition de ce label, c'est qu'elle semble avoir été précipitée. Les hypothèses prises sont souvent fortes sans qu'elles soient étayées rigoureusement. La rédaction est approximative et les supports scientifiques sont presque inexistantes. Les équilibres semblent avoir été fixés pour le logement, et manquent de cohérence pour un immeuble de bureau, ce qui ouvre la voie aux optimisations de calcul sans rapport avec l'objectif.

Dans le détail, les consommations hors postes RT sont manifestement sous-évaluées, tandis que le recours à la production photovoltaïque seule, prise comme hypothèse de base pourtant, est irréaliste au vu des enjeux globaux d'un projet de construction.

Ce label est une première étape, et son existence est importante. Il y a néanmoins fort à parier qu'il nécessite des évolutions et des corrections au gré des difficultés rencontrées lors des mises en application. Souhaitons que cela ne décourage pas les acteurs de la construction d'aller de l'avant.

III.4 REVUE DES PROJETS PILOTES FRANÇAIS

L'Ademe a aujourd'hui identifié 218 opérations se qualifiant de bâtiment à *énergie zéro*, *zéro énergie fossile*, *zéro émissions de CO2*, ou bien à *énergie positive*. L'étude de ces premières expérimentations va nous permettre de dégager les tendances générales et les caractéristiques particulières des enveloppes bâties de ces ouvrages.

III.4.1 RECENSEMENT

III.4.1.1 Destination

Sur les 218 ouvrages connus, 135 sont à destination du secteur tertiaire, ce qui est remarquable, et contraste avec l'essentiel de l'action et du discours politique qui elle est axée sur l'habitat.

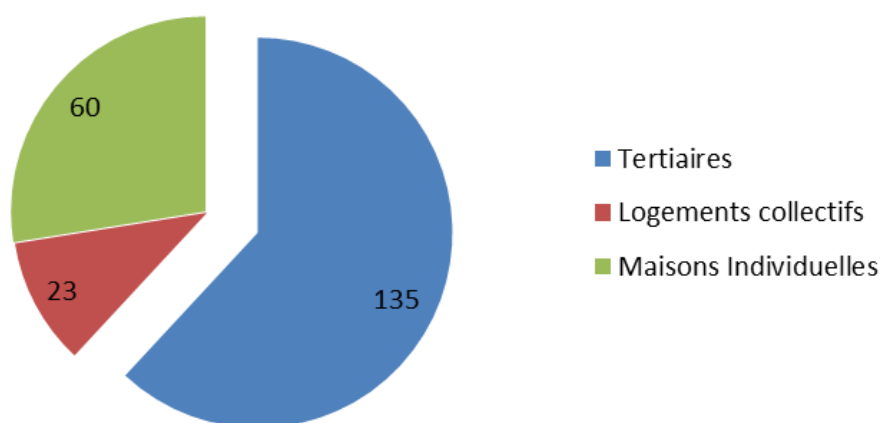


Figure 57 : Destination des BePOS⁶²

Ces ouvrages sont à peu près également réparti entre commande privée et publique (44% MO privé, 56% MO public). L'état n'a pas en la matière pris l'avance et le rôle exemplaire pour lequel il est attendu au travers de ses engagements internationaux⁶³. Comme un symbole de ce retard, le ministère de l'écologie et du développement durable et de l'énergie va bientôt quitter l'arche de la Défense pour une tour proche de la Défense, datant des années 80.

⁶² Graphique de l'auteur sur les données issues de la base Alpheeis-Ademe

⁶³ Voir refonte de la DPEB datant de 2010 fixant la généralisation du « Zéro Energie » en 2020 pour tous les bâtiments neufs, et en anticipation en 2018 pour les bâtiments publics.

Pas loin de deux tiers de ces bâtiments tertiaires sont à usage de bureaux, et un tiers destiné à l'enseignement.

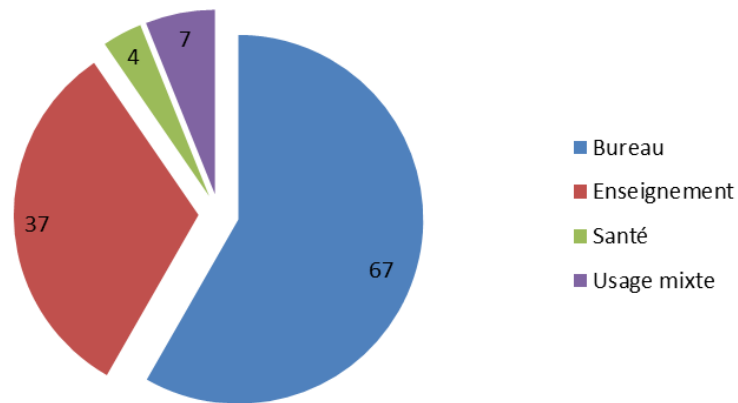


Figure 58 : Usages au sein de la catégorie « bâtiments tertiaires »⁶⁴

III.4.1.2 Implantation

Leur répartition est assez homogène sur le territoire métropolitain, en étant concentré sur les zones urbaines.



Figure 59 : Cartographie des 135 BePOS tertiaires français

⁶⁴ Graphique de l'auteur sur les données issues de la base Alpheis-Ademe

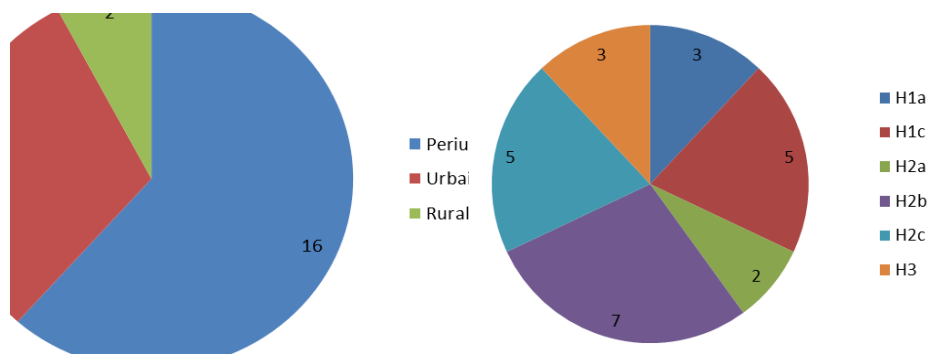


Figure 60 : Distribution urbaine et climatique des 135 BePOS tertiaires français

En France, 76% de la population vit dans un contexte urbain ou suburbain. C'est donc aujourd'hui logiquement le lieu d'implantation privilégié des BEPOS.

III.4.1.3 Rythme de construction

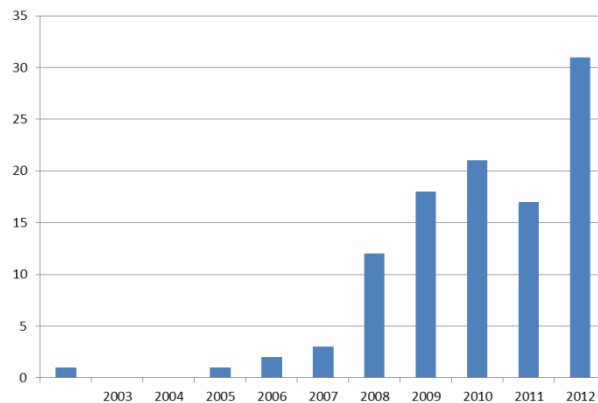


Figure 61 : Nombre d'opérations réalisées par année

L'engouement, bien que récent, pour l'expérimentation des BEPOS est réel et croissant ces dernières années. Cependant, on peut craindre un essoufflement de cet élan en raison de l'attente d'un relais au niveau de l'état pour définir le cap des années à venir.

III.4.2 CONDITIONS CLIMATIQUES

L'irradiation moyenne annuelle globale horizontale est incluse dans une fourchette comprise entre 1000 et 1700 kWh/m², la température moyenne entre 9 et 13°C environ. On peut même atteindre 1760kWh/m².an à Nice.

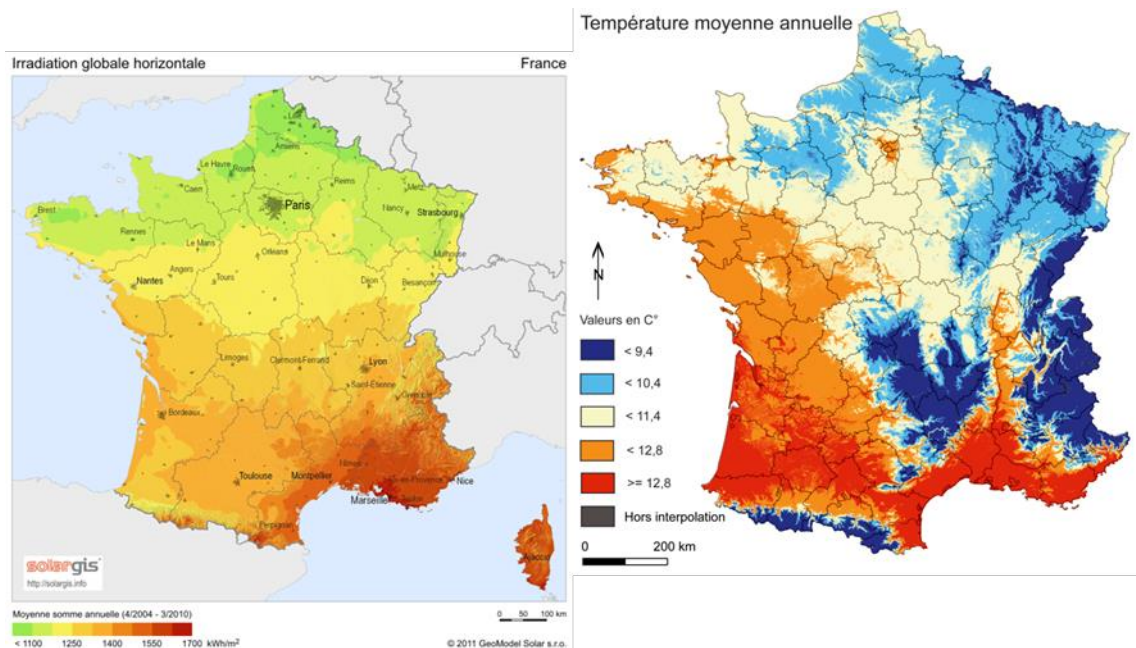


Figure 62 : Insolation et température moyenne en France

Selon la classification climatique de Köppen-Geiger, la majeure partie de la France est classée Cfb, climat tempéré, humide, avec été tempéré, comportant les caractéristiques suivantes :

- Les températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre 0 °C et 18 °C
- La température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C
- Les saisons été et hiver sont bien définies
- Précipitations tous les mois de l'année
- Pas de saison sèche
- Températures moyennes du mois le plus chaud <22°C
- Températures moyennes des 4 mois les plus chauds >10°C

Des zones localisées présentent des caractéristiques spécifiques différentes à considérer :

- La région des Cévennes est classée Dfc, climat continental, humide, avec un été court et sec.
- La côte méditerranéenne est classée Csa, Csb, climat tempéré, avec un été tempéré/chaud, et sec.

- Les régions Alpines et le centre des Pyrénées sont classées ET, EF avec un climat polaire, et un été froid.

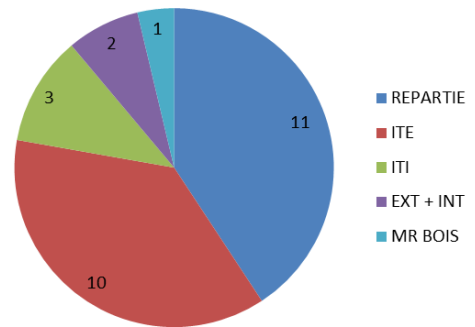
III.4.3 CARACTÉRISTIQUES DES ENVELOPPES

III.4.3.1 Parois verticales opaques

Position du plan d'isolation

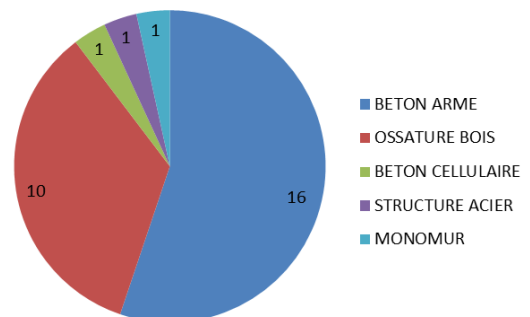
L'isolation par l'intérieur est quasiment inexistante. C'est un élément significatif, tant l'ITI a été plébiscité dans le logement BBC. La majorité des systèmes sont soit à isolation répartie, soit à isolation par l'extérieure.

On voit un cas de double isolation, par l'intérieur, et l'extérieure, qui est atypique.



Matériau structurel

Le béton armé est en tête, dans la tradition constructive à la française, suivie par la construction à ossature bois. C'est ainsi que l'isolation répartie est donc mise en œuvre plutôt qu'en monomur. Cette technique, limitée en termes de niveau d'isolation, voit sans doute ici ses limites atteintes.

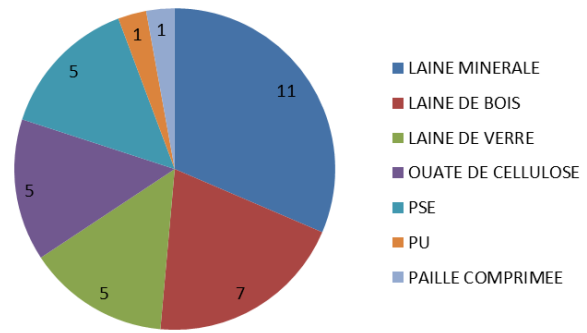


L'usage mixte béton et bois est fréquent. Un exemple courant est le soubassement et RdC en BA, surmonté d'étages en ossature bois. Également, des structures mixtes bois-béton apparaissent. On note l'originalité de l'utilisation en béton cellulaire, qui est à étudier, notamment pour le traitement des acrotères, et autres points singuliers de l'enveloppe thermique.

Matériau isolant

Beaucoup d'isolants sont employés, et souvent combinés (Ouate de cellulose + laine de bois, ou PSE+LV).

En revanche, le choix d'isolants biosourcés, est effectué sur tout le projet, et il n'y a pas de mélange avec des isolants traditionnels.



Chose étonnante, il n'y a aucun exemple de super isolants (VIP, aérogels, nanogels).

Épaisseur d'isolant

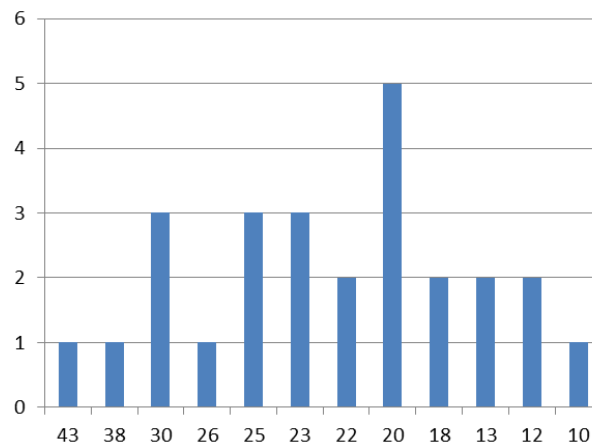


Figure 63 : Occurrences par épaisseur d'isolant

L'épaisseur moyenne d'isolant utilisé est de 22.5cm. Dans les fortes épaisseurs, on trouve souvent des isolants différents combinés. Les très fortes épaisseurs correspondent à des isolants à faible performance (paille comprimée, ouate de cellulose).

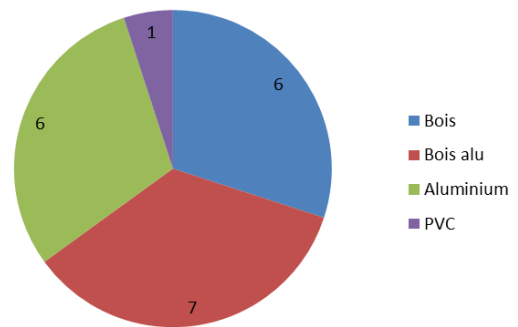
Matériau de parement

Les parements ne sont pas indiqués dans la revue. À noter cependant, au regard de la définition du label Effinergie Bepos 2013, qu'un seul projet déclare mettre en œuvre des panneaux photovoltaïque en façade, au Sud.

III.4.3.2 Parties vitrées

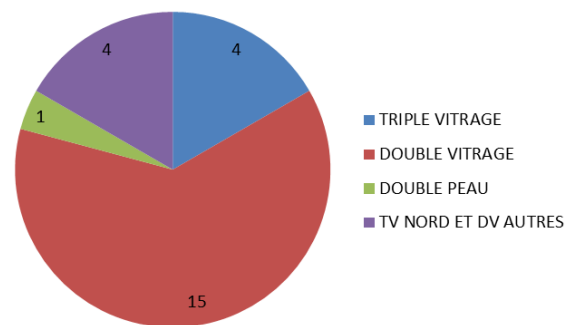
Menuiseries

On constate un usage très également réparti des différentes techniques de menuiserie, PVC, alu et bois. Dans la revue de projets internationaux, seules les menuiseries en bois sont utilisées.



Vitrages

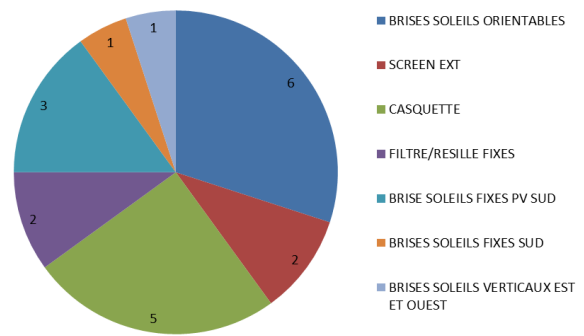
Le double vitrage est le plus utilisé, et de loin. À plusieurs reprises, on voit une différenciation du remplissage suivant l'orientation, dans une logique de bioclimatisme typique de la conception de logement : TV au nord, et DV pour le reste des orientations.



Il existe même un exemple de double peau TV +DV, avec différenciation par orientation. TV ext + DV int au Nord, et DVext + TV int pour les autres orientations. Ce cas est je crois unique en France, et ce parti pris sans doute un peu excessif. Il est à noter que le projet concerné est de loin le plus cher et le plus démonstratif de la revue, sans pour autant être le plus performant.

III.4.3.3 Nature des protections solaires

On constate l'absence totale de stores intérieurs et la forte présence d'occultations fixes. Là encore, c'est l'héritage du bioclimatisme appliqué au logement.



III.4.3.4 Étanchéité à l'air

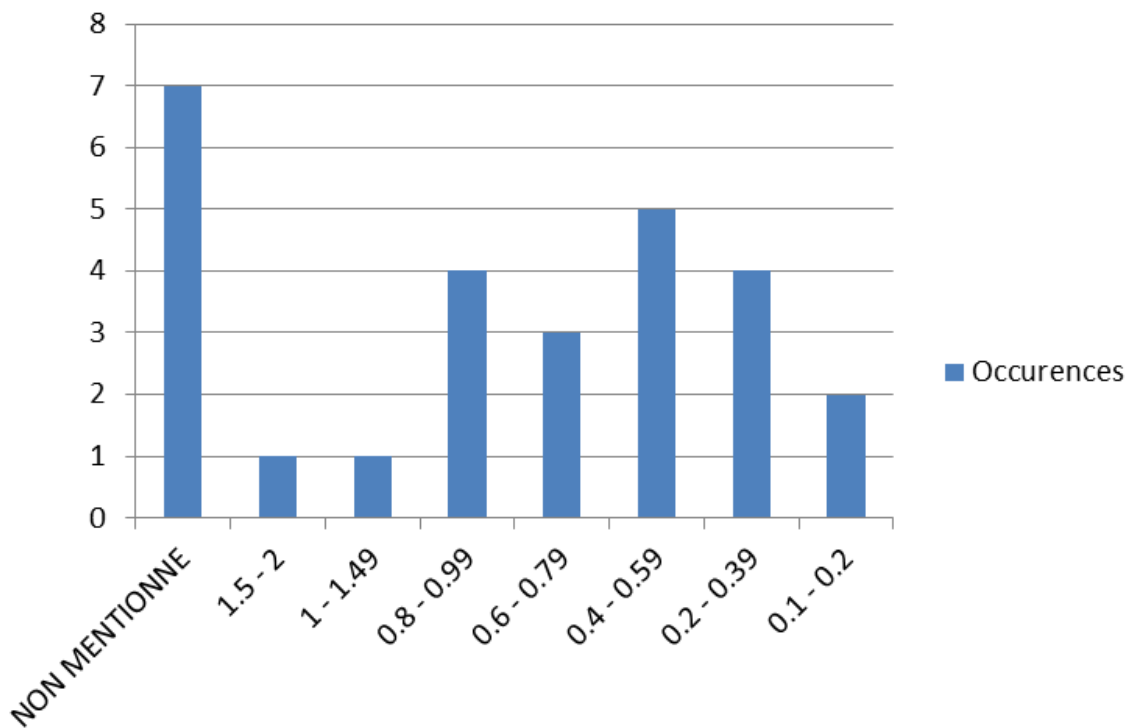


Figure 64 : Distribution des valeurs mesurées de I_a

La valeur moyenne mesurée est de 0.63, et pour 7 occurrences sur 27, il n'y a pas eu de mesure effectuée. On est loin du niveau pratiqué outre-Rhin.

III.4.4 SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

La totalité des projets disposent de panneaux photovoltaïques, dont la production est intégralement reversée au réseau ERDF. Il n'est pas fait mention dans le recensement des technologies mises en œuvre. Aucun projet ne dispose de capacité de stockage, et aucun ne fait d'autoconsommation de cette production.

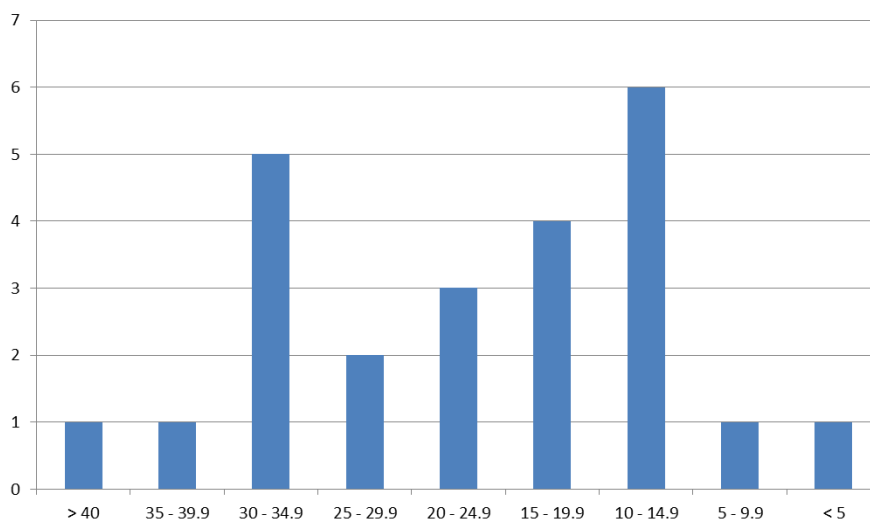


Figure 65 : Distribution des surfaces en m² de panneaux photovoltaïques pour 100m² de SHON

Les valeurs déterminées dans l'analyse du label Effinergie Bepos 2013 sont, pour une implantation optimale en toiture, de 16% environ de la SHON. Seuls 8 projets sont en dessous de cette valeur, et une grande partie ne dépasse la limite.

	m ² _{PV} /m ² _{SHON}
Valeur Maxi	1.50
Valeur Mini	0.05
Valeur moyenne	0.26
Valeur médiane	0.77

Cependant, cela est à nuancer, car les grandes surfaces sont généralement présentes sur site, mais pas intégrées au bâtiment, ce qui est une exigence du label.

CONCLUSION

Le secteur du bâtiment s'est vu confié l'objectif ambitieux de transformer les ouvrages bâtis, autrefois simples abris, en des objets qui génèrent leur propre énergie. Cet objectif est un des cinq piliers de la *Troisième Révolution Industrielle* annoncée par Jérémy Rifkin, que l'Union Européenne a intégré dans ses orientations stratégiques et ses lois.

Le concept de BEPOS, tel qu'il est aujourd'hui défini, ne porte pas encore sens. Le cadre de définition international couvre un spectre trop large, et l'embryon de définition française que constitue le label Effinergie Bepos 2013 n'est pas abouti. Au-delà de l'aspect technique, la difficulté est liée au passage d'un système énergétique centralisé basé sur une énergie de stock, éloignée mais mobilisable à la demande, à un système décentralisé, permettant de gérer des flux multiples d'une énergie disponible partout mais intermittente et difficilement stockable.

La performance énergétique, la valeur d'une production d'énergie, ne peuvent pas suffire à justifier une construction. La qualité essentielle d'un bâtiment est avant tout une qualité d'usage, et c'est cet usage qu'il faut définir pour définir le *Bâtiment à Énergie Positive*. C'est une vision de notre mode de vie de demain qu'il nous faut écrire, et c'est cela qui déterminera ce que sera l'architecture de demain. C'est pourquoi le groupe de travail *Réflexion Bâtiment Responsable 2020* porte la réflexion bien plus loin que la consommation d'énergie, et place l'humain au cœur de la réflexion⁶⁵. C'est une évolution importante que de considérer l'utilisateur et ses désirs dans le processus de conception. Il est traditionnellement considéré comme une variable parmi d'autres, problématique car peu maîtrisable et susceptible de générer de fortes incertitudes sur les résultats escomptés.

Quelles conclusions tirer pour le concepteur d'enveloppes de bâtiment ?

- Les performances d'isolation, d'étanchéité à l'air sont inférieures en France à celles pratiquées dans d'autres pays Européens. Une marge de progression importante peut être réalisée.

⁶⁵ *Embarquement immédiat pour un bâti sobre, robuste et désirable*, rapport d'étape du groupe de travail « réflexion Bâtiment responsable 2020-2050 », juillet 2013.

- L'intégration de capteurs solaires, thermiques et photovoltaïques va sans doute se généraliser à tous les bâtiments tertiaires.
- Aucune étude spécialisée sur l'enveloppe des BEPOS n'existe. Un travail conséquent est à effectuer sur ce sujet, qui pourrait concerner les volumes solaires, les compositions de façades (vitré, opaque inerte, opaque actif), etc.
- La prise en compte de l'utilisateur est à intégrer davantage aux pratiques de conception. C'est une évolution des métiers de maîtres d'œuvres dont il s'agit.

La dernière partie de ce mémoire est une étude paramétrique de Simulation Thermique Dynamique d'un espace de bureau typique. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'influence respective des conditions extérieures, de la façade, et des conditions d'usage sur les besoins calorifiques d'un espace de bureau.

C SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE APPLIQUÉE AUX FAÇADES

INTRODUCTION

La revue de projets-pilotes a permis de caractériser les pratiques actuelles en termes d'enveloppes des immeubles tendant vers l'énergie positive que ce soit dans le reste de l'Union Européenne ou en France. On a pu voir que les constructions réalisées en France marquent un décalage certain en matière de performance et de composition avec ce qui peut se faire à l'étranger, en particulier outre-rhin, berceau du concept PassivHaus. Avant cela, l'étude de l'embryon de définition que propose l'association Effinergie a été l'occasion d'examiner les tendances à l'œuvre en termes d'excellence énergétique en France. La crainte de construire des bâtiments *thermos* trop isolés pour le climat français, ou celle d'optimiser un ouvrage construit pour 50 ans à partir d'une définition partisane, établie sur un calcul de consommation conventionnel, partiel et opaque a été confirmée, plutôt que levée, par cette analyse.

Il nous faut donc avoir recours à la simulation pour rechercher des solutions constructives optimales, et établir des repères exploitables en phase de conception. Arcora a développé un outil de Simulation Thermique Dynamique monozone baptisé Optima, qui permet de déterminer les besoins de chaud et de froid d'un espace de travail. Le raisonnement en besoin permet de s'affranchir dans la conception des façades du choix des systèmes de production de chaud et de froid et du débat sur les coefficients de conversion et le réseau énergétique.

I OPTIMA, UNE STD SPÉCIALISÉE SUR L'ENVELOPPE

I.1 INTÉRÊT ET LIMITE DE LA SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

La Simulation Thermique Dynamique (STD) est une méthode permettant d'estimer les besoins et les consommations énergétiques d'un bâtiment. Ce type de simulation nécessite de nombreuses entrées de données qui peuvent être rassemblées en trois types :

- Sollicitations extérieures
- Descriptions du bâti

- Conditions intérieures

À partir de ces données d'entrée le logiciel de STD va calculer heure par heure les échanges thermiques et la température dans ce bâtiment. On peut donc estimer le confort thermique d'un bâtiment et en faire un bilan thermique complet.

Ce bilan thermique permet d'appréhender la part de différents échanges thermiques auxquels est soumis le bâtiment. Ces échanges sont :

- Les apports internes (apports de chaleur dû à l'éclairage, au matériel informatique, aux personnes présentes dans le bâtiment)
- Les apports solaires
- Les déperditions (pertes par conduction à travers les parois vers le milieu extérieur)
- Les infiltrations d'air
- Le renouvellement d'air hygiénique

Par rapport aux autres types de calcul thermique, la STD présente l'avantage de prendre en compte les effets d'inertie thermique et d'appréhender la répartition journalière des différents phénomènes thermiques. Malheureusement mettre en place une STD pour un bâtiment classique peut être extrêmement chronophage (de l'ordre de deux à trois semaines pour un bâtiment de bureau classique), et le temps de calcul peut se montrer très important pour effectuer des itérations intéressantes dans le processus de conception.

I.2 PRÉSENTATION DE L'OUTIL OPTIMA

Afin de répondre à ces deux limites de la STD, et de la rendre accessible au concepteur de l'enveloppe, OptimA propose trois éléments de différenciation :

- Modélisation précise de l'enveloppe, permettant de caractériser l'effet de modifications subtiles de l'enveloppe,
- Modélisation d'une portion de façade, réduisant le temps de modélisation à quelques dizaines de minutes, et le temps de calcul à quelques dizaines de seconde,

- Calcul par lot, offrant la possibilité d'effectuer jusqu'à sept calculs consécutifs sur une durée de deux minutes environ.

OptimA est un outil de Simulation Thermique Dynamique (STD) adapté à l'étude des façades développé au sein d'Arcora depuis Octobre 2012. Cet outil permet d'analyser les besoins énergétiques d'une trame de façade courante et d'effectuer la comparaison entre différentes typologies de façade. La saisie des données et l'exploitation des résultats s'effectuent sur Excel, tandis que le calcul est quant à lui effectué par le moteur de calcul de TrnSys (Transient System Simulation Tool). OptimA est une interface utilisateur qui permet de créer des fichiers d'entrées et de lancer une simulation TrnSys, puis de récupérer les résultats issus de la simulation et de proposer un post-traitement automatisé de ces données.

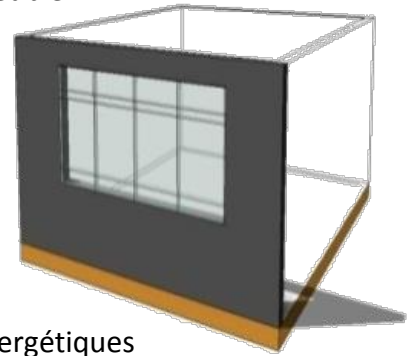
OptimA étant orienté sur la modélisation des façades avec un grand niveau de détail, le choix a été fait de ne pas préjuger du type de système mis en place dans le bâtiment. La STD donne en sortie l'énergie qui doit être fournie au milieu intérieur pour maintenir une température donnée (sans modéliser le système qui fournira cette énergie). C'est une donnée intermédiaire au calcul des consommations et au dimensionnement des systèmes de production de chaleur et de froid qui caractérise justement la partie liée au bâti dans un calcul de consommation. Habituellement intégré au calcul thermique global du bâtiment, le concepteur de l'enveloppe n'a pas un accès facile à cette donnée brut au stade de l'avant-projet, et ne peut orienter la conception à partir de ces résultats. C'est donc un outil original à l'usage du concepteur, dont ce travail est la première exploitation systématique au sein d'Arcora.

II MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

La méthodologie est la suivante : On effectue d'abord la construction d'un modèle, dont le calcul des besoins va permettre de fournir une référence. Ce modèle correspond au standard haut de gamme de l'immeuble de bureau actuel en Île de France. À partir de cette référence, on va examiner le poids de chaque paramètre sur les besoins en chaud et en froid. Ensuite, on va essayer de faire évoluer cette *cellule* vers un espace de travail plus désirable, tout en présentant la plus grande sobriété en termes de besoins chaud et froid.

II.1 MODÈLE DE RÉFÉRENCE

La cellule de référence correspond au standard d'immeuble tertiaire pratiqué en région parisienne à l'heure actuelle. Tous les immeubles de bureaux ne sont bien sûr pas représentés par cette cellule, mais cette cellule type correspond au résultat d'un compromis technico-économique abouti à partir des exigences réglementaires (RT2012), d'atteinte de labels énergétiques (Effinergie +) et environnementaux (HQE et BREEAM), d'entretien et de coût.



Les hypothèses de calcul (valeurs de ponts thermiques, largeurs de profilés, de ponts thermiques, caractéristiques des vitrages, etc.) sont tirées d'un projet de campus de 80 000m² utiles situé à Nanterre, et conçu en 2013. Des études de STD très poussées ont permis de valider la conception des façades utilisées pour notre étude. Labellisé HQE, BREAM, et Effinergie+, il constitue une base actuelle et complète pour puiser les hypothèses de référence de cette étude.



Figure 66 : Projet Campus La Défense, Nanterre 2013, Architecte G. Simonetti Malaspina

II.1.1 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

- Cellule de bureau occupée par deux collaborateurs
- Largeur 2.70m, soit deux trames courantes de façade de largeur 1.35m
- Hauteur sous plafond : 2.70m
- Profondeur : 4.5m
- Plenum technique de faux plafond d'une hauteur de 40cm
- Faux plancher d'une hauteur de 10cm
- Scénario d'occupation et d'apports internes empruntés à la RT2012

II.1.2 CARACTÉRISTIQUES DES FAÇADES

Deux choix constructifs distincts cohabitent suivant la nature de la structure de l'ouvrage. Le premier cas courant est une structure poteau-poutre béton avec une façade légère constituée par un mur rideau en aluminium. Le deuxième cas classique est un voile porteur avec des châssis posés sur précadre, et un bardage ventilé sur allège et retombée de poutre en béton armé. L'aspect extérieur (à l'exception des tramages mettant en évidence les trumeaux ou poteaux en retrait de la façade) peut être traité de manière identique. C'est ainsi essentiellement au niveau de la constitution de la partie opaque que va se faire la différence.

- Rapport partie opaque partie vitrée : 50% vu de l'extérieur. La partie vitrée est disposée de manière favorable en matière d'éclairage naturel, avec le linteau disposé au plus près du faux-plafond.
- Les parties vitrées sont composées de châssis en aluminium ouvrant, dotés d'un double vitrage de contrôle solaire et d'un store vénitien intérieur. Clair de vitrage 85%, $U_w = 1.4$, TL 70%, $S_{wsp} = 0.35$, $S_{wap} = 0.15$
- Les parties opaques sont constituées d'un matelas isolant de 20cm d'épaisseur soit agrafé sur un mur en béton armé banché, soit mis en œuvre dans élément de remplissage de mur rideau. $U_{cw} = 1.3W/m^2.K$
- Étanchéité à l'air, $I_4 = 1.7m^3/h.m^2$

II.2 RÉSULTATS DU CALCUL DE RÉFÉRENCE

Les représentations suivantes sont l'occasion d'exposer le type de résultats que l'on peut obtenir grâce à l'outil OptimA, tout en calant les besoins chauds et froids pour la cellule de base équipée de la façade mur rideau aluminium décrite précédemment. On procédera par la suite par comparaison à ce premier résultat.

II.2.1 TEMPÉRATURE INTÉRIEURE AU PAS HORAIRE SUR UNE ANNÉE

La température intérieure est calculée au pas horaire sur une durée d'une année.

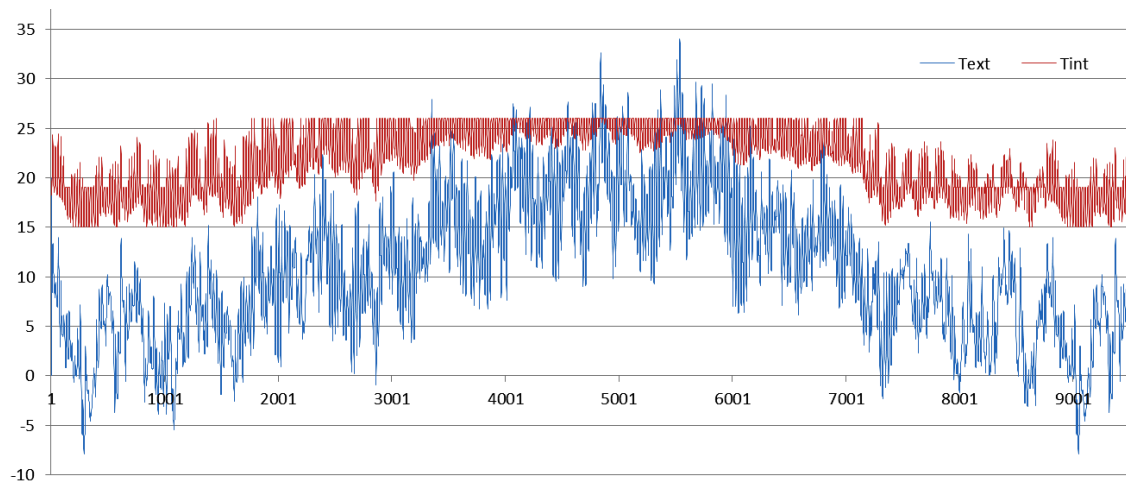


Figure 67: températures intérieures et extérieures de la cellule de référence sur une année.

Une année comporte 8760 heures, ce qui fait que 1000 heures correspondent à 6 semaines environ dans le graphique ci-dessus. Ce comportement annuel permet de caler les périodes de bilan chaud et froid, correspondant à la mise en service saisonnières des équipements. La température interne est écrêtée en dessous de 19°C (15°C en régime réduit) et au-dessus de 26°C, températures de consigne respectives du système théorique de chauffage et de rafraîchissement. Ces valeurs limites correspondent aux valeurs limites du code de la construction et du code du travail.

II.2.2 BESOINS CHAUD ET FROID AU PAS HORAIRE SUR UNE ANNÉE

La détermination de la température intérieure à chaque heure permet de déterminer la puissance appelée en chaud, et en froid. C'est ce que nous définirons comme le *besoin chaud* et le *besoin froid*.

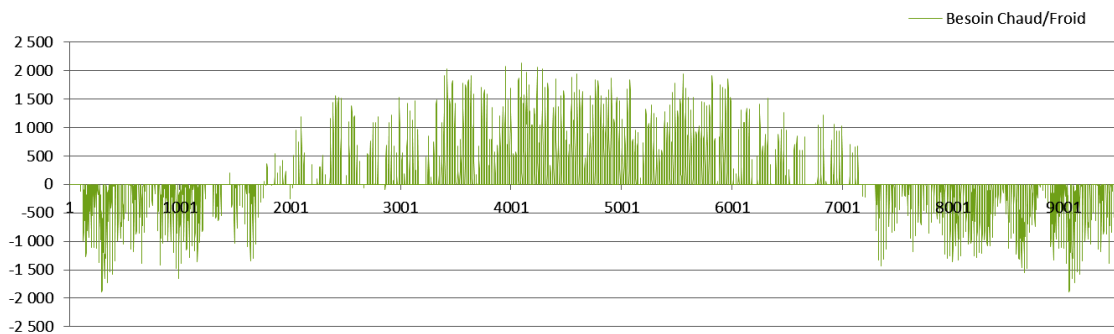


Figure 68: Besoins chaud et froid de la cellule de référence

Le calage des saisons chaud et froid, permet de réduire la période de simultanéité des équipements. L'existence de cette simultanéité est néanmoins un signe que l'inertie mobilisable ne permet pas de lisser la sollicitation climatique sur une durée de 24h. Pour des espaces de travail uniquement occupés en journée, l'aspect transitoire mais à forte amplitude des apports internes est un élément à exploiter.

La solution de la cellule de référence n'exploite pas la masse construite (la façade est légère, les cloisons également, les faux plafonds et planchers empêchent la mobilisation du plancher).

II.2.3 BILAN ANNUEL MENSUALISÉ DES BESOINS CHAUD ET FROID

Pour permettre l'exploitation des résultats, on différencie chaque source de déperdition et chaque type d'apport contribuant à l'équilibre thermique de la cellule. On effectue ensuite l'intégration de ces résultats obtenus pour chaque mois :

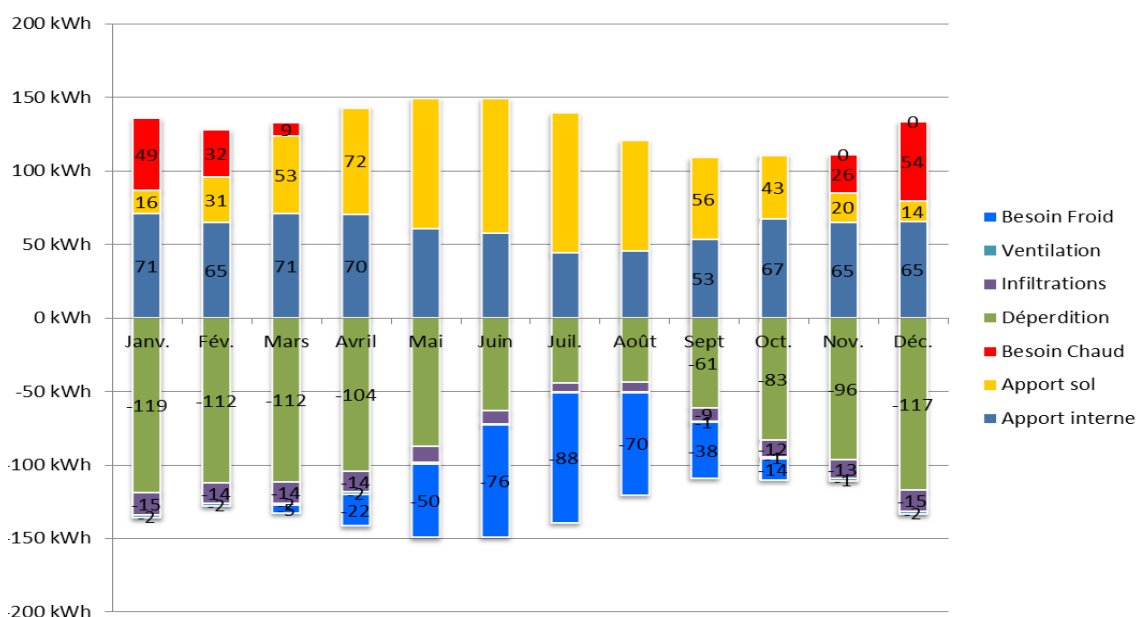


Figure 69 : Bilan illustré annuel avec évolution mensuelle

Cette illustration très condensée permet de bien percevoir les grandes masses concernées et l'évolution mensuelle des équilibres chauds et froid. On constate, à la lecture de cet histogramme que :

- Tous les mois de l'année ont besoin d'une correction en chaud ou en froid
- La simultanéité des besoins chauds et froids concerne le seul mois de mars
- Le besoin froid est de loin supérieur en amplitude au besoin chaud.

La cellule ayant une aire de $2.7 \times 4.5 = 12.15 \text{m}^2$, les valeurs ci-dessus en kWh sont égales à 2% près à la valeur du besoin annuel par m^2 . Le cumul des besoins chauds et froids sur l'année atteint $43.9 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$.

Le calage des saisons chaud et froid, permet de réduire la période de simultanéité des équipements, cependant, l'existence résiduelle de cette simultanéité est le signe que l'inertie mobilisable ne permet pas de lisser la sollicitation climatique sur une durée de 24h à certaines périodes de l'année (au mois de mars).

III PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE

III.1 INFLUENCE DE L'ORIENTATION

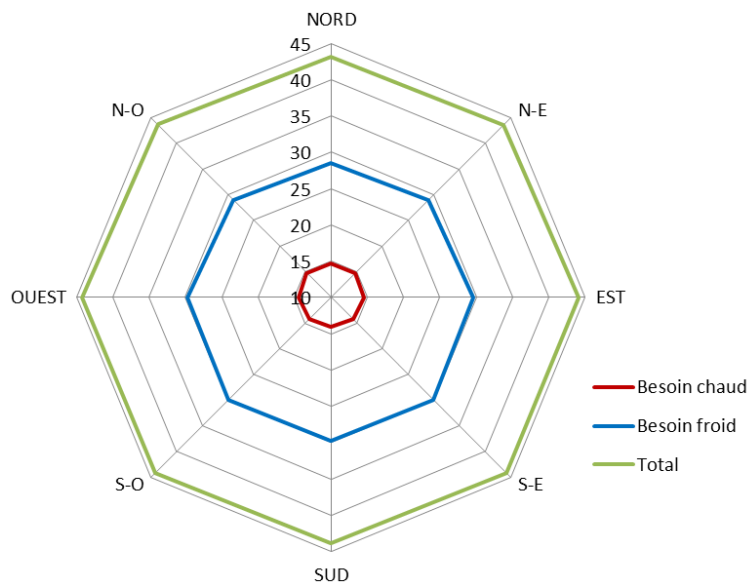


Figure 70 : Diagramme radar des besoins chauds et froids par orientation [kWh/m².an]

L'orientation a un impact très peu sensible sur le niveau de besoin ($\Delta < -2\%$). C'est une réelle différence par rapport au logement, qui s'explique par la différence de niveau d'apports internes et de scénario d'occupation.

Avec les hypothèses considérées, et une efficacité équivalente des protections solaires par orientation, on voit que le principe de bioclimatisme développé pour l'habitat, avec sa différenciation des façades ne peut être calquée sur les bâtiments à usage de bureau. La raison à cela est sans doute que contrairement au logement, les apports solaires (diurnes, par définition) viennent se cumuler aux apports internes au lieu de lisser la courbe d'apport sur un cycle de 24h, en alternant pointe d'apports internes et externes. Le déséquilibre chaud-froid est très marqué en faveur du besoin de froid, c'est le poste que l'on va diminuer en premier.

III.2 RÉDUCTION DU BESOIN FROID

III.2.1 PASSAGE À UNE ALLÈGE BÉTON ET CHÂSSIS SUR PRÉCADRE

En remplaçant le mur rideau aluminium par des châssis en bande filante sur allège béton, on obtient :

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-6.0	-43%
8.1			
Besoin froid	29.8	-1.7	-6%
28.1			
Besoin global	43.9	-7.7	-17%
36.2			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 71 : Variation du besoin avec une allège béton

Le changement de composition de la façade a pour résultat d'augmenter simultanément le niveau d'isolation et l'inertie mobilisable de la cellule de bureau. Cela permet de réduire de 17% le besoin global.

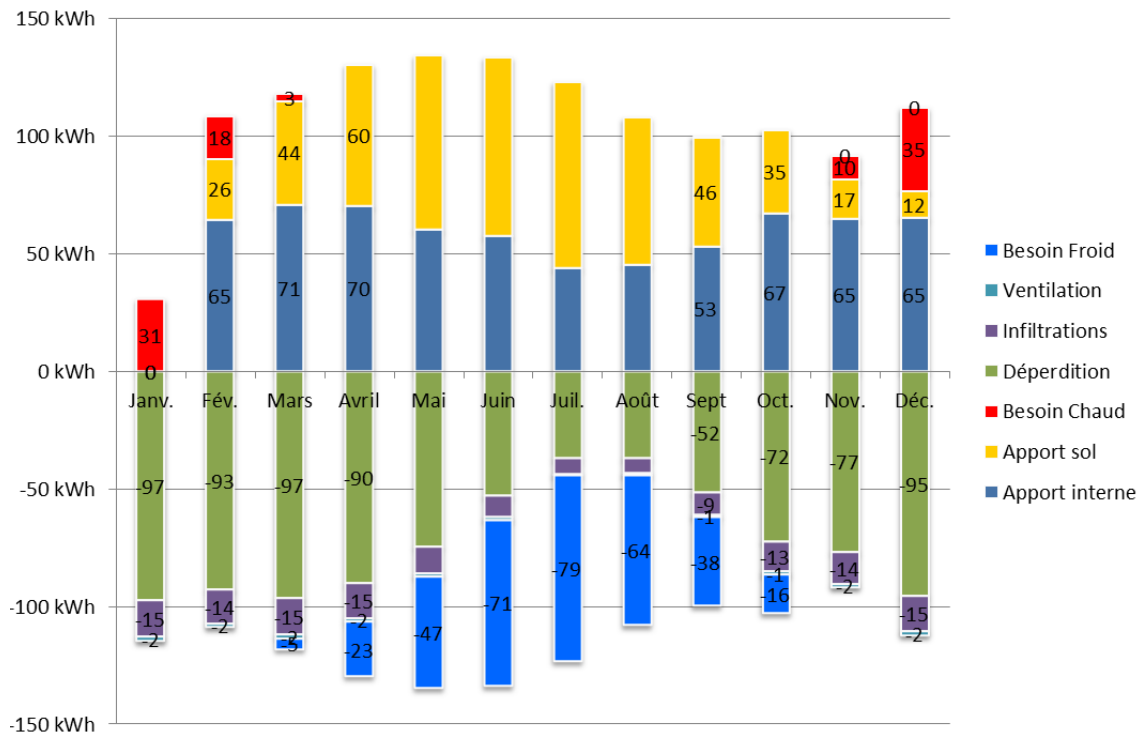


Figure 72 : Somme mensualisée des besoins chaud et froid

La simultanéité des besoins est réduite, mais pas éliminée.

III.2.2 AMÉLIORATION DE LA PROTECTION SOLAIRE

III.2.2.1 Passage de la protection solaire à l'extérieur

On remplace le store vénitien intérieur par un brise soleil orientable.

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-5.6	-40%
8.4			
Besoin froid	29.8	-4.5	-15%
25.3			
Besoin global	43.9	-10.2	-23%
33.7			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 73 : Variation du besoin avec BSO au lieu d'un store vénitien intérieur

On constate une légère hausse du besoin chaud en raison de la perte d'apports gratuits, mais cette hausse est compensée par une baisse supplémentaire de 9% du besoin froid.

III.2.2.2 Régulation par GTB du BSO avec dérogation manuelle utilisateur

Le pilotage automatisé des protections solaires par un système de Gestion Technique du Bâtiment, optimise grandement l'efficacité de la protection solaire extérieure. Une dérogation est laissée à l'utilisateur, qui peut toujours prendre la main sur le système automatique (hypothèse 25% du temps).

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-5.4	-38%
8.7			
Besoin froid	29.8	-14.4	-48%
15.4			
Besoin global	43.9	-19.8	-45%
24.1			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 74 : Variation du besoin avec pilotage par GTB

Les apports solaires sont très réduits en été, mais seulement très faiblement en hiver.

III.2.2.1 Influence d'une protection fixe

Plaçons une casquette de 1m de profondeur au-dessus de la baie, en façade au Sud en complément :

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-6.6	-47%
7.5			
Besoin froid	29.8	-19.0	-64%
10.8			
Besoin global	43.9	-25.6	-58%
18.3			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 75 : Variation du besoin avec une casquette en façade Sud

La baisse de besoin chaud provient d'un couplage GTB - dérogation manuelle avec l'ensoleillement de la baie. L'effet sur les besoins froid est considérable, cependant, il faut garder à l'esprit que ce gain est fortement compensé par l'augmentation des besoins d'éclairages, non considérés ici, mais très importants en tertiaire. Gardons à l'esprit également que cette efficacité n'est valable qu'au Sud. C'est pourquoi nous ne gardons pas cette disposition dans la suite de l'étude.

III.2.3 UTILISATION DE LA VENTILATION NATURELLE

On simule une ouverture mécanisée d'ouvrants disposés en façade pendant la nuit, en été. Cela permet un débit d'extraction Q, fonction du coefficient aéraulique C associé au type de fenêtre (dans le cas présent, C=0.8 pour un ouvrant à la française), des sections S d'ouverture haute et basse distante d'une hauteur h, et des températures intérieure Ti et extérieure Te selon la formule suivante :

$$Q = C S \sqrt{2 g h \frac{T_i - T_o}{T_i}}$$

Cette ventilation est très efficace, mais suppose quelques aménagements, tels que moustiquaire, une ventilation traversante entre façades, ce qui peut générer des problématiques de sécurité incendie, et de confidentialité, ainsi que des vitesses d'air importantes qui rendent le travail sur papier problématique.

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-5.4	-38%
8.7			
Besoin froid	29.8	-25.7	-86%
4.1			
Besoin global	43.9	-31.0	-71%
12.8			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 76: Variation du besoin avec une ventilation naturelle

Le besoin est finalement réduit à 30% de ce qu'il était initialement. Cette optimisation a été menée en prenant des apports internes très importants, et il est impossible de diminuer davantage le besoin sans réduire le niveau d'apports internes.

C'est la situation à laquelle on arrive dans de nombreux projets, une cuvette où l'augmentation par exemple d'une épaisseur d'isolant, ou bien le passage en triple vitrage détériore le résultat global, en augmentant davantage le besoin froid qu'il ne diminue le besoin chaud. C'est le bout de la solution purement technique.

III.2.4 DIMINUTION DES APPORTS INTERNES

C'est là une modification des hypothèses programmatiques dont il est question, une modification de l'usage fait de l'espace de travail.

En optimisant la puissance installée d'éclairage (passage en led, graduation, éclairage sur pied plutôt qu'en plafonnier), on passe de 12W/m² à 6W/m². En limitant l'équipement informatique (isolement des serveurs, ordinateurs portables performants, pas de fax), on passe d'un total de 107W par poste informatique à 25W par poste. Au total, ces réductions de puissance font passer le niveau de gain interne de 44.3kWh/m² à 11.7kWh/m².an pour la bureautique (baisse de 74%), de 20.3kWh/m².an à 10.1kWh/m².an pour l'éclairage (baisse de 50%). En ajoutant les apports internes liés aux personnes (13Kwh/m²), c'est une réduction du total des gains de 55% qui est réalisable.

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	5.9	42%
20.0			
Besoin froid	29.8	-29.4	-99%
0.4			
Besoin global	43.9	-23.5	-54%
20.3			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 77 : Variation du besoin liée à la diminution des apports internes

La structure du besoin se retourne totalement. Le besoin froid disparaît quasiment, le besoin chaud augmente considérablement.

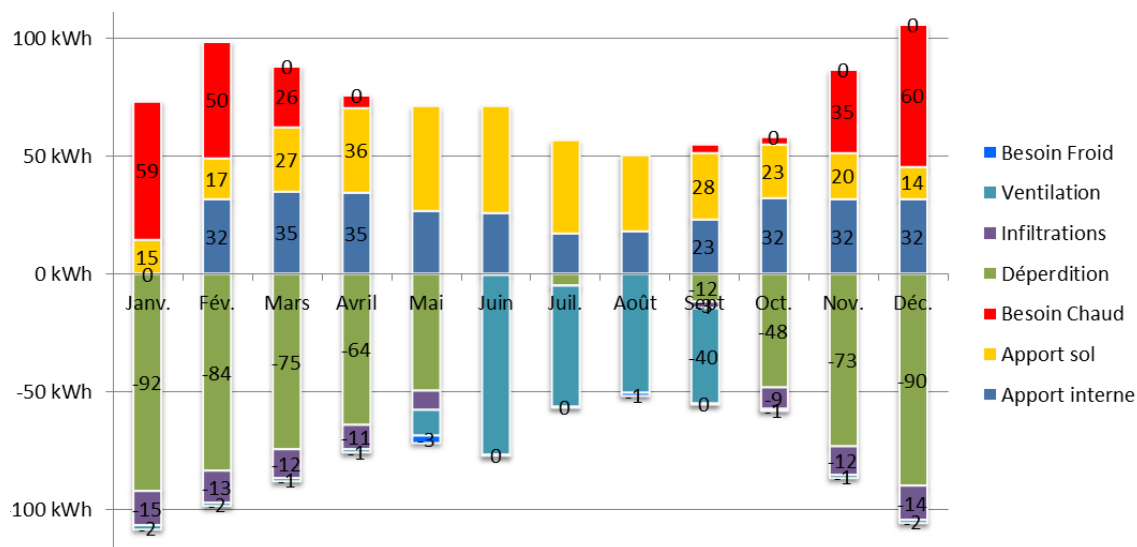


Figure 78: Besoin global mensuel sur une année

La climatisation n'est plus nécessaire, c'est désormais un sujet de confort d'hiver.

III.3 RÉDUCTION DU BESOIN CHAUD

L'épaisseur d'isolant est de 20cm. Le gain d'une augmentation d'épaisseur est secondaire, car l'essentiel des déperditions provient de la partie vitrée.

III.3.1 PASSAGE EN TRIPLE VITRAGE ET MENUISERIE BOIS

C'est la menuiserie de type *Passiv Haus*, très performante : $U_w = 0.8W/m^2.K$

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-5.3	-38%
8.7			
Besoin froid	29.8	-28.9	-97%
0.9			
Besoin global	43.9	-34.3	-78%
9.6			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 79 : Variation avec menuiserie bois et triple vitrage

Alors que peu de projets en France comportent de triple vitrage, en raison du coût élevé de ceux-ci, leur efficacité conjuguée avec des menuiseries performantes en bois est très importante sur le besoin chaud.

III.3.2 INFLUENCE DU RATIO VITRÉ OPAQUE

Ht baie	Ht étage	HSP
	3.7	2.7
2.7	73%	100%
1.7	46%	63%
1.5	41%	56%
1.3	35%	48%
1.1	30%	41%
0.9	24%	33%
0.7	19%	26%

Une valeur de 2.70m correspond à un vitrage toute hauteur dans l'espace de bureau. 1.70m correspond au standard actuel de bureau. 70cm peut être considéré comme un minimum théorique de hauteur de baie qui permette de bénéficier d'une vue extérieure en position assise (1.10m) et debout (1.80m).

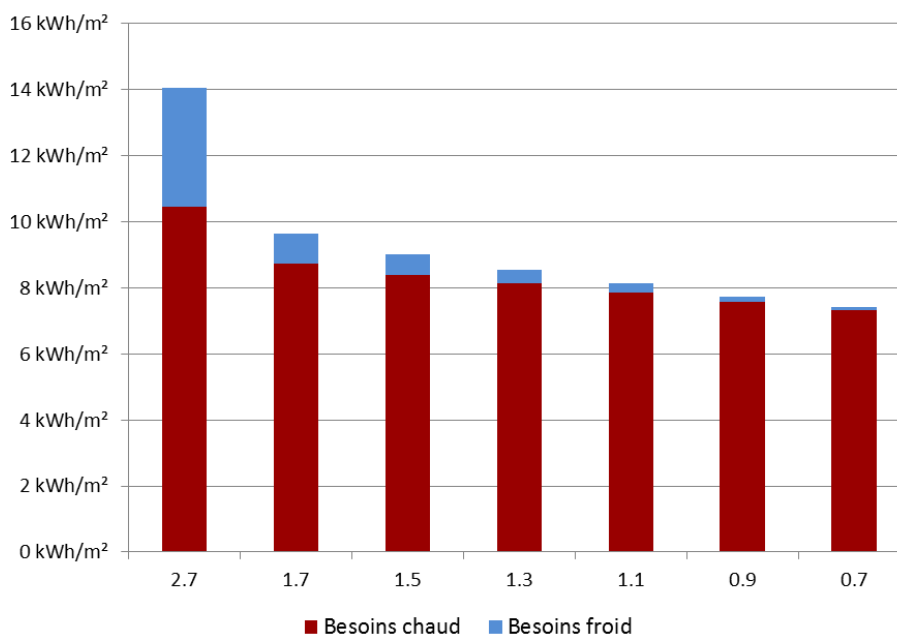


Figure 80: Sensibilité des besoins au ratio vitré-opaque

Le gain de besoin chaud entre 1m70 et 70cm est faible, passant de 8.7 kWh/m² à environ 7.5kWh/m². Si l'on garde à l'esprit que les besoins d'éclairages sont importants en tertiaire, et conditionnés à la taille de la baie, c'est sans doute la version à 1m70 qui est la plus performante.

III.3.3 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLANT

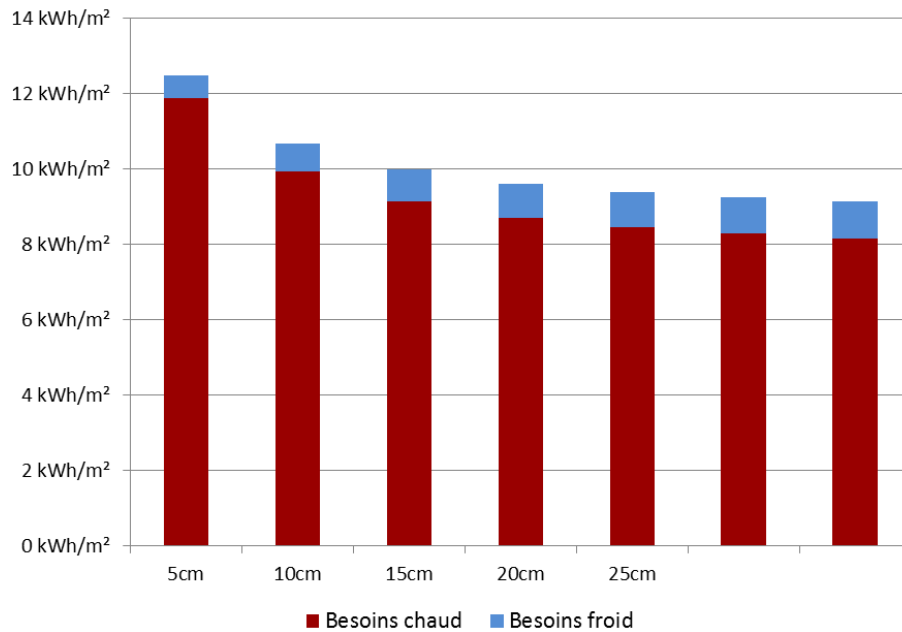


Figure 81: Sensibilité des besoins à l'épaisseur d'isolant

On voit qu'il y a compensation de la baisse du besoin chaud par hausse relative du besoin froid. L'essentiel du gain potentiel est atteint pour une épaisseur de 20cm d'isolant.

III.3.4 AMÉLIORATION DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

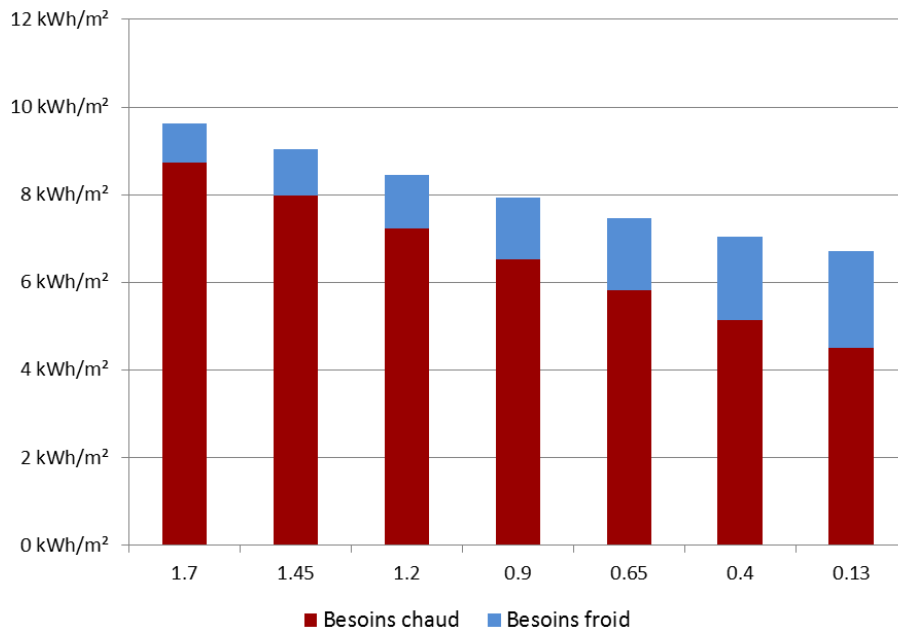


Figure 82 : Sensibilité du besoin à l'étanchéité à l'air I_4

La valeur de 0.4 correspond au niveau d'exigence de PassivHaus. Cette valeur est donc atteignable de manière généralisée. L'impact de cette mesure est plus important qu'une augmentation de l'épaisseur d'isolant.

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-8.9	-63%
5.1			
Besoin froid	29.8	-27.9	-94%
1.9			
Besoin global	43.9	-36.8	-84%
7.1			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 83 : Variation du besoin avec $I_4 = 0.4$

Le résultat obtenu correspond à l'optimum de ce qui peut être atteint en conservant les fonctionnalités attendues d'un espace de travail en *blanc*. Cependant, on peut arriver à un résultat identique par une autre approche.

III.4 MODIFICATION DE L'ESPACE DE TRAVAIL

L'espace modélisé précédemment est à inertie très légère. Aucun matériau à inertie significative n'est mobilisable. C'est pourquoi la première évolution a été de remplacer le mur rideau par une façade comportant une masse inertielle mobilisable. Il reste une marge d'amélioration consistante à réaliser en augmentant cette inertie, ou en la rendant mobilisable.

III.4.1 AUGMENTATION DE L'INERTIE

III.4.1.1 Passage en cloisons lourdes

On remplace les cloisons légères amovibles par des cloisons fixes, à 50% pleine en terre crue et 50% vitrés. C'est un parti pris important, car le cloisonnement lourd fixe en partie l'aménagement du plateau de bureau. Un espace ne pourra pas correspondre à toutes les configurations imaginables, ni à toutes les entreprises sans doute. C'est pourquoi on se limite à 50%, car cela laisse encore une grande souplesse si l'espace est architecturalement bien pensé.

En contrepartie, les cloisons vont jouer le rôle d’amortisseur thermique, ce qui a un effet très important pour un lieu de travail avec une telle différence d’apports entre jour et nuit.

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-8.6	-61%
5.5			
Besoin froid	29.8	-28.5	-96%
1.3			
Besoin global	43.9	-37.1	-85%
6.7			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 84 : Variation du besoin avec cloisons lourdes

Pas d’effet notable dans la configuration actuelle. Continuons l’amélioration de l’inertie par la suppression du faux plafond et du faux plancher.

III.4.1.2 Suppression du faux plafond et du faux plancher

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-7.5	-53%
6.6			
Besoin froid	29.8	-28.5	-96%
1.3			
Besoin global	43.9	-36.0	-82%
7.9			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 85 : Variation de la suppression du faux plafond et du faux plancher

On récupère dans le volume chauffé la hauteur des plenums de faux plafond et faux plancher. On passe d’une HSP de 2.70m à 3.20m. C’est ce qui explique la légère augmentation du besoin chaud.

III.4.2 RÉDUCTION DE LA HAUTEUR D’ÉTAGE

On réduit la hauteur d’étage à 3.20m, dont une dalle de 30cm et une HSP de 2.90m, permettant la mise en place d’une correction acoustique, ou d’un éventuel équipement en plafond dans une épaisseur de 20cm.

Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-8.5	-60%
5.6			
Besoin froid	29.8	-28.3	-95%
1.5			
Besoin global	43.9	-36.8	-84%
7.1			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 86 : Variation liée à la réduction de la hauteur d'étage

III.4.1 PRISE EN COMPTE DU CONFORT ADPTATIF

Envisageons de laisser la température fluctuer librement. En été, elle peut dépasser 28°C, mais jamais plus de 6 heures de suite, et seulement 3 ou 4 jours par an. Comme la température est libre, l'adaptation de l'organisme peut se faire en équilibre avec la température extérieure est elle aussi plus supportable, car moins contrastée avec l'ambiance intérieure.

En hiver, une température d'air de 19°C peut en revanche s'avérer insatisfaisante et contreproductive pour une partie des utilisateurs.

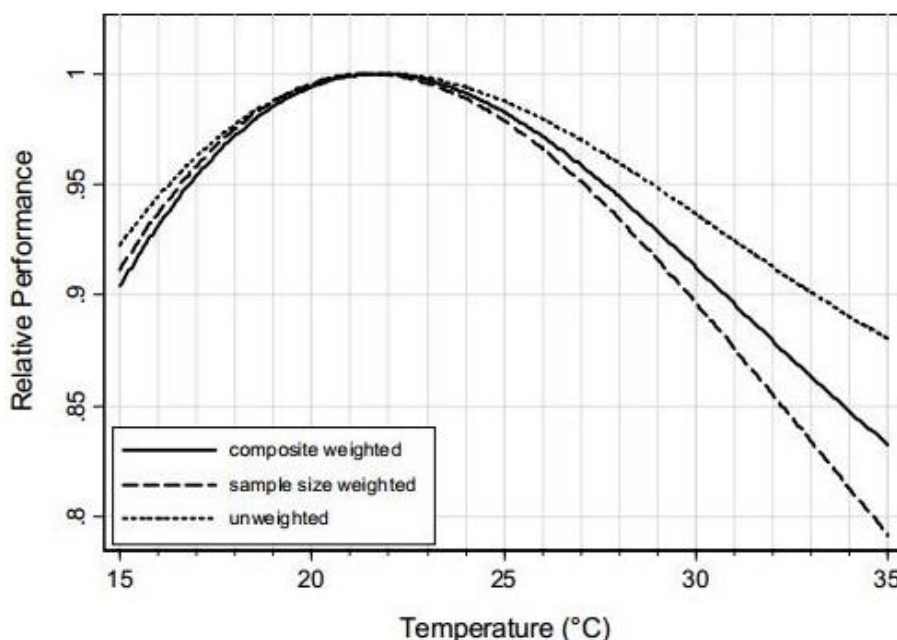


Figure 87 : Performance relative en fonction de la température dans un bureau, en Grande Bretagne

Le système de chauffage, en marche seulement les deux mois les plus froids de l'hiver peut être poussé à une température de 21°C en restant dans une plage de besoin très restreint.

Résultat	Référence	Delta		Résultat	Référence	Delta	
Besoin chaud	14.1	-4.8	-34%	Besoin chaud	14.1	-8.7	-62%
9.2				5.4			
Besoin froid	29.8	-29.6	-99%	Besoin froid	29.8	-29.6	-99%
0.2				0.2			
Besoin global	43.9	-34.5	-79%	Besoin global	43.9	-38.3	-87%
9.4				5.5			
<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>				<i>Valeurs exprimées en KWh/m².an</i>			

Figure 88: Variation du besoin pour température de 21°C à gauche, et 19°C à droite

Tant que le besoin est très faible en raison d'une très bonne isolation de la paroi, l'augmentation relative du besoin chaud liée à l'élévation de température de 2°C est importante, mais reste très faible en valeur absolue.

IV EXPLOITATION DES RÉSULTATS

L'ensemble des modifications apportées au modèle standard de l'immeuble de bureau parisien a réduit le besoin en énergie pour le chauffage et le refroidissement de 87%. C'est un nouveau concept d'espace de travail, dont la qualité d'usage a été améliorée en même temps que sa sobriété énergétique intrinsèque.

La pièce a conservé la même surface au sol, mais a gagné 20cm de hauteur sous plafond. Les dalles de faux plafond de 60x60 ont disparu pour laisser la place à un BA10 collé sous la dalle, et une correction acoustique suspendue ajourée. Le faux plancher et sa moquette en dalle ont disparu pour des lames de plancher en bois. Le cloisonnement, fixe, est composé de briques de terre crue à mi-hauteur surmonté d'un vitrage en partie supérieure, avec des impostes ouvrantes au droit des portes d'accès aux circulations. Une possibilité est d'alterner des éléments en terre crue toute hauteur, et des cloisons vitrées, des portes ou du vide, pour permettre une modularité de l'espace. Les cloisons en terre peuvent intégrer le système de chauffage et de refroidissement (tubes en PER sous l'enduit, alimenté en eau chaude par les collecteurs thermiques en toiture). Le réseau de renouvellement hygiénique de l'air est limité au plenum au-dessus de la circulation. La consommation électrique est réduite,

et alimentée par l'autoproduction photovoltaïque du site ou de ses alentours. L'éclairage est sur pied au niveau des plans de travail ; ce sont des éléments de mobilier qui habillent l'espace et le personnalisent, comme dans un intérieur décoré.

À basse température, ce besoin de chauffage peut être assuré par des collecteurs solaires thermiques en toiture.

La façade comporte une baie vitrée généreuse de 1m70 de hauteur, en triple vitrage isolant dans une menuiserie bois-aluminium, ouvrante à chaque trame. La partie en allège a une épaisseur de 35cm, grâce à seulement 15cm d'isolant. Le rendement SU/SHON cher au promoteur immobilier est de bon niveau. Des ouvrants sont motorisés et pilotés par GTB pour effectuer le rafraichissement nocturne en été.

Des brises soleils extérieurs protègent les baies des apports solaires, et sont pilotés par la GTB. Néanmoins, l'utilisateur peut déroger au pilotage automatique en fonction de ses désirs et de ses activités.

Grâce à la combinaison de la forte inertie, des BSO sur GTB, et des menuiseries triple vitrage très performantes, la façade dispose d'une certaine liberté architecturale en ce qui concerne la composition des pleins et des vides, sans que cela viennent trop affecter le besoin. L'épaisseur d'isolant, à partir de 15cm varie peu, et au-delà de 20cm n'évolue plus de façon significative.

CONCLUSION

La relativement faible performance des façades du standard actuel de bureau est liée au très haut niveau d'apport interne du programme classique, correspondant au confort jugé nécessaire à la commercialisation des promoteurs. Les optimisations sont possibles, notamment la mise en place de BSO pilotés par GTB, et d'une ventilation nocturne, mais atteignent vite leur limite. Dans ce scénario, les besoins en froid sont privilégiés car bénéficiant des coefficients avantageux des systèmes de production de froid. Dans l'hypothèse, du maintien d'un niveau très élevé d'apports internes, l'atteinte de l'énergie positive laisse supposer la mise en place d'une grande surface de panneaux photovoltaïques, pour alimenter les appareils électriques d'abord, puis pour refroidir le local surchauffé par les apports internes dûs à ces appareils électriques.

Cependant, en autorisant une souplesse sur le programme *en blanc* des bureaux, il est possible d'imaginer un espace de très grande qualité, avec des besoins minimaux en chauffage, et aucun besoin de froid, qui ait une véritable identité, et offre un véritable confort et une grande qualité d'usage. Le cout de construction est réduit, par la simplification des systèmes, par la réduction de la modularité du cloisonnement, par la moindre hauteur d'étage, et la diminution des zones affectées aux locaux techniques.

Cette première étude paramétrique a suscité plusieurs ajustements de l'outil OptimA, et la démarche de qualifier les besoins chaud et froid liés à une façade étant nouvelle, la méthode a montré un potentiel d'amélioration certain :

- La création de fichiers météorologiques spécifiques comportant l'influence des masques lointains permettrait d'aborder les questions d'implantation urbaine.
- Il serait intéressant de développer un module permettant de calculer conjointement le besoin en éclairage d'une cellule de bureau. Cette amélioration a été effectuée pendant la rédaction de ce travail.
- Le nombre de calcul du mode calcul par lot mériterait d'être augmenté, au minimum à 8 pour permettre le calcul successifs des 4 orientations cardinales, et leurs intermédiaires. À terme, le calcul par lot sur plusieurs variables selon un *algorithme génétique* serait un outil puissant et inédit de conception.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le *Bâtiment à Énergie Positive* est annoncé comme la contribution du secteur de la construction à la résolution des problèmes majeurs posés à l'Humanité en ce début de XXI^{ème} siècle : réchauffement climatique, épuisement des ressources énergétiques d'origine fossile, raréfaction des matières premières, et plus largement finitude de notre monde. Cet objectif s'inscrit dans le projet de troisième révolution industrielle décrit par Jérémy Rifkin, auquel nombre d'états ont adhéré et dont l'Union Européenne est le fer de lance.

Le travail de formalisation de l'idée du *bâtiment à énergie positive* est engagé, mais tarde à aboutir à une définition cohérente. Les exemples construits sont désormais nombreux, et un premier label de performance a été proposé. Il est aujourd'hui possible de concevoir et de construire des bâtiments relativement sobres en énergie, puis d'y intégrer des panneaux photovoltaïques en toiture et en façade. Au vu des performances constatées dans les expérimentations françaises, cela semble suffire à l'obtention du statut de BEPOS.

Cependant, la réflexion est insatisfaisante en l'état. D'abord, cette *énergie zéro, ou positive*, ne correspond pas à une consommation réelle, ni à un calcul physique rigoureux. Ensuite, l'utilisateur est pris en compte comme une variable imprévisible, un facteur d'incertitude du calcul. Finalement, la réflexion sur l'acte de construire *durable*, n'est pas encore intégrée à ce modèle, très consommateur de ressources, qui ne prend en compte que la construction neuve. Il faut désormais pousser plus avant la réflexion conceptuelle, comme le font les membres du groupe *Réflexion Bâtiment Responsable 2020-2050*⁶⁶, ou bien Grégoire Bignier⁶⁷ dans son livre *Architecture et écologie*.

⁶⁶ *Embarquement immédiat pour un bâti sobre, robuste et désirable*, rapport d'étape du groupe « Réflexion Bâtiment responsable », juillet 2013.

⁶⁷ *Architecture et écologie, comment partager le monde habité ?*, Grégoire Bignier, ed. Eyrolles, 2012.

On peut évoquer quelques notions qui mériteraient d'être intégrées dans un concept encore à venir, de bâti *sobre, robuste et désirable* :

- L'utilisateur doit être placé au cœur de la réflexion. Un bâtiment offre avant tout une qualité d'usage, et c'est celle-ci qu'il faut privilégier. Les bâtiments ne consomment pas d'énergie, les hommes, si. Cette qualité d'usage inclut un confort, acoustique, lumineux, thermique et hydrique, mais peut intégrer des qualités sanitaires, permettre même un allongement de l'espérance de vie.
- Les architectes, maîtres d'œuvres, entrepreneurs, tous constructeurs aux yeux de la loi, doivent s'adresser directement aux usagers des ouvrages. Une bonne conception doit intégrer l'exploitation, l'entretien, la reconversion des ouvrages, permettre une flexibilité sur le long terme.
- Il faut passer de l'obligation de moyen à l'obligation de résultat pour les constructeurs. Un objectif théorique qui ne se concrétise pas réellement n'a pas grand intérêt.
- Il faudrait abandonner le calcul de consommation conventionnel. La méthode de calcul RT2012 est aujourd'hui extrêmement poussée dans certains détails (les règles th-BCE atteignent 1500 pages) mais ne fournit de prévision réaliste de consommation. Les critères de bonne conception pourraient être résumés à quelques grands principes simples à vérifier, et toute l'attention reportée vers la conception elle-même.
- Il faut amener la différenciation des qualités d'énergie dans les équilibres énergétiques à atteindre, c.-à-d. l'exergie de chaque forme d'énergie. Il n'y a pas grand sens physique à considérer une équivalence entre la chaleur contenue dans de l'eau tiède, un litre de pétrole, le rayonnement solaire, de l'électricité, car elles ne permettent pas de produire la même quantité de travail.
- Il faut considérer toutes les consommations non renouvelables : énergies non renouvelables, matériaux non renouvelables, déchets non renouvelables.

L'objectif de ce mémoire était initialement de constituer un guide de bonnes pratiques permettant de concevoir l'enveloppe d'un bâtiment à énergie positive. À cet égard, ce travail n'est pas une réussite, car les critères rassemblés sont tout à fait insuffisants pour constituer un objectif cohérent et désirable. Cependant, cela a été l'occasion d'éclairer les axes de travail d'une ingénierie de conception des enveloppes telle qu'Arcora pour les années à venir.

Pour les actions de recherche :

- Le développement d'un outil de STD est très intéressant et devrait être poussé.
- L'approche bioclimatique nécessite d'être revisitée. Des travaux de recherche comme le programme *Habisol Valerie* aborde ce sujet. Leur application en projet est prometteuse, et peut être complémentaire d'un outil comme OptimA.
- La caractérisation de la notion d'inertie mobilisable des façades est à étudier. L'envisager comme un moyen de stockage de chaleur est une piste nouvelle.
- La caractérisation de l'énergie grise des façades est à développer.

Sur les plans techniques et commerciaux :

- Le remplacement de l'aluminium par le bois est à anticiper.
- L'intégration de cellules photovoltaïques et de collecteurs thermiques dans la façade, ainsi que d'autres éléments actifs est une tendance croissante, et va sans doute se généraliser dès la parité réseau atteinte.
- L'adoption de méthodes pour atteindre un très haut niveau de qualité de l'enveloppe. Cela suppose donc des missions de contrôle par la MOE, la GPEI, formation des entreprises, qualité en chantier et plus en usine seulement.