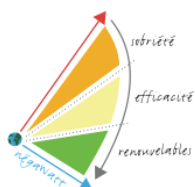


Scénario négaWatt 2011-2050

Hypothèses et méthode

« Il y a urgence à intégrer dans nos décisions
à court terme les impératifs du long terme »



Ce rapport technique du scénario négaWatt 2011 a été réalisé avec le concours financier de l'Institut Caisse des Dépôts pour la Recherche, dans le cadre d'une convention bilatérale.

Conformément à l'objet de cette convention, cette analyse du scénario négaWatt 2011 décrit de façon détaillée la méthodologie suivie pour l'élaboration de cet exercice de prospective, avant de présenter de manière la plus exhaustive possible la grande majorité des hypothèses qui structurent ce scénario. Les résultats obtenus viennent enfin conclure ce document.

Suite à la version du scénario négaWatt publié fin 2011, certaines hypothèses - notamment en termes de ressources énergétiques et de production - ont fait l'objet d'une mise à jour début 2013. C'est cette nouvelle version, la v21, qui est décrite dans ce document.

Le lecteur trouvera également d'autres sources d'information sur le scénario négaWatt 2011, et plus globalement sur les travaux de l'Association négaWatt, sur les supports suivants : site internet www.negawatt.org - avec [graphiques dynamiques](#) et synthèse du scénario -, Manifeste négaWatt (Actes Sud, Janvier 2012), et Changeons d'énergies (Actes Sud, Février 2013).

Rapport technique du scénario négaWatt 2011

Table des matières

Partie 1 - Démarche et méthodologie.....	6
1. Démarche du scénario.....	6
1.1. Démarche négaWatt.....	6
1.2. Crises et contraintes.....	7
1.3. Scénario.....	8
1.4. Fondamentaux du scénario.....	8
2. Méthodologie.....	10
2.1. Modèle.....	10
2.2. Hypothèses de cadrage.....	12
Partie 2 - Sobriété et efficacité énergétiques : analyse sectorielle sur la demande	15
1. Résidentiel et tertiaire.....	17
1.1. Évolution des secteurs résidentiel et tertiaire.....	17
1.1.1. Vision directrice.....	17
1.1.2. Évolution du secteur résidentiel.....	18
1.2. Consommation des équipements dans le résidentiel et le tertiaire.....	22
1.2.1. Vision directrice.....	22
1.2.2. Électricité spécifique dans le secteur résidentiel.....	23
1.2.3. Électricité spécifique dans le secteur tertiaire.....	30
1.2.4. Cuisson dans le résidentiel et le tertiaire.....	35
1.2.5. Résultats sur les équipements dans le résidentiel et le tertiaire.....	37
1.3. Confort thermique dans le résidentiel et le tertiaire.....	38
1.3.1. Vision directrice.....	38
1.3.2. Confort thermique dans le secteur résidentiel.....	39
1.3.3. Confort thermique dans le secteur tertiaire.....	53
1.3.4. Résultats sur le confort thermique dans le résidentiel et le tertiaire.....	59
1.4. Secteur du bâtiment - bilan.....	60
2. Transports.....	62
2.1. Approche générale.....	62
2.2. Mobilité des personnes.....	63
2.2.1. Méthodologie.....	63
2.2.2. Hypothèses.....	66
2.2.2.1. Évolution des voyageurs.km.....	66
2.2.2.2. Évolution des parts modales.....	68
2.2.2.3. Évolution du parc de véhicules individuels.....	70
2.2.2.4. Évolution des motorisations.....	71
2.2.2.5. Évolution des taux de remplissage des véhicules.....	72
2.2.2.6. Évolution de la vitesse sur route.....	73
2.2.2.7. Évolution des consommations par mode.....	73
2.2.3. Résultats.....	73
2.3. Transports de marchandises.....	75
2.3.1. Méthodologie.....	76

2.3.2.	Hypothèses	77
2.3.2.1.	Évolution des t.km transportées	77
2.3.2.2.	Évolution des parts modales des différents modes de transport (en Gt.km)	78
2.3.2.3.	Évolution du taux de charge des véhicules routiers	78
2.3.2.4.	Évolution des motorisations.....	78
2.3.2.5.	Évolution des consommations par véhicule et par motorisation.....	78
2.3.3.	Résultats obtenus	79
3.	Production industrielle et agricole.....	81
3.1.	<i>Industrie</i>	81
3.1.1.	Constats et enjeux	81
3.1.2.	Production et sobriété.....	83
3.1.2.1.	La matrice de production	83
3.1.2.2.	La relocalisation.....	84
3.1.2.3.	L'évolution générale de la consommation	85
3.1.2.4.	L'évolution des emballages	85
3.1.2.5.	L'évolution des matériaux de construction.....	85
3.1.2.6.	L'évolution globale des tonnages	86
3.1.2.7.	Le recyclage	86
3.1.3.	L'efficacité énergétique	88
3.1.3.1.	Généralités	88
3.1.3.2.	Les économies transversales	89
3.1.3.3.	Les économies spécifiques	92
3.1.3.4.	La substitution de combustible vers l'électricité	92
3.1.4.	Les sources d'énergie.....	93
3.1.4.1.	La substituabilité des sources.....	93
3.1.4.2.	La cogénération	94
3.1.4.3.	Les réseaux de chaleur	95
3.1.4.4.	La place des énergies renouvelables	96
3.1.5.	Résultats	96
3.2.	<i>Agriculture</i>	98
3.2.1.	Consommation d'énergie dans l'agriculture	98
3.2.2.	Évolution du système agricole et de l'assiette alimentaire	98

Partie 3 - Substitution par les énergies renouvelables : analyse de bouclage sur l'offre..... 102

1.	Production d'énergie - la biomasse	103
1.1.	<i>Le bois énergie</i>	103
1.1.1.	La forêt.....	103
1.1.2.	L'agroforesterie et les arbres hors forêt.....	106
1.1.3.	Les déchets de bois.....	106
1.2.	<i>Le biogaz</i>	106
1.2.1.	Biodéchets, déjections d'élevage, résidus de culture	106
1.2.2.	Les ressources fourragères	107
1.2.3.	La méthanisation au cœur de la durabilité des agrosystèmes	107
1.3.	<i>Les agrocarburants</i>	108
1.4.	<i>Vecteurs énergétiques et énergies finales issus de la biomasse</i>	109
2.	Production d'énergie : les énergies renouvelables électriques.....	111
2.1.	<i>L'énergie éolienne</i>	112
2.1.1.	L'éolien terrestre	112
2.1.2.	L'éolien maritime	114
2.1.2.1.	Eolien offshore "posé" (ou "planté").....	114
2.1.2.2.	Eolien offshore "flottant" (ou "ancré")	114

2.2.	<i>Le solaire photovoltaïque</i>	116
2.3.	<i>La production hydraulique</i>	121
2.4.	<i>Les énergies marines</i>	121
3.	Production d'énergie : autres énergies renouvelables	123
3.1.	<i>Le solaire thermique</i>	123
3.2.	<i>La géothermie</i>	126
4.	Production d'énergie : les énergies fissiles et fossiles	128
4.1.	<i>Le nucléaire</i>	128
4.2.	<i>Les énergies fossiles</i>	130
5.	L'équilibre offre-demande : le rôle primordial des réseaux	132
5.1.	<i>Le cas particulier de l'électricité</i>	132
5.1.1.	L'évolution de la demande	132
5.1.2.	L'évolution de l'offre.....	135
5.1.3.	L'équilibre offre-demande électrique.....	136
5.1.3.1.	Piloter la demande et l'offre flexible.....	136
5.1.3.2.	Utiliser le réseau de transport.....	136
5.1.3.3.	Stocker l'électricité.....	137
5.1.3.4.	Transformer l'électricité en méthane	137
5.1.3.5.	Production conventionnelle et déconnexion des renouvelables	139
5.2.	<i>De l'équilibre électrique à l'écologie industrielle</i>	141
	Partie 4 - Résultats du scénario négaWatt 2011	143
1.	Énergie finale, vecteurs, énergie primaire	143
2.	Impact sur les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES)	149
2.1.	<i>Emissions du secteur énergétique</i>	149
2.2.	<i>Ensemble des émissions de GES</i>	150
	Tables des figures et des tableaux	154
1.	Table des figures	154
2.	Table des tableaux	157
	Annexes	160
	Annexe 1 - hypothèses et résultats du secteur du bâtiment	160
	Annexe 2 - hypothèses et résultats du secteur des transports	185
	Annexe 3 - hypothèses et résultats du secteur de l'industrie et de l'agriculture	198
	Annexe 4 - production d'énergie - hypothèses et résultats	205

Partie 1 -

Démarche et méthodologie

Le scénario négaWatt 2011 est le résultat de l'application prospective, à l'échelle de la France et à l'horizon 2050, d'une démarche systématique basée sur l'analyse des besoins de services énergétiques et la recherche des solutions les plus soutenables pour les satisfaire.

1. Démarche du scénario

Les crises énergétiques auxquelles la France et l'ensemble de la communauté internationale sont aujourd'hui confrontés trouvent leur source dans la croissance non maîtrisée de modes de production et de consommation de l'énergie peu durables. Dès lors, un travail sur la demande d'énergie est indispensable avant d'engager la substitution par d'autres sources d'énergie.

1.1. Démarche négaWatt

L'Association négaWatt a fondé, depuis sa création en septembre 2001, toute son action sur une philosophie simple. Celle-ci commence par remettre la question énergétique dans le bon sens en partant des usages et non des ressources : c'est de nous chauffer, de nous éclairer ou de nous déplacer dont nous avons besoin, et non de bois, d'uranium ou de pétrole.

Elle s'interroge sur les moyens les plus soutenables de satisfaire nos besoins de services énergétiques en appliquant une démarche en trois temps :

- la sobriété tout d'abord, qui consiste à interroger nos besoins puis agir à travers les comportements individuels et l'organisation collective sur nos différents usages de l'énergie, pour privilégier les plus utiles, restreindre les plus extravagants et supprimer les plus nuisibles ;
- l'efficacité ensuite, qui consiste à agir, essentiellement par les choix techniques en remontant de l'utilisation jusqu'à la production, sur la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire un service énergétique donné ;
- le recours aux énergies renouvelables enfin, qui permet, pour un besoin de production donné, d'augmenter la part de services énergétiques satisfaite par les énergies les moins polluantes et les plus soutenables.

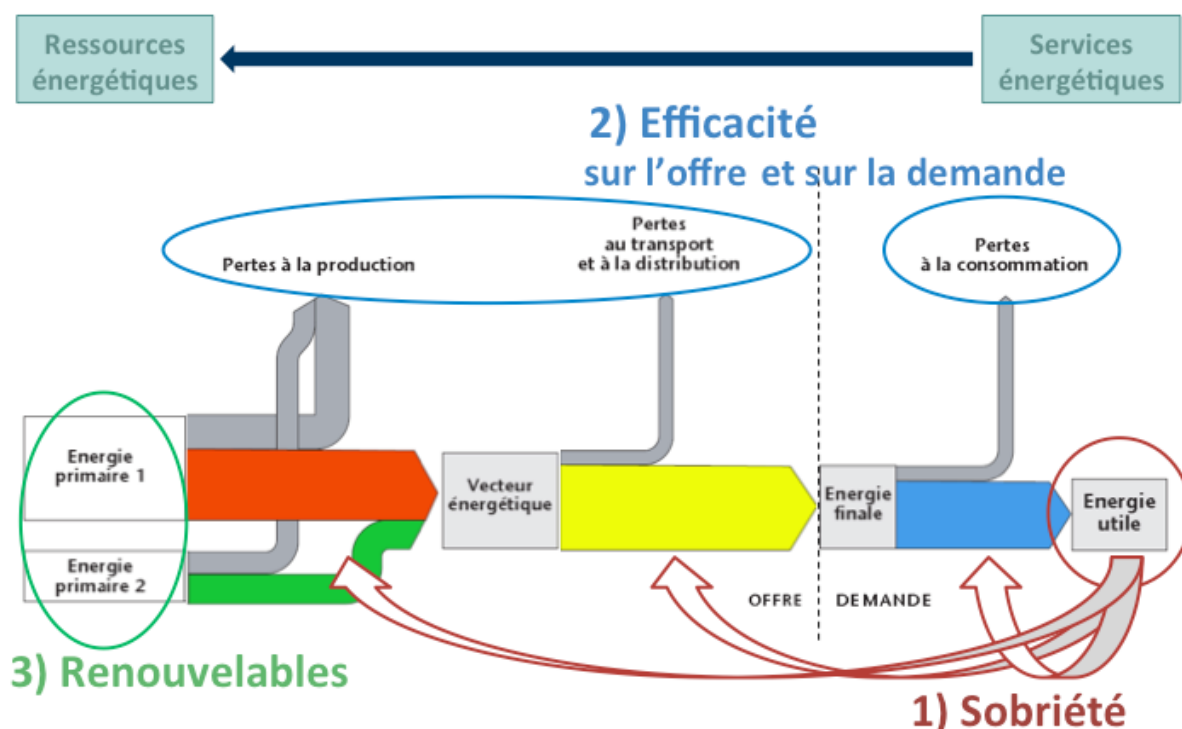


Figure 1 : Priorités de la démarche négaWatt

Bien dimensionner notre niveau d'éclairage puis recourir à des luminaires à très basse consommation permet par exemple de diviser par cinq ou davantage le besoin d'électricité correspondant sans diminuer le service rendu : ce sera d'autant plus simple de produire celle-ci par des énergies renouvelables. Cet exemple simple est transposable à l'ensemble de nos usages de l'énergie, des plus anecdotiques aux plus structurants.

La démarche négaWatt consiste à réfléchir à la demande en énergie, dépendante des équipements et comportements individuels et collectifs, donc des usages de l'énergie, avant de s'intéresser à l'offre d'énergie, cette dernière ne se limitant pas aux quantités d'énergie primaire disponible : les réseaux ont bien entendu un rôle structurant dans le dimensionnement de l'offre.

1.2. Crises et contraintes

Cette démarche est la seule à même de répondre aux défis toujours plus pressants liés à l'énergie. Il y a en effet urgence du côté des impacts comme du côté des ressources.

La croissance de la consommation d'énergies fossiles (charbon pétrole et gaz naturel) n'est pas soutenable. D'une part, elle accroît les émissions mondiales de gaz à effet de serre, qui nous entraînent toujours plus vite vers un risque de dérèglement climatique aux conséquences difficilement calculables. D'autre part, elle accélère l'épuisement de réserves qui ne sont pas infinies, nous rapprochant chaque jour un peu plus de tensions géostratégiques et économiques majeures.

La catastrophe de Fukushima, vingt-cinq ans après celle de Tchernobyl, nous rappelle que l'énergie nucléaire ne constitue pas une alternative acceptable, d'autant plus qu'elle reste cantonnée à un rôle marginal en fournissant moins de 3 % de la consommation finale d'énergie dans le monde.

À l'inverse, l'ensemble des énergies renouvelables, qui fournissent d'ores et déjà plus de 13 % de la consommation mondiale, constituent de loin la ressource la plus abondante à notre disposition, et la seule qui le sera sur la durée : l'énergie solaire reçue chaque année sur Terre, dont nous savons récupérer une

partie soit directement, soit via la biomasse, le vent ou le cycle de l'eau, représente plus de 10 000 fois la consommation annuelle mondiale d'énergie.

Alors que les énergies de stock que sont le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium s'épuisent à un rythme très élevé (il nous reste quelques dizaines d'années de consommation pour le pétrole et quelques centaines d'années pour le charbon), les énergies de flux que sont le solaire, l'éolien, l'hydraulique, le bois, la biomasse, le biogaz ou la géothermie sont renouvelables en permanence à l'échelle du passage de l'humanité sur Terre.

Il n'y a d'autre avenir que dans un système énergétique sobre, efficace et basé sur ces énergies de flux. La transition vers cette solution est non seulement souhaitable, elle est surtout possible. À une condition : la décider vite pour pouvoir l'engager sans tarder.

Le temps de l'énergie est un temps long : les infrastructures et l'organisation économique et sociale que nous construisons aujourd'hui pèseront encore sur la production et la consommation d'énergie bien au-delà de la première moitié du siècle. L'horizon de 2050, c'est déjà après-demain !

Pourtant notre conduite est de plus en plus dictée par le court terme. Obnubilés par la satisfaction immédiate de nos besoins de consommation, obsédés par la croissance du PIB, aveuglés par les exigences financières des marchés, nous faisons de plus en plus comme si nous comptions sur les bonnes fées du Progrès pour nous donner à temps, d'un coup de baguette magique, les moyens d'échapper au pire.

L'urgence de notre mise en mouvement est d'autant plus vitale que les risques auxquels nous devons faire face ont un caractère cumulatif : chaque goutte de pétrole consommée nous rapproche de la pénurie, chaque gramme de CO₂ lâché dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre des décennies après son émission, chaque année supplémentaire de fonctionnement d'un réacteur nucléaire le rend plus dangereux. Remettre les changements de fond à plus tard, c'est avoir la certitude d'arriver trop tard.

1.3. Scénario

Intégrer les impératifs du long terme dans nos décisions de court terme, voilà par où commencer. Il nous faut non seulement nous accorder sur une vision désirable à un horizon de la moitié de ce siècle, mais aussi sur la trajectoire qui relie concrètement notre situation actuelle à cet objectif lointain : ce n'est qu'à travers la visualisation d'un avenir acceptable qu'un scénario prospectif trouve son sens.

Face à la faiblesse des scénarios officiels français sur la sobriété, l'efficacité et les renouvelables, l'Association négaWatt a publié dès 2003 son propre scénario, actualisé en 2006. Débattu et reconnu, il a inspiré certaines mesures du « Grenelle de l'environnement » qui ont légèrement infléchi la trajectoire énergétique française, mais celle-ci reste très éloignée d'une tendance soutenable sur le long terme. Malgré quelques timides avancées d'ailleurs remises en cause depuis, les mesures prises sont loin de répondre aux objectifs pourtant relativement ambitieux à l'horizon 2020. Mais le plus grave est que, faute d'une vision claire, rien n'est réellement engagé pour accélérer la transition au-delà de ce point intermédiaire.

Forte de son expérience et face à l'urgence croissante, l'Association négaWatt a jugé nécessaire d'actualiser son scénario. Cette nouvelle version 2011, portant sur la période 2011-2050, est le fruit d'un travail collectif de plus d'un an autour d'un noyau d'une quinzaine d'experts et de praticiens de l'énergie contribuant à titre strictement personnel.

1.4. Fondamentaux du scénario

Le scénario « 100 % négaWatt », porteur d'une ambition accrue, repose sur quelques principes fondamentaux :

- Au-delà d'un optimum « technico-économique » des différentes énergies, ce scénario repose sur

les principes d'un développement soutenable, incluant des critères environnementaux, sociaux et économiques dans la hiérarchisation des solutions. Concrètement, cela signifie qu'il explore systématiquement les « gisements de négaWatts » de la sobriété et de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs avant de s'intéresser à la production, puis qu'il privilégie les énergies de flux par rapport aux énergies de stock. Ceci conduit à écarter la construction de nouveaux réacteurs nucléaires ainsi que le recours aux technologies de « capture et séquestration de carbone ».

- Le scénario ne repose sur aucun pari technologique. Des « ruptures » ne sont pas à exclure d'ici à 2050 mais elles sont impossibles à prévoir. Le scénario ne retient que des solutions jugées réalistes et matures, c'est-à-dire dont la faisabilité technique et économique est démontrée même si elles ne sont pas encore très développées au niveau industriel. Il dessine ainsi une trajectoire robuste tout en restant ouvert aux évolutions futures.
- L'objectif du scénario ne se réduit pas à la lutte contre le changement climatique. Il ne suffit pas de « décarboner » l'énergie mais il faut réduire l'ensemble des risques et des impacts liés à notre modèle énergétique. Les contraintes sur l'eau, les matières premières ou l'usage des sols doivent également être prises en compte. Sur ce dernier point, le scénario est couplé avec Afterres2050, un scénario centré sur les utilisations de la ressource biomasse pour l'alimentation, l'énergie et les matériaux et développé selon une démarche similaire à celle de négaWatt par l'association Solagro, spécialiste reconnue du domaine.

Le scénario négaWatt 2011-2050 propose ainsi une trajectoire énergétique ambitieuse mais réaliste et conforme à un principe central du développement soutenable : « léguer aux générations futures des bienfaits et des rentes plutôt que des fardeaux et des dettes ».

2. Méthodologie

La démarche de prospective centrée sur les services énergétiques pour remonter aux productions d'énergie induit une modélisation de type « bottom-up » basée sur un découpage sectoriel des usages de l'énergie. Cette modélisation repose sur un modèle purement physique, qui se démarque ainsi des exercices prospectifs classiques basés sur des modèles économiques.

2.1. Modèle

La transition énergétique engage évidemment une transformation économique et sociale de la société, mais ce sont bien les contraintes imposées par les données physiques qui déterminent les évolutions décrites par le scénario négaWatt.

Les modèles macro-économiques aujourd'hui dominants, utilisés notamment par l'État, sont fondés sur le principe que c'est le « moindre coût » à un instant donné pour un acteur économique donné qui doit guider les choix en matière d'énergie. Ainsi, les signaux économiques – essentiellement de court terme – guident la trajectoire énergétique plutôt que le contraire.

Or, il n'y a aucune raison de penser que cette règle puisse conduire à une trajectoire conforme à l'intérêt général de long terme vis-à-vis des contraintes physiques sur les ressources énergétiques et leurs impacts.

Le modèle utilisé pour la version 2011 du scénario négaWatt ne permet pas de relier directement choix énergétiques et mesure du PIB ; ceci a fait l'objet d'études complémentaires à ce scénario. Il permet en revanche de définir, à partir d'une évolution des usages, des vecteurs et des sources d'énergie, les grandes lignes du contenu en croissance et en emplois d'une transition énergétique dont la pratique de terrain et les exemples à l'étranger nous indiquent qu'elle peut être porteuse d'une véritable dynamique économique et sociale, surtout si on la compare aux conséquences de l'inaction...

Le scénario 2011 s'appuie sur une méthodologie et un modèle considérablement renforcés pour représenter de manière très fine au sein d'un « plan directeur dynamique » l'évolution du système énergétique français en termes d'usages et de ressources.

Le modèle repose sur une analyse remontante (« bottom-up ») en cinq étapes à partir des services énergétiques, répartis entre trois grandes catégories :

- la chaleur, qui regroupe le chauffage et la climatisation des bâtiments du résidentiel et du tertiaire, l'eau chaude sanitaire, la cuisson des aliments, et la chaleur utilisée dans les processus industriels ;
- la mobilité, soit l'ensemble des déplacements de personnes, de matières premières et de biens ;
- l'électricité spécifique incluant l'éclairage, l'électroménager, l'informatique, la bureautique et les moteurs électriques utilisés dans l'industrie ou le bâtiment, pour les ascenseurs par exemple.

Ces services sont analysés par secteur d'activité (habitat, tertiaire, transports, industrie, agriculture) dans autant de « modules » qui intègrent plusieurs milliers de paramètres relevant de la sobriété et de l'efficacité pour fournir un chiffrage des besoins résiduels en énergie année par année. À titre d'exemple, l'utilisation de l'électricité spécifique dans le secteur de l'habitat est découpée en 19 catégories de produit (lave-linge, éclairage, hi-fi, etc.) eux-mêmes dépendants de nombreux paramètres (exemple de paramètres : pourcentages de cycles à 30°C pour le lave-linge et consommation unitaire de ces cycles, répartie entre la consommation du moteur et la consommation nécessaire au chauffage de l'eau). Ces milliers de paramètres agrégés permettent de déterminer les besoins en énergie sur l'ensemble des 40 années étudiées dans le scénario négaWatt.

Un choix du « vecteur énergétique » le plus approprié - combustible (gazeux, liquide ou solide), carburant (gazeux, liquide ou solide), chaleur, électricité - pour répondre à chaque besoin est ensuite effectué de façon à pouvoir remonter aux besoins en énergie finale, celle qui est délivrée aux consommateurs pour

chacun de leurs usages. De même, on remonte ensuite des consommations finales aux besoins en ressources primaires (pétrole, gaz, uranium, énergies renouvelables) produites en France ou importées.

Ces besoins sont mis d'abord en face du potentiel de production des énergies renouvelables, en fonction de leur stade de développement filière par filière, puis du rythme de fermeture des réacteurs nucléaires. Enfin les énergies fossiles servent de variable d'ajustement pour fournir le complément de production et assurer l'équilibre entre offre et demande.

Pour l'électricité cet équilibre ne doit pas être assuré seulement en moyenne sur l'année mais à tout instant : le croisement de courbes-type de répartition de la consommation selon les usages et de production selon les filières permet, en intégrant différentes solutions de flexibilité, un équilibre heure par heure pour chaque année jusqu'à 2050.

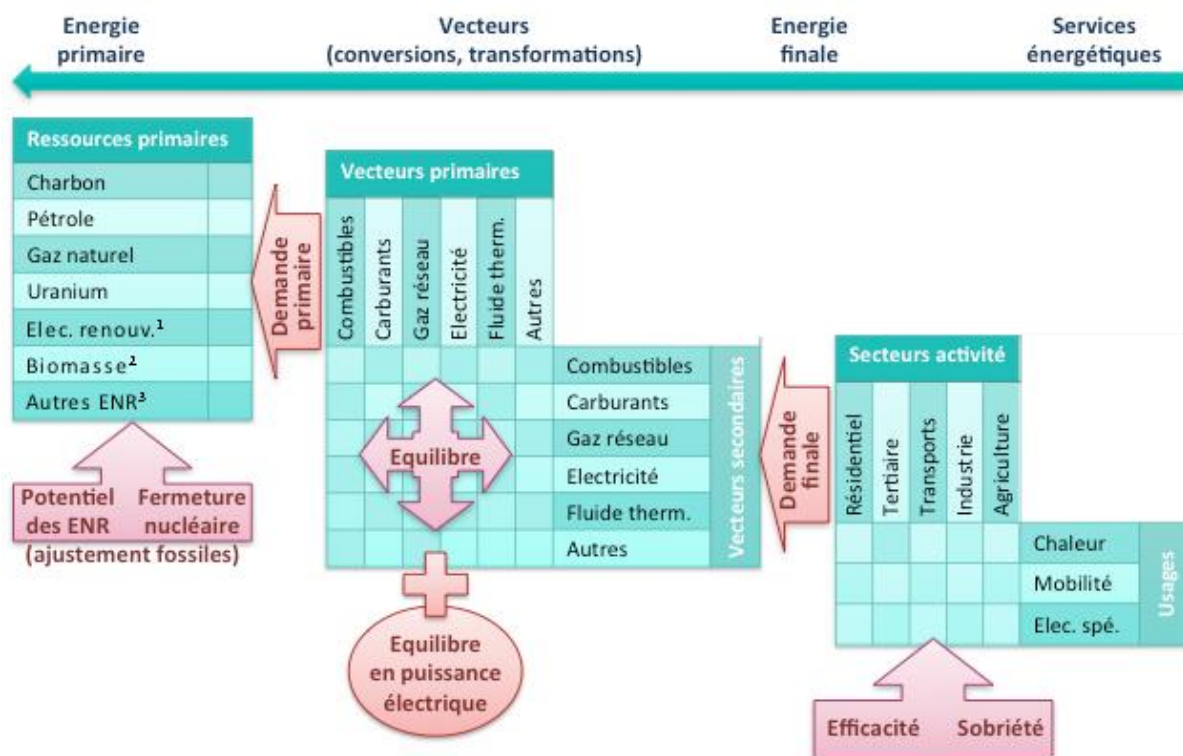
Cet outil est basé sur :

- des courbes-type de répartition de la consommation selon les usages ;
- des courbes-type de production selon les filières.

Ces courbes de production et de consommation sont croisées pour déterminer les situations de l'équilibre offre-demande (surproduction ou surconsommation), heure par heure. Ce calcul dynamique permet de déterminer :

- les différentes solutions de flexibilité, comme l'effacement et le stockage ;
- la contribution des filières « pilotables » : thermique à flamme, hydraulique de barrage, etc.

L'équilibre offre-demande en électricité est ainsi pris en compte, ainsi que les consommations d'énergie fossile nécessaires à cet équilibre, le cas échéant.



¹ Electricité primaire d'origine renouvelable : hydraulique, éolien, photovoltaïque, énergies marines...

² Biomasse solide, biomasse liquide et biogaz.

³ Autres énergies renouvelables : solaire thermique, géothermie, déchets ménagers...

Figure 2 : Démarche de modélisation du scénario négaWatt 2011

Une remarque méthodologique importante : toutes les productions et consommations d'énergie ont été exprimées en TWh PCS (TéraWatt heures, avec Pouvoir Calorifique Supérieur). Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) ne prend pas en compte l'énergie de vaporisation de l'eau présente en fin de réaction (chaleur latente), contrairement au PCS. Ce choix augmente donc les quantités d'énergie considérées par rapport au PCI (car $PCS = PCI + \text{chaleur latente de l'eau}$) pour plusieurs vecteurs :

- pour la biomasse solide, augmentation de 9 % ;
- pour les combustibles liquides, augmentation de 8 % ;
- pour le GPL, augmentation de 9 % ;
- pour le combustible gazeux, augmentation de 11 %.

2.2. Hypothèses de cadrage

Tout scénario a besoin d'une année de référence, en principe la plus récente pour laquelle les statistiques sont disponibles : c'était logiquement l'année 2005 pour le scénario publié en 2006, c'est l'année 2010 pour sa version 2011. Dès lors que l'horizon de temps reste 2050, ceci n'est pas indifférent : cela fait cinq années de moins pour agir alors même que l'urgence s'est accrue...

Le point de départ 2010 du scénario est une reconstitution du paysage énergétique, à partir d'une démarche *bottum-up* : c'est l'agrégation de l'ensemble des usages de l'énergie, à partir de statistiques, qui permet d'obtenir la consommation totale d'énergie finale puis primaire. Cette démarche permet de valider l'outil utilisé mais peut entraîner quelques écarts à la marge entre les bilans officiels et la situation du scénario négaWatt en 2010.

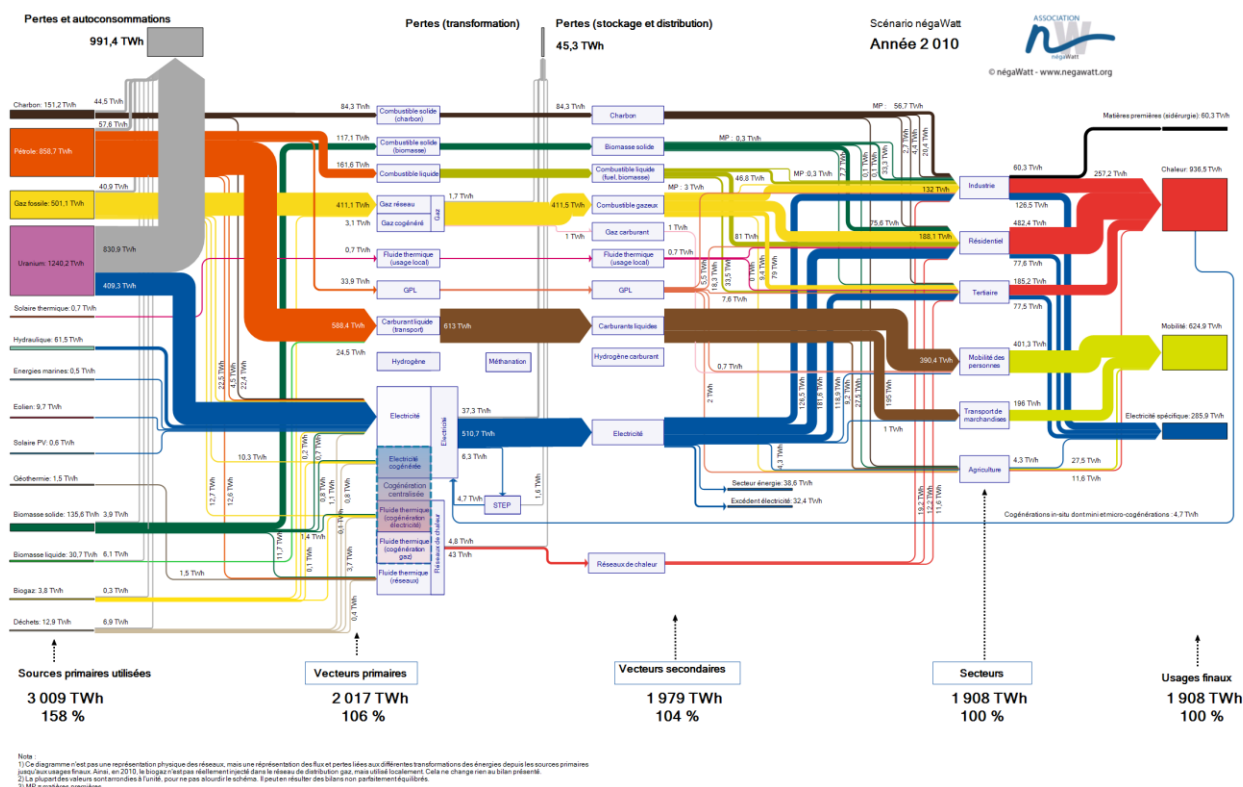


Figure 3 : Diagramme de Sankey - Bilan énergétique de la France pour 2010

Du point de vue géographique, le modèle se limite à la France métropolitaine et n'intègre les évolutions qu'à l'intérieur de cette « frontière ». La France du scénario négaWatt s'inscrit dans une logique d'autosuffisance, ou « d'autonomie énergétique » et non d'autarcie. Elle n'est pas pour autant repliée sur

elle-même : elle continue à échanger avec les pays étrangers, mais elle réduit sa dépendance énergétique, y compris pour l'électricité.

Sur le plan démographique, le scénario s'appuie sur l'hypothèse médiane de l'INSEE¹ jusqu'en 2040, puis sur une extrapolation jusqu'à 2050. Ainsi, la population augmente jusqu'à 72,3 millions d'habitants vers 2050, une prévision largement supérieure à la précédente (datant de 2003), où la population se stabilisait entre 2035 et 2045 aux alentours de 64,5 millions d'habitants, avant de diminuer légèrement vers 2050. Ce sont donc 7 millions de personnes supplémentaires dont les besoins sont à satisfaire.

En parallèle à cette hausse démographique, le scénario intègre certaines évolutions spécifiques à d'autres domaines qui peuvent se différencier des projections de l'INSEE. Le scénario prend en compte les nécessaires changements dans notre rapport au territoire : nous devons retrouver le sens des distances et de l'espace que nous avons perdu au cours des dernières décennies. L'étalement urbain, l'éloignement des lieux d'activité et de résidence, l'allongement des circuits de consommation, l'artificialisation des sols, ont pris des proportions insoutenables – et pas seulement du point de vue énergétique. Le modèle intègre un ralentissement de ces phénomènes grâce aux mesures proposées par ailleurs dans une logique de cohérence entre les différents secteurs.

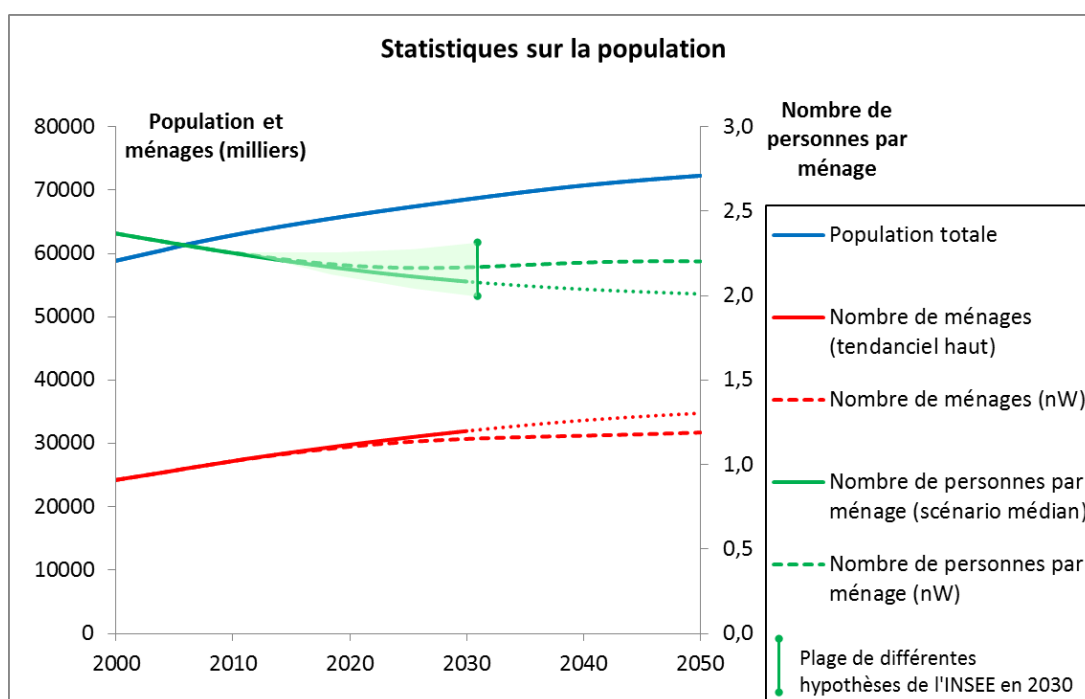


Figure 4 : Évolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négawatt)

D'autre part, les événements observés depuis 2005 tels que le Grenelle de l'environnement ou la crise économique de 2008 ont conduit à revoir la manière de bâtir le scénario tendanciel. Construit sur le même modèle que le scénario négawatt, il vise à décrire ce qui se passerait si les évolutions actuelles étaient poursuivies sans engager les changements proposés.

Ainsi le scénario tendanciel 2011-2050 intègre une relative stabilisation de la consommation d'énergie à long terme, qui reflète une compensation entre les efforts d'économie d'énergie d'un côté, la croissance de la population et le développement des services énergétiques de l'autre. Du côté de la production, ce

¹ Projections de population à l'horizon 2060, INSEE, octobre 2010.

scénario projette un maintien de la capacité nucléaire d'une part, un développement modéré et non soutenu dans la durée des énergies renouvelables d'autre part.

Partie 2 -

Sobriété et efficacité énergétiques : analyse sectorielle sur la demande

La demande de services énergétiques et son analyse prospective sont traitées pour chacun des grands secteurs de l'économie. Plus précisément, l'approche basée sur les services énergétiques de négaWatt conduit à croiser les trois grandes catégories d'usages de l'énergie (chaleur, mobilité, électricité spécifique) avec les principaux secteurs en distinguant résidentiel, tertiaire, transports, industrie et agriculture. L'objectif du scénario est d'explorer les potentiels réalistes de réduction des consommations d'énergie sur chacun de ces usages et dans chacun de ces secteurs par la maîtrise individuelle et collective des services énergétiques utiles (sobriété) d'une part, et par la maîtrise des conditions techniques de fourniture de ces services (efficacité) d'autre part, tout en identifiant les potentiels correspondants de substitution des sources d'énergie nécessaires à cette fourniture (renouvelables).

Les enjeux respectifs sur les différents usages de l'énergie et les leviers d'action diffèrent selon les secteurs et justifient un traitement distinct de chacun d'entre eux. Dans le même temps, les différents secteurs participent d'une même activité économique et d'une même organisation sociale et ne peuvent être totalement dissociés : la modélisation impose de croiser de façon cohérente les évolutions liées de ces secteurs (à titre d'exemple, la rénovation du parc de logements existants entraîne une hausse de la production d'isolant dans le secteur industriel). La typologie des usages et des secteurs est agrégée dans la suite selon une logique tenant compte de ces enjeux et de ces interactions tout en remontant, du point de vue de l'activité économique, des services vers la production secondaire et primaire.

Ainsi, l'évolution de la demande d'énergie dans le scénario négaWatt 2011 est présentée selon les secteurs et usages suivants :

- les secteurs résidentiel et tertiaire, qui génèrent des besoins de services énergétiques du même type, concentrés sur l'ensemble des besoins en électricité spécifique des équipements et des besoins de chaleur dans les bâtiments. On traite successivement :
 - les services énergétiques fournis par les équipements électriques dans le résidentiel d'une part et dans le tertiaire d'autre part, qui portent uniquement sur des usages spécifiques de l'électricité ;
 - les usages liés à la chaleur, regroupant le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation et la cuisson des aliments, dans le résidentiel d'une part et dans le tertiaire d'autre part.
- le secteur des transports, qui concentre bien sûr l'essentiel des usages de mobilité. On distingue au sein de ce secteur :
 - la mobilité des personnes, qui reste très liée aux activités de service, et dont la modélisation tient notamment compte d'éléments d'aménagement du territoire croisés avec la prospective sur les secteurs résidentiel et tertiaire traités précédemment ;
 - le transport de marchandises, qui est davantage lié aux activités productives, et dont la modélisation tient notamment compte d'éléments liés à la relocalisation d'activités et à l'évolution des besoins de production croisés avec la prospective sur les secteurs industriel et agricole traités ensuite ;
- les secteurs de production de biens et d'équipements, au sein desquels on distingue :

- le secteur de l'industrie, qui fait appel pour ses procédés et son fonctionnement à des usages de chaleur et d'électricité spécifique, et pour lequel on analyse la demande en partant des besoins de production de biens et d'équipements, en lien avec les secteurs précédents, pour remonter à des besoins de production primaire ;
- le secteur de l'agriculture, qui génère ses propres besoins de services énergétiques en chaleur, mobilité et électricité spécifique mais qui est surtout envisagé sous l'angle des contraintes d'usage des sols et de sa contribution, au-delà des besoins alimentaires, à la production d'énergie et de matériaux.

Pour chacun des secteurs ainsi identifiés, l'analyse prospective est présentée en suivant globalement un même déroulé, visant à préciser à la fois dans quel esprit, avec quelle méthode et selon quelles hypothèses cette analyse a été conduite, et pour quels résultats. Ainsi, on présente pour chacun d'entre eux :

- la vision directrice à long terme issue de la réflexion prospective sur l'application de la démarche négaWatt au secteur considéré, qui fixe à la fois, compte tenu des enjeux et contraintes énergétiques globales et des caractéristiques de chaque secteur, le type d'objectif à atteindre et la nature des transformations à réaliser,
- la méthode de représentation prospective de la trajectoire correspondante, qui précise à la fois les choix de désagrégation sur les usages et les facteurs d'évolution en sobriété et en efficacité de chacun d'entre eux, les données utilisées et les hypothèses d'évolution retenues,
- les résultats issus de la modélisation, en particulier l'évolution pour chaque secteur des services énergétiques fournis, des besoins en énergie finale correspondants et de leur répartition.

1. Résidentiel et tertiaire

Les besoins d'énergie dans les bâtiments sont, même si leur finalité est différente, sensiblement de même nature dans les secteurs résidentiel et tertiaire. En termes de méthode, la modélisation du scénario négaWatt les distingue tout en leur appliquant une même approche. C'est pourquoi ces deux secteurs sont regroupés pour cette analyse. L'ensemble des consommations d'énergie dans ces bâtiments représente un poids majeur dans le bilan énergétique actuel : plus de 40 % de notre consommation d'énergie finale.

Ces besoins d'énergie recouvrent des usages divers qu'il convient de distinguer dans l'analyse. Ils sont regroupés dans la suite selon deux grandes catégories. La plus importante concerne l'ensemble des consommations énergétiques directement liées à des besoins de chaleur dans les bâtiments, ce qui inclut le chauffage des locaux, mais aussi la climatisation, la fourniture d'eau chaude sanitaire et la cuisson. Cette catégorie représente plus de 80 % de la consommation d'énergie finale des bâtiments, et 35 % de la consommation finale d'énergie française. Le reste des usages regroupe l'ensemble des consommations d'électricité spécifique tels que l'éclairage, l'électro-ménager, la bureautique, l'audiovisuel, la gestion des bâtiments (VMC, auxiliaires et pompes), etc. Cet ensemble représente 8 % de la consommation finale d'énergie française.

L'évolution des consommations en électricité spécifique et en cuisson dans le résidentiel et dans le tertiaire repose essentiellement sur les caractéristiques et sur les conditions d'utilisation des équipements concernés. Les leviers d'action pour maîtriser ces consommations d'énergie sont ainsi généralement plus simples, et plus rapides à mettre en œuvre, que les leviers d'action sur les autres usages (chaleur hors cuisson) qui incluent des facteurs liés à la taille ou à l'enveloppe des bâtiments dont l'inertie est beaucoup plus grande. Aussi, on traite dans cette partie d'abord les différents usages liés aux équipements électriques et à la cuisson, avant les autres usages liés à la chaleur.

1.1. Évolution des secteurs résidentiel et tertiaire

Les consommations d'énergie liées à l'occupation et à l'usage des bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire sont, en amont des comportements et des équipements associés à ces usages, déterminées par le volume global du parc de bâtiments. Il convient donc, avant d'analyser la consommation d'énergie associée à chacun des services énergétiques fournis dans ces bâtiments, de préciser l'évolution des parcs de bâtiments résidentiels et de bâtiments tertiaires. Dans la mesure où l'évolution de ces parcs résulte de choix sociétaux, la démarche négaWatt s'applique dès cette étape en distinguant une évolution tendancielle et une inflexion résultant de l'application de cette démarche aux besoins de bâtiments résidentiels et tertiaires.

1.1.1. Vision directrice

L'évolution du parc de bâtiments influence directement les besoins de services énergétiques liés aux activités domestiques, de services et de loisirs assurées dans ces bâtiments et aux usages de la chaleur pour le chauffage ou la climatisation des locaux et pour l'eau chaude sanitaire. Cette influence s'exerce à double titre.

D'une part, la densité d'activités rapportée à la surface des bâtiments favorise une mutualisation des équipements qui est favorable du point de vue énergétique. Ainsi par exemple, le nombre moyen d'habitants par logement joue sur le nombre de salons à éclairer, de frigidaires à maintenir froids, de casseroles à chauffer ou d'équipements de ventilation à faire fonctionner. De la même manière, le degré de concentration ou de dispersion des activités tertiaires conditionne le degré de mutualisation de services énergétiques tels que l'éclairage, les auxiliaires et réseaux informatiques, ou la production d'eau chaude sanitaire.

D'autre part, et c'est le facteur le plus important, la surface globale des logements conditionne les besoins de services énergétiques les plus directement liés au nombre de mètres carrés : il s'agit notamment des besoins d'éclairage, de chauffage et de climatisation.

Ainsi, à niveau équivalent d'usage dans les locaux et d'efficacité de la fourniture des services, la surface globale des bâtiments et la densité d'occupation de ces bâtiments apparaissent comme deux facteurs importants de maîtrise des consommations d'énergie. Outre ces bénéfices directs, l'évolution positive de ces deux facteurs est également porteuse de bénéfices indirects du point de vue de l'énergie et de l'environnement. Cette évolution a par ailleurs un impact positif sur les transports, lié à la densification, ou encore sur l'artificialisation des sols grâce à la limitation des nouvelles surfaces pour l'extension du parc bâti, qui sont compatibles avec les évolutions dessinées par ailleurs dans ces secteurs par le scénario négaWatt 2011.

Dès lors, le scénario négaWatt 2011 applique une vision directrice très simple de maîtrise de la croissance à long terme, en nombre et en surface, du parc de bâtiments résidentiels et tertiaires. Comme précisé précédemment, le scénario n'introduit pas de différence avec un scénario tendanciel sur l'évolution de la population française. Il considère en revanche différents facteurs, que l'on peut considérer comme relevant d'une sobriété collective, et agissant sur le volume de bâtiments générant des besoins énergétiques. Dans le résidentiel, il s'agit d'une part d'infléchir l'évolution tendancielle du nombre de personnes par logement, et d'autre part de modifier l'orientation fixée par les nouvelles constructions sur la surface moyenne des logements. Dans le tertiaire, il s'agit de limiter la croissance des surfaces de bâtiments tertiaires en rapportant celle-ci à un niveau de service par habitant.

1.1.2. Évolution du secteur résidentiel

L'évolution du secteur résidentiel est conditionnée par l'évolution brute de la population décrite précédemment, mais aussi par différents facteurs tels que le nombre moyen d'habitants par logement, la part de maisons individuelles et d'appartements en logements collectifs, ou encore la taille moyenne des logements.

Un facteur très important est celui du taux de cohabitation, c'est-à-dire du nombre moyen de personnes par logement. La prévision centrale de l'INSEE retenue pour cet exercice conduit à une population totale de 72,3 millions d'habitants en 2050 et s'accompagne d'une forte tendance à la décohabitation : l'augmentation du nombre de personnes seules, âgées ou non, et des familles monoparentales entraîne une fragmentation accrue des foyers. Ainsi le taux de cohabitation, qui s'établit à 2,25 environ en 2010, diminue régulièrement. En prolongeant au-delà de 2030 la tendance retenue par l'INSEE, on tombe en 2050 à un niveau de cohabitation à peine supérieur à 2. C'est cette évolution que l'on retient dans le scénario tendanciel.

Cohabitation

Le scénario négaWatt 2011 introduit un premier élément de sobriété en projetant une stabilisation du taux de cohabitation autour de 2,2, c'est-à-dire légèrement en-dessous du niveau actuel. Cette trajectoire, même si elle ne correspond pas à la projection centrale de l'INSEE, reste pleinement cohérente avec les projections démographiques : elle s'inscrit parfaitement dans la fourchette de valeurs des différents scénarios retenus par l'INSEE, qui va de 2,0 à 2,3 environ à l'horizon 2030 auquel s'arrêtent ces scénarios.

La tendance à une relative « recohobitation » retenue par le scénario négaWatt ne préjuge pas des évolutions sociétales sur l'éclatement ou le regroupement des familles. Le scénario ne se prononce ni sur l'évolution des familles résidentes en France, ni sur la part de familles dans le solde migratoire positif inclus dans cette projection, puisque l'INSEE intègre un flux migratoire annuel de 100 000 personnes. La stabilisation du nombre de personnes par logement peut faire appel à d'autres ressorts qu'à la politique familiale. Ainsi, la trajectoire peut être obtenue en encourageant par exemple la colocation d'étudiants, la cohabitation entre personnes âgées et personnes actives ou étudiantes seules, l'accession facilitée à l'achat

collectif de logements, l'intégration d'une conception plus modulaire dans la construction de nouveaux logements, etc. En d'autres termes, le maintien d'un certain niveau de cohabitation représente dans le scénario négaWatt un objectif nécessaire, justifiant la mise en place de politiques publiques incitatives.

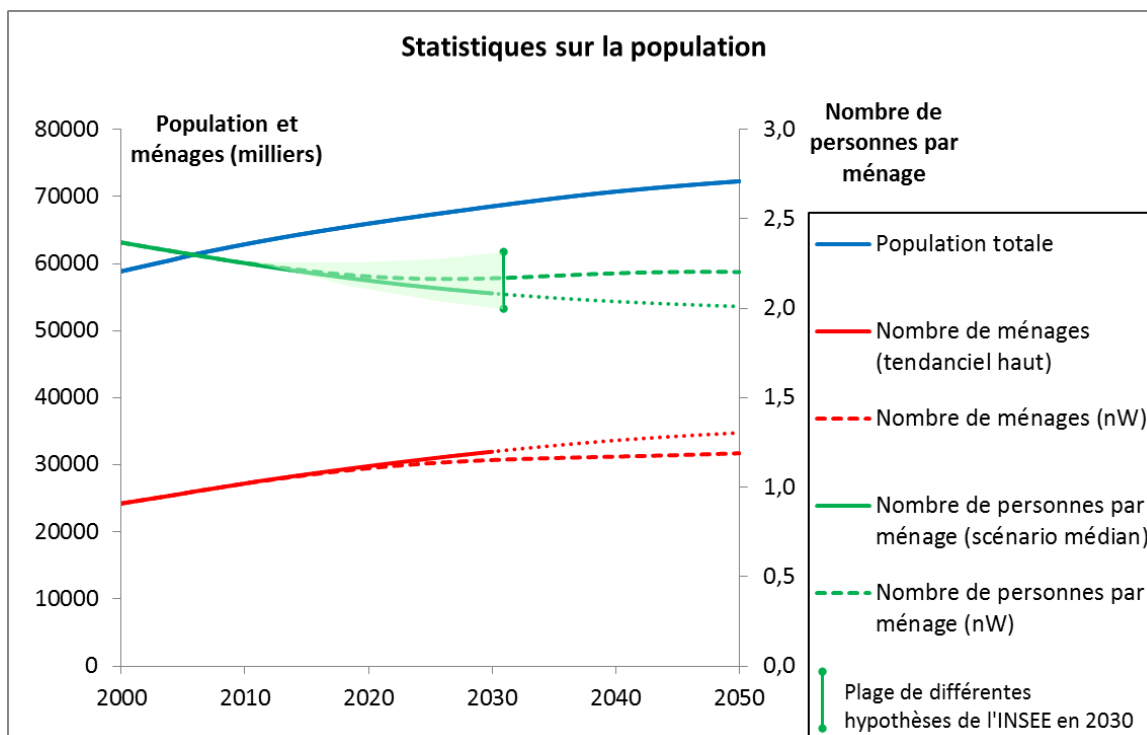


Figure 5 : Évolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négaWatt)

On mesure immédiatement l'importance de ce facteur dès qu'on le traduit en termes de nombre de logements. Compte tenu du même niveau de population retenu dans les deux scénarios en 2050, la différence sur le taux de cohabitation se traduit par un besoin total de 31,7 millions de logements dans le scénario négaWatt, contre 34,7 millions dans le scénario tendanciel, ce qui représente donc 3 millions de logements de plus à construire et à habiter, avec les consommations d'énergie associées.

Ainsi, l'évolution du nombre cumulé de logements est relativement stabilisée dans le scénario négaWatt, par rapport à une augmentation qui se poursuit dans le scénario tendanciel. Cette évolution tient compte des logements construits annuellement et des démolitions de logements vétustes. On considère dans les deux scénarios que le taux de démolition moyen observé par le passé se poursuit à l'identique, c'est-à-dire que 0,12 % des logements sont détruits chaque année.

Taille des logements

Le second facteur de sobriété introduit par le scénario négaWatt porte sur la taille moyenne des logements. Ce facteur porte essentiellement sur la surface des nouveaux logements construits, même si la division de logements existants peut intervenir à la marge. La taille moyenne des nouveaux logements construits en 2010 atteignait 131 m² pour les maisons individuelles et 73 m² pour les logements collectifs, à comparer à une moyenne de respectivement 110 m² et 66 m² pour l'ensemble des logements existants. Dans le neuf, la part de maisons individuelles construites n'a par ailleurs pas cessé de progresser depuis de nombreuses années, pour atteindre 56 % dans les constructions en 2010 ; les maisons individuelles représentent également 56 % du parc installé.

Le scénario négaWatt retient une stabilisation des surfaces de nouveaux logements au niveau des constructions neuves de 2010. La même hypothèse est conservée dans le scénario tendanciel, où ces

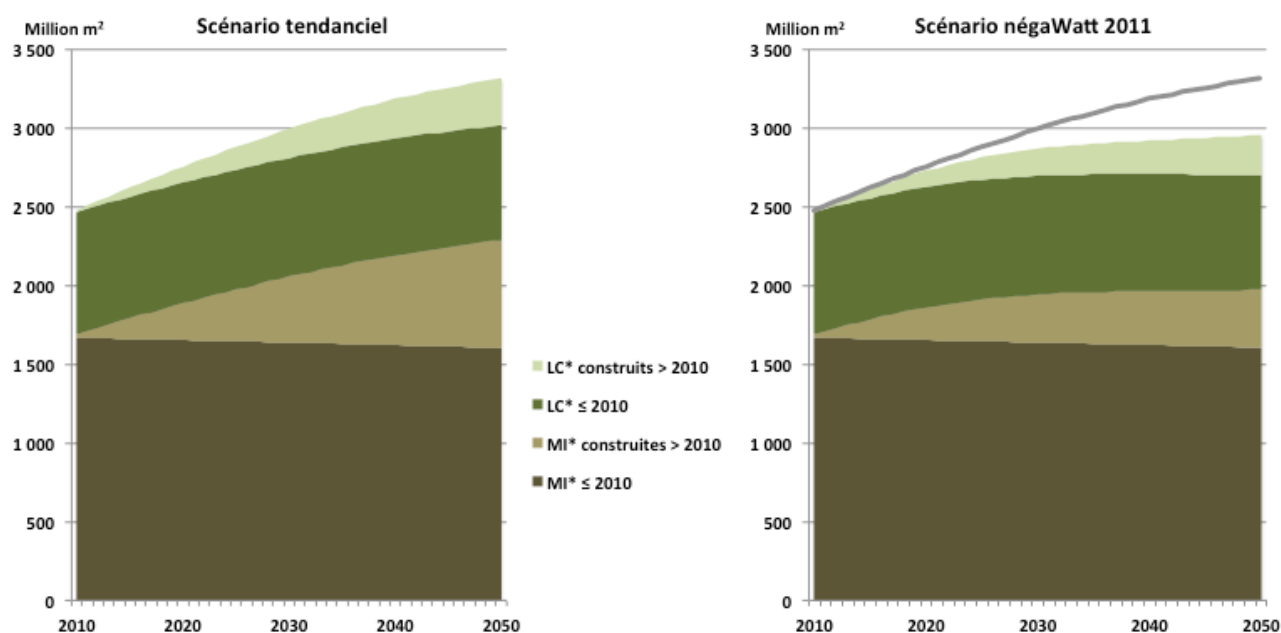
nouveaux logements sont toutefois occupés par moins de personnes en moyenne. Une différence importante est cependant introduite dans la part respective des maisons individuelles et logements collectifs dans les constructions neuves. Dans le scénario tendanciel, cette part continue à progresser lentement puis se stabilise : elle est de 60 % jusqu'en 2050. Dans le scénario négaWatt, au contraire, la part des maisons individuelles dans le neuf diminue et se stabilise à 20 %. Le scénario privilégie derrière ces chiffres une logique d'habitat groupé à taille humaine plutôt que l'étalement périurbain en maisons individuelles - non viable à long terme - ou la construction de grands ensembles collectifs.

Résultats

Les inflexions introduites dans le scénario négaWatt 2011 par rapport à une projection tendancielle se traduisent par une augmentation plus modeste du nombre total de logements, qui augmente de 17 % entre 2010 et 2050, contre une augmentation de 28 % dans le tendanciel. Compte tenu des orientations fixées sur la surface des logements, la surface totale de logements augmente de 19 % dans le scénario négaWatt (+17 % pour la surface de maisons individuelles, +25 % pour la surface de logements collectifs).

Mais l'indicateur qui se rapproche le plus des services énergétiques liés à l'occupation et à l'usage des logements est au final celui de la surface habitable par habitant. Cet indicateur reflète les variations introduites sur les deux facteurs que sont le nombre de personnes par logement et la taille moyenne des logements. La surface moyenne habitable par personne était de 36,5 m² en 2000 et elle peut être estimée à 39,4 m² en 2010.

Dans le scénario négaWatt, la surface moyenne par personne continue d'augmenter très légèrement puis se stabilise pour s'établir à 40,9 m² en 2050 (45,9 m² dans le scénario tendanciel). Les choix relatifs à l'habitat proposés dans le scénario négaWatt conduisent de plus, au-delà de cette moyenne, à un rééquilibrage autour de la moyenne des disparités de surface habitable par personne, alors que les écarts importants observés dans ce domaine continuent de s'accroître dans le scénario tendanciel.



*LC : logements collectifs - MI : maisons individuelles

Figure 6 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la surface totale de logements

Hypothèses détaillées et chiffrées en Annexe 1 - Tableau 14 : Évolution du secteur résidentiel

1.1.3. Évolution du secteur tertiaire

L'évolution du secteur tertiaire est également mesurée, du point de vue des services énergétiques, en termes de mètres carrés de surface de bâtiments. Cette surface est déterminée par le facteur démographique, c'est-à-dire le nombre de personnes à servir, mais aussi par l'intensité en services tertiaires, c'est-à-dire la quantité de services à fournir par habitant, et par la densité d'activité dans les bâtiments tertiaires, c'est-à-dire la quantité de services fournis par m² de surface tertiaire.

La modélisation du secteur tertiaire repose sur une évolution des surfaces de bâtiments reliée à des besoins de services différenciés par activité, en retenant pour cette analyse la sectorisation statistique usuelle des services en huit sous-secteurs :

- cafés, hôtels et restaurants ;
- habitat communautaire ;
- santé et action sociale ;
- enseignement et recherche ;
- sport et loisirs ;
- bureaux et administrations ;
- commerce ;
- transport.

La surface totale des bâtiments du tertiaire selon ce découpage sectoriel représentait en 2010 près de 930 millions de m², soit toutes catégories confondues 14,8 m² par personne en moyenne. Ces surfaces ont connu ces dernières années une croissance forte bien que différenciée selon les secteurs. Le scénario tendanciel projette une poursuite linéaire des taux de croissance des surfaces observés dans chacune des catégories.

Le scénario négaWatt introduit par rapport à cette projection tendancielle un facteur de sobriété sur l'accroissement des surfaces. Il retient pour cela un principe simple de calage des surfaces de bâtiments tertiaires sur l'accroissement démographique des populations. Cette hypothèse permet de maintenir un accroissement des services : à surface de bâtiments tertiaires par habitant globalement constante, l'efficacité qui peut être introduite par ailleurs dans la densité de services fournis par unité de surface permet un progrès de l'intensité de services procurés aux populations. De plus, conformément à la démarche négaWatt, l'activité de services se recentre dans chaque secteur sur les services dont l'utilité relative est jugée la plus grande ; au-delà d'un progrès de l'intensité de services, le but recherché est un progrès en utilité des services.

La progression des surfaces de bâtiments tertiaires est donc contenue et mise en adéquation avec l'augmentation des populations. Le scénario négaWatt tient compte pour appliquer cette logique d'une évolution relative des différentes classes d'âge au sein de la population telle qu'elle est projetée par l'INSEE. En effet, les services fournis par les différentes catégories sectorielles tertiaires ne s'adressent pas de façon homogène à toutes les classes d'âge de la population. Pour refléter *a minima* ce facteur sans entrer dans une analyse socio-démographique détaillée, le scénario négaWatt module le taux de croissance de certains secteurs par rapport à des classes données. Ainsi, la croissance des surfaces est rapportée à l'augmentation de la population de moins de 20 ans pour le secteur enseignement et recherche, de la population de 20 à 59 ans pour le secteur bureaux et administrations, et de plus de 60 ans pour les secteurs de l'habitat communautaire et de la santé et de l'action sociale. Elle reste proportionnelle à l'ensemble de la population pour les autres secteurs.

L'introduction de cette sobriété *a minima* entraîne un ralentissement sensible de la croissance des surfaces, qui atteignent au total, tous secteurs confondus, 1 200 millions de m² dans le scénario négaWatt à l'horizon 2050 (contre plus de 1 500 millions de m² dans le tendanciel). La surface de bâtiments tertiaires par habitant, compte tenu d'une surface moyenne par habitant différente selon les secteurs et de la

progression relative de certains secteurs en fonction de classes d'âge de la population, progresse de 12 % pour s'établir à 16,7 m² en 2050.

La différence nette entre les deux scénarios progresse régulièrement pour atteindre un total de 312 millions de m² à l'horizon 2050. Comme évoqué précédemment, cette économie de surfaces n'est pas répartie de façon homogène selon les secteurs. La moitié provient des bureaux et administrations et des commerces.

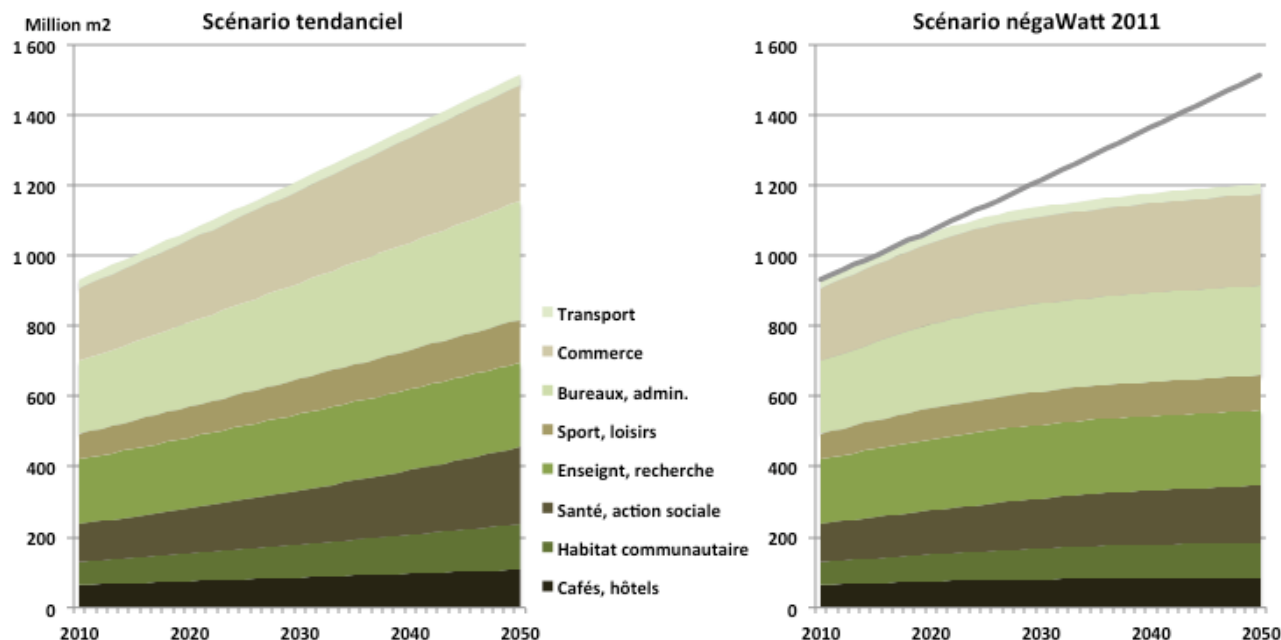


Figure 7 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la surface totale des bâtiments tertiaires

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 15 : Évolution du secteur tertiaire

1.2. Consommation des équipements dans le résidentiel et le tertiaire

Cette section regroupe l'ensemble des consommations liées aux équipements domestiques, aux services généraux et aux équipements tertiaires, hors confort thermique. Cet agrégat comprend, dans l'ordre dans lequel ces points sont détaillés dans la présente section, toute la consommation d'électricité spécifique du secteur résidentiel, puis celle du tertiaire, ainsi que toute la consommation d'énergie pour les usages de cuisson, rassemblant la cuisson domestique et la restauration collective.

1.2.1. Vision directrice

Le secteur de la consommation des équipements en électricité spécifique et pour la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire est celui dont l'inertie est la plus faible dans l'ensemble de notre système énergétique, puisqu'il repose sur des comportements qui peuvent évoluer relativement rapidement et sur des équipements dont le taux de rotation est en général relativement important. En ce sens, la modélisation d'une démarche de sobriété et d'efficacité pour ces usages consiste essentiellement à projeter une évolution possible des caractéristiques des équipements et des comportements en se donnant une ligne directrice.

La modélisation de ces usages intègre bien sûr l'évolution démographique, ainsi que d'autres éléments structurants tels que le nombre total de foyers ou d'établissements tertiaires, tels qu'ils ont été décrits précédemment. Ce premier étage de sobriété est indirectement pris en compte dans la description des usages liés aux équipements domestiques et tertiaires en termes de taux d'équipement, lorsque celui-ci est décrit à partir du nombre de foyers (typiquement comme les lave-linges) ou des surfaces tertiaires.

La vision directrice appliquée dans le scénario négaWatt à ce secteur de consommation repose d'abord sur le constat que la consommation liée aux équipements domestiques et tertiaires recouvre des usages indispensables à notre confort moderne. Aussi, même en appliquant à ce secteur une démarche de sobriété, le scénario négaWatt prévoit un renforcement de la part de ces services dans l'ensemble des services énergétiques. Ainsi, il renforce les usages jugés utiles tout en ajoutant une part de nouveaux usages inconnus pour tenir compte de la tendance sociétale à l'augmentation des services rendus par l'électricité spécifique. Par ailleurs, comme pour l'ensemble des autres secteurs, le scénario n'introduit aucune rupture technologique sur les usages liés aux équipements domestiques et tertiaires.

Dans le même temps, les nombreuses campagnes de mesure dans les logements et les bâtiments tertiaires sur lesquelles le travail de l'Association négaWatt peut s'appuyer dans ce domaine montrent que ce secteur est l'objet de gaspillages importants à la fois par l'absence de sobriété sur les usages (appareils inutilisés en fonctionnement, multiplication des veilles, usages démesurés, etc.), et par la pénétration insuffisante des appareils les plus performants. Ce secteur montre donc un important potentiel de maîtrise de la consommation, relativement facile à atteindre techniquement et qui s'avère un levier essentiel pour réduire en particulier les contraintes sur la composante électrique du système énergétique, à la fois en termes de bilan annuel mais aussi de respect de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité.

Au-delà de l'analyse démographique et sociologique des usages, la modélisation du scénario négaWatt désagrège les consommations d'électricité spécifique en une trentaine d'usages au total pour le résidentiel et le tertiaire, pour lesquels on identifie dans les conditions d'utilisation et la qualité des équipements les principaux facteurs de sobriété et d'efficacité. Le scénario applique ensuite à tous ces usages la même vision directrice, qui consiste à faire évoluer de façon réaliste ces facteurs pour atteindre en moyenne, à l'horizon 2050, les meilleurs niveaux de comportement et de performance actuels, tels qu'ils sont issus de nombreuses campagnes de mesure dans les logements et les bâtiments tertiaires. Cette démarche méthodologique reste très prudente : sur certains postes, les consommations suggérées en 2050 dans ce scénario peuvent être supérieures à celles estimées pour 2030 par la Commission Européenne, avec l'application des nouvelles directives Ecodesign².

1.2.2. Électricité spécifique dans le secteur résidentiel

La modélisation de la consommation d'énergie liée aux usages d'électricité spécifique dans le résidentiel s'appuie sur la désagrégation de cette consommation en 19 services regroupés autour de cinq grands postes, désignés dans le tableau suivant. La démarche négaWatt est appliquée dans le scénario en recherchant pour chacun de ces postes les leviers réalistes de sobriété et d'efficacité.

² http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/index_fr.htm

Poste	Service
« Produits blancs »	Lave-linge
	Sèche-linge
	Lave-vaisselle
Production de froid	Réfrigérateur
	Combiné réfrigérateur-congélateur
	Congélateur
Éclairage	Éclairage domestique
Audio-visuel	Téléviseur
	Ordinateur
	Chaîne hi-fi
	DVD, décodeur, box internet, console...
	Téléphonie fixe et mobile
	Système audio-visuel intégré
Gestion, hygiène et autres usages	Circulateur et pompe (chauff./clim.) individuelle
	Ventilation individuelle
	Communs immeubles collectifs
	Aspirateur
	Fer à repasser
	Hygiène, bricolage et nouveaux usages

Tableau 1 : Détail des services désagrégés pour la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel

Les données d'entrée sur la consommation de chacun de ces services et les hypothèses retenues pour faire évoluer cette consommation s'appuient notamment sur l'expérience et les nombreuses campagnes de mesure du bureau d'études Enertech³. Ainsi, l'ensemble des actions se base sur l'observation des pratiques actuelles, avec à terme une généralisation des meilleures pratiques et des meilleures techniques déjà disponibles.

Plusieurs déterminants globaux tels que le nombre de ménages ou les surfaces construites ou rénovées ont été nécessaires pour définir les consommations d'électricité spécifique. Ils sont pour la plupart reliés au reste du scénario, et détaillés dans la partie consacrée aux usages chaleur dans le bâtiment.

Conformément à la démarche négaWatt, le travail sur ces postes de consommations croise une action sur la sobriété sur les usages de l'électricité avec une action sur l'efficacité énergétique des appareils utilisés. En parallèle, l'évolution retenue dans chacun de ces secteurs prend en compte une tendance plus ou moins prononcée au renforcement de certains usages pour des services liés au confort de vie moderne. Enfin, une apparition très probable de nouveaux usages domestiques de l'électricité générateurs de nouvelles consommations a été retenue.

Efficacité transverse

Différentes évolutions concernant simultanément l'ensemble des usages ont été définies en amont : il s'agit par exemple de l'évolution du taux d'appareils laissés en veille, de la puissance des veilles, de

³ www.enertech.fr

l'efficacité des moteurs ou encore de l'efficacité des cycles de chauffage et de froid. Les évolutions de l'efficacité des process dans les équipements considérés sont répertoriées dans l'Annexe 1 - Tableau 16 : Par rapport à 2010, évolution de l'efficacité transverse dans l'électricité spécifique dans le secteur résidentiel. Elles sont rassemblées sous le terme générique d'efficacité transverse qui exprime un taux de gain d'efficacité par rapport à un indice 100 % pour le niveau moyen d'efficacité estimé pour chacun de ces postes en 2010.

Le gain le plus important concerne les veilles, sur lesquelles l'hypothèse porte simplement sur l'introduction progressive d'électronique à plus basse consommation ainsi que la réduction de puissance pour assurer la fonction, en cohérence avec les directives écoconception de la commission européenne⁴. Les gains sont plus faibles sur l'efficacité des process de chauffage des appareils lave-linge/lave-vaisselle, qui repose sur une meilleure utilisation de la chaleur, une baisse de l'inertie ou encore une meilleure isolation des composants. Pour les moteurs, la diffusion d'améliorations semble plus limitée pour les petits moteurs, d'une puissance inférieure à 20 W, que pour les gros moteurs d'une puissance supérieure, pour lesquels on peut envisager la diffusion de moteurs asynchrones ou à aimant permanent.

Lavage

Ce poste regroupe les usages de lavage et de séchage du linge ainsi que de lavage de la vaisselle. Pour chacun de ces usages, la modélisation repose sur une évolution du taux d'équipement par foyer, des conditions d'usage (nombre de cycles, taux de remplissage, etc.) et de l'efficacité des équipements électroménagers correspondants. Les évolutions retenues dans le scénario négaWatt pour chacun de ces indicateurs sont résumées dans l'Annexe 1 - Tableau 17 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux lave-linges et sèche-linges dans le secteur résidentiel.

Concernant les lave-linges, le scénario retient l'hypothèse d'une saturation du taux d'équipement, qui plafonne au niveau de 96 % actuel, et ne prévoit pas de développement d'un second lave-linge dans les foyers. Le taux d'appareil en veille reste marginal et la consommation correspondante devient négligeable grâce à l'efficacité croissante de ces veilles. Le nombre de cycles effectué chaque année baisse grâce à l'augmentation du taux moyen de remplissage, relativement faible aujourd'hui. En parallèle, la proportion de cycles à 30 ou 40°C augmente avec le développement des lessives efficaces à faible température. Une efficacité énergétique est envisagée de façon différenciée selon la température des cycles de lavage. Au total, la consommation de ce poste est à peu près stabilisée sur la première décennie avant de décroître progressivement jusqu'à 2,4 TWh en 2050. La consommation annuelle par équipement passe de 176 kWh en 2010 à 116 kWh en 2030 et 78 kWh en 2050. Ces évolutions sont cohérentes avec l'hypothèse technique de l'étude anglaise AECOM qui juge possible une baisse de 33% de l'efficacité des lave-linge mis sur le marché entre 2011 et 2030⁵.

Pour le séchage du linge, traité indifféremment qu'il s'agisse d'équipements séparés ou combinés aux lave-linges, le scénario négaWatt intègre une poursuite de la hausse modérée du taux d'équipement avant un recul de ce taux lié à l'évolution plus générale de l'habitat. Le nombre annuel de cycles suit la même évolution que pour les lave-linges. La durée des cycles diminue légèrement et l'efficacité unitaire des appareils progresse de 19 %. Au total, la consommation s'établit à 5,6 TWh en 2010 et progresse de 12 % en 2020 pour redescendre à 2,5 TWh en 2050.

Enfin pour les lave-vaisselles, le scénario négaWatt retient une augmentation du taux d'équipement, tenant compte du fait que la vaisselle en machine est une pratique économe par rapport aux pratiques courantes de vaisselle à la main. Comme pour les équipements précédents, le taux d'appareils en veille reste très faible. Le nombre annuel moyen de cycles baisse du fait de l'augmentation du nombre moyen de couverts

⁴ http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/index_fr.htm

⁵ AECOM, *Long term energy performances for energy-using domestic and commercial appliances and products*, Juin 2011 - <http://efficient-products.ghkint.eu/spm/download/document/id/995.pdf>

par lavage. L'efficacité des cycles progresse de 20 %. La consommation totale de ce poste représente 6,1 TWh en 2010 et augmente d'abord avant de diminuer jusqu'à 4,5 TWh en 2050. La consommation moyenne par équipement se situe à 431 kWh/an en 2010 ; elle est de 275 kWh/an en 2030 et de 200 kWh/an en 2050. Ces évolutions sont également confirmées par l'étude AECOM précédemment citée.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 18 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux lave-vaisselles dans le secteur résidentiel

Froid domestique

Le poste froid rassemble les usages de réfrigération et de congélation. Le modèle intègre au niveau du taux d'équipement des foyers pour ces deux usages des appareils réfrigérateurs, des appareils congélateurs et des appareils combinés. Le scénario joue sur leur répartition, sur leur volume unitaire et sur leur efficacité selon des orientations précisées dans l'Annexe 1 - Tableau 19 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la production de froid dans le secteur résidentiel.

Du point de vue de la sobriété, le scénario négaWatt prévoit une augmentation de la part des appareils combinés calée sur l'évolution historique et une baisse du taux de 2^{ème} équipement en réfrigérateur. Le scénario prévoit également une diminution du volume moyen de tous les appareils, qui correspond d'une part à un meilleur taux de remplissage des appareils, et d'autre part à une évolution cohérente avec celle envisagée dans d'autres secteurs comme le volume des emballages ou l'évolution des circuits de distribution (rotation plus fréquente des aliments). Enfin, le nombre de réfrigérateurs équipés d'une veille (diode lumineuse, affichage de la température, etc.) est divisé par trois (le taux actuel est maintenu pour les combinés et congélateurs). Les gains en efficacité représentent par ailleurs 40 % d'économie d'énergie par cycle pour un même volume en 2050 par rapport aux niveaux moyens de 2010, pour tous les types d'appareils.

Au total, la consommation d'électricité pour le froid domestique tombe de 21,6 TWh en 2010 à 9,4 TWh en 2050. La consommation annuelle par équipement passe de 255 kWh en 2010 à 191 kWh en 2030 et 133 kWh en 2050, évolution plus prudente que l'étude AECOM qui prévoit à l'horizon 2030 une réduction de la consommation plus importante que celle envisagée par le scénario négaWatt en 2050.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 19 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la production de froid dans le secteur résidentiel

Éclairage domestique

Pour le poste éclairage, les besoins de service sont définis pour la modélisation par des surfaces à éclairer avec une certaine intensité lumineuse pendant une certaine durée. Ces éléments permettent de définir un besoin de lumière à fournir, exprimé en lumen, qui lui-même peut être fourni par des éclairages de différents types dont le modèle permet de faire varier la contribution. Les catégories d'éclairages prises en compte sont, dans l'ordre croissant d'efficacité, les ampoules à incandescence, les ampoules halogènes haute tension (HT) et basse tension (BT), les lampes fluo-compactes (LFC) et tubes fluorescents, les diodes électroluminescentes classiques (LED) et organiques (OLED).

Le scénario négaWatt ne joue en sobriété que sur une stabilisation des niveaux de service actuels. Il conserve l'intensité moyenne d'éclairage constante par rapport à son niveau actuel et observe sur l'évolution des surfaces à éclairer une faible augmentation qui suit grosso-modo l'évolution démographique (les hypothèses sur l'évolution des surfaces résidentielles sont détaillées dans la section suivante, consacrée aux usages de la chaleur). Le scénario n'intègre pas davantage d'évolution de la durée moyenne de fonctionnement des éclairages. Il joue en revanche pleinement sur l'évolution du type d'éclairage, avec un déplacement massif des formes les moins efficaces actuelles (incandescence et halogènes) vers les éclairages fluorescents puis vers les éclairages électroluminescents. Ce déplacement existe de façon beaucoup plus modérée dans le scénario tendanciel, comme le montre la figure suivante.

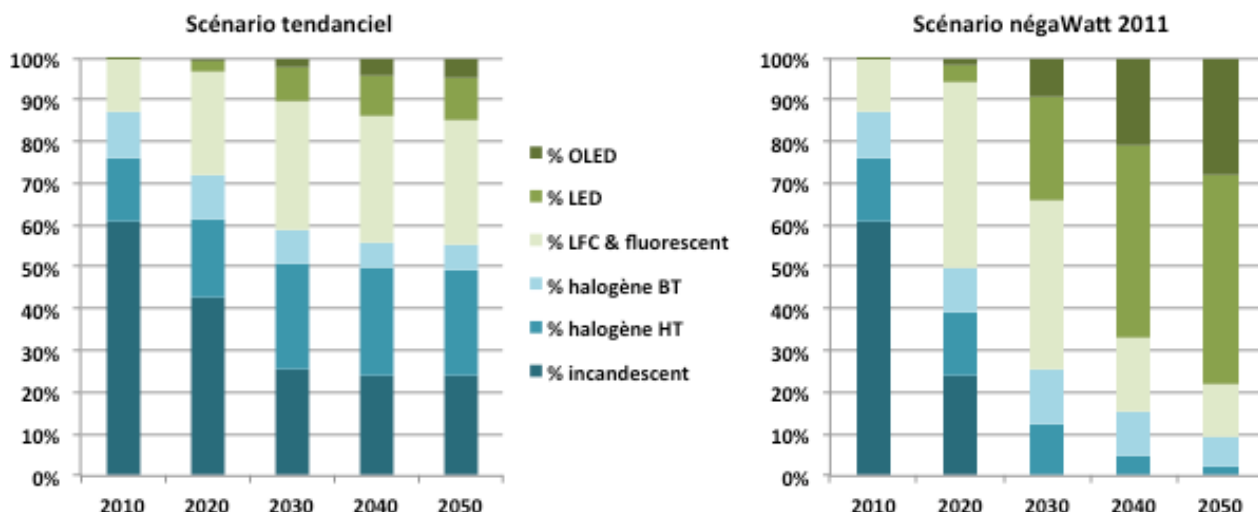


Figure 8 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation liée à l'éclairage dans le secteur résidentiel

Les gains en efficacité sur chacun des types d'éclairage jouent un rôle moindre que ce basculement vers des types d'éclairages intrinsèquement plus efficaces. Au total, l'efficacité moyenne des éclairages est multipliée par 4,2 dans le scénario négaWatt. La consommation annuelle d'électricité pour l'éclairage résidentiel est divisée par 3,5.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 20 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'éclairage dans le secteur résidentiel

Audio-visuel, information et communication

Ce poste regroupe un ensemble très divers d'activités reposant sur différents appareils dont les principaux sont aujourd'hui les téléviseurs, les ordinateurs et leurs périphériques, les chaînes hi-fi, les lecteurs audio-vidéo tels que les lecteurs DVD, les « box », et les téléphones. Ces appareils montrent une tendance croissante à remplir plusieurs des fonctions d'image, de son et de communication qui sont donc assurées de manière redondante. Aussi le modèle introduit l'idée de systèmes audio-vidéo unifiés (ou AVU) permettant, autour d'une gestion centralisée de terminaux fixes et mobiles, de remplir de façon optimisée ces différentes fonctions. Ce type d'équipement, dont le développement ne présente aucune difficulté technologique, apparaît également comme le support de nouveaux développements domotiques.

Dans le scénario négaWatt, les systèmes AVU émergent avant 2020, où ils équipent 5 % seulement des foyers, puis progressent pour devenir la norme, atteignant jusqu'à un taux d'équipement de 90 % des foyers en 2050. Les taux d'équipement de tous les autres appareils, dont ils sont censés remplacer les fonctions, diminuent pour tomber sous les 10 % en 2050. Les systèmes AVU absorbent ainsi à terme l'essentiel des usages existants et de nouveaux usages pouvant se développer sur ce poste de consommation. Outre cette sobriété d'équipement liée aux réflexions développées plus loin sur le secteur industriel, le scénario intègre des éléments de sobriété sur leur dimensionnement et leur usage, comme par exemple une stabilisation de la taille moyenne des écrans de télévision et de la durée moyenne d'utilisation des équipements pour chacun des usages (qui se traduit, grâce à leur caractère multifonction, par une diminution de 10 % environ du nombre de terminaux des systèmes AVU).

Le scénario négaWatt prend également en compte, comme sur les autres postes de l'électricité spécifique domestique, un progrès adapté à chaque usage sur le nombre d'appareils en veille : ce taux est par exemple conservé stable pour les téléviseurs ou les ordinateurs mais divisé par dix pour les lecteurs DVD ; il

est fixé à 100 % pour les systèmes AVU qui intègrent les fonctions de communication externes des téléphones actuels. Enfin, le scénario s'appuie en termes d'efficacité sur un progrès moyen de 40 % de la performance des équipements entre 2010 et 2050.

Au total, la consommation liée à ce poste est réduite de plus des deux tiers entre 2010 et 2050, de 20,1 TWh à 6,3 TWh. Comme pour le poste froid, l'inertie liée aux équipements existants et au changement de comportement conduit à une poursuite de la hausse jusqu'à 23,9 TWh peu avant 2020 avant une baisse régulière. À terme, les systèmes AVU représentent près de 80 % de la consommation de ce poste.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 21 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'audio-visuel, l'information et la communication dans le secteur résidentiel

Nettoyage, hygiène, bricolage et divers

On rassemble dans la modélisation une série de services énergétiques disparates incluant les activités de ménage et de repassage, de bricolage, et l'ensemble de petits ustensiles électriques utilisés dans la cuisine, l'hygiène ou les loisirs. On distingue essentiellement pour la modélisation deux types d'appareils qui représentent chacun une part de ce poste, c'est-à-dire les aspirateurs et les fers à repasser. Une désagrégation plus fine de l'ensemble des autres usages, qui peuvent aller de la perceuse à la brosse à dent électrique ou à l'ouvre-boîte, a simplement permis d'estimer un niveau moyen de puissance et de durée d'utilisation de ces appareils, qui sont ensuite agrégés dans un poste « divers ». Ce poste englobe également des nouveaux usages qui ne sont pas identifiés aujourd'hui mais dont la tendance sociétale est à l'augmentation.

Dans le scénario négaWatt, le taux d'équipement en aspirateurs et fers ne varie pas ; la durée d'utilisation des aspirateurs est stable, celle des fers baisse de plus de 20 %. L'efficacité des aspirateurs progresse, contrairement à celle des fers dont la puissance augmente par ailleurs. Pour l'ensemble des autres usages, le scénario prévoit un gain modeste de 15 % environ en moyenne sur l'efficacité des appareils concernés, mais surtout une multiplication par plus de 12 de ces usages divers. Le scénario négaWatt intègre ici l'apparition de nouveaux usages méconnus aujourd'hui mais qui ne manqueront pas d'apparaître dans les prochaines décennies. Au total, la consommation des fers et des aspirateurs recule mais la croissance du poste « divers » l'emporte pour faire progresser l'ensemble de 4 TWh à 6,2 TWh.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 22 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée au nettoyage, à l'hygiène et au bricolage dans le secteur résidentiel

Gestion des logements et des communs d'immeubles

Le dernier poste de consommation d'électricité spécifique pris en compte dans la désagrégation des usages intègre des fonctions diverses. On y regroupe des fonctions de gestion des logements individuels telles que l'ensemble des circulateurs et des pompes de chauffage, ainsi que des appareils de ventilation. Cette rubrique prend également en compte tous les équipements communs aux logements collectifs, incluant les mêmes fonctions de circulation et de ventilation mais aussi l'éclairage des parties communes et les ascenseurs (rubrique « communs »).

Pour l'ensemble des circulateurs et pompes et des ventilations, les taux d'équipement sont reliés à la modélisation des bâtiments pour les usages chaleur. Dans le scénario négaWatt, le taux d'équipement en appareils nécessitant circulateurs et pompes progresse régulièrement, mais les pompes sont systématiquement asservies et leur durée d'utilisation est ainsi divisée par trois. Le taux d'équipement en ventilation des logements suit le même développement, et la ventilation double flux est privilégiée pour atteindre près de trois quarts des équipements à l'horizon 2050. Pour les communs, le taux d'équipement moyen progresse également fortement, et le nombre d'équipements augmente conformément à la part des logements collectifs dans l'habitat. De plus, le scénario prend en compte comme sur les autres postes un important gain en efficacité unitaire des équipements.

Au total, l'augmentation du parc d'équipement liée au développement de la ventilation en logement individuel et des surfaces communes en logement collectif prend le pas sur les gains en efficacité et en sobriété dans le dimensionnement et l'usage des équipements, pour conduire à une augmentation de 59 % de la consommation de ce poste.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 23 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la gestion des locaux dans le secteur résidentiel

Résultats sur l'électricité spécifique dans le secteur résidentiel

Au total, l'application systématique des gains envisagés en sobriété et en efficacité conduit à des évolutions assez différenciées selon les postes, qui aboutissent globalement à une division par 1,8 de la consommation totale d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel. Outre la différence entre les postes, l'évolution résulte de la dynamique croisée de la pénétration des changements de comportement et des appareils efficaces d'un côté, et du développement de certains usages de l'autre. Ainsi la consommation augmente modérément pendant les premières années pour culminer en 2017 à 80,2 TWh (77,6 TWh en 2010), puis baisse régulièrement jusqu'aux environs de 2040 où elle se stabilise presque, ne diminuant plus que très faiblement jusqu'en 2050.

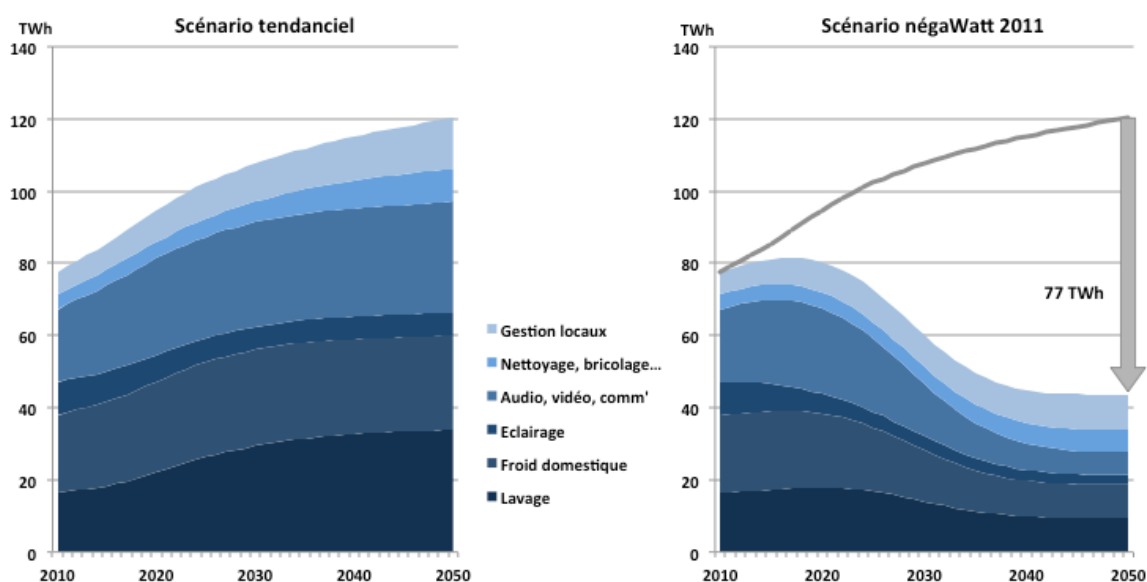


Figure 9 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 24 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel

Rapportée au nombre de ménages, la consommation moyenne d'électricité spécifique passe de 2 846 kWh par ménage en 2010 à 1 373 kWh en 2050. Cette baisse de plus de 50 % provient notamment d'une division par 4,1 de la consommation pour l'éclairage, par 3,7 pour l'audio-visuel, l'informatique et la communication, par 2,7 pour le froid et par 2 pour le lavage – les autres postes diminuent plus faiblement voire augmentent, comme la gestion des locaux dont la consommation double presque et comme le nettoyage, l'hygiène et le bricolage, où la réserve pour de nouveaux usages représente au final près de 7 % de la consommation des ménages.

L'évolution est encore plus significative si on la compare au scénario tendanciel, où en tenant compte du nombre plus important de ménages, la consommation moyenne des ménages augmente de 15 % pour

atteindre 3 283 kWh en 2050. La consommation des ménages dans les deux scénarios diverge dès le début de la période, même si la différence s'accélère ensuite.

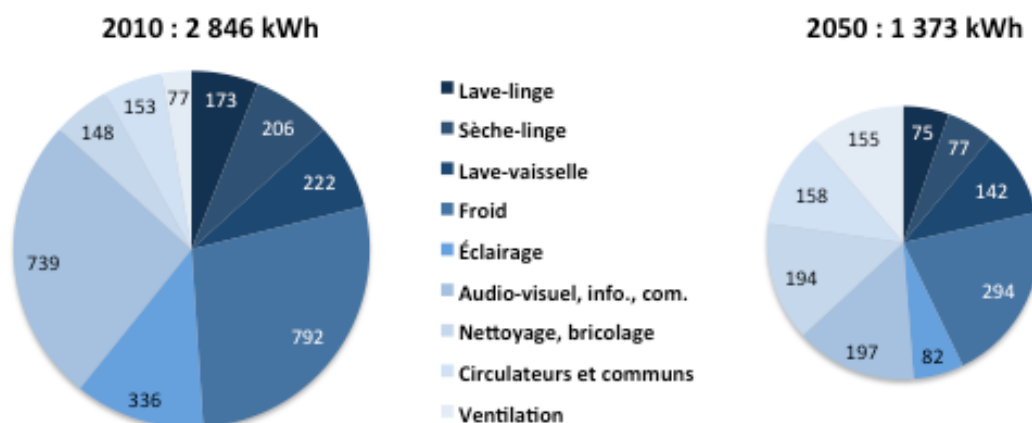


Figure 10 : Consommation moyenne d'électricité spécifique d'un ménage en 2010 et 2050

1.2.3. Électricité spécifique dans le secteur tertiaire

La même méthode de modélisation est appliquée aux usages d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire. La désagrégation fine des différents usages devient rapidement complexe pour prendre en compte les spécificités des besoins des activités très diverses comprises dans ce secteur. L'absence de données statistiques croisant systématiquement usages et secteurs d'activité du tertiaire ne permet pas de désagréger totalement la consommation.

La désagrégation retenue pour la modélisation du secteur retient une dizaine de postes selon deux logiques complémentaires. D'un côté, les services énergétiques fournis dans les bâtiments tertiaires sont divisés en deux postes facilement identifiables, l'éclairage et l'informatique, et un troisième poste « autres » intégrant les différents process mis en jeu dans les bâtiments tertiaires, tels par exemple que l'imagerie médicale. De l'autre, on identifie des secteurs spécifiques dans lesquels on analyse globalement les besoins en électricité, tels que l'éclairage public, les télécommunications ou la gestion de l'eau.

De la même manière que pour le secteur résidentiel, la modélisation s'appuie pour certains postes, comme l'éclairage tertiaire et l'informatique, sur les bases de données disponibles telles que celles rassemblées par Enertech. Toutefois les données disponibles ne permettent pas d'atteindre le même niveau de détail sur d'autres postes qui sont par conséquent traités de façon plus globale, en appliquant les mêmes logiques de sobriété et d'efficacité.

Poste	Service
Services dans les bâtiments tertiaires	Éclairage tertiaire
	Informatique
	Autres dont process tertiaire (imagerie médicale...)
Secteurs spécifiques	Éclairage public
	Télécommunications
	Entrepôts frigorifiques
	Gérants immeubles tertiaires
	BCG (bâtiment, génie civil)
	Eau

Tableau 2 : Détail des services désagrégés pour la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire

Comme pour le résidentiel, l'évolution modélisée sur le secteur tertiaire tient compte des déterminants globaux que constituent l'évolution de la population d'une part, et des surfaces des bâtiments consacrés aux activités tertiaires d'autre part, tels qu'ils sont définis en lien avec d'autres volets du scénario. Ces déterminants, décrits notamment dans la partie consacrée aux usages chaleur dans le bâtiment, sont dans la mesure du possible pris en compte de façon différenciée dans la représentation du secteur tertiaire : l'évolution démographique, à travers la tendance au vieillissement des populations, conduit par exemple à considérer une croissance relative plus importante au sein du secteur tertiaire des établissements de santé ou des maisons de retraite par rapport aux établissements éducatifs.

Par ailleurs, la modélisation des gains en efficacité inclut une part d'efficacité transverse sur les veilles, les moteurs, l'électronique et autres qui suit la même progression que dans le secteur résidentiel.

Éclairage tertiaire

Les besoins en éclairage des bâtiments tertiaires sont modélisés selon la même logique que ceux du secteur résidentiel en tenant compte des spécificités d'usages. La modélisation part du service énergétique défini par la surface à éclairer, l'intensité lumineuse à fournir et la durée à couvrir. Ces besoins sont couverts par une combinaison des différents types d'éclairage dont la répartition peut varier pour profiter des solutions les plus efficaces.

Le scénario négaWatt identifie un potentiel de sobriété plus élevé sur l'éclairage dans le tertiaire par rapport au résidentiel : de nombreux retours d'expérience issus de campagnes de mesure montrent que les surfaces éclairées dépassent souvent les surfaces où la lumière est utile, que les éclairages fonctionnent parfois sans utilité de jour et que l'intensité de l'éclairage est souvent plus élevée que nécessaire. Le scénario intègre donc une réduction de la surface utile à éclairer, de la durée moyenne de fonctionnement et de l'intensité moyenne.

Le scénario joue ensuite, en efficacité, sur les gains de chaque technologie d'éclairage qui sont conformes à ceux pris en compte dans le résidentiel, mais surtout, comme dans les logements, sur une forte pénétration des technologies d'éclairage les plus efficaces. Compte tenu de la part occupée dans ce secteur par les éclairages fluorescents, l'ampleur des transferts est moindre et concerne essentiellement une substitution des trois quarts des éclairages incandescents et halogènes par des éclairages électroluminescents.

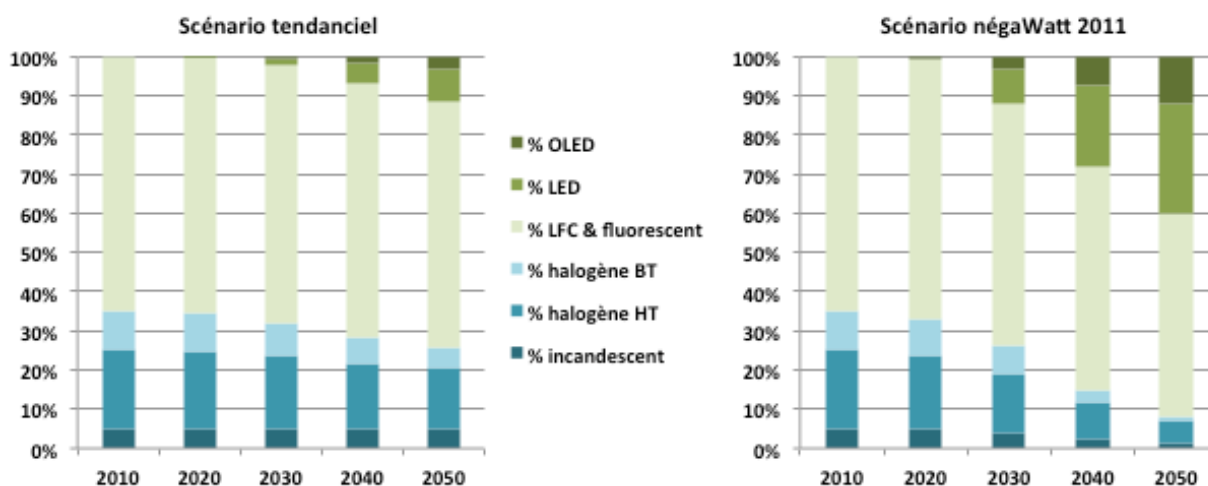


Figure 11 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la proportion des différents types d'éclairages dans les bâtiments du secteur tertiaire

Les éclairages sont en moyenne deux fois plus efficaces en 2010 dans le tertiaire que dans le résidentiel. Ils restent, à l'issue du scénario négaWatt, environ 30 % plus efficaces en moyenne, mais le gain global en efficacité des éclairages est une multiplication par 2,6 dans le tertiaire, contre 4,2 dans le résidentiel.

L'ensemble de ces actions permet de diviser par 3,3 la consommation annuelle d'électricité pour l'éclairage dans les bâtiments tertiaires.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 25 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'éclairage dans le secteur tertiaire

Informatique tertiaire

Le poste informatique recouvre l'ensemble des consommations liées à l'utilisation d'ordinateurs et de leurs auxiliaires, tels que les serveurs, les imprimantes et les différents lecteurs externes, dans les bâtiments du secteur tertiaire. Ce poste est modélisé à partir d'un besoin de services informatiques rapporté à une moyenne inter-usages et inter-secteurs par surface de bâtiments tertiaires. Les équipements modélisés pour répondre à ces services distinguent les ordinateurs fixes et les ordinateurs portables et traitent comme un ensemble les différents auxiliaires.

Le scénario négaWatt introduit la sobriété sur ces usages à travers une réduction de la durée d'utilisation des ordinateurs, qui s'établit à terme à un peu plus de 2 500 heures en moyenne pour les postes fixes comme pour les portables. Cette baisse de 37 % pour les fixes et 28 % pour les portables correspond simplement à l'élimination des plages très importantes de fonctionnement sans usage observées dans le tertiaire aujourd'hui. Le scénario prévoit également une diminution de plus de moitié du pourcentage de veille sur les appareils.

Le scénario prévoit par ailleurs une évolution contrastée des équipements correspondant à la fois à une optimisation énergétique et à une poursuite du développement des usages informatiques dans le tertiaire. En particulier, le taux moyen d'équipement en postes informatiques est à peu près maintenu, mais en éliminant la redondance entre postes fixes et portables et en transférant massivement l'ensemble des activités sur les portables, pour un usage augmenté malgré un temps de fonctionnement diminué de chacun des appareils. De plus, une meilleure mutualisation des auxiliaires permet de réduire d'un tiers environ le taux d'équipement, là encore sans préjudice d'une plus grande utilisation des services rendus par ces appareils, correspondant également à une meilleure utilisation de leur temps de fonctionnement même si celui-ci diminue légèrement.

Le transfert d'usage des ordinateurs fixes vers les ordinateurs portables se justifie notamment, du point de vue énergétique, par les gains en efficacité associés : les portables ont une puissance moyenne de moins d'un tiers des fixes en 2010, et cet écart augmente encore légèrement dans la projection du scénario sur les économies en puissance des deux types d'appareils à l'horizon 2050. Le scénario inclut également un gain en efficacité moyenne sur les auxiliaires.

La consommation d'électricité pour ce poste baisse dès les premières années et se stabilise vers le dernier quart de la période, pour atteindre 7,0 TWh en 2050 contre 21,1 TWh en 2010, soit une division par 3,3.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 26 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'informatique dans le secteur tertiaire

Autres usages tertiaires

La modélisation reste beaucoup plus agrégée pour l'ensemble des autres services énergétiques rendus par l'électricité spécifique dans les bâtiments tertiaires, qui recouvre un ensemble extrêmement hétérogène d'usages difficiles à reconstituer avec la précision nécessaire. Le modèle prend essentiellement en compte deux facteurs pour décrire l'évolution de ce poste. Le premier est un taux moyen de services énergétiques rapportés à la surface de bâtiments tertiaires, intégrant tous les usages hors éclairage et informatique traités précédemment, et tous les secteurs hors secteurs spécifiques traités ensuite. Le second est un indice moyen d'efficacité des appareils électriques fournissant ces différents services énergétiques.

La sobriété introduite dans le scénario négaWatt 2011 par rapport au scénario tendanciel porte essentiellement sur l'évolution contrastée des surfaces de bâtiments entre les deux scénarios : ainsi, une même hypothèse de maintien au niveau actuel des services énergétiques rendus par m² est retenue dans les deux scénarios. Le scénario négaWatt introduit par ailleurs 10 % de gain d'efficacité supplémentaire en moyenne sur les divers appareils concernés, contre une efficacité stable dans le scénario tendanciel. Au final, la croissance modérée des surfaces l'emporte dans le scénario négaWatt sur l'efficacité accrue, pour conduire à une progression de 16 % de la consommation pour ce poste agrégé.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 27 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux services hors éclairage et informatique dans les bâtiments tertiaires

Secteurs spécifiques

Outres l'approche précédente par les usages, la modélisation de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire identifie et traite séparément plusieurs secteurs spécifiques au sein de l'activité tertiaire. Pour chacun de ces grands secteurs, on distingue des facteurs caractérisant le dimensionnement des services énergétiques et le rendement avec lequel ils sont fournis, qui permettent de différencier de façon agrégée dans chacun de ces secteurs la trajectoire du scénario négaWatt.

Pour l'éclairage public, le scénario négaWatt prend en compte une légère diminution du temps d'éclairage moyen (par la systématisation, par exemple, des calculateurs astronomiques) ainsi qu'une baisse de 20 % à terme de la puissance moyenne des éclairages, et une variation selon l'horaire de leur taux de charge (éclairage réduit à certaines périodes). La consommation de ce poste, tenant compte également d'une augmentation de l'efficacité moyenne des éclairages utilisés, est ainsi divisée par 3,3.

Dans le secteur de la gérance d'immeubles tertiaires (ascenseurs, auxiliaires de chauffage collectif, éclairage des communs, etc.), le scénario négaWatt retient face à la très grande dispersion des usages une hypothèse conservatrice en sobriété de maintien du niveau de service énergétique par m² au niveau de 2010. En revanche, il s'appuie sur une hypothèse de réduction de 50 % des consommations unitaires, qui relève d'une application basée sur le retour d'expérience de nombreuses opérations menées sur des immeubles : il s'agit non seulement d'intégrer le potentiel d'efficacité des appareils, mais surtout de mettre en œuvre des économies accessibles à court terme sans investissement, tels que le réglage correct des installations et l'arrêt des consommations inutiles, en particulier en dehors des heures d'activité. Compte tenu de ce potentiel, la consommation totale de ce poste diminue de 35 %.

Les consommations d'électricité spécifique liées au secteur des télécommunications, aux entrepôts frigorifiques, au secteur du bâtiment et du génie civil (BGC), et à la gestion de l'eau sont toutes traitées selon la même logique : faute de pouvoir entrer dans une représentation plus fine de la diversité des usages au sein de chaque secteur, la consommation évolue en fonction d'un indice d'évolution du service énergétique rapporté à la croissance de la population, et d'un indice d'efficacité des appareils électriques mis en jeu. Pour chacun de ces secteurs, le scénario négaWatt fait le choix conservateur de maintenir le niveau de service énergétique par habitant au niveau de 2010, et de ne prévoir que 10 % de gain en efficacité énergétique. Compte tenu de l'augmentation de la population, ces hypothèses prudentes conduisent à une hausse de 3,5 % de la consommation de chacun de ces secteurs.

Le modèle isole enfin deux secteurs spécifiques qui, faute de données et de visibilité prospective, sont traités forfaitairement et maintenus à leur niveau actuel de consommation : le secteur de la recherche et celui des activités militaires.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 28 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à différents secteurs spécifiques dans le secteur tertiaire

Résultats sur l'électricité spécifique dans le secteur tertiaire

La consommation d'électricité spécifique dans le tertiaire, bien désagrégée sur quelques services énergétiques - éclairage des bâtiments, informatique, gérance des immeubles et éclairage public représentant au total plus de 70 % de ce poste en 2010 - mais traitée de façon beaucoup plus agrégée sur le reste, connaît une évolution proche de celle observée dans le résidentiel. Elle est divisée par 1,8 entre 2010 et 2050, avec une baisse essentiellement marquée entre 2020 et 2040. Ce résultat qui peut apparaître comme relativement conservateur masque des disparités importantes entre secteurs : si une baisse de la consommation de 35 % peut être envisagée sur le poste des gérances d'immeubles et de près de 70 % sur les autres postes désagrégés, les hypothèses prudentes sur les autres postes conduisent au contraire sur ceux-ci à une hausse allant jusqu'à 16 %.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 29 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire

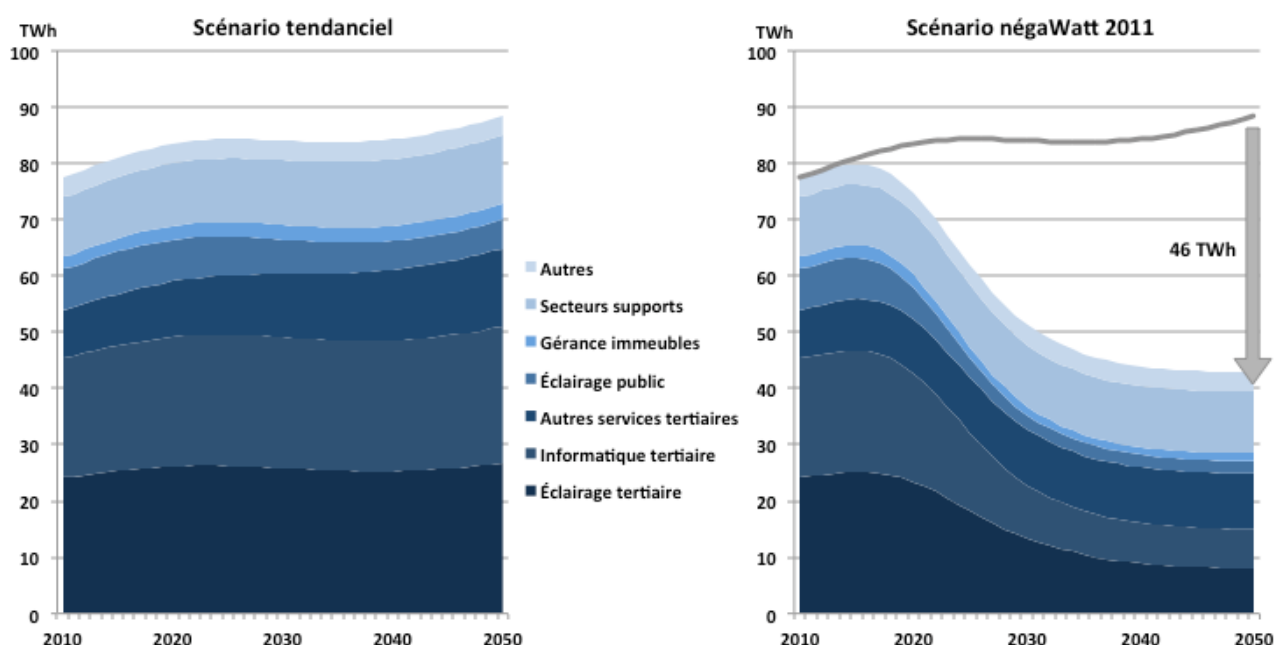


Figure 12 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire

1.2.4. Cuisson dans le résidentiel et le tertiaire

Le dernier poste concernant les services énergétiques fournis par des équipements dans les bâtiments résidentiels et tertiaires (hors chauffage, climatisation et eau chaude sanitaire) porte sur la cuisson des aliments. Ce poste utilise en partie l'électricité mais peut également faire appel à d'autres vecteurs énergétiques tels que le gaz ou le GPL.

La modélisation de ce poste de consommation d'énergie finale part de l'évaluation du nombre de repas à fournir à la population pour établir des besoins de cuisson au niveau des utilisateurs. Ainsi, on traite ensemble la cuisson dans le secteur résidentiel, c'est-à-dire les repas pris à domicile, et la cuisson dans le secteur tertiaire, qui recouvre différentes formes (restauration commerciale sur place et à emporter, restauration collective, restauration individuelle sur les lieux de travail, etc.). Ces deux principaux modes de consommation sont toutefois distingués pour refléter la différence des dispositifs de fourniture du service de cuisson dans les usages domestiques et dans les usages collectifs.

La cuisson dans le résidentiel et le tertiaire s'inscrit en bout de la chaîne agro-alimentaire, dans laquelle une cuisson industrielle intervient à différents stades de transformation voire de préparation par pré-cuisson des aliments. Cette partie « amont » de la cuisson est traitée dans le secteur de l'industrie. Faute d'une vision claire sur l'influence possible de l'évolution de la cuisson intermédiaire dans la chaîne agro-alimentaire sur les besoins de cuisson chez le consommateur final, ce facteur n'est pas pris en compte dans le modèle.

Besoins de cuisson

La modélisation repose sur une évaluation de l'évolution du nombre de repas (intégrant petit-déjeuner, déjeuner et dîner, dont les besoins en termes de cuisson sont moyennés) qui est essentiellement déterminée par la démographie de la population. Ainsi le nombre de repas à fournir annuellement, identique dans les deux scénarios, passe de 57,4 milliards en 2010 à 66,0 milliards à l'horizon 2050.

Le modèle introduit une répartition de cette enveloppe globale entre résidentiel et tertiaire à travers un taux de repas pris à l'extérieur, supposé en légère progression.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 30 : Scénario négaWatt et scénario tendanciel : évolution du nombre et de la répartition des repas

Le scénario négaWatt n'introduit par ailleurs, faute là encore de visibilité sur les évolutions possibles, aucune évolution sur les habitudes de cuisson. Ainsi le besoin de service énergétique pour la cuisson par couvert est supposé constant par rapport au niveau moyen observé en 2010.

Cuisson dans le secteur résidentiel

Comme pour l'électricité spécifique, le modèle intègre une analyse très désagrégée de la consommation d'énergie pour la cuisson dans le secteur résidentiel. Cette désagrégation passe par une répartition des usages de cuisson entre les principaux types d'appareils : plaques de cuisson, fours et autres appareils (inclus les fours à micro-ondes, bouilloires, grille-pains, etc.). Cette troisième catégorie, qui réunit des appareils tous électriques mais très divers, est traitée comme un ensemble à partir d'une consommation moyenne. Les deux premières catégories sont plus détaillées, en distinguant la part d'appareils électriques, à GPL ou à gaz pour chacun des usages, y compris la répartition entre différents types de plaques électriques.

Le scénario négaWatt conserve la répartition du service énergétique entre les trois différents modes de cuisson (plaques, fours et autres) à son niveau de 2010. En termes d'équipements, le scénario introduit une progression des plaques électriques aux dépens des plaques au GPL, combustible nécessairement d'origine fossile, qui disparaissent presque totalement à partir de 2020. Les plaques électriques en fonte disparaissent pratiquement au profit des plaques à induction, beaucoup plus efficaces. Au total, en tenant compte des gains d'efficacité sur chaque technologie, le rendement moyen des plaques électriques progresse de 64 % en 2010 à 80 % en 2050. La même logique est appliquée aux fours, avec le renforcement

des équipements électriques aux dépends principalement du GPL qui disparaît peu après 2030. Le scénario maintient par ailleurs le taux d'équipement des foyers en fours à son niveau de 2010, soit 72 %. Enfin, la consommation d'électricité pour les autres usages de cuisson est maintenue en termes de services et faiblement réduite par un gain en efficacité conservateur de 10 % entre 2010 et 2050.

Au total, la consommation d'énergie finale pour la cuisson dans le résidentiel recule de 29,8 TWh en 2010 à 22,9 TWh en 2050. La part de l'électricité dans cette consommation progresse de 37 % en 2010 à 63 % en 2050, pendant que le gaz recule de 41 % à 37 % et que le GPL est progressivement abandonné.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 31 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à la cuisson dans le secteur résidentiel

Cuisson dans le secteur tertiaire

La modélisation reste plus agrégée pour la cuisson dans le secteur tertiaire qui recouvre des usages sectoriels relativement divers. On prend en compte une évolution de la répartition entre les différents vecteurs énergétiques dans les modes de cuisson, ainsi qu'une consommation moyenne par repas associée à la cuisson par chacun des modes, qui intègre un facteur d'efficacité.

Le GPL disparaît peu après 2020 et les modes de cuisson se déplacent du gaz vers l'électrique - permettant une efficacité accrue des appareils -, qui atteint 78 % des usages de cuisson à l'horizon 2050. L'efficacité des appareils de cuisson progresse en moyenne de 20 %. La consommation finale d'énergie de ce poste connaît de légères variations pour aboutir à 9,6 TWh en 2050 contre 9,3 TWh en 2010. L'électricité voit sa part en énergie finale progresser de 53 % à 74 %.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 32 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à la cuisson dans le secteur tertiaire

Résultats sur la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire

La consommation d'énergie finale pour la cuisson dans les secteurs résidentiel et tertiaire diminue sensiblement moins que l'électricité spécifique dans ces deux secteurs. Elle pèse au total 39,1 TWh en 2010 et baisse de 17 % jusqu'à 32,5 TWh. La part du tertiaire dans cette consommation progresse globalement de 24 % en 2010 à 30 % en 2050. Par ailleurs, la consommation pour la cuisson est dominée de façon croissante par l'électricité, qui représente en 2050 environ 66 % de ce poste, le reste revenant au gaz après disparition de la part résiduelle de GPL.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 33 : Évolution de la consommation d'énergie finale pour la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire

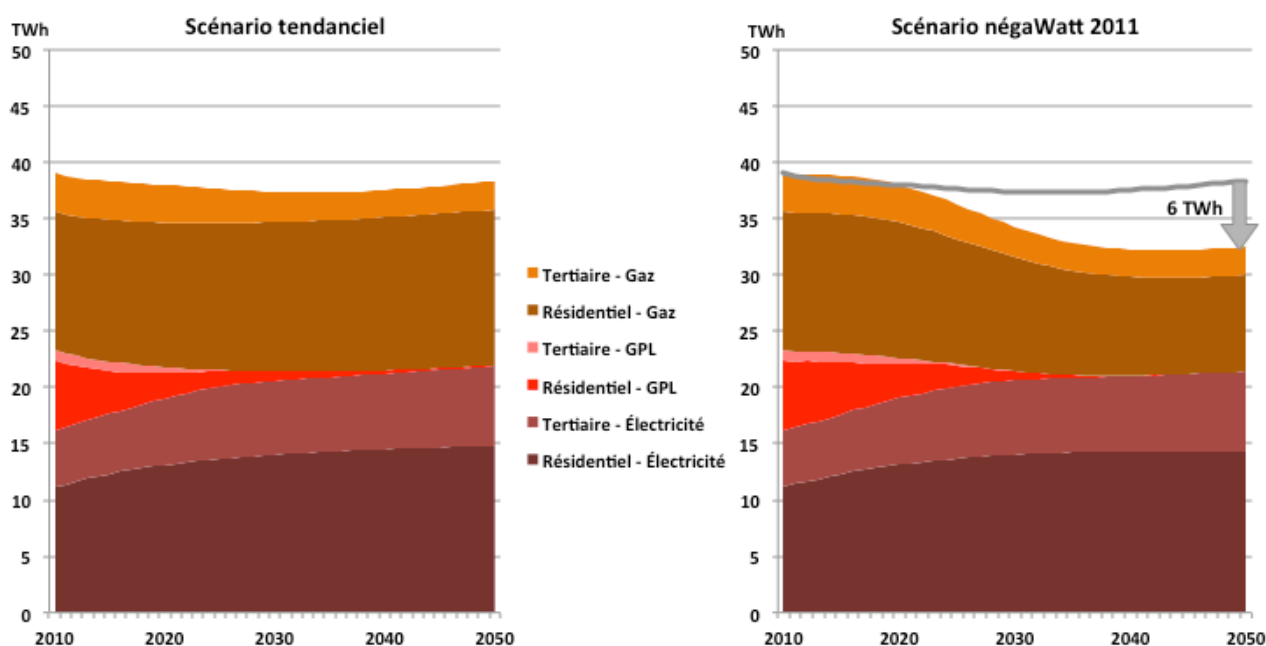


Figure 13 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'énergie finale pour la cuisson

1.2.5. Résultats sur les équipements dans le résidentiel et le tertiaire

Le scénario négaWatt 2011 illustre comment une démarche systématique de sobriété sur les usages et d'efficacité sur les appareils permet de réduire la consommation d'énergie finale pour l'ensemble des équipements utilisés dans le secteur résidentiel et le secteur tertiaire. Cette évolution, qui renforce les services énergétiques utiles et intègre même une part réservée au développement de nouveaux usages, se traduit par une division de près de la moitié des besoins en électricité spécifique dans le résidentiel comme dans le tertiaire, et par une réduction moindre des besoins en énergie finale pour la cuisson.

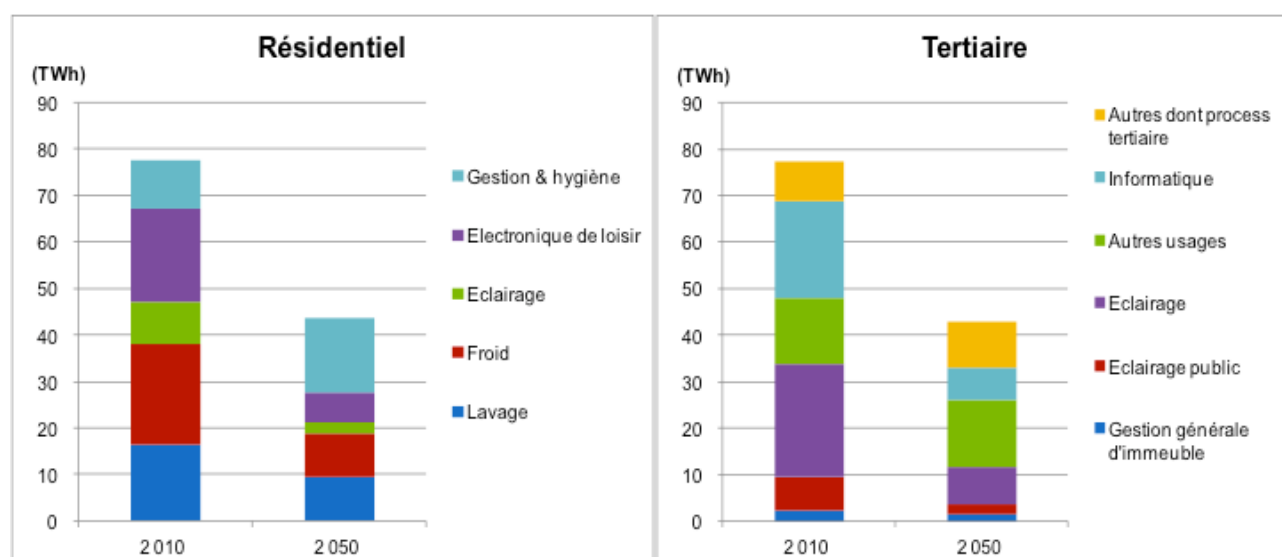


Figure 14 : Scénario négaWatt 2011 : consommation d'électricité spécifique en 2010 et 2050 dans le résidentiel et le tertiaire

Le scénario négaWatt représente au total, sur l'ensemble de ces usages, une réduction de 39 % des besoins en énergie finale en 2050 par rapport au niveau de 2010 : ainsi, la consommation baisse de 194 TWh à 119 TWh. Cette baisse est dominée à parts presque égales par la maîtrise de la demande sur l'électricité spécifique dans le résidentiel et dans le tertiaire. Le scénario intègre toutefois un développement de la part de l'électricité qui progresse dans les usages de cuisson aux dépens des combustibles GPL et gaz.

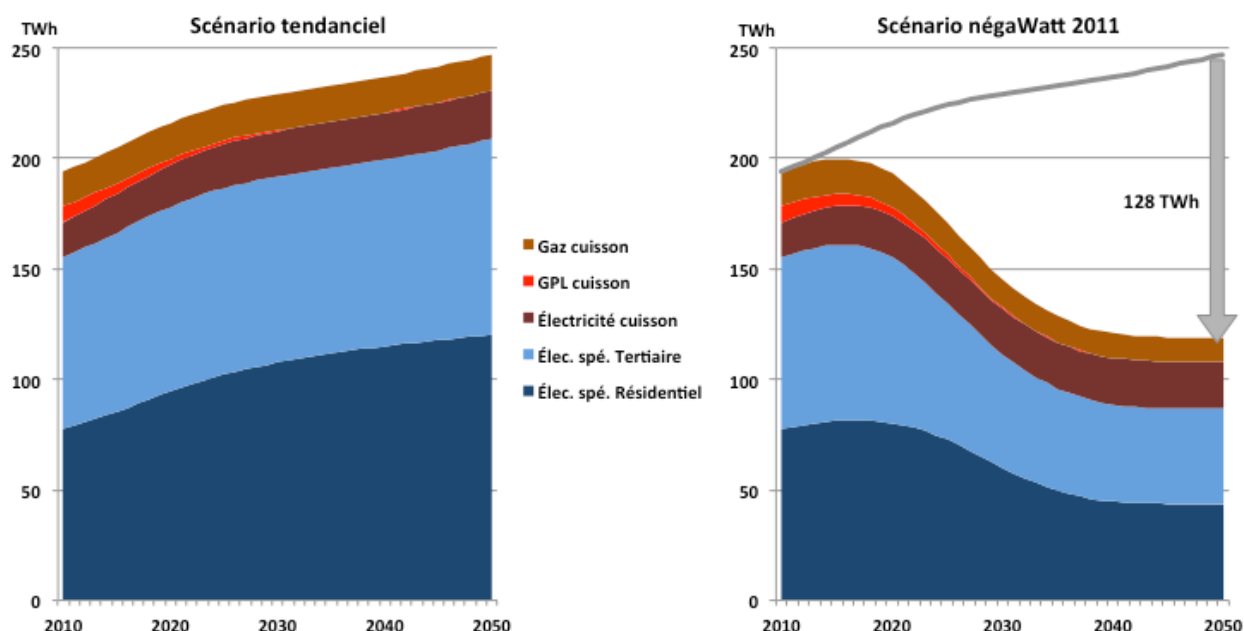


Figure 15 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'énergie finale pour l'électricité spécifique et la cuisson dans les secteurs résidentiel et tertiaire

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 34 : Évolution de la consommation d'énergie finale pour l'électricité spécifique et la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire

1.3. Confort thermique dans le résidentiel et le tertiaire

Cette section regroupe les consommations d'énergie finale associées au confort thermique dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. Le confort thermique intègre les trois usages de la chaleur que sont le chauffage des locaux, leur éventuelle climatisation, et la fourniture d'eau chaude sanitaire. Ces trois usages sont traités dans la suite en distinguant leur évolution dans le résidentiel d'abord puis dans le tertiaire.

1.3.1. Vision directrice

Le confort thermique dans les bâtiments résidentiels et tertiaires représente plus de 30 % de la consommation d'énergie finale et constitue donc à ce titre un chantier essentiel de la transition énergétique. Cette consommation est en grande partie déterminée non seulement par les solutions de fourniture des besoins de chaleur dans le bâtiment, qui présentent une efficacité diverse, mais surtout par la qualité de l'enveloppe des bâtiments. Aussi, les niveaux de consommation pour la chaleur dans les bâtiments connaissent une inertie beaucoup plus forte que la consommation liée aux autres usages résidentiels et tertiaires, où la vitesse d'évolution des comportements et de rotation des équipements peut être assez élevée.

Avec environ 1 % de nouvelles constructions par rapport aux bâtiments existants chaque année, et seulement 0,12 % de destructions, l'évolution est beaucoup trop lente pour s'en remettre au seul principe d'un renouvellement du parc par des bâtiments très performants énergétiquement.

L'option qui consisterait à accélérer le rythme des destructions et des constructions pour renouveler plus vite le parc n'est pas la bonne dès lors qu'on prend en compte non seulement l'énergie consommée pour le confort thermique dans l'occupation des bâtiments, mais aussi l'énergie grise consommée dans la production des matériaux de construction et les chantiers de construction (et dans une moindre mesure l'élimination des matériaux issus de destructions). Aujourd'hui, l'énergie grise d'un bâtiment neuf peut représenter plusieurs dizaines de fois sa consommation d'énergie annuelle : aussi, en dehors des démolitions de bâtiments justifiées pour d'autres raisons, notamment d'insécurité ou d'insalubrité, cette solution n'est jamais privilégiée du point de vue énergétique.

La vision directrice pour l'application de la démarche négaWatt sur les bâtiments consiste au contraire à appliquer d'abord la sobriété sur ce point. Comme cela a été discuté plus haut, il s'agit de maîtriser la progression de la surface par habitant dans le résidentiel et dans le tertiaire en jouant sur la densité d'occupation des logements et de fourniture de services dans les bâtiments tertiaires ainsi que sur le nombre et les surfaces moyennes des nouvelles constructions.

Au-delà de la surface totale de bâtiments, d'autres éléments peuvent intervenir en sobriété sur le niveau de confort thermique recherché, qu'il s'agisse de la température de consigne appliquée dans les bâtiments ou de la quantité d'eau chaude sanitaire utilisée. Leur rôle est toutefois marginal en regard de la question centrale de la performance thermique des bâtiments, qui inclut les qualités thermiques de l'enveloppe et le rendement des systèmes de chauffage, éventuellement de climatisation, et de production d'eau chaude sanitaire.

L'efficacité est le ressort essentiel de la démarche négaWatt appliquée au confort thermique dans les bâtiments. Elle réside à la fois dans une bonne isolation des bâtiments, une bonne maîtrise de la ventilation et de l'étanchéité à l'air des locaux, de manière à limiter les besoins de chauffage, et dans l'utilisation de systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire à rendements élevés.

Dans le neuf, les meilleurs niveaux de performance sont bien entendu systématiquement appliqués. Mais le parc de bâtiments existants, dont la majeure partie a été construite avant même l'introduction en 1975 de la première réglementation thermique – obligeant à un certain niveau de performance des bâtiments qui lui-même reste très insuffisant en regard des enjeux à long terme –, constitue le principal gisement d'économie d'énergie.

Aussi, l'élément central de la vision directrice appliquée au confort thermique est la mise en place d'un grand programme de rénovation thermique du bâtiment, s'appliquant à améliorer massivement la performance énergétique des bâtiments à la fois par l'isolation des parois et des toitures et par l'introduction de systèmes de ventilation performants, en veillant à ce que le nombre d'opérations et le niveau de performance atteint après rénovation mobilisent pleinement ce potentiel. En d'autres termes, l'objectif est bien d'avoir rénové l'ensemble du parc au niveau le plus performant à l'horizon 2050.

Enfin, cet effort sur le neuf et en rénovation s'accompagne de l'introduction systématique de systèmes de chauffage, de production d'eau chaude et de climatisation les plus performants, basés en priorité sur les énergies renouvelables. En particulier, une production renouvelable d'énergie est directement intégrée aux bâtiments neufs à chaque fois que cela est pertinent, et dans une moindre mesure en rénovation.

1.3.2. Confort thermique dans le secteur résidentiel

La méthode de modélisation suivie pour le confort thermique en résidentiel s'appuie sur une analyse de la chaîne des services énergétiques correspondants, partant des besoins liés à l'évolution du parc de bâtiments pour remonter aux vecteurs énergétiques.

Ainsi, la modélisation part de l'évolution démographique pour établir les besoins de confort thermique. Cette évaluation intègre en sobriété les éléments discutés au début de cette section sur le nombre de personnes par logement et sur la surface moyenne des logements, déterminés notamment par les choix sur les démolitions et les nouvelles constructions. Ces éléments, auxquels s'ajoute un facteur sur le taux d'équipement en climatisation des logements, fournissent la base d'une quantification des services énergétiques nécessaires : surfaces à chauffer, nombre de personnes à fournir en eau chaude sanitaire, surfaces à climatiser. D'autres facteurs potentiels de sobriété interviennent également à ce stade : la température de consigne recherchée en chauffage ou en climatisation, et la quantité moyenne d'eau chaude sanitaire consommée par personne.

Ces différents facteurs permettent ensuite de déterminer pour l'ensemble du parc résidentiel un besoin en énergie utile de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de climatisation. Là intervient l'efficacité, notamment à travers l'évolution de la performance énergétique de l'enveloppe des bâtiments. Celle-ci évolue à travers le niveau de performance des nouvelles constructions, mais aussi et surtout par les actions de rénovation. La répartition des systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de climatisation et leurs différents rendements permet enfin de reconstituer un besoin en vecteurs énergétiques pour ces trois services. On considère dans le scénario de référence un niveau modéré d'amélioration de l'efficacité tandis que le scénario négaWatt généralise progressivement les solutions les plus performantes.

Enfin, les opérations menées sur les bâtiments neufs et existants permettent, en faisant évoluer les vecteurs énergétiques mobilisés pour la chaleur, de progresser dans la substitution des énergies renouvelables aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire. Cette substitution se joue hors du champ des bâtiments pour les vecteurs de réseau (électricité, gaz et chaleur) mais elle intervient au contraire dans les bâtiments pour ce qui relève du développement de chaudières utilisant la biomasse et de l'installation de panneaux solaires thermiques aux bâtiments.

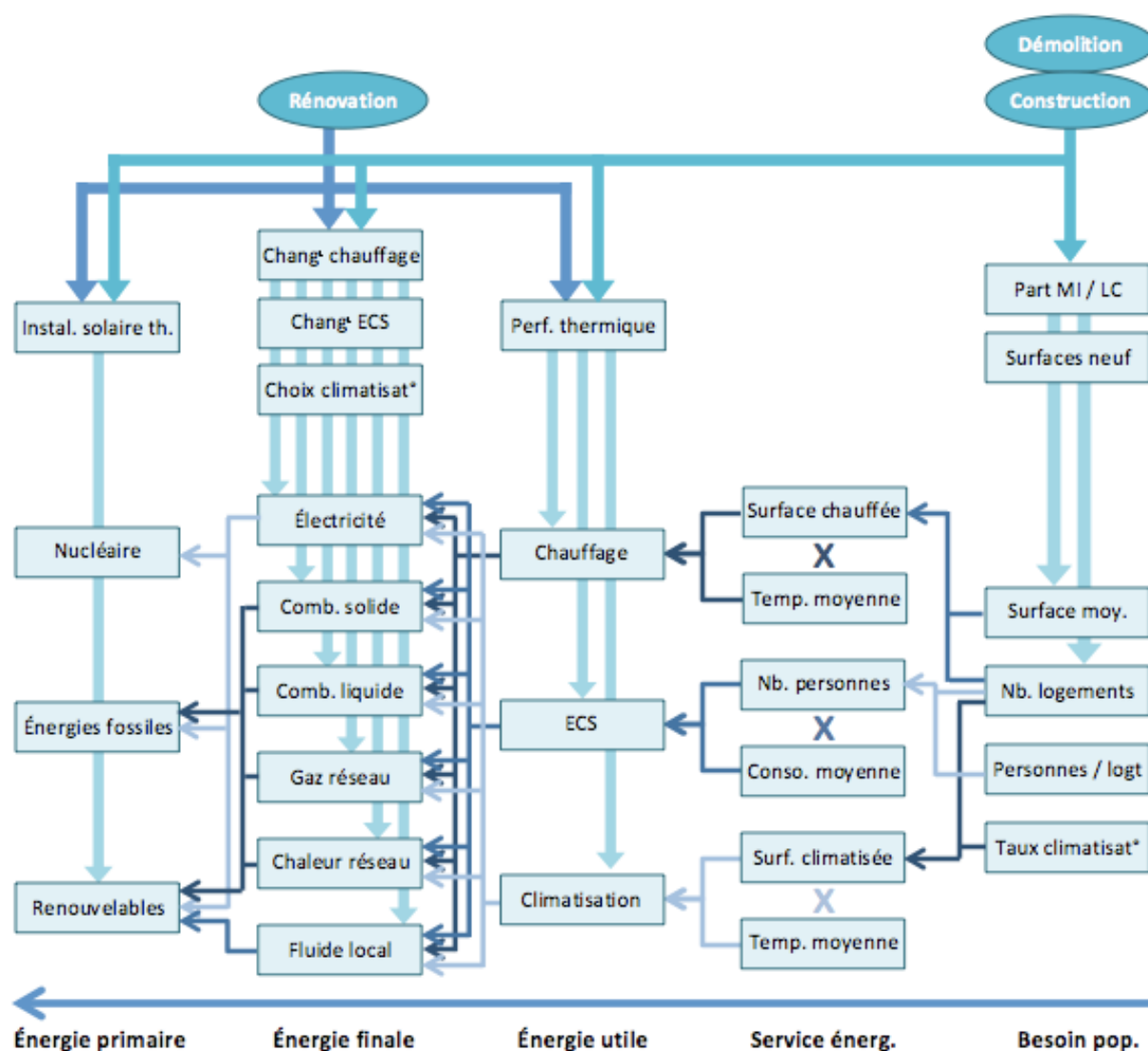


Figure 16 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie pour le confort thermique dans les logements (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation)

Amélioration thermique du parc de logements

L'évolution du parc de logements intervient à double titre dans les besoins de confort thermique du secteur résidentiel. Tout d'abord, le rythme de démolition, conservé stable et identique, et le rythme de construction déterminent l'évolution du besoin de service en termes de surfaces à chauffer, de nombres de logements à servir en eau chaude sanitaire, et éventuellement de surfaces à climatiser.

Mais au-delà des surfaces, la gestion du parc de logements intervient également de façon cruciale sur la performance thermique des bâtiments, par la performance introduite dans les nouvelles constructions et l'amélioration de la performance des logements existants par leur rénovation thermique.

Comme dans le scénario tendanciel, le scénario négaWatt introduit à partir de 2020 une exigence de performance en construction neuve de 15 kWh/m².an de besoin de chauffage (soit l'équivalent du niveau retenu dans les standards actuels en construction passive), dans les maisons individuelles comme dans les logements collectifs.

L'essentiel du gain potentiel en performance énergétique se situe dans la rénovation des logements. Le scénario négaWatt introduit un programme de rénovation massive qui démarre au plus tôt et monte progressivement en volume, selon un rythme volontariste mais réaliste vis-à-vis des délais incompressibles pour permettre à la profession et aux industriels du bâtiment de se former et de mettre en place les filières, et aux pouvoirs publics d'organiser les conditions réglementaires et financières de mise en œuvre des opérations. L'objectif fixé est d'atteindre avant 2025 un rythme proche de 750 000 logements rénovés par an, rythme nécessaire pour accomplir une rénovation de l'ensemble du parc à l'horizon 2050.

Le programme de rénovation est organisé par phases pour assurer au bout du compte un traitement homogène de l'ensemble du parc tout en traitant par ordre de priorité les logements les plus anciens. La même démarche est adoptée pour les maisons individuelles et pour les logements collectifs. Ainsi, le parc est découpé en tranches d'âges correspondant à différents niveaux de performance thermique moyens. On distingue d'abord le parc ancien, qui regroupe l'ensemble des logements construits avant l'introduction de la première réglementation thermique sur les bâtiments, en 1975, suite au choc pétrolier de 1973. Les bâtiments construits après 1975 sont ensuite rangés par âge en fonction des évolutions successives de cette réglementation thermique pour le neuf : logements construits de 1975 à 1981, de 1982 à 1988 puis de 1989 à 2010. On distingue également, parmi les bâtiments d'avant 1975, la fraction qui a déjà subi une rénovation thermique avant 2010.

Ces différentes catégories sont traitées successivement en donnant priorité aux catégories les plus anciennes, qui sont les moins performantes. La modélisation repose, pour représenter les enjeux aussi clairement que possible, sur une hypothèse de gestion par tranches de la rénovation. Ainsi, les rénovations thermiques sur le parc de 14,8 millions de logements construits avant 1975 et jamais rénovés commencent en 2012-2013 et montent en puissance pour atteindre un rythme de croisière proche de 470 000 opérations par an, dont un peu plus de moitié sur les maisons individuelles.

Le rythme de rénovation de cette tranche ne ralentit que dans les années 2040, lorsque l'essentiel de ce parc est traité et que ne demeure qu'une fraction résiduelle jugée impropre à la rénovation. On considère en effet qu'une partie des logements, toutes catégories confondues, ne pourra pas être rénovée du fait de difficultés diverses (d'ordre technique, juridique, architectural, etc.). Le scénario maintient pour cela, à titre conservateur, une fraction de 10 % du parc ancien hors rénovation. C'est également dans la dernière décennie qu'est réalisée la rénovation de la quasi-totalité des 2 millions de logements construits avant 1975 et déjà rénovés une première fois avant 2010.

À partir de 2020 environ, le programme de rénovation est progressivement étendu aux logements construits entre 1975 et 1981, entièrement traités sur une période d'une dizaine d'années, puis aux logements construits entre 1982 et 1988 autour de 2030 et enfin aux logements construits après 1989 après 2035, avec la même logique. La moitié enfin des logements existants en 2010 construits après 1989 est rénovée à terme. Au total, le nombre d'opérations de rénovation par an connaît dans les maisons individuelles comme dans les logements collectifs une progression régulière dans les dix premières années, puis un rythme de croisière qui ne diminue que dans les dernières années.

Nombre de rénovations annuelles	2020	2030	2040	2050
Logements Collectifs	254 415	349 271	347 709	110 123
Maisons Individuelles	282 144	400 721	402 274	139 897
TOTAL	536 559	749 992	749 983	250 020

Tableau 3 : Rythme de rénovation du parc résidentiel dans le scénario négaWatt

En définitive, 87 % des maisons individuelles et 91 % des logements collectifs existants avant 2010 font l'objet d'une ambitieuse rénovation énergétique entre 2011 et 2050 dans le scénario négaWatt, le reste étant la part résiduelle des logements construits avant 1975, et la grande majorité des logements construits entre 2000 et 2010. Le nombre de rénovations dépasse les 20 millions (11,2 millions de maisons individuelles et 9,8 millions de logements collectifs), un niveau bien plus important que dans le scénario tendanciel où seules 13 millions de rénovations performantes sont réalisées entre 2010 et 2050.

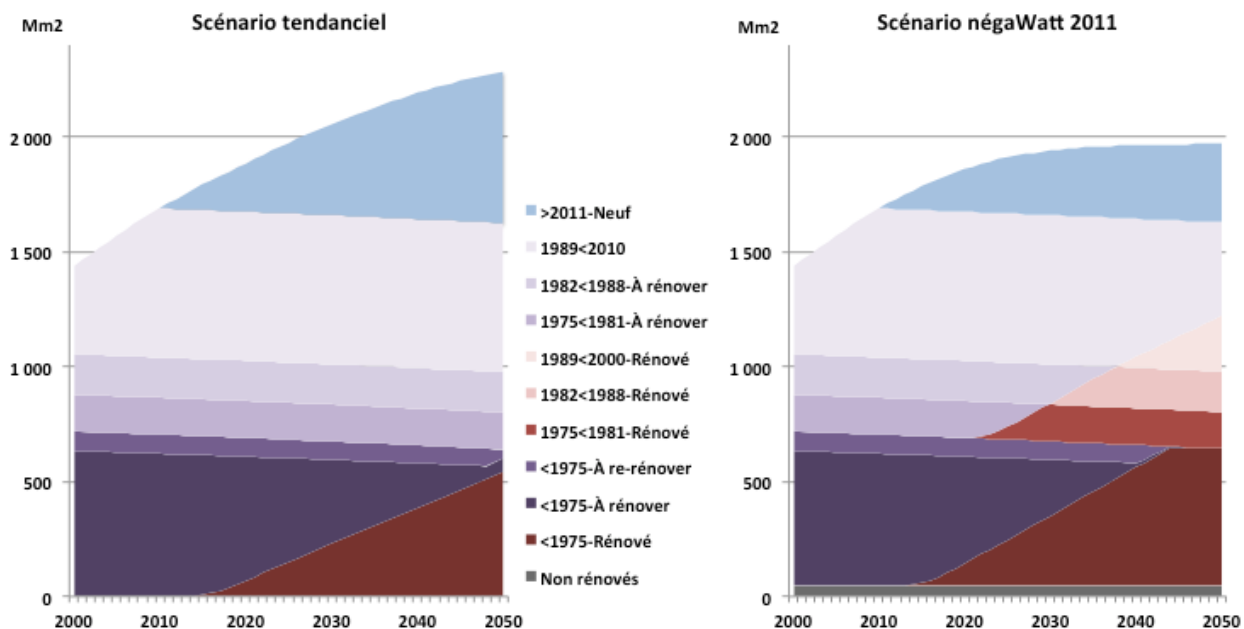


Figure 17 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : mise en œuvre de la rénovation thermique des maisons individuelles

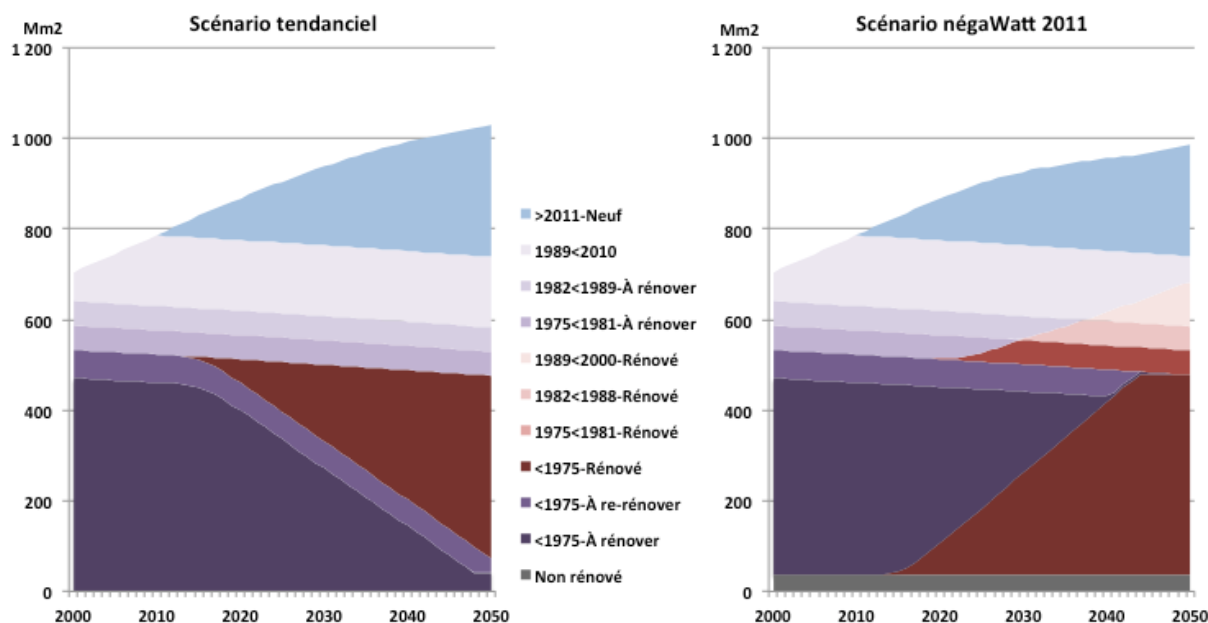


Figure 18 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : mise en œuvre de la rénovation thermique des logements collectifs

Outre le rythme des opérations, l'impact des rénovations sur la réduction des besoins d'énergie utile pour le chauffage des logements dépend fortement du niveau de performance atteint. Le scénario négaWatt s'applique de ce point de vue à ne pas « tuer le gisement » en évitant des opérations de rénovation peu poussées – au sens où le potentiel d'une réduction supplémentaire est alors perdu, si l'on considère réalisme qu'on n'interviendra qu'une fois en rénovation lourde sur chaque logement pendant la période.

Les rénovations réalisées dans le scénario négaWatt sont donc systématiquement menées en visant un degré élevé de performance. Cette réhabilitation thermique passe à la fois par la mise en place d'une isolation conséquente des parois (opaques et vitrées), par l'amélioration de l'étanchéité à l'air pour réduire les infiltrations d'air parasite, et par l'installation de ventilations performantes. Conformément à ce qui a été vu sur l'électricité spécifique, le choix se porte si possible vers une ventilation double flux afin d'assurer des débits de renouvellement d'air hygiénique suffisants tout en permettant une récupération efficace de la chaleur contenue dans l'air extrait. La ventilation simple flux hygro-réglable reste utilisée en cas de fortes contraintes techniques.

Dans les maisons individuelles, les rénovations visent à atteindre un besoin de chauffage moyen de 45 kWh/m².an sur le parc rénové, contre 200 kWh/m².an en moyenne dans le parc construit avant 1975⁶. L'application progressive et systématique des rénovations ainsi que le niveau de performance introduit dans les constructions neuves permettent d'abaisser les besoins moyens en chauffage du parc de maisons individuelles de 108 kWh/m².an en 2010 à 43 kWh/m².an à l'horizon 2050, soit une division par 2,5.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 35 : Évolution de la performance thermique des maisons individuelles sous l'effet des constructions neuves et de la rénovation

La logique est la même dans les logements collectifs. Les rénovations y visent une moyenne légèrement plus basse de 40 kWh/m².an sur le parc rénové, contre 140 kWh/m².an en moyenne dans le parc d'avant 1975 (avant rénovation). Les besoins moyens en chauffage du parc de logements collectifs, neuf et rénové inclus, passent de 105 kWh/m².an en 2010 à 37 kWh/m².an à l'horizon 2050.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 36 : Évolution de la performance thermique des logements collectifs sous l'effet des constructions neuves et de la rénovation

Chauffage

Les consommations d'énergie finale pour le chauffage dans le résidentiel dépendent de plusieurs facteurs. Le premier, dont l'évolution vient d'être détaillée, est celui de la performance énergétique des logements. Cette performance doit être croisée avec les usages, représentés essentiellement par la température de consigne recherchée par les habitants pour leur confort dans le logement. Enfin, les besoins en énergie utile correspondants doivent être croisés avec les solutions de chauffage et leur rendement pour déterminer des besoins en énergie finale.

Les températures intérieures de consigne pour le chauffage choisies par les habitants ont une influence d'autant plus importante sur les consommations que les bâtiments sont bien isolés. Ainsi, dans le parc de logements projeté à 2050 par le scénario négaWatt, une variation de 1°C de la température de consigne moyenne fait varier les besoins de chauffage d'environ 13 %.

Dans les logements rénovés, pour atteindre les besoins de chauffage décrits précédemment, une diminution de la température moyenne de consigne est envisagée. Elle est estimée en 2010 égale à 21°C ; dans le scénario négaWatt, elle passe à 19°C dans les logements rénovés. Cette diminution s'explique par deux facteurs. Le premier est l'amélioration naturelle du confort des occupants rendu possible grâce à l'isolation des parois et la suppression subséquente de « l'effet de paroi froide », qui permet d'améliorer

⁶ Les valeurs exprimées ici sont bien des besoins de chauffage et non des consommations. Les rendements des systèmes de chauffage (production et distribution) ne sont donc pas intégrés dans cette partie.

nettement la température ressentie par l'occupant (rappelons que la température ressentie par une personne est la moyenne entre la température des parois qui l'entourent et la température de l'air ambiant). Ainsi, même en diminuant légèrement la température de consigne, l'occupant d'un logement rénové de façon performante ressentira un meilleur confort. Le second facteur justifiant d'une diminution progressive de la température de consigne est le simple respect du code de la construction et de l'habitat qui date de 1979 (article R131-20) qui indique que la température des logements ne doit pas dépasser 19°C.

Cette diminution de la température de consigne masque également d'autres évolutions dont on fait par défaut l'hypothèse simplificatrice qu'elles se compensent en moyenne. D'un côté, le constat actuel est qu'une bonne partie des logements est surchauffée en hiver, notamment dans le logement collectif où les systèmes collectifs de chauffage sont souvent mal équilibrés et mal régulés. Les actions d'amélioration des systèmes de distribution et de régulation vont donc clairement dans le sens d'une baisse des températures de consigne à confort maintenu. De l'autre côté, la situation de précarité énergétique croissante des ménages conduit à ne chauffer que partiellement, voire pas du tout dans les cas extrêmes, une fraction de plus en plus importante des logements. La politique d'amélioration thermique de l'habitat, et plus largement l'évolution globale des consommations d'énergie des ménages, sont de nature à permettre une augmentation des surfaces réellement chauffées et des niveaux de chauffage assurés dans une trajectoire négaWatt. Ces facteurs contraires sont donc supposés se compenser tout en disparaissant tous les deux à l'horizon 2050.

Les besoins en énergie utile ainsi reconstitués sont croisés avec les options sur les solutions de chauffage. Le modèle repose bien sûr sur un inventaire de la répartition des solutions de chauffage pour chacune des catégories de logements retenues dans la projection du parc. Il permet ainsi de représenter finement le potentiel de modification des systèmes de chauffage à l'occasion des opérations de rénovation ainsi que les choix effectués dans les constructions neuves.

Le scénario négaWatt s'appuie sur l'introduction progressive de systèmes de chauffage (ainsi, comme on le verra plus loin, que de production d'eau chaude et de climatisation) qui recherchent à la fois la plus grande efficacité énergétique et la pénétration la plus grande possible des énergies renouvelables. Dans le neuf, la priorité est donnée aux solutions renouvelables les mieux adaptées aux conditions locales. Dans l'existant, l'effort de rénovation s'accompagne dans le scénario négaWatt de l'amélioration voire de la modification systématique des systèmes de chauffage. À terme, les formes actuellement dominantes sont quasiment abandonnées au profit d'un recours diversifié aux énergies renouvelables :

- élimination systématique du chauffage électrique direct par effet Joule, sauf pour une faible fraction de 2 % environ de logements où aucune autre solution n'est techniquement envisageable et pour des usages très ponctuels tels que l'appoint dans les salles de bains ;
- remplacement du chauffage électrique, là où l'électricité reste la meilleure solution, par des pompes à chaleur performantes ;
- disparition du fioul sauf pour une petite part résiduelle, du gaz butane et propane, ainsi que du charbon ;
- développement des différentes solutions de bois énergie ;
- diminution relative du gaz réseau, qui fait par ailleurs progressivement appel à une part croissante de gaz d'origine renouvelable au lieu de fossile, et introduction de micro-cogénération au gaz ;
- à terme, en tenant compte des délais nécessaires à leur implantation, pénétration accrue des réseaux de chaleur, particulièrement dans le logement collectif ;
- introduction du chauffage solaire dans une partie des maisons individuelles existantes, toujours après rénovation thermique.

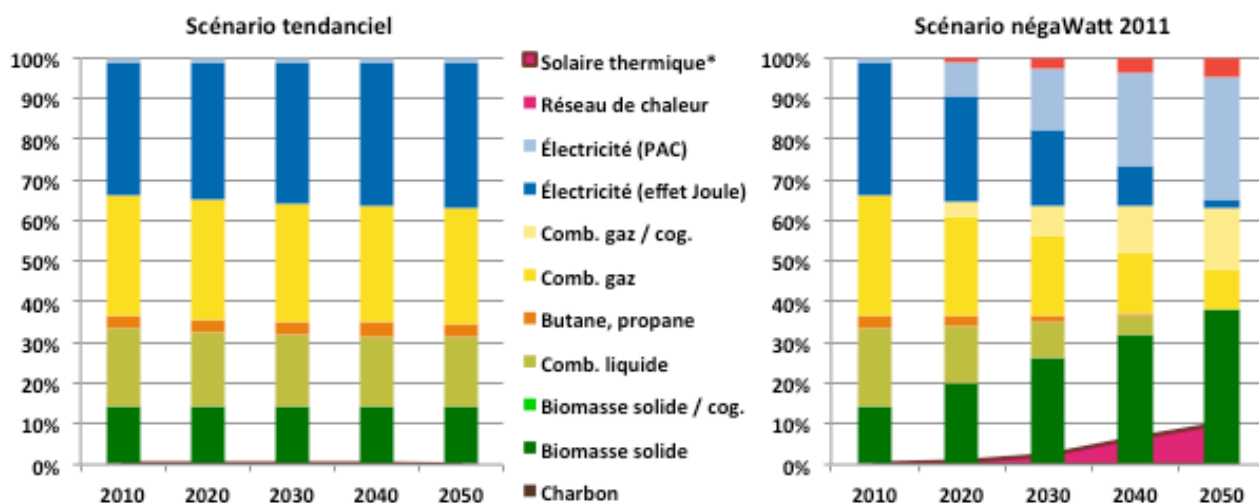
La diversification vers les énergies renouvelables répond à la nécessité d'adapter les solutions retenues aux spécificités des différents bâtiments, qu'il s'agisse de leur localisation géographique, de leur

implantation (accès aux réseaux de chaleur, de gaz), de leur exposition (possibilité d'apport solaire), etc. En particulier, la répartition retenue diffère pour les maisons individuelles et pour les logements collectifs.

Dans les maisons individuelles, le fioul et le GPL, plus présents qu'en collectif, reculent régulièrement pour disparaître à l'horizon 2050. La baisse des besoins unitaires de chauffage permet un transfert d'une majeure partie des usages correspondants vers l'utilisation du bois. On privilégie le bois bûche en chaudière performante à la campagne, puis de plus en plus les poêles ou chaudières à haut rendement à granulés en maison individuelle urbaine. La proportion de maisons individuelles chauffées au bois passe ainsi d'un peu moins de 15 % à près de 40 % entre 2010 et 2050. Le chauffage électrique direct est également progressivement supprimé, au profit du développement de pompes à chaleur performantes, dont le taux de pénétration dans les maisons individuelles atteint à terme 30 %. Une petite partie des maisons, portée au final à 5 %, peut être raccordée à des réseaux de chaleur qui seront développés dans les bourgs et les villages. La part restante, soit environ 25 %, est alimentée par le réseau de gaz, avec un passage dans près de 60 % des systèmes gaz à des installations en micro-cogénération.

L'alimentation des réseaux de chaleur évolue au fil des années. Aujourd'hui les énergies fossiles, la biomasse et les déchets fournissent l'essentiel des apports énergétiques. En 2050, ce sont principalement la biomasse, le biogaz et la géothermie.

Enfin, le scénario intègre l'installation de solaire thermique, après rénovation, sur un quart environ des maisons individuelles construites avant 1975, en système solaire combiné aux systèmes de chauffage qui y sont installés. L'installation de 28 millions de m² de capteurs solaires environ permet d'équiper à terme plus de 10 % du parc de maisons individuelles.



* Le solaire thermique est installé en système combiné avec les systèmes de chauffage présents dans une partie des maisons individuelles anciennes rénovées. Le pourcentage de solaire thermique représente ici la proportion des surfaces de maisons individuelles équipées. Le solaire fournit alors une base, complétée par une énergie d'appoint dont la répartition est donnée par les pourcentages des autres énergies.

Figure 19 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles

Dans le logement collectif, la densité favorise le recours aux réseaux de chaleur, qui sont déjà en partie développés pour ce type de logements, et qui progressent dans le scénario négaWatt pour équiper à terme près de 32 % des logements collectifs. La biomasse solide, sous forme de plaquettes forestières et de granulés bois, est utilisée dans des micro-réseaux ou des chaufferies collectives dans environ 30 % des logements ; une petite partie est installée en cogénération. Le réseau de gaz alimente la même proportion

d'immeubles qu'en maisons individuelles, soit environ 25 %, avec la même proportion de micro-cogénération. Le solde est couvert par de l'électricité à travers des pompes à chaleur, qui équipent environ 20 % des logements collectifs.

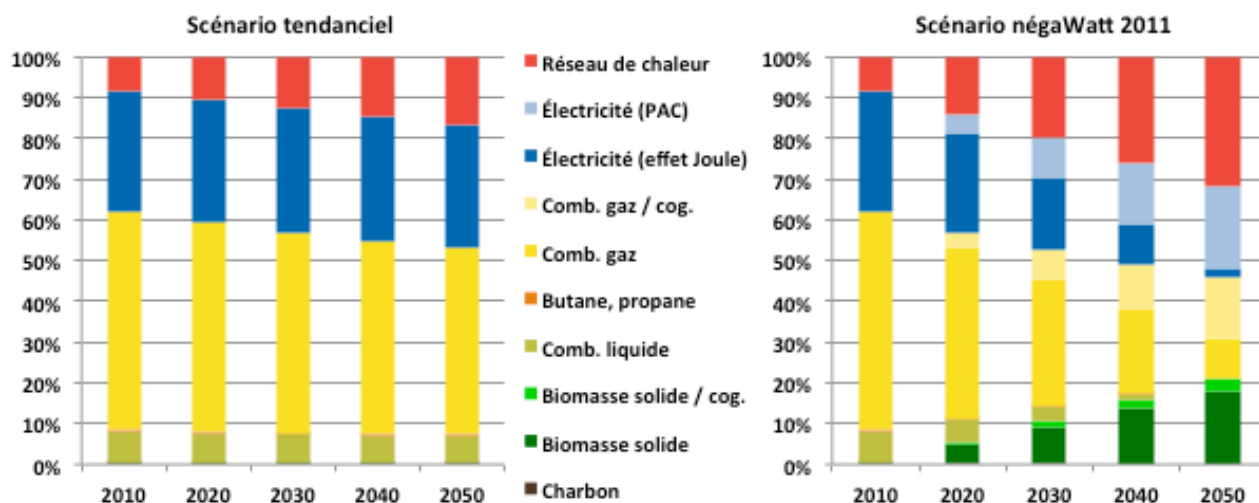


Figure 20 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans les logements collectifs

La dernière étape de la démarche et de la modélisation repose sur l'amélioration des rendements de l'ensemble des systèmes de chauffage. Les rendements pris en compte à cette étape sont des rendements globaux, incluant génération, distribution, régulation et émission, de conversion de l'énergie finale en énergie utile au niveau des systèmes (qui n'incluent donc pas le rendement amont de conversion de l'énergie primaire en énergie finale, évidemment très variable selon qu'on utilise un combustible, un réseau de chaleur ou de l'électricité). Cette amélioration repose notamment sur l'application systématique des orientations suivantes :

- l'élimination des appareils anciens vétustes, qui concerne essentiellement les appareils utilisant du bois, du fioul ou du charbon ;
- le renouvellement progressif des générateurs à combustion existants par des appareils à haute efficacité, avec le recours systématique aux chaudières à condensation pour les chaudières gaz mais aussi biomasse ;
- l'élimination des systèmes électriques à effet Joule et le recours aux pompes à chaleur, incluant l'amélioration de leur coefficient de performance (COP) moyen annuel du fait de l'utilisation préférentielle de pompes à chaleur sur eau de nappe, pieu ou échangeur horizontal enterré ;
- l'isolation renforcée des réseaux de distribution ;
- l'utilisation préférentielle d'émetteurs à basse température (planchers chauffants, radiateurs à basse température) qui procurent une meilleure homogénéité des températures intérieures et sont favorables à des performances optimisées des appareils à condensation et des pompes à chaleur (COP élevé) ;
- l'utilisation de régulations à faible hystérésis (comme par exemple, pour les radiateurs, des vannes deux voies commandées par des moteurs électrothermiques pilotés par un thermostat d'ambiance placé dans chaque pièce ou à l'entrée du logement, qui permettent une meilleure récupération des apports gratuits que des robinets thermostatiques classiques), l'amélioration des régulations centrales reliées à des sondes de température extérieure, l'utilisation accrue de l'intermittence, etc.

Cet effort permet une progression globale des rendements moyens des systèmes de chauffage. Cette progression diffère, pour chacun des systèmes, en fonction de la catégorie et de l'ancienneté des

logements en partant des écarts constatés en 2010 sur le parc. La valeur cible retenue en efficacité en fin de période (2050) est toutefois fixée, pour chaque filière, de façon homogène sur l'ensemble du parc, toutes catégories confondues – à l'exception des réseaux de chaleur pour lesquels une valeur plus élevée est retenue dans les maisons individuelles, jusqu'à 98 % de rendement contre une progression limitée à 80 % dans les logements collectifs du fait notamment des pertes de distribution. Les rendements moyens des chaudières progressent pour atteindre en particulier 70 % pour les systèmes au bois et 75 % pour les systèmes au gaz. Enfin, la performance des pompes à chaleur est assurée avec un COP moyen progressant de 2,5 en 2010 à 4,0 en 2050.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 37 : Évolution du rendement des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles et les logements collectifs

À l'issue de ces différentes étapes du scénario négaWatt, la consommation d'énergie finale pour le chauffage des logements change radicalement en volume et dans la structure des vecteurs énergétiques mobilisés pour y répondre.

Dans l'ensemble des maisons individuelles, la consommation d'énergie finale pour le chauffage est ramenée de 277 TWh en 2010 à 99 TWh en 2050 (-64 %). La baisse est beaucoup plus forte dans les maisons construites avant 1975, où la demande finale diminue de 80 % sous l'effet de la rénovation systématique. Même la consommation de bois diminue fortement alors que sa contribution (en part de surface chauffée) augmente.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 38 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans les maisons individuelles

Les mêmes résultats, avec quelques nuances importantes, sont obtenus sur les logements collectifs. La baisse globale est un peu moins forte, mais la consommation d'énergie finale pour le chauffage diminue cependant de 110 TWh en 2010 à 47 TWh en 2050 (-57 %). Comme pour les maisons individuelles, la réduction est très nette sur le parc de logements antérieurs à 1975, où la consommation connaît une baisse de 71 %. La priorité donnée dans les nouvelles constructions au petit collectif conduit cependant la consommation dans le parc postérieur à 1975, compte tenu du poids de ces nouveaux logements, à progresser de 22 % entre 2010 et 2050.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 39 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans les logements collectifs

Au total, le bilan sur l'énergie consommée pour le chauffage dans les logements, toutes catégories confondues, peut être décomposé en trois étapes. La première est l'action combinée de l'effort de sobriété, principalement porté sur les surfaces, et du travail sur l'isolation des bâtiments dans le neuf et en rénovation pour réduire les besoins en énergie utile. Celle-ci diminue de 71% dans le parc construit avant 1975 et augmente de 8 % dans le reste du parc, neuf inclus, soit au total une réduction de plus de moitié (52 %) du besoin en énergie utile.

La seconde est l'application systématique de la recherche des meilleurs rendements des systèmes de chauffage, qui permet en moyenne de gagner une dizaine de points supplémentaires sur la transformation de l'énergie finale en énergie utile. Ainsi, la consommation totale d'énergie finale pour le chauffage des logements, qui représente 387 TWh en 2010, recule de 62 % pour s'établir en 2050 à 146 TWh.

La troisième est le transfert massif vers des vecteurs énergétiques pouvant s'appuyer sur les ressources renouvelables. Ce transfert se fait d'une part en s'appuyant directement sur l'utilisation de la biomasse dans des systèmes de chauffage bois ou sur le recours au solaire thermique, d'autre part de façon indirecte en prélevant sur les réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur dont les sources d'énergie primaire vont par ailleurs inclure un part croissante d'énergies renouvelables.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 40 : Évolution des consommations d'énergies utile et finale pour le chauffage dans le résidentiel

Le scénario négaWatt représente à l'horizon 2050 une économie de 71 TWh par rapport au scénario tendanciel. Dans celui-ci, l'absence de sobriété sur les surfaces et d'un programme suffisamment ambitieux de rénovation conduit à une diminution moins forte des besoins en énergie utile. L'absence de progrès suffisant sur les rendements conduit également à ralentir la diminution des consommations.

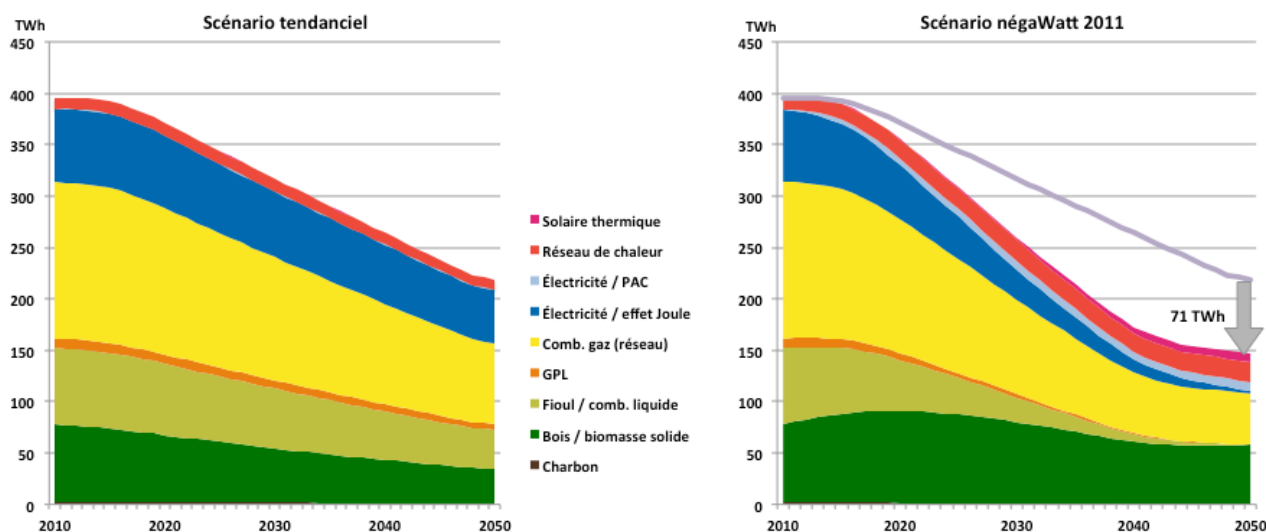


Figure 21 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'énergie finale pour le chauffage dans le secteur résidentiel

Eau chaude sanitaire (ECS)

Le deuxième poste de confort thermique à prendre en compte est celui de la production d'eau chaude sanitaire. Le besoin de service énergétique est ici défini par le volume d'eau chaude consommée et par la température à laquelle celle-ci est utilisée. L'énergie utile ainsi représentée est convertie en énergie finale en fonction des caractéristiques et des rendements des solutions retenues pour la production d'eau chaude.

Les consommations d'eau chaude observées témoignent d'une grande diversité des comportements d'une famille à l'autre, avec des écarts de consommation d'eau par personne qui varient d'un facteur un à quatre, voire davantage, entre les foyers. La moyenne actuelle, qui s'établit à 32,0 litres à 50°C⁷ par personne par jour (l/pers.j) dans les maisons individuelles et 21,3 l/pers.j dans les logements collectifs, cache donc des gaspillages considérables. Le scénario négaWatt prévoit une baisse de la consommation moyenne d'eau chaude qui traduit davantage une réduction de ces disparités qu'un effort homogène de sobriété. De plus, l'application quasi systématique des dispositifs de limitation des débits aux points de soutirage permet, à confort égal, de réduire les consommations d'eau. Le scénario prend également en compte, indirectement, une baisse liée à l'augmentation du taux d'équipement en lave-vaisselle. Le scénario retient globalement une baisse des besoins de 1 % par an dans les maisons individuelles et de 0,5 % par an dans les logements collectifs.

Ainsi la consommation moyenne d'eau chaude par habitant, tous logements confondus, passe de 27 l/j en 2010 à 20 l/j en 2050. En prenant en compte l'écart moyen de température entre la température d'eau

⁷ La température moyenne de l'eau chaude sanitaire soutirée (avant mélange au robinet) est supposée constante et normalisée à 50°C pour caractériser les volumes.

chaude (50°C) et la température de l'eau froide, on peut calculer à partir de cette consommation un besoin en énergie utile par personne et par an pour l'ECS.

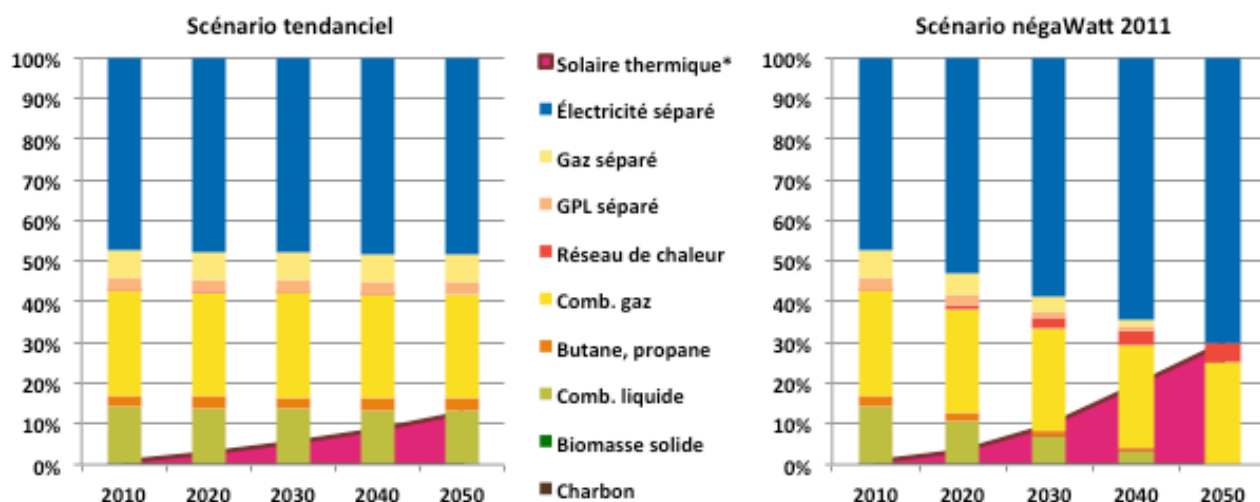
Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 41 : Évolution de la consommation d'eau chaude dans le résidentiel

Comme pour le chauffage, la modélisation des besoins de production d'eau chaude sanitaire correspondant à ces besoins en énergie utile prend en compte les différents leviers d'efficacité applicables dans le scénario négaWatt. En amont du choix des techniques les plus efficaces pour les systèmes de production, cette démarche passe par une optimisation des quantités d'énergie à fournir pour répondre aux besoins en énergie utile, en recherchant par exemple une récupération de la chaleur des eaux usées, et une réduction des pertes de distribution par l'amélioration du tracé et l'isolation renforcée des réseaux de distribution dans les logements – particulièrement en collectif où les boucles de distribution sont responsables d'une très forte proportion de pertes thermiques.

L'évolution vers des systèmes plus efficaces et permettant un plus grand recours aux énergies renouvelables repose sur des priorités différentes dans les logements individuels et collectifs.

Dans les maisons individuelles, la priorité est donnée à la production d'eau chaude par un système performant séparé du système de chauffage lorsque celui-ci ne peut pas fournir ce service de façon aussi performante. Ainsi, les systèmes de production d'eau chaude au gaz ou par réseau de chaleur suivent l'évolution des modes de chauffage correspondants, jugée suffisante, tandis que pour les autres modes de chauffage développés dans le scénario négaWatt (essentiellement chauffage bois et pompe à chaleur), on privilégie au contraire un système séparé de production d'eau chaude, basé sur l'électricité, qui permet un gain d'efficacité plus important. Cette orientation s'accompagne d'un changement de technologie : quand la configuration le permet, les chauffe-eau électriques à effet Joule sont progressivement retirés au profit de chauffe-eau thermodynamiques performants.

La répartition visée à terme est de 70 % de systèmes séparés électriques, 25 % de production d'eau chaude associée à un système de chauffage au gaz, et 5 % associée à un système de chauffage par réseau de chaleur. Le scénario prévoit par ailleurs un développement soutenu du solaire thermique qui contribue à la production d'eau chaude sanitaire. Avec à terme 20 millions de m2 de capteurs déployés sur les maisons individuelles, cet apport contribue à l'horizon 2050 à 38 % des besoins d'eau chaude sanitaire.

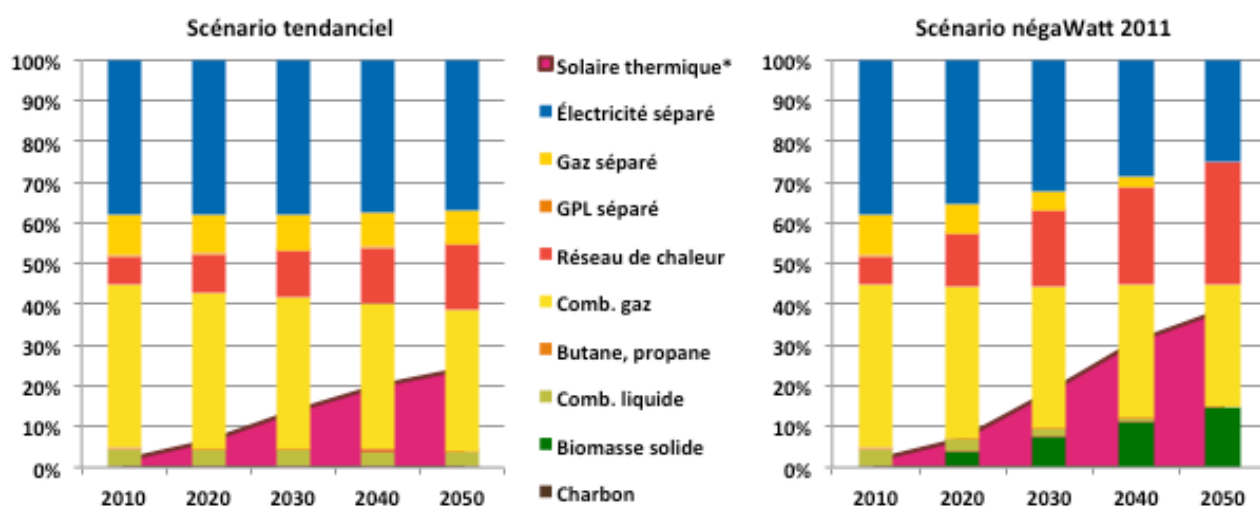


* Le pourcentage de solaire thermique représente ici la proportion des surfaces de maisons individuelles équipées. Le solaire fournit alors une base, complétée par une énergie d'appoint dont la répartition est donnée par les pourcentages des autres énergies.

Figure 22 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les maisons individuelles

Dans le logement collectif, c'est au contraire le recours, pour la production d'eau chaude, au même système que pour le chauffage qui est privilégié. En conséquence, le scénario négaWatt prévoit sur l'eau chaude sanitaire une évolution très proche de celle de la répartition des systèmes de chauffage. Ceci conduit à une réduction de la part du gaz au profit notamment de systèmes au bois et surtout de réseaux de chaleur. Les systèmes séparés de production électrique d'eau chaude sont privilégiés là où le système de chauffage est lui-même électrique. Comme dans les maisons individuelles, les chauffe-eau thermodynamiques remplacent progressivement les systèmes à accumulation par effet Joule.

À terme, les systèmes au gaz et les réseaux de chaleur représentent 30 % chacun, les systèmes au bois 15 %, et les systèmes électriques séparés 25 %. Le scénario prévoit également une pénétration du solaire thermique similaire à celle en maison individuelle. À l'horizon 2050, il fournit, via l'installation de 10 millions de m², plus de 37 % des apports en eau chaude sanitaire dans les logements collectifs.



*Le pourcentage de solaire thermique représente ici la proportion des surfaces de logements collectifs équipées. Le solaire fournit alors une base, complétée par une énergie d'appoint dont la répartition est donnée par les pourcentages des autres énergies.

Figure 23 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les logements collectifs

Le scénario négaWatt se traduit ainsi, pour l'eau chaude sanitaire, par la disparition progressive des combustibles fossiles (fioul, butane et propane) et par la diminution des systèmes électriques à effet Joule et de la part relative du gaz.

Les besoins en énergie finale sont déterminés en tenant compte des rendements des différents systèmes, et de leur progression au fil de l'introduction de systèmes plus performants. Pour la production d'eau chaude sanitaire, les rendements pris en compte sont des rendements globaux, incluant la génération de l'eau chaude, son stockage et sa distribution. Le scénario négaWatt introduit des gains significatifs en efficacité sur tous les systèmes, basés notamment sur :

- les gains induits sur les rendements de génération pour les systèmes de production d'eau chaude couplés avec le système de chauffage ;
- les gains induits par l'introduction progressive de pompes à chaleur pour les systèmes indépendants utilisant l'électricité ;
- l'isolation renforcée des dispositifs de stockage de l'eau chaude et des réseaux de distribution, notamment les circuits bouclés.

Grâce à ces différentes améliorations, les rendements progressent significativement pour tous les types de systèmes. Les systèmes couplés au chauffage atteignent au minimum 60 % de rendement, comme la production d'eau chaude par système de chauffage bois dans les logements collectifs, et jusqu'à 90 % pour la production par réseau de chaleur en maison individuelle. Les systèmes de production d'eau chaude électrique (chauffe-eau classiques et CET) atteignent un COP de 1,5 en moyenne, ce qui constitue un niveau très conservateur par rapport aux progrès possibles dans ce domaine.

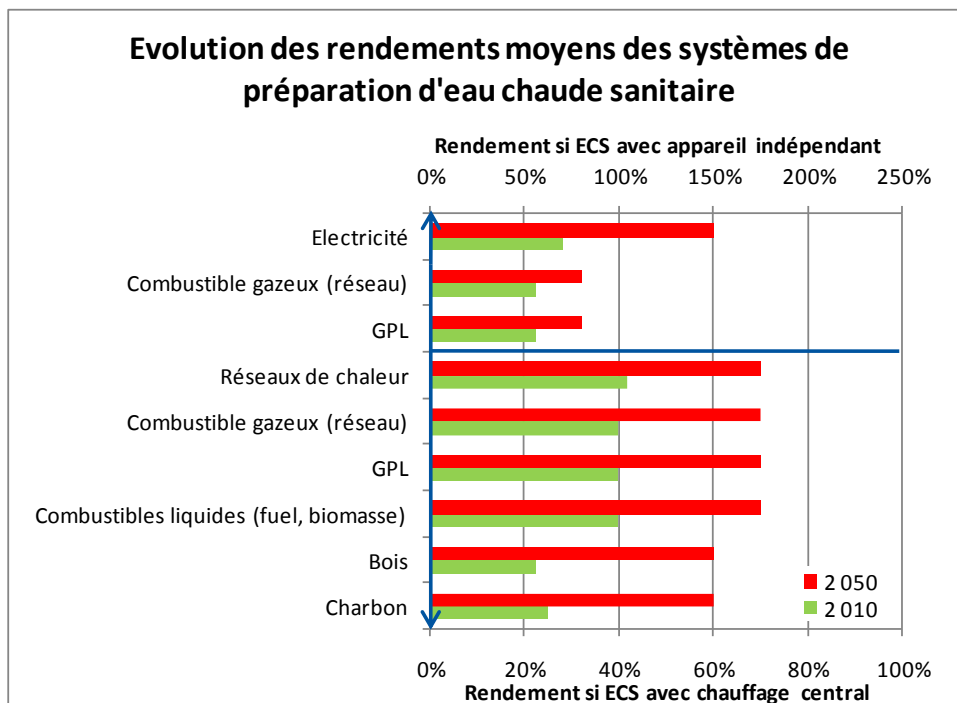


Figure 24 : Évolution des rendements moyens sur l'ensemble du parc de logements collectifs des différents systèmes de préparation d'eau chaude sanitaire

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 42 : Évolution du rendement des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les maisons individuelles et les logements collectifs

L'évolution de ces différents paramètres permet d'envisager une diminution de la consommation d'énergie finale nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire dans les logements, passant de 53,9 TWh en 2010 à 23,3 TWh en 2050 (-57 %).

Climatisation

Il est relativement simple de faire des prévisions sur l'évolution de la consommation de chauffage car les principaux paramètres sont connus ou peuvent être estimés. L'exercice est en revanche beaucoup plus délicat en matière de besoin de rafraîchissement. Le paramètre « taux d'équipement » est particulièrement représentatif de cette difficulté : c'est un facteur déterminant de la consommation dont l'évolution est liée à de nombreux facteurs n'ayant pas tous le même degré de prévisibilité (évolution des techniques de construction et de rénovation, évolution sociétale sur le « besoin » de rafraîchissement, évolution du climat). La prudence est donc de mise dans la lecture des hypothèses et l'interprétation des résultats qui vont suivre.

En matière de climatisation, comme pour le chauffage, la sobriété repose sur la limitation des surfaces climatisées et sur les températures de consigne. Toutefois, de grandes différences existent entre le chauffage et la climatisation : cette dernière représente un usage qui ne s'avère pas toujours

indispensable ; on peut donc plus facilement limiter le taux d'équipement tout comme les durées d'utilisation.

Vient ensuite l'efficacité qui consiste à limiter les besoins de rafraîchissement en concevant les bâtiments de manière à réduire au maximum les apports de chaleur externes (isolation des parois, mise en place de protections solaires efficaces, surventilation nocturne quand c'est possible) et les dégagements de chaleur interne (utilisation d'appareils à haute efficacité : éclairage, bureautique, électroménager, hifi-vidéo), afin que la consommation électrique finalement dégradée en chaleur soit la plus réduite possible.

Cela étant, la réalisation d'enveloppes de bâtiments très performantes risque d'augmenter les besoins de climatisation (notamment dans le neuf), la chaleur se retrouvant piégée dans le bâtiment. Par conséquent, le scénario négaWatt ne rejette pas complètement l'usage de la climatisation puisqu'il est supposé qu'en 2050, 20 % du parc de logements sera climatisé, contre 5 % aujourd'hui.

Du fait d'une meilleure protection des logements contre les apports solaires et d'une maîtrise des apports internes liée à une baisse des consommations d'électricité spécifique, une légère diminution du besoin surfacique moyen de climatisation est envisagée, de 11,8 kWh/m².an en 2010 à 10 en 2050.

En 2050, la climatisation est apportée par des appareils dont le rendement augmente progressivement : le coefficient de performance (COP) moyen est de 3 en 2050, contre 2,2 actuellement. Ces appareils sont alimentés en électricité d'origine renouvelable. Une petite fraction peut également utiliser des systèmes de climatisation à absorption fonctionnant au gaz, ou être alimentée par des réseaux froids urbains.

Au total, dans le scénario négaWatt, la consommation d'énergie finale dédiée à la climatisation passe de 0,7 TWh en 2010 à 2,1 TWh en 2050.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 43 : Hypothèses formulées pour la climatisation dans le résidentiel

Résultats pour le confort thermique dans le secteur résidentiel

Additionnées, les consommations dues au chauffage et à la climatisation des logements ainsi qu'à la production d'eau chaude sanitaire représentent 452 TWh en 2010. Grâce à l'ensemble des actions de sobriété et d'efficacité énergétiques, elles ne représentent plus que 173 TWh en 2050 (-62%).

1.3.3. Confort thermique dans le secteur tertiaire

La méthodologie suivie pour le confort thermique dans le secteur tertiaire ressemble fortement à celle présentée pour le secteur résidentiel : analyse des besoins surfaciques (en distinguant l'évolution des surfaces par grand secteur d'activité), évolution des rénovations du parc de bâtiments, évolution des consommations moyennes d'ECS, évolution des besoins en climatisation, évolution de la répartition des systèmes de production de chauffage, d'ECS et de climatisation et évolution des rendements de ces différents systèmes.

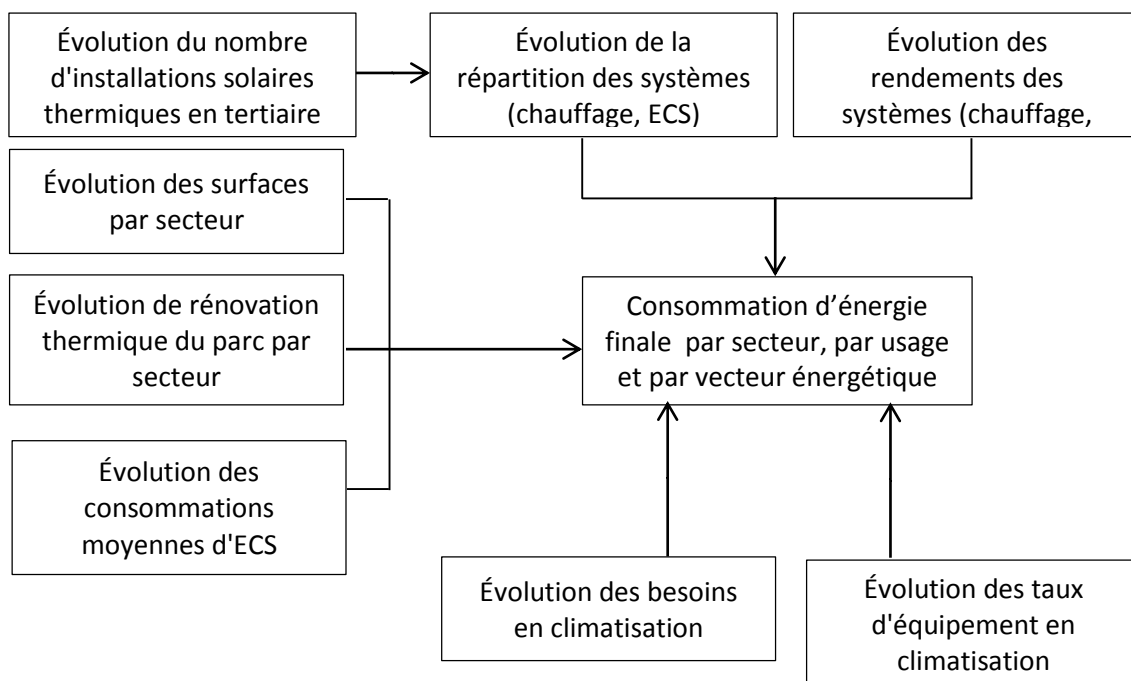


Figure 25 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées au confort thermique dans le secteur tertiaire

Les secteurs pris en compte pour le tertiaire sont les huit habituellement retenus dans les statistiques : Cafés, Hôtels, Restaurants ; Habitat Communautaire ; Santé, Action sociale ; Enseignement, Recherche ; Sport, Loisirs ; Bureaux, Administrations ; Commerce ; Transport.

Évolution de la surface construite par secteur d'activité

Afin d'affiner au mieux les évolutions des surfaces construites dans chacun des secteurs, celles-ci ont été corrélées à l'évolution de la frange de la population concernée par chacun des secteurs : proportionnelles à la population de plus de 60 ans pour les secteurs Habitat Communautaire et Santé, Action sociale ; proportionnelles à la population de 0 à 19 ans pour le secteur Enseignement, Recherche ; proportionnelles à la population de 20 à 59 ans pour le secteur Bureaux, Administrations ; proportionnelles à l'ensemble de la population pour les autres secteurs.

Rénovation thermique du parc tertiaire

Comme pour le secteur résidentiel, un programme massif de rénovation est enclenché, à partir de 2016, avec une montée en régime progressive en une dizaine d'années. 3,5 % du parc sont alors rénovés chaque année. Là aussi une distinction entre bâtiments antérieurs et postérieurs à 1975 a été faite.

Milliers de m ² rénovés annuellement	2020	2030	2040	2050
TOTAL	14 000	28 984	28 984	28 734

Tableau 4 : Rythme de rénovation annuel dans le secteur tertiaire

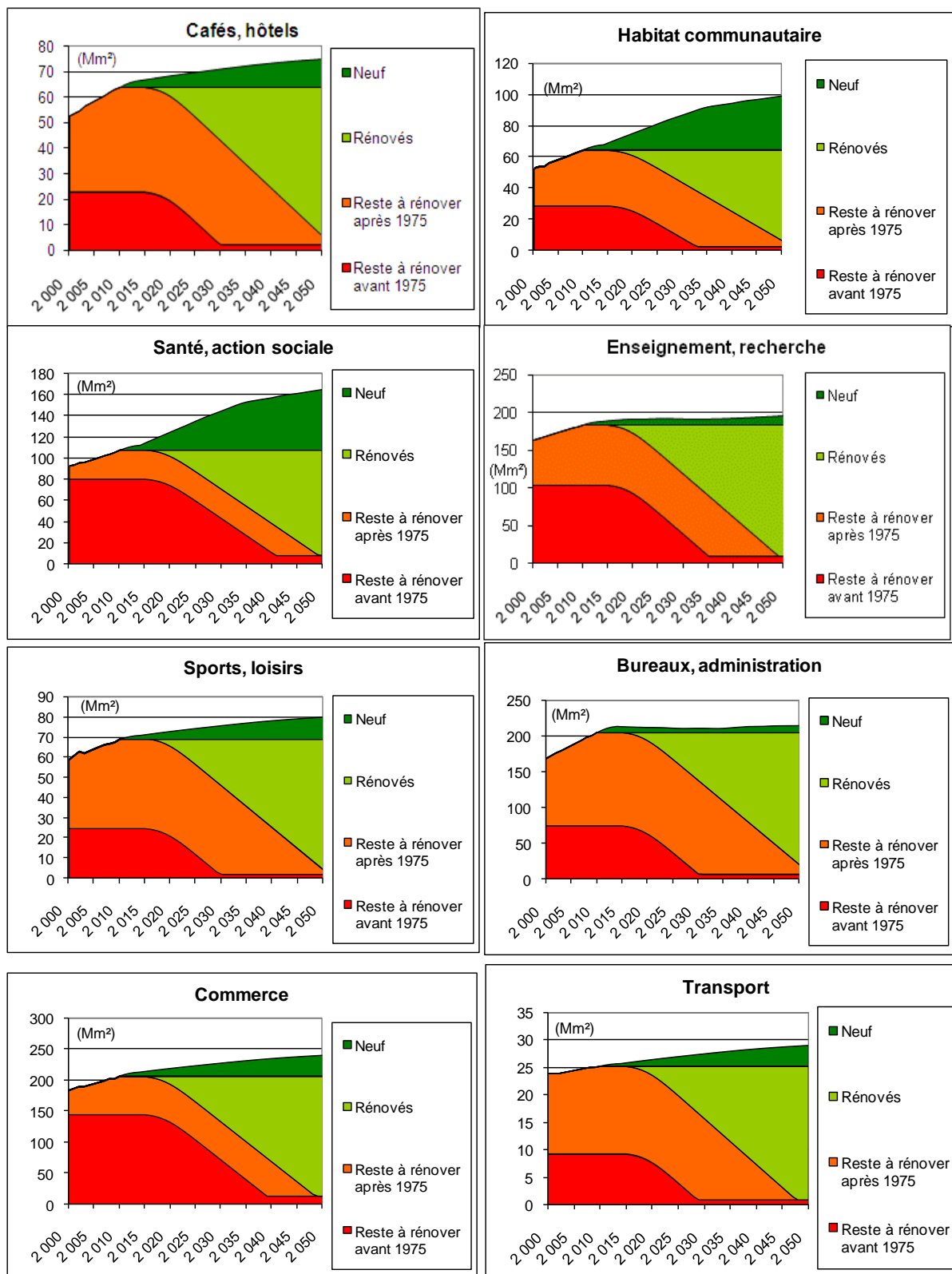


Figure 26 : Évolution de la structure du parc dans le secteur tertiaire

Besoins de chauffage

Dans le secteur tertiaire, les ratios moyens de besoins de chauffage comportent d'importantes différences d'un secteur à l'autre, du fait de la diversité des types de bâtiments et de leur occupation. Une école par exemple n'est occupée à peine qu'un tiers du temps alors que les hôpitaux doivent être maintenus à une température confortable en permanence. La reconstitution des consommations conduit à des coefficients de besoins variant de 85 à 180 kWh/m².an pour les bâtiments construits avant 1975 et de 75 à 150 kWh/m².an pour ceux construits après 1975. Une rénovation poussée sur un bâtiment permet en moyenne de diminuer ces besoins à 35 kWh/m².an. Ce chiffre est également retenu pour les surfaces nouvellement construites.

Hypothèses chiffrées et détaillées dans l'Annexe 1 - Tableau 44 : Besoins moyens de chauffage par m² de surface dans le tertiaire

Répartition des énergies de chauffage

Comme dans le secteur résidentiel, la priorité est donnée aux systèmes associant à la fois une efficacité énergétique accrue et une utilisation tournée vers les énergies renouvelables. On observe donc une quasi-disparition du chauffage électrique direct et des chaudières fioul au profit de l'utilisation de réseaux de chaleur (alimentés principalement en énergies renouvelables), de pompes à chaleur performantes et de la biomasse (dont près de 45 % en cogénération). Les systèmes gaz sont progressivement remplacés par des micro-cogénérations.

La répartition des énergies de chauffage est donnée sur la figure ci-dessous. Comme pour le logement collectif, l'introduction de chauffage solaire n'est pas envisagée, pour deux raisons. La première tient à la complexité d'une telle installation plus importante qu'en individuel, et donc à la difficulté de sa mise en œuvre notamment dans l'existant. La deuxième réside dans la limitation des surfaces de toitures disponibles : dès qu'un immeuble dépasse environ 5 à 6 niveaux, on ne dispose plus d'assez de surface pour couvrir une part suffisante des besoins d'eau chaude ET de chauffage. C'est pourquoi on privilégiera les applications eau chaude sanitaire, plus simples, mêmes si elles sont intrinsèquement un peu moins performantes.

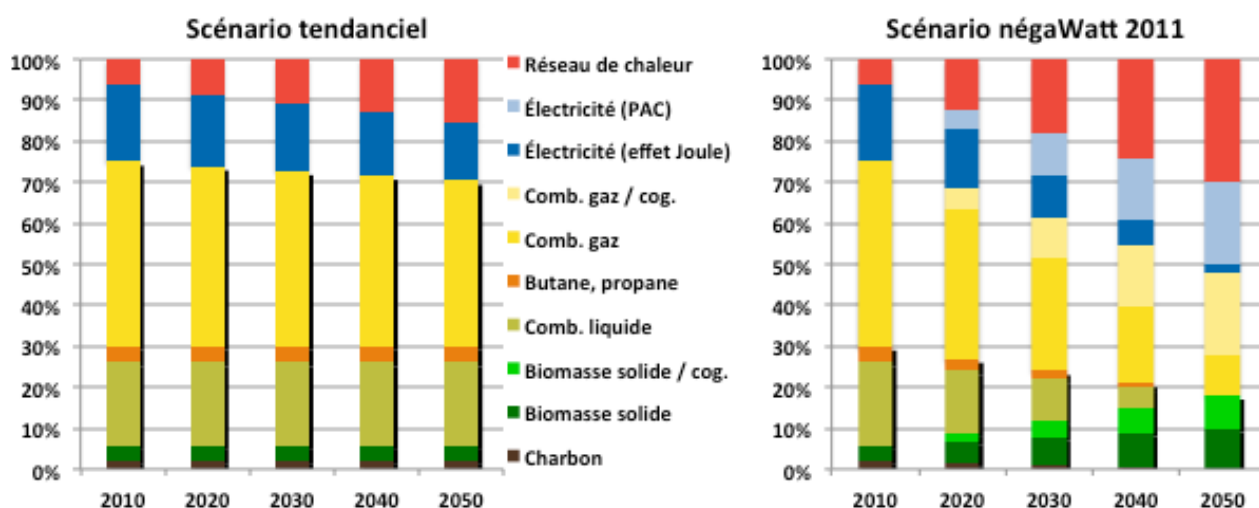


Figure 27 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans les bâtiments tertiaires (en % des surfaces chauffées)

Hypothèses chiffrées et détaillées dans l'Annexe 1 - Tableau 45 : Évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans le secteur tertiaire (en % des surfaces chauffées)

Rendements des systèmes de chauffage

Les systèmes proposés étant relativement similaires dans les logements collectifs et dans le secteur tertiaire (bien que parfois différents dans certains cas spécifiques), l'évolution des rendements des systèmes de chauffage dans le secteur résidentiel est identique à celle déclinée dans le secteur du logement collectif (Tableau 37 : Évolution du rendement des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles et les logements collectifs).

Consommation d'énergie finale pour le chauffage des bâtiments tertiaires

L'ensemble des évolutions précédemment détaillées permet d'envisager une nette réduction de la consommation d'énergie finale nécessaire au chauffage des bâtiments tertiaires, de près de 60 %. Cette réduction masque de fortes disparités compte tenu des évolutions spécifiques de chaque secteur. Ainsi, les consommations des bâtiments construits après 1975 dans le secteur de la Santé et de l'Action sociale sont plus que doublées du fait de la forte hausse des surfaces construites. À l'inverse, dans la plupart des secteurs étudiés, le parc de bâtiment d'avant 1975 voit sa consommation d'énergie finale pour le chauffage chuter de près de 90 %.

Au total, la consommation de ce poste passe ainsi de 132 TWh en 2010 à 54 TWh en 2050 (-59%).

Hypothèses chiffrées et détaillées dans l'Annexe 1 - Tableau 46 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans le secteur tertiaire

Besoins d'ECS dans le tertiaire

Encore plus que pour le chauffage, les consommations d'eau chaude sont fortement disparates entre les différents secteurs d'activité recensés, variant d'un facteur 1 à 9. L'application d'actions de sensibilisation, la mise en place d'appareils économes en eau (limiteurs de débit, etc.) et la réduction des pertes de distribution par une optimisation du tracé des circuits permettent d'envisager une réduction annuelle arbitraire (mais conservatrice) de 1 % par an des consommations d'ECS, soit 33 % sur la période étudiée.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 47 : Consommation d'eau moyenne quotidienne par m² de surface dans le tertiaire

Répartition des énergies de production d'ECS

Comme pour la production de chaleur, les systèmes fonctionnant au fioul, butane, propane et charbon disparaissent progressivement. À l'inverse, le scénario négaWatt prévoit une forte augmentation des réseaux de chaleur et de l'utilisation de la biomasse, et une légère diminution de l'utilisation de systèmes gaz et d'électricité.

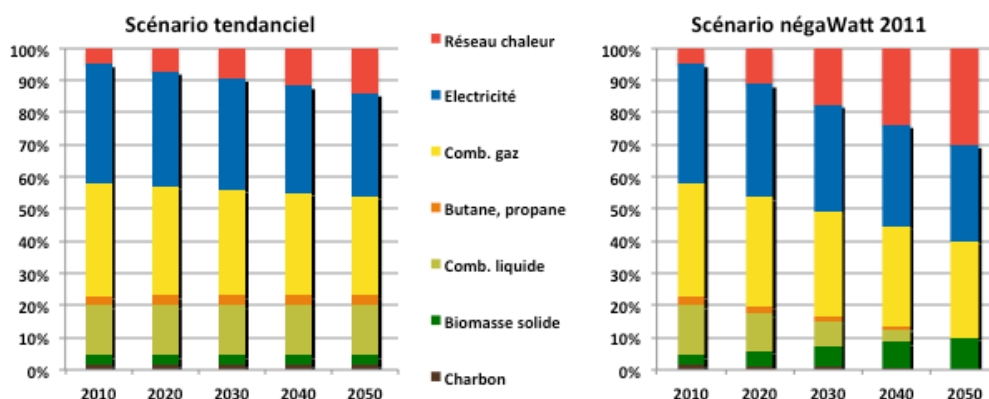


Figure 28 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de production d'eau chaude dans les bâtiments tertiaires

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 48 : Évolution de la répartition des systèmes de production d'eau chaude dans le secteur tertiaire

En parallèle, 10 millions de m² de capteurs solaires thermiques sont installés sur les bâtiments ayant des consommations d'eau chaude sanitaire importantes et régulièrement réparties sur l'année (établissements de santé, habitat communautaire, hôtels, etc.). En 2050, le solaire thermique fournit 27 % des besoins d'eau chaude sanitaire dans l'ensemble du secteur tertiaire.

Rendements des systèmes de production d'ECS

Comme pour le chauffage, dans le tertiaire les rendements des systèmes de production d'ECS sont conformes à ceux estimés dans le logement collectif (voir Tableau 42 : Évolution du rendement des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les maisons individuelles et les logements collectifs)

Consommation d'énergie finale pour la production d'ECS dans les bâtiments tertiaires

Dans chaque secteur d'activité, la consommation d'énergie finale nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire diminue sensiblement, de 49 % à 60 %. Au total, elle chute de 57 % entre 2010 et 2050, passant de 27 à 12 TWh.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 49 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à l'ECS dans le secteur tertiaire

Climatisation dans le secteur tertiaire

Le scénario négaWatt prévoit une augmentation des surfaces climatisées dans le secteur tertiaire. Cette évolution est contrastée en fonction des secteurs d'activité : par exemple, les besoins ne sont et ne seront pas les mêmes dans les hôpitaux ou dans les écoles.

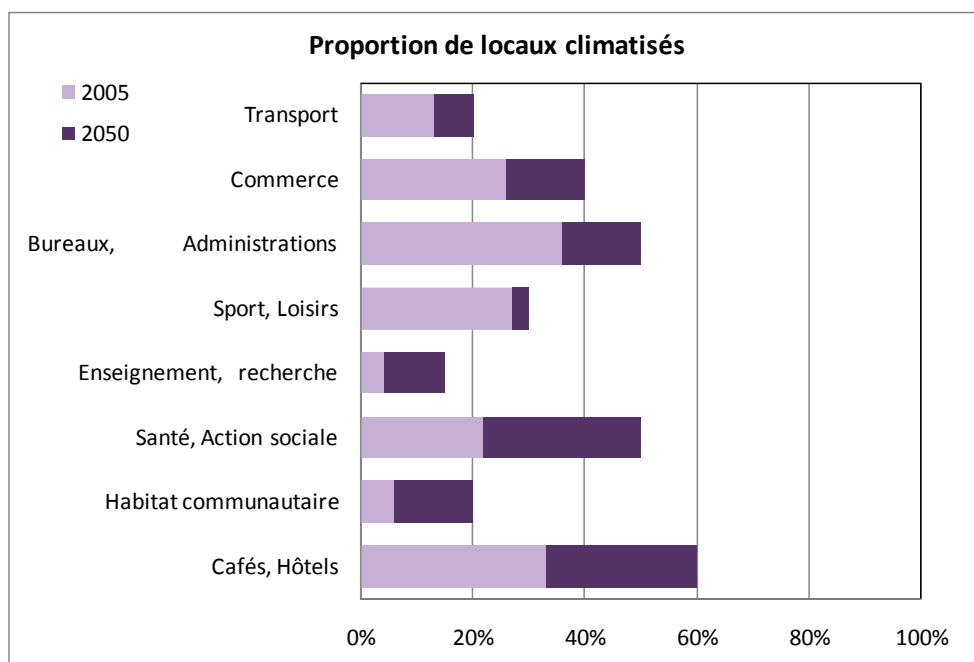


Figure 29 : Évolution des surfaces climatisées dans le secteur tertiaire

En parallèle, une baisse annuelle de 1 % par an de la demande surfacique est prévue, liée à une meilleure maîtrise des apports internes (utilisation d'appareillages électriques plus performants, meilleures

protections solaires), concomitante avec une amélioration de l'efficacité des systèmes. La consommation unitaire d'électricité finale par m² de surface climatisée est ainsi réduite de plus de 50 %.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 50 : Besoins en climatisation et consommations correspondantes par secteur

Au total, la consommation d'énergie finale nécessaire à la climatisation des locaux tertiaires évolue de 16 TWh en 2010 à 14 TWh en 2050, malgré une forte augmentation des surfaces climatisées.

1.3.4. Résultats sur le confort thermique dans le résidentiel et le tertiaire

Le graphique ci-après récapitule l'ensemble des consommations d'énergie finale correspondant aux usages chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation dans le secteur du bâtiment :

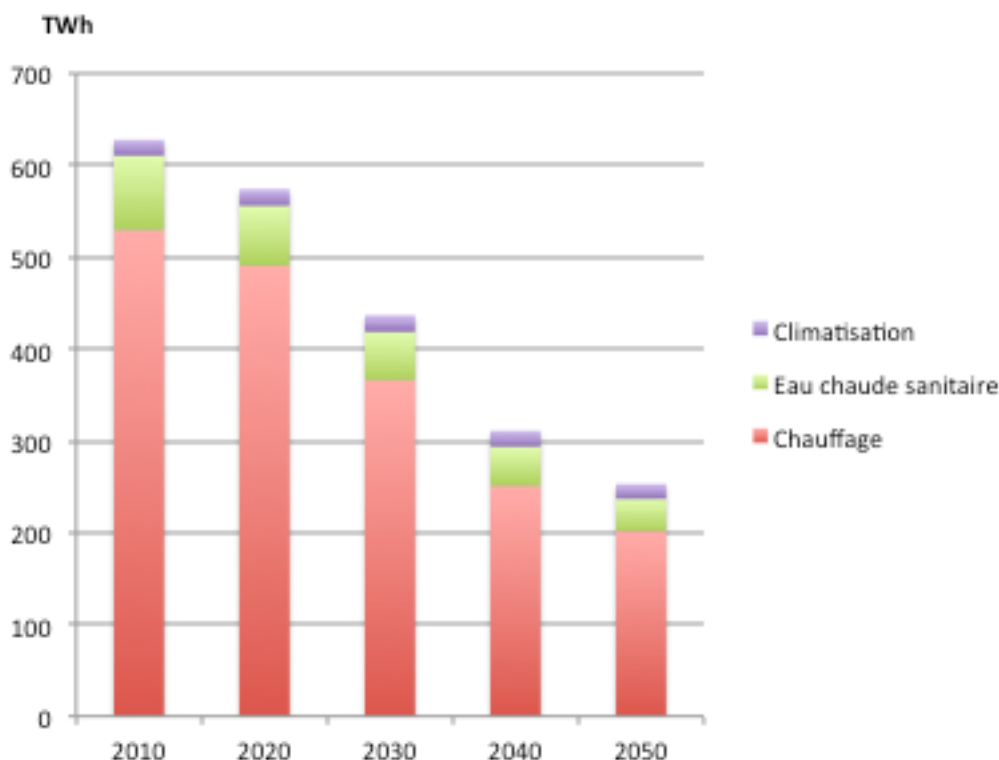
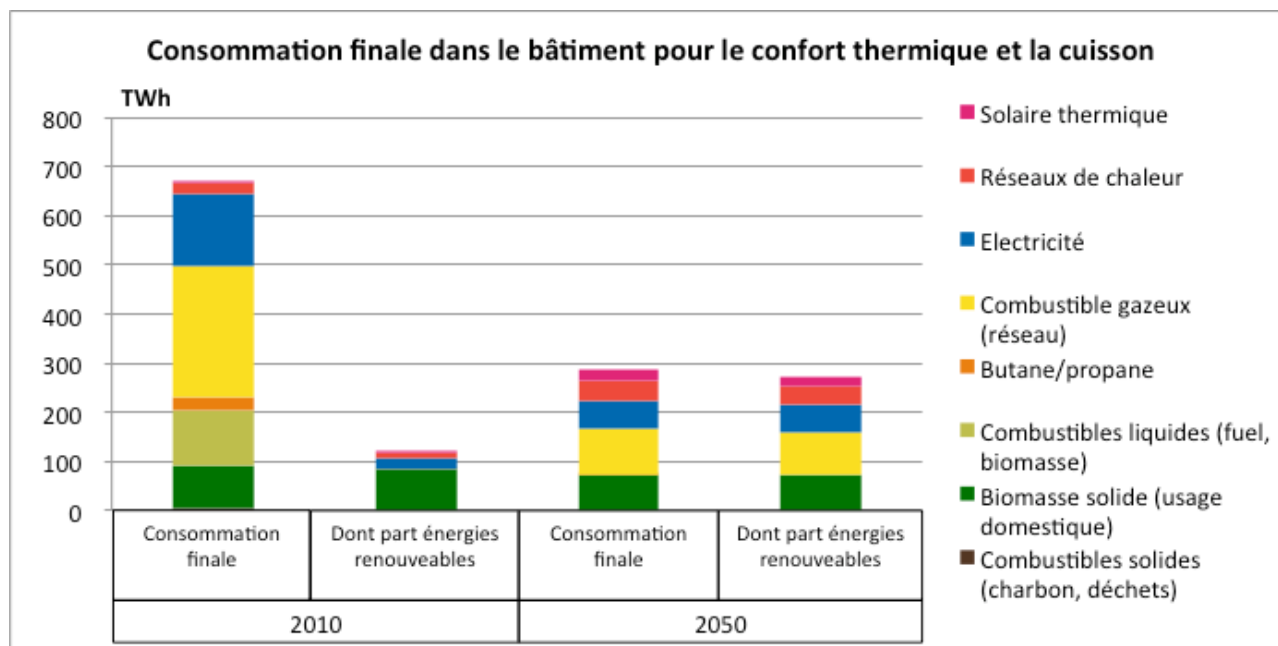


Figure 30 : Évolution de la consommation d'énergie finale nécessaire pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation dans le secteur du bâtiment

La consommation d'énergie finale diminue de 375 TWh en 40 ans. Le secteur du bâtiment présente donc un immense gisement de négaWatts, malgré une hausse sensible de certains usages (augmentation des surfaces chauffées et climatisées, réduction notable des logements mal-chauffés pour les millions de personnes actuellement en précarité énergétique). Ce gisement d'économie d'énergie se concentre majoritairement dans le chauffage des bâtiments résidentiels : 2/3 des TWh économisés le sont grâce au programme de rénovation des logements prévu dans le scénario négaWatt.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 51 : Évolution de la consommation d'énergie finale nécessaire pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation dans le secteur du bâtiment

Cette importante réduction des consommations d'énergie couplée au fort développement des énergies renouvelables (détaillé dans la partie 3) permet d'envisager un approvisionnement fortement majoritaire en énergies renouvelables :



1.4. Secteur du bâtiment - bilan

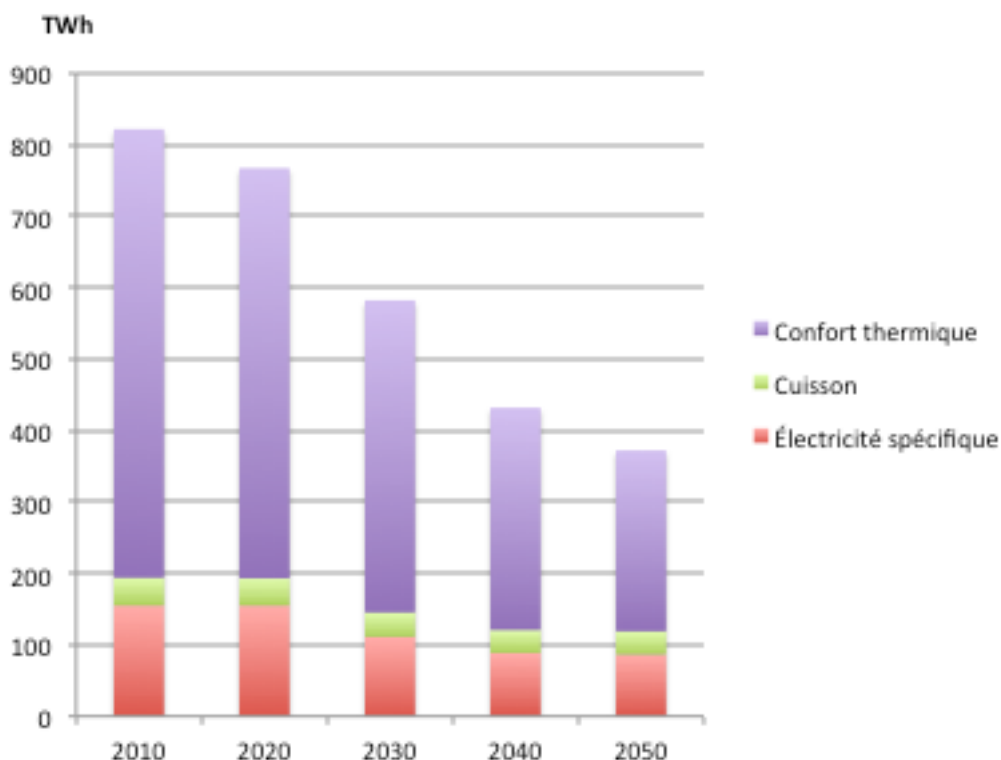


Figure 31 : Évolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment

Le graphique ci-dessus récapitule les évolutions de consommation d'énergie finale dans le bâtiment. Plus de la moitié des TWh consommés en 2010 peuvent être économisés grâce à des actions de sobriété et d'efficacité, tout en prévoyant une augmentation des services rendus. Le confort thermique, qui représentait 76 % des consommations de ce secteur en 2010, n'en représente plus que 68 % en 2050. À l'opposé, l'électricité spécifique augmente sa contribution et représente à terme plus de 23 % des consommations de ce secteur.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 52 : Évolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment

En terme de vecteurs, les réseaux de chaleur et le solaire thermique voient leur usage augmenter fortement. Après une période de hausse, la quantité de biomasse solide diminue légèrement en fin de période, et ce malgré la forte augmentation de son utilisation en termes de services rendus. Le charbon, le GPL et le fuel disparaissent totalement, pendant que le gaz et l'électricité voient leur volume décroître (-65 % et -52 %) ; l'électricité voit néanmoins sa part progresser, de 36 à 39 % du total des consommations.

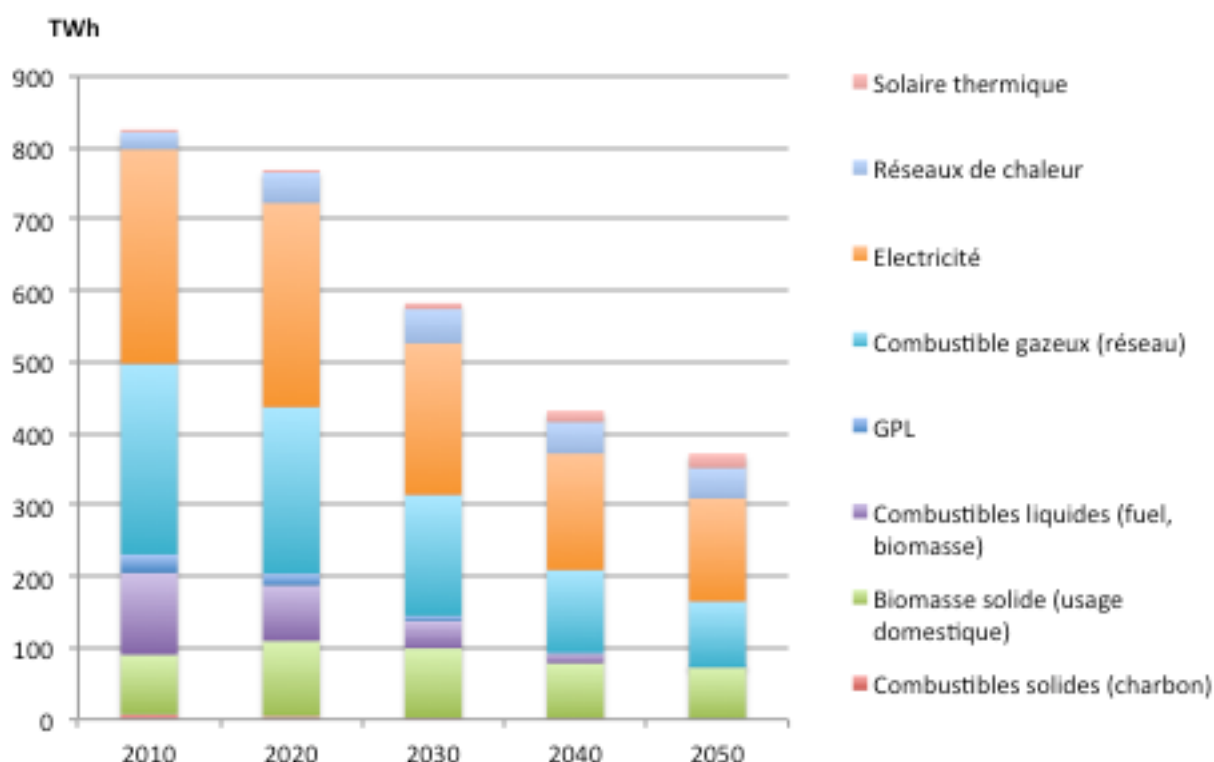


Figure 32 : Évolution des vecteurs secondaires dans le secteur du bâtiment

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 53 : Évolution des vecteurs secondaires dans le secteur du bâtiment

2. Transports

2.1. Approche générale

Dans les transports, une ligne directrice est indispensable pour sortir de la situation actuelle. Ils représentent 30 % de notre consommation d'énergie finale, dont près des deux tiers concernent les déplacements de voyageurs et le tiers restant les marchandises, mais ils dépendent à plus de 90 % du pétrole. L'enjeu est de sortir de notre dépendance presque totale au transport automobile, du moins sous sa forme actuelle, tout en conservant notre liberté de déplacement.

Le scénario négaWatt envisage une évolution différenciée, en privilégiant les solutions les plus adaptées en fonction des motifs de déplacement, des distances à parcourir et de la densité d'infrastructures de transport disponibles sur le parcours, depuis l'espace rural jusqu'à l'hyper-centre urbain.

Il prévoit d'abord une évolution des besoins de mobilité sous l'effet des politiques d'aménagement du territoire et de nouvelles pratiques sociales. Une politique de densification des espaces urbains et de revitalisation des espaces ruraux en alternative à l'étalement urbain, le développement du commerce en ligne ou celui de centres partagés de « télétravail » permettent de réduire, pour les mêmes services, le nombre de kilomètres parcourus. L'avion, utilisé aujourd'hui de plus en plus fréquemment, doit retrouver un usage d'exception.

La place laissée à la voiture individuelle diminue d'autant plus que l'on se situe dans un espace dense et sur des distances courtes. Au total, en 2050 elle ne représente plus que 49 % du nombre total de voyageurs.kilomètres parcourus, contre 61 % actuellement.

Le transfert bénéficie en priorité aux modes de déplacement actifs (marche à pied, vélo, etc.) pour les courtes distances, et aux transports en commun pour les distances supérieures – ce qui suppose bien sûr un aménagement correspondant des espaces publics urbains ainsi que le développement des réseaux de transports en commun. Au centre des espaces urbains, des systèmes très flexibles tels que les petits véhicules électriques en auto-partage ou les taxis collectifs viennent compléter l'offre, excluant à terme totalement le véhicule automobile tel que nous le connaissons aujourd'hui.

Des gains sont ensuite envisagés dans les consommations, à la fois par une meilleure organisation permettant d'augmenter le taux de remplissage des véhicules et par une réglementation plus stricte avec par exemple la limitation des vitesses, mais surtout grâce à une meilleure efficacité générale des moteurs, à la généralisation de l'hybridation des véhicules (rechargeables ou non) et à une diminution de leur poids : la consommation unitaire des voitures individuelles diminue de 56 % entre 2012 et 2050.

La principale évolution réside toutefois dans un changement de motorisation autour de deux filières complémentaires. La première est le véhicule électrique, bien adapté aux trajets courts en milieu urbain, mais dont la généralisation poserait d'importants problèmes aux réseaux de distribution pour la recharge et buterait sur des limites de ressources en matières premières pour les batteries. Il assure au final 17 % des kilomètres parcourus en véhicule automobile.

La seconde est le « méthane-carburant » dont le choix pour les voitures et les bus, mais aussi pour les poids lourds, repose à la fois sur des avantages intrinsèques et sur le potentiel qu'il ouvre pour basculer progressivement vers une utilisation de ressources renouvelables. Cette carburation, déjà bien développée dans plusieurs régions comme l'Italie ou certains pays d'Amérique du Sud et facilement adaptable sur les véhicules actuels, à essence ou Diesel, est fiable et performante. Le réseau existant de distribution du gaz permet d'alimenter un nombre important de stations-service - sauf dans les territoires les plus isolés où une majorité de véhicules à essence ou Diesel est conservée - et de passer progressivement du gaz naturel fossile au gaz renouvelable véhicule (GRV) issu de différentes sources : biogaz (méthanisation), gazéification de biomasse solide et gaz de synthèse (méthanation). Le GRV représente à terme plus de 65 % des voyageurs.km effectués en automobile.

La même logique s'applique au transport de marchandises. Ainsi le GRV assure 83 % des tonnes.kilomètres (t.km) qui transitent par la route en 2050. Le véhicule électrique, développé surtout en milieu urbain, représente près de 13 % des transports par véhicules utilitaires légers. Le scénario intègre également une progression du taux de remplissage des véhicules et un transfert modal vers le transport ferroviaire (qui atteint 40 % des t.km transportées en 2050 contre moins de 10 % aujourd'hui) et le transport fluvial (5 % en 2050 contre 2 % aujourd'hui).

Le scénario prévoit également, comme pour les voyageurs, une inversion de tendance des volumes transportés. Ainsi, le nombre de t.km, au lieu d'augmenter proportionnellement à la population voire plus vite encore, connaît une légère baisse de 2,5 % entre 2010 et 2050, soit une diminution annuelle moyenne de seulement 0,06 %.

2.2. Mobilité des personnes

Aujourd'hui, la voiture individuelle constitue la principale réponse à la mobilité des personnes, que cette mobilité soit à courte, moyenne ou longue distance et que le motif du déplacement soit personnel ou professionnel.

La logique négaWatt consiste d'abord à réévaluer les besoins de mobilité puis à adapter le mode de déplacement à ces besoins. Pour cela, il est nécessaire de mieux définir le type de mobilité, le type de zone dans laquelle elle se déroule et les modes de déplacement disponibles.

2.2.1. Méthodologie

Pour décrire la mobilité des personnes, la méthode utilisée a consisté à découpler ce secteur suivant trois axes d'analyse détaillés dans le Tableau 5 : Détail des paramètres d'analyse de la mobilité des personnes :

- le mode de transport ;
- le type de mobilité ;
- l'urbanisme et la densité de la zone considérée (pour la mobilité régulière et locale)

Modes de déplacement

Onze modes de déplacement ont été pris en compte, de la marche à pied à l'avion, en passant par la bicyclette, les véhicules individuels motorisés (deux-roues ou quatre-roues) et les transports collectifs.

Types de déplacement

La mobilité des voyageurs se divise en trois grandes catégories de déplacement :

- réguliers et locaux, c'est à dire effectués au moins 3 fois par semaine et dans un périmètre de 80 km autour du domicile : il s'agit là des trajets pendulaires (domicile-travail et domicile-école principalement) ;
- longue distance (plus de 80 km du domicile) ;
- autres non classables : locaux mais non réguliers (typiquement promenade du week-end, etc.). Cette catégorie permet également d'ajuster les données nationales et annuelles issues notamment des comptes de transport avec les données issues de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) datant de 2008, puisque cette enquête comporte des différences non négligeables avec les données annuelles. On l'observe notamment pour le secteur aérien : seulement 37 % des voyageurs.km recensés dans les comptes de transport sont présents dans l'ENTD.

Urbanisme et densité de la zone

Pour la mobilité régulière et locale, l'espace français a été partagé en 10 zones de densités différentes, du centre de Paris à l'espace à dominante rurale.

Longueur du déplacement

Pour la mobilité longue distance, les voyageurs.km sont répartis en fonction de huit longueurs de déplacement, des déplacements de moins de 100 km aux déplacements de plus de 1500 km.

Poste	Service
Modes de déplacement	Avion, à l'international et en métropole
	TGV
	TER, TET et Transilien
	Tram/Métro et RER
	Bus/car
	Voiture individuelle hors urbain*
	Voiture citadine**
	Taxi collectif***
	Deux-roues motorisées
	Bicyclette (éventuellement à assistance électrique)
	Marche à pied
Types de déplacement	Mobilité régulière et locale
	Mobilité longue distance - usages personnels
	Mobilité longue distance - usages professionnels
	Autre mobilité
Urbanisme et densité de la zone	Paris
(mobilité régulière et locale)	Banlieue parisienne
	Commune polarisée de l'aire urbaine (AU) de Paris
	Centre du pôle urbain d'une AU de 100 000 à 10 millions d'hab.
	Banlieue du pôle urbain d'une AU de 100 000 à 10 millions d'hab.
	Commune polarisée d'une AU de 100 000 à 10 millions d'hab.
	Commune multipolarisée
	Pôle urbain d'une AU jusqu'à 99 999 habitants
	Commune polarisée d'une AU jusqu'à 99 999 habitants
	Espace à dominante rurale
Longueur du déplacement	< 100 km
(mobilité longue distance)	De 100 à 200 km
	De 200 à 400 km
	De 400 à 600 km
	De 600 à 800 km
	De 800 à 1500 km
	> 1500 km

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacée par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 5 : Détail des paramètres d'analyse de la mobilité des personnes

À titre d'exemple, pour la mobilité régulière et locale, la matrice suivante est ainsi complétée - en nombre de voyageurs.km - pour chaque année du scénario négaWatt :

	TGV	TER TET Transilien	Tram Métro RER	Bus/Cars	Taxi Collectif	Voiture indiv. hors urbain	Voiture citadine	Deux- roues à moteur	Bicyclette
Espace à dominante rurale									
Commune polarisée d'une AU jusqu'à 99 999 habitants									
Pôle urbain d'une AU jusqu'à 99 999 habitants									
Commune multipolarisée									
Commune polarisée d'une AU de 100 000 à 10 millions d'hab.									
Banlieue du pôle urbain d'une AU de 100 000 à 10 millions d'hab.									
Centre du pôle urbain d'une AU de 100 000 à 10 millions d'hab.									
Commune polarisée de l'aire urbaine de Paris									
Banlieue parisienne									
Paris									

Tableau 6 : Mobilité régulière et locale - méthodologie

La majorité des données permettant de remplir ces différentes matrices sont issues de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) de 2008 et des comptes de transports. D'autres sources (CGDD, DGAC, Enerdata, ...) viennent également compléter ces données.

Une fois cette méthodologie définie et les données initiales obtenues, la structuration permettant de remonter aux consommations d'énergie pour les transports de personnes dans le scénario est donnée par le logigramme ci-dessous :

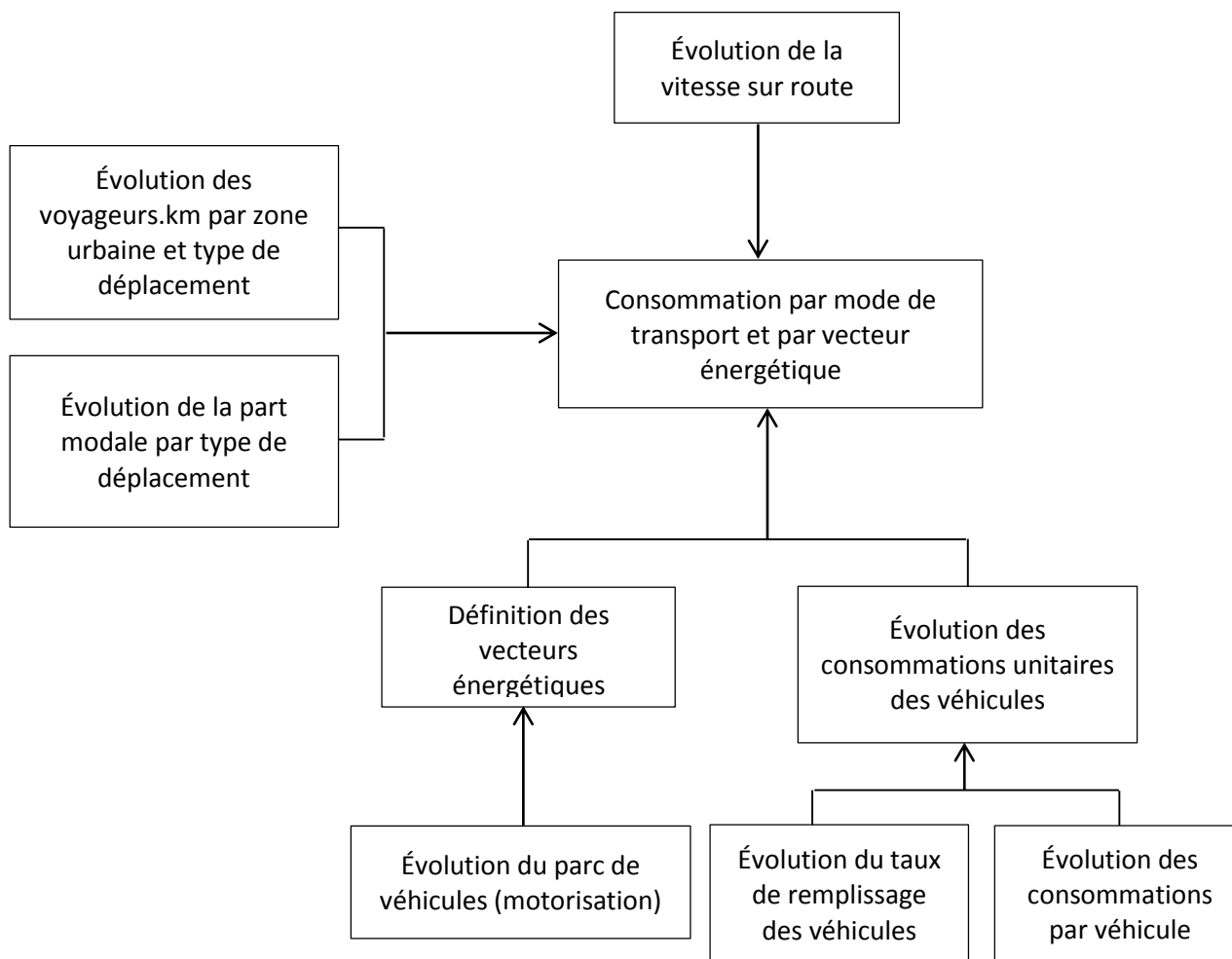


Figure 33 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de personnes

Les déterminants à expliciter sont donc les suivants :

- évolution des voyageurs.km par zone urbaine et type de déplacement ;
- évolution de la part modale par type de déplacement ;
- évolution du parc de véhicules (motorisation) ;
- évolution du taux de remplissage des véhicules ;
- évolution de la vitesse sur route ;
- évolution des consommations par mode de transport.

2.2.2. Hypothèses

2.2.2.1. Évolution des voyageurs.km

La baisse de la mobilité totale est d'environ 7 % entre 2008 et 2050. La mobilité est le seul usage pour lequel une baisse du service énergétique est prévue, grâce au développement d'autres moyens techniques (comme le télétravail ou les conférences *via* internet), à la réorganisation de l'espace (et donc à la diminution du besoin de mobilité) et à la rationalisation de certains déplacements (notamment aériens). En matière de mobilité, les évolutions constatées sur les 10 dernières années montrent que la hausse indéfinie de notre besoin de mobilité n'est déjà plus une réalité. En effet, on observe depuis 2003 une diminution de 4 % du nombre de kilomètres parcourus par an et par habitant en voiture individuelle et une stabilisation

du nombre total de kilomètres parcourus, tous modes de déplacement confondus. L'évolution du prix de l'énergie est bien entendu un facteur déterminant dans ces évolutions mais il n'est pas le seul : évolution des besoins par le développement de nouveaux moyens de communication, rationalisation de certains déplacements, ...

Dans le scénario négaWatt, la baisse du nombre de voyageurs.km par habitant est de 20 % entre 2010 et 2050 (Tableau 55 : Évolution des voyageurs.km parcourus par mode de transport et par habitant). À terme, nous retrouvons une mobilité par habitant similaire à celle du début des années 1990.

Cette diminution du nombre de voyageurs.km est différenciée en fonction du type de déplacement. Pour la mobilité régulière et locale (MRL), le nombre de voyageurs.km effectués est stabilisé entre 2008 et 2050, malgré la hausse de la population. Cela correspond donc à une diminution des kilomètres effectués par personne d'environ 15 % entre 2012 et 2050. Cette diminution s'explique principalement par une réorganisation de l'urbanisme qui devrait permettre une diminution de la mobilité contrainte. On peut par exemple envisager l'apparition d'hôtels d'entreprise dans les villes et les principaux bourgs du pays, permettant d'envisager un taux de télétravail plus important sans pour autant devoir exercer son activité professionnelle depuis son domicile. Ces hôtels d'entreprise permettent de réduire le nombre de kilomètres parcourus par les salariés, tout en leur assurant l'ensemble des services nécessaires à leur activité (connexion internet, mutualisation d'équipements informatiques, de photocopieurs, de salle de réunion, ...) et en leur permettant de conserver un lien social avec d'autres actifs. De réels progrès peuvent être envisagés en matière de télétravail, permettant des gains environnementaux mais également de productivité. La France n'est aujourd'hui classée qu'au 13e rang des pays de l'OCDE⁸ pour la diffusion du télétravail⁹.

Pour la mobilité longue distance (MLD), on constate d'abord la forte prépondérance actuelle de la mobilité personnelle face à la mobilité professionnelle : plus de 5 fois plus de voyageurs.km parcourus. Dans le scénario négaWatt, les kilomètres parcourus par habitant et par an restent inchangés pour les distances inférieures à 200 km par rapport à l'année 2010. La mobilité « moyenne distance » n'est donc pas affectée pour les usages non contraints (loisirs, trajets occasionnels, etc.). Ce n'est plus le cas pour la mobilité longue distance qui diminue de 12 % par rapport à 2010 pour les trajets compris entre 200 et 800 km, puis de façon plus importante pour les trajets supérieurs à 800 km.

Ces évolutions relatives s'expliquent principalement par la hausse du prix de l'énergie qui entraîne une diminution de la mobilité à longue distance, encore plus accentuée pour les trajets de plus de 800 km du fait de la taxation des vols aériens. Ces déplacements à très longues distances sont remplacés par des trajets plus courts pour les usages personnels et par l'utilisation de la visio-conférence ou d'autres moyens de communication pour les usages professionnels.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 1 - Tableau 54 : Évolution des voyageurs.km/hab parcourus entre 2008 et 2050 pour la mobilité longue distance (hors "Autre mobilité")

Enfin, pour le secteur « Autre mobilité », les voyageurs.km/an diminuent de 23 % entre 2008 et 2050. Cette diminution importante est majoritairement due à la forte baisse des kilomètres parcourus en avion et, dans une moindre mesure, à une certaine baisse de la mobilité liée aux loisirs, la hausse du prix l'énergie entraînant logiquement une diminution des déplacements non contraints au profit d'autres activités de proximité.

⁸ OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques.

⁹ Source : http://www.carbone4.com/fr/l_actu_de_carbone_4/le-t%C3%A9l%C3%A9travail-tout-le-monde-y-gagne

2.2.2.2. Évolution des parts modales

La voiture individuelle représente aujourd'hui plus de 60 % des voyageurs.km et atteint même 87 % de part modale pour les trajets pendulaires. Cette forte domination sur les autres modes de déplacement entraîne plusieurs effets pervers à commencer par la construction ininterrompue de nouvelles infrastructures routières et l'entretien fréquent des voiries existantes qui monopolisent une part non négligeable des dépenses publiques, mais aussi des nuisances directes comme la pollution de l'air (particules imbrûlées) et le bruit, ou encore un manque d'espace pour d'autres usages en milieu urbain. La réduction de la place de la voiture et le développement d'offres performantes de transport en commun sont indispensables pour réduire nos consommations d'énergie et retrouver des espaces publics plus apaisés.

Mobilité régulière et locale (MRL)

En matière de mobilité régulière et locale, plus l'espace est dense plus la part de la voiture individuelle diminue. Cela s'explique bien évidemment par les distances plus courtes à parcourir et par la présence d'un réseau de transport en commun plus dense et plus accessible. Ainsi, alors que la voiture individuelle représente 93 % des voyageurs.km en espace rural, elle n'est que de 38% à Paris, seule commune de France où les transports en commun réalisent davantage de voyageurs.km que la voiture.

Dans l'ensemble des zones étudiées, la part de la voiture individuelle dans la MRL diminue au profit des modes actifs et des transports en commun. Les taxis collectifs sont de plus en plus développés pour se substituer à la voiture ou aux transports en commun dans les zones mal desservies. En milieu urbain on constate également l'apparition de plus en plus remarquée des nouveaux véhicules électriques ou hybrides, de quelques centaines de kg, beaucoup plus adaptés à leur environnement et souvent mis à disposition dans de multiples formules d'autopartage. Enfin, les deux-roues motorisés connaissent également un essor important, permettant en outre des gains substantiels en terme d'emprise au sol et de décongestion des milieux urbains.

À terme, la voiture individuelle voit sa part modale diminuer de 87 à 62 % tandis que celle des transports en commun augmente de 10 à 26 %.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 56 : Mobilité régulière et locale : évolutions des parts modales en fonction du type d'urbanisme

L'évolution des kilomètres parcourus et des parts modales entraîne une diminution de 40 % des voyageurs.km parcourus en voiture individuelle, alors que ceux-ci augmentent de plus de 350 % pour les deux-roues motorisés. En parallèle, l'usage des modes actifs et des transports en commun est également en forte augmentation.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 57 : MRL : Évolution des voyageurs.km/hab (hors marche à pied)

Mobilité longue distance (MLD)

Pour la mobilité longue distance, pour les trajets personnels comme pour les trajets professionnels, on remarque que plus la distance augmente et plus la part de la voiture individuelle diminue, remplacée principalement par le train et l'avion. Pour les trajets personnels, alors que la voiture représente 90 % des voyageurs.km pour les trajets inférieurs à 200 km, sa part n'est plus que de 50 % pour les trajets compris entre 800 et 1500 km, tandis que le train et l'avion représentent chacun environ 20 % des voyageurs.km parcourus.

On constate également que la voiture individuelle est beaucoup moins utilisée pour les trajets professionnels : elle ne représente que 29 % des voyageurs.km parcourus, là où sa part est de 56 % pour les trajets personnels. Moins contraints que les familles, les salariés trouvent dans le train et l'avion un mode de transport permettant un gain de temps appréciable tout en bénéficiant d'un espace de travail.

À titre d'exemple, le train correspond aujourd'hui à 58 % des voyageurs.km pour les déplacements professionnels compris entre 400 et 600 km, contre 16 % pour ces mêmes trajets à usages personnels.

Dans le scénario négaWatt, comme pour la MRL, la place de la voiture diminue progressivement au profit des transports en commun terrestres (autocar et train). L'usage de l'avion, mode de transport le plus fortement émetteur de CO₂ par voyageur.km parcouru, est fortement découragé et limité aux vols de première nécessité inférieurs à 800 km ; il est remplacé par le train quand cela est possible (de nouvelles lignes à grande vitesse sont envisagées, doublées d'une taxation de l'aérien), et la vidéo-conférence se généralise au fur et à mesure des prochaines décennies, permettant de réduire les besoins annuels de déplacements des personnes concernées de plusieurs milliers de kilomètres.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 58 : Mobilité longue distance - Évolution des parts modales en fonction de la longueur du déplacement et de son motif

Autres mobilités

Le secteur « Autre mobilité » suit les mêmes tendances et voit la part de la voiture individuelle et de l'avion régresser au profit des modes actifs, des deux-roues motorisés et des transports en commun terrestres.

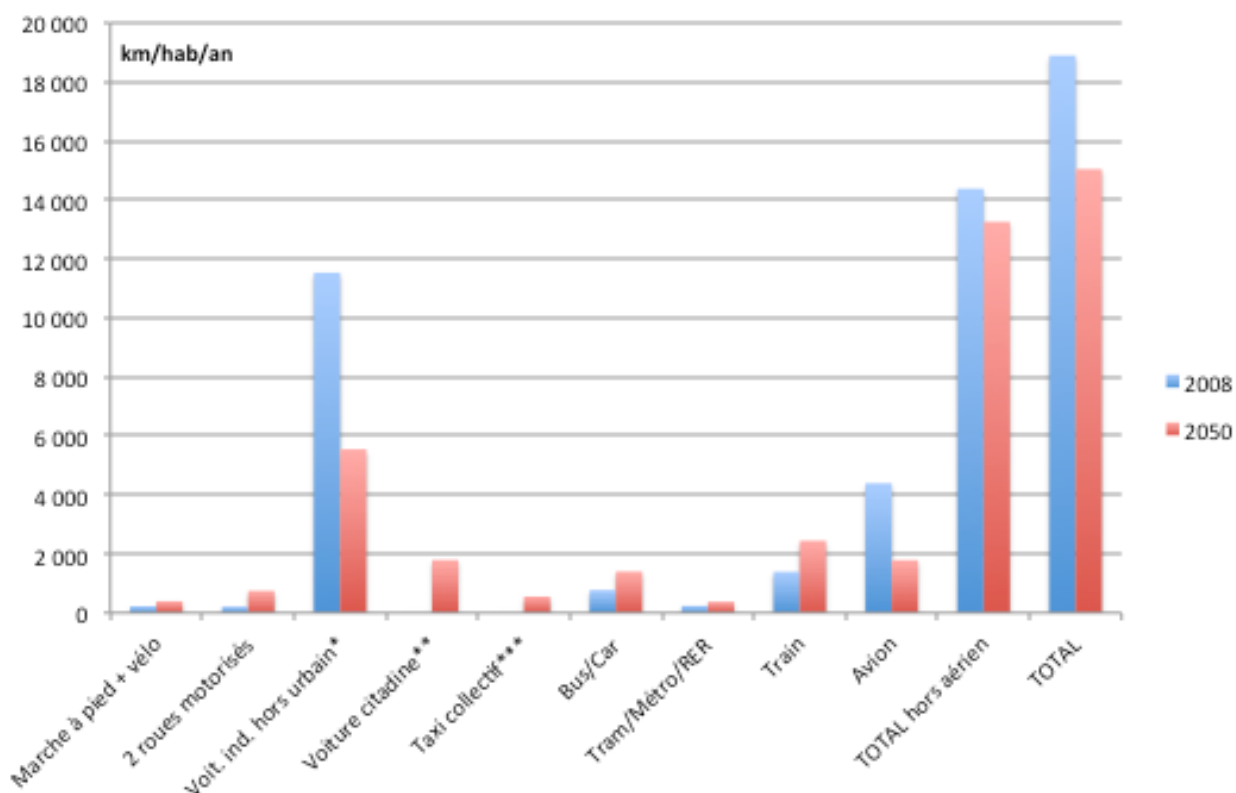
Au total, la voiture individuelle voit sa part modale passer de 61 % à 59 % ; un quart des déplacements effectués en voiture le sont par l'intermédiaire de véhicules urbains adaptés à leur environnement. La part modale des deux-roues motorisés augmente sensiblement, tout comme celle des transports en commun qui passe de 13 à 28 %.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 59 : Évolution des parts modales par mode de transport

Les évolutions combinées du nombre de km parcourus par an et des parts modales conduit aux principaux résultats suivants (synthétisés dans le Tableau 60 : Évolution des voyageurs.km/hab par mode de transport) :

- doublement du nombre de voyageurs.km/hab parcourus en train ;
- diminution de 60 % du nombre de voyageurs.km/hab en avion ;
- augmentation de 81 % des voyageurs.km parcourus en bus ou car ;
- augmentation de 57 % pour les tram, métro et RER ;
- multiplication par 3,5 et 2,5 des voyageurs.km/hab en deux-roues motorisés et en vélo ;
- hausse de 23 % de la marche à pied.

Ces résultats sont représentés sur la figure suivante :



* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Figure 34 : Mobilité des personnes : évolution des kilomètres parcourus par habitant et par an

2.2.2.3. Évolution du parc de véhicules individuels

La voiture individuelle telle que nous la connaissons est en soi un impressionnant moyen de mobilité : capable d'emporter 4 ou 5 personnes à plus de 130 km/h sur plusieurs centaines de kilomètres, ces véhicules qui présentent généralement un poids compris entre 1 tonne et 1,5 tonne sont en réalité très rarement utilisés pour cet usage. Pour quelques déplacements familiaux dans l'année, ces mêmes véhicules sont utilisés au quotidien pour parcourir quelques dizaines de kilomètres, à une vitesse relativement basse, et le plus souvent pour transporter une seule personne.

L'approche négaWatt appliquée au secteur automobile conduit à reconsidérer profondément ce moyen de locomotion. Afin de mettre en adéquation les besoins et les outils, le choix a été fait d'introduire progressivement dans les milieux urbains et péri-urbains de petits véhicules de quelques centaines de kilogrammes, que préfigurent aujourd'hui des modèles tels que les Renault Twizy ou EON Wizz. Lorsque les transports collectifs ne pourront pas répondre à la demande, ces véhicules peu gourmands en énergie pourront remplacer nos voitures actuelles pour la grande majorité des trajets pendulaires, permettant des améliorations en termes de consommation, de bruit, de pollution de l'air, mais également au niveau du coût et de l'occupation de l'espace dans nos villes. Ces petits véhicules pourront également être proposés en auto-partage pour des trajets ponctuels.

2.2.2.4. Évolution des motorisations

Aujourd'hui les déplacements des personnes dépendent à 90 % des produits pétroliers. L'électricité ne représente que 8 % de part modale (essentiellement pour les transports en commun) et le GNV reste anecdotique. En matière d'énergie consommée, le déséquilibre pétrole/électricité est encore plus flagrant : les énergies fossiles représentent 97 % de l'énergie consommée par les voyageurs. Les véhicules électriques (trains, trams, métros, ...), généralement plus sobres et plus efficaces, ne consomment que 9,2 TWh, soit l'équivalent de la seule consommation d'éclairage des logements.

Cette dépendance quasi-totale de notre mobilité vis-à-vis du pétrole peut difficilement se poursuivre à moyen et long terme : le déclin de cette ressource - et la hausse du prix de l'énergie qui y sera associée doit nous pousser à concevoir dès aujourd'hui des véhicules ne dépendant plus des énergies fossiles.

Voiture individuelle

Malgré son image de véhicule propre et de réponse à tous les problèmes, le véhicule électrique ne peut être une solution universelle. Pour pouvoir fonctionner, il nécessite une densité suffisante de bornes de recharge - qui peuvent s'avérer coûteuses - et un réseau de distribution d'électricité capable de supporter ces nouveaux appels de puissance non négligeables. Par ailleurs, ces véhicules disposent pour l'instant d'une autonomie assez réduite et ne peuvent donc répondre à tous les besoins. Partant de ces constats, dans le scénario négaWatt le véhicule électrique n'est envisagé qu'en milieu urbain et péri-urbain.

En dehors des zones urbaines, le scénario conserve un parc important de voitures individuelles qui sont très majoritairement alimentées par du gaz fourni par le réseau. Aucune rupture technologique ou innovation industrielle majeure n'étant nécessaire pour faire basculer un parc de véhicules à essence ou gazole vers le gaz (on compte aujourd'hui plusieurs millions de véhicules roulant au GNV à travers le monde dont plusieurs centaines de milliers chez nos voisins italiens), cette évolution pourra se faire naturellement au fur et à mesure du renouvellement du parc et de l'installation de pompes dédiées dans les stations-service raccordées au réseau de gaz.

Ce combustible, au départ d'origine fossile, sera progressivement remplacé par du méthane d'origine renouvelable, issu de la méthanisation, de la gazéification de biomasse ou de la méthanation (cf. Partie 3). C'est là que réside l'intérêt particulier du gaz carburant : il peut presque intégralement être produit de façon renouvelable (il l'est à près de 90 % dans le scénario négaWatt) avec un bilan énergétique et environnemental très favorable, contrairement aux carburants liquides issus de la biomasse dont les résultats sont peu satisfaisants aujourd'hui, même si des progrès notables sont attendus dans les prochaines décennies avec l'avènement des agrocarburants ligno-cellulosiques dits de 3^{ème} génération.

Toutefois, pour les zones rurales éloignées du réseau de distribution de gaz, les carburants liquides sont encore envisagés. Leur faible volume (62 TWh en 2050) permet d'envisager une part relativement significative d'agrocarburants (38 %), sans que ces derniers ne présentent un impact trop important sur l'environnement.

Deux-roues motorisés

Dans le scénario négaWatt, les deux-roues motorisés connaissent un fort développement, principalement pour les trajets domicile-travail. Ce type de trajet permet d'envisager une généralisation des moteurs électriques, qui couvrent la moitié des km parcourus en 2050. Le reste du parc continue à être alimenté avec des carburants liquides.

Vélo à assistance électrique

L'augmentation du nombre d'utilisateurs de vélos entraînera également un développement significatif des vélos à assistance électrique : ils représentent 10 % du parc de bicyclettes en 2050.

Bus / Cars

En milieu urbain, les autobus sont majoritairement alimentés en électricité en 2050 : les lignes de trolleybus et de tramways sont multipliées sur les axes structurants, amplifiant une évolution déjà en cours dans de nombreuses villes en France et en l'Europe.

Les autres autobus et les autocars sont très majoritairement alimentés par du gaz, à l'instar des véhicules individuels. En 2050, seuls 5 % des voyageurs.km sont effectués grâce aux carburants liquides.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 61 : Répartition par vecteur pour chaque mode de déplacement (en % du nombre de voyageurs.km parcourus pour chaque mode)

Ces multiples évolutions permettent d'envisager à terme la quasi-exclusion des moteurs thermiques du cœur des villes : modes actifs, électrification des transports en commun et véhicules légers (en auto-partage ou non) permettent de répondre à l'ensemble des besoins de mobilité des citoyens. En dehors des centres urbains, le gaz – majoritairement d'origine renouvelable – est le principal vecteur de nos déplacements. En 2050, il assure 44 % des voyageurs.km, contre 33 % pour l'électricité (tous modes confondus). Les carburants liquides, bien qu'encore omniprésents dans le secteur aérien, ne représentent plus que 20 % des voyageurs.km.

2.2.2.5. Évolution des taux de remplissage des véhicules

Aucune évolution sensible des taux de remplissage des véhicules non routiers n'a été retenue, par manque de données mais surtout par prudence. Des gains sont certainement à attendre, par exemple sur des lignes de TER (Transport Express Régional) ou de TET (Train d'Équilibre du Territoire) aujourd'hui peu ou moyennement fréquentées, mais une hypothèse conservatrice a tout de même été privilégiée.

Pour les autobus et les autocars, les taux de remplissage passent de 33 % en moyenne en 2008 à 50 % en 2050 (avec stabilité des capacités : 37 places pour un autobus, 55 pour un autocar). Cette augmentation masque plusieurs évolutions :

- sur les axes forts non saturés aujourd'hui, augmentation sensible des taux de remplissage ;
- sur les axes secondaires déjà existants, augmentation des taux de remplissage grâce au report modal envisagé ;
- augmentation des réseaux et des dessertes de lieux aujourd'hui non desservis, sur lesquels les taux de remplissage seront peu élevés.

Les « bouts de ligne » avec des faibles taux de remplissage sont donc toujours présents en 2050, mais la part de ces réseaux peu utilisés diminue en fait et à mesure de l'augmentation de la taille des réseaux et de l'utilisation des transports en commun.

Pour les voitures individuelles, le taux de remplissage moyen en 2008 était de 1,8 personne par véhicule. Il se décompose de la façon suivante : MRL : 1,4 ; MLD - trajets personnels : 2,8 ; MLD - trajets professionnels : 1,8 ; Autres mobilités : 2.

En 2050, le taux de remplissage moyen des voitures individuelles non citadines est de 2,4 (MRL : 2 ; MLD - trajets personnels : 3,1 ; MLD - trajets professionnels : 2,1 ; Autres mobilités : 2,3). Le déplacement en covoiturage, aussi bien pour les trajets pendulaires que pour les trajets occasionnels, se développe fortement (c'est déjà le cas depuis plusieurs années¹⁰). De nombreux facteurs peuvent permettre un développement du covoiturage. Parmi eux, citons simplement les nouveaux moyens de communication, le développement d'infrastructures adaptées, la mise en place d'avantages pour les covoitureurs (comme des voies réservées sur certains axes) ou encore la hausse du coût de l'énergie. Pour les voitures citadines, en 2050 le taux de remplissage moyen est de 1,35.

¹⁰ En 2012, le site covoiturage.fr recensait chaque mois 600 000 utilisateurs du covoiturage.

2.2.2.6. Évolution de la vitesse sur route

La vitesse d'un véhicule est évidemment un facteur déterminant de sa consommation, puisque la résistance aérodynamique évolue avec le carré de la vitesse. Afin de permettre de rapides diminutions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur routier, le scénario négaWatt prévoit de réduire dès les premières années la vitesse maximale autorisée sur route et autoroute :

- passage de 130 à 110 km/h sur les autoroutes ;
- passage de 110 à 100 km/h sur les voies rapides ;
- passage 90 à 80 km/h sur le reste du réseau, hors agglomérations.

La généralisation de cette réduction de la vitesse au niveau national permet un infléchissement immédiat de la consommation d'énergie suivi d'une baisse régulière jusqu'en 2018 ; la baisse enregistrée est alors de 8 %¹¹ par rapport à l'évolution tendancielle, et elle n'est plus modifiée ensuite jusqu'à 2050.

2.2.2.7. Évolution des consommations par mode

Pour l'ensemble des moteurs thermiques des véhicules routiers, à gaz ou à carburant liquide, une diffusion forte de la technologie hybride est envisagée, permettant des gains significatifs sur la consommation d'énergie. Ces gains sont accentués par une réduction du poids des véhicules et à une efficacité énergétique accrue grâce aux évolutions techniques.

La consommation moyenne du parc automobile (hors voiture citadine) passe ainsi de 6,9 litres/100 km aujourd'hui à 3 l/100 km en 2050. Rappelons que dès aujourd'hui l'objectif est de proposer en 2020 des véhicules consommant 2l/100km, et que les constructeurs automobiles devraient être tenus de respecter un objectif de moins de 4 l/100 km pour la moyenne du parc vendu en 2020. Des innovations importantes sont donc à prévoir dans la prochaine décennie, et il est fort probable que les objectifs à 2050 du scénario négaWatt seront atteints bien avant l'échéance.

Les petits véhicules électriques citadins consomment de leur côté 15 kWh/100 km en 2015, consommation divisée par deux en 2050.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 62 : Evolution de la consommation unitaire des voitures individuelles

Les autobus et autocars voient également leur consommation diminuer. Elle évolue respectivement de 45 et 37 l/100 km à 41 et 33 en 2050.

Pour les trains, le TGV conserve ses consommations énergétiques actuelles. Pour les TER, TET et Transiliens, une baisse de 15 % de la consommation énergétique / voyageurs.km est prévue, due à la fois à un meilleur taux de remplissage et à un gain d'efficacité énergétique des moteurs et des véhicules.

Enfin, les avions, en court, moyen et long courrier consomment 25 % de moins en 2050 qu'en 2008.

2.2.3. Résultats

La consommation d'énergie finale dans le secteur des transports évolue de la façon suivante :

¹¹ *Impact des limitations de vitesse sur les émissions de gaz à effet de serre*, communiqué de presse de l'ADEME du 16/10/2003.

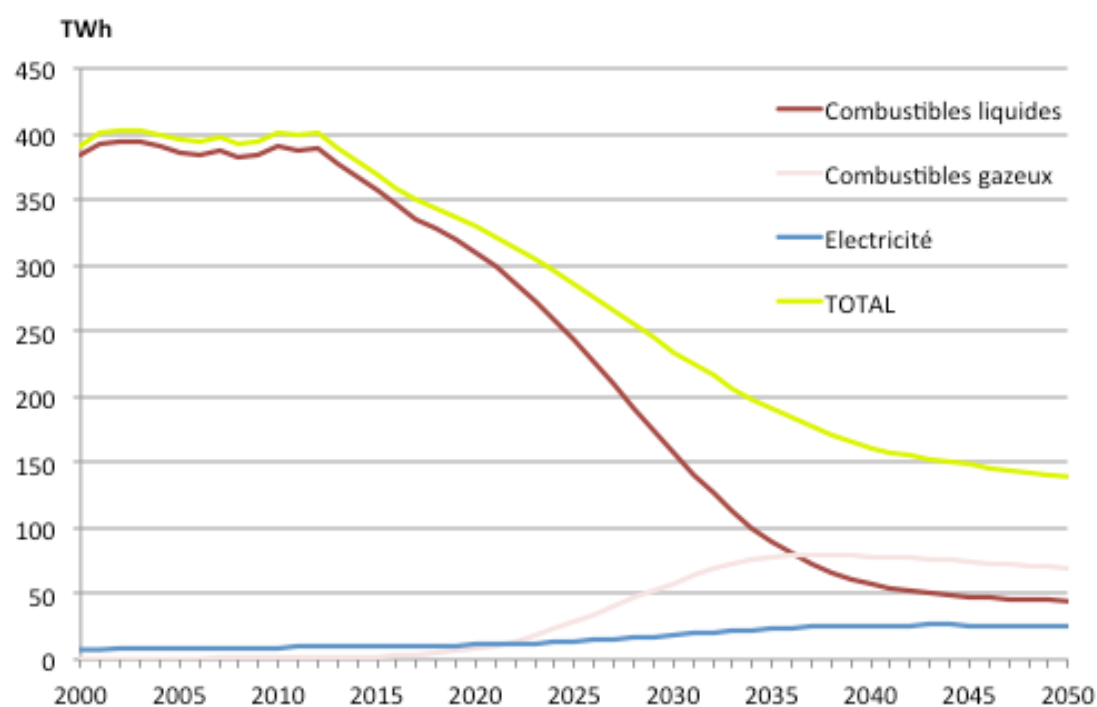
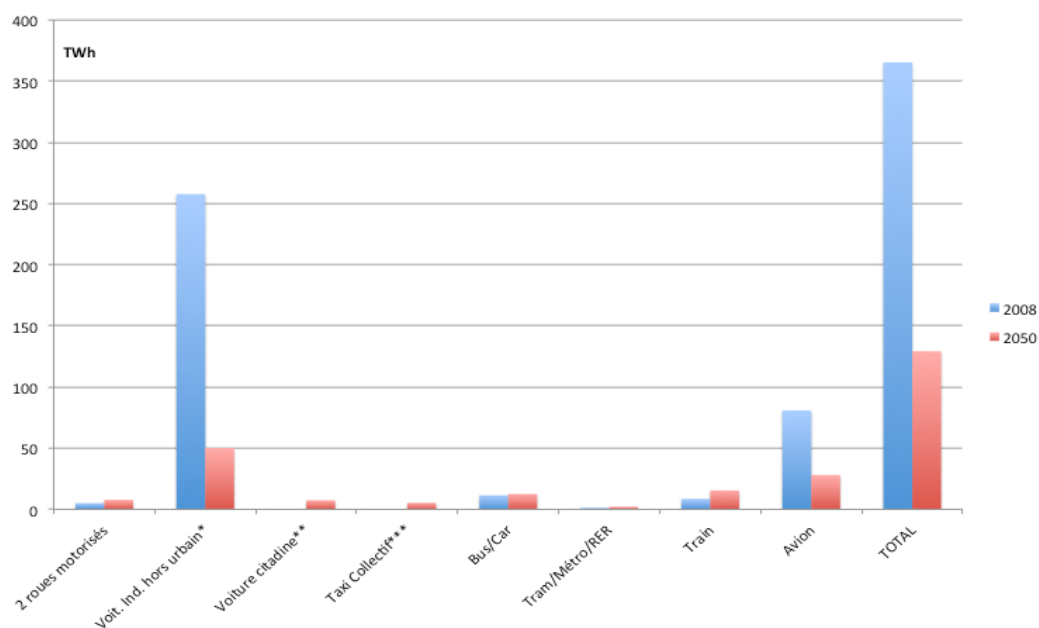


Figure 35 : Mobilité des personnes : évolution de la consommation d'énergie finale

Cette consommation se répartit de la façon suivante :



* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Figure 36 : Mobilité des personnes : répartition et évolution des consommations d'énergie finale

La voiture individuelle reste le premier mode de déplacement en termes de consommation d'énergie, mais sa part relative diminue nettement (71 % de l'énergie consommée en 2008, 45 % en 2050). Les transports en commun terrestres voient de leur côté leur part augmenter de 6 % en 2008 à 28 % en 2050.

2.3. Transports de marchandises

Les transports de marchandises sont aujourd'hui dominés de manière écrasante par la route (88 % des tonnes.kilomètres transportées, 99 % de la consommation d'énergie). Cette domination sans partage n'a pas toujours été la règle puisque le fret ferroviaire a connu une part modale de plus de 60 % de 1880 jusqu'au début des années 1950, avant l'avènement du transport routier. Entre 1985 et 2005, le déclin du fret ferroviaire a été particulièrement marqué :

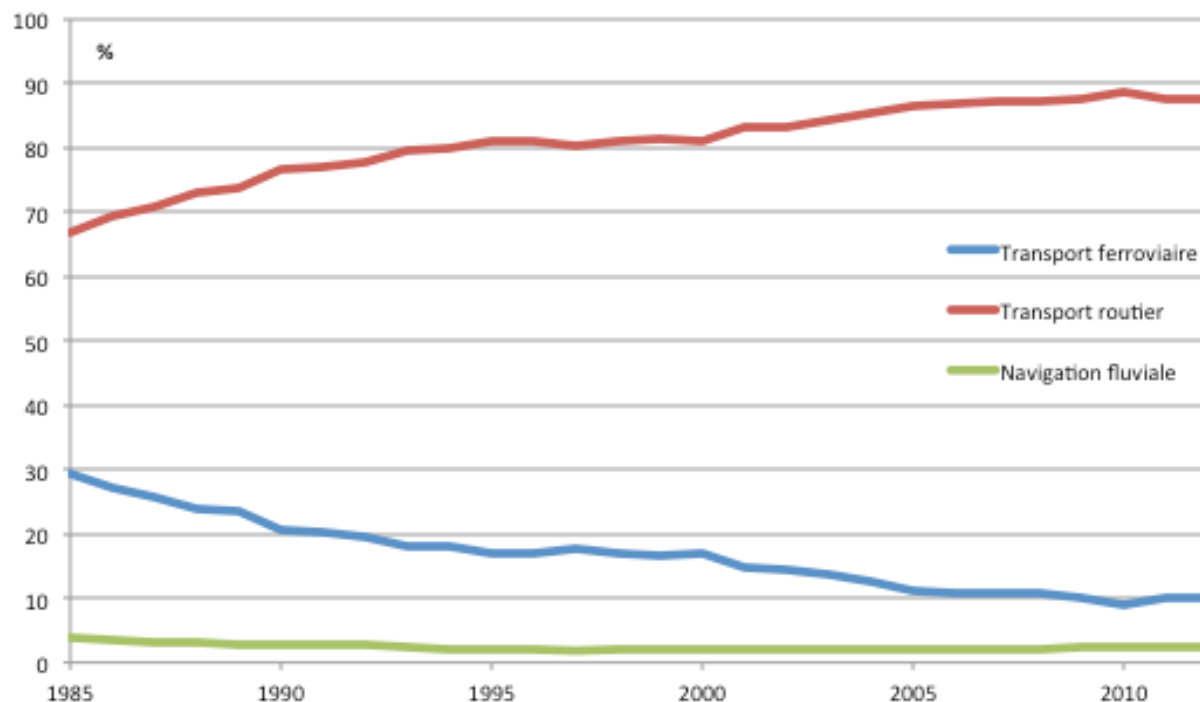


Figure 37 : Transport de marchandises : évolution des parts modales depuis 1985¹²

Ce déclin du ferroviaire s'est accompagné d'une hausse sensible des tonnages de marchandises transportées, compensée intégralement par la hausse du transport routier. On remarque que non seulement la part modale du fret ferroviaire a chuté, mais aussi que le nombre de Gigatonnes.kilomètres (Gt.km) transportées grâce au ferroviaire a régulièrement diminué depuis une trentaine d'années :

¹² CGDD, *Les comptes des transports en 2012*, Juillet 2013.

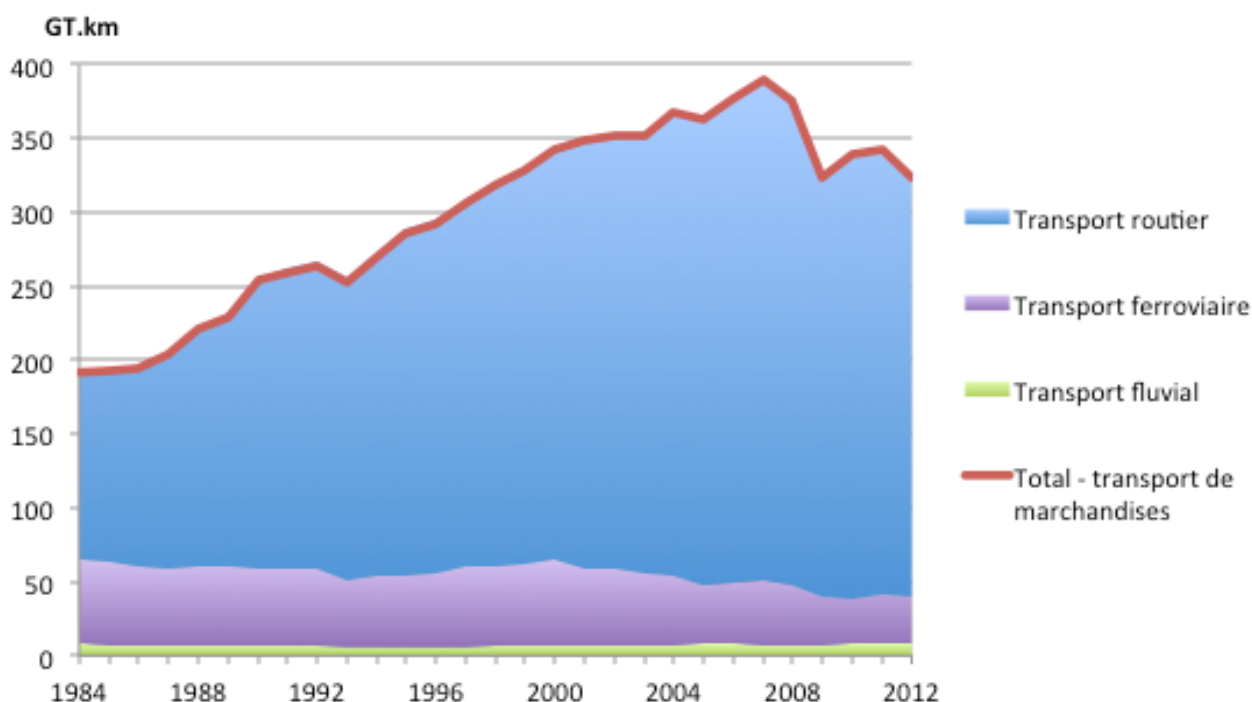


Figure 38 : Transport de marchandises : évolution des Gt.km transportées par mode de transport¹³

2.3.1. Méthodologie

En matière de transport de marchandises, le scénario négaWatt intègre les transports routiers, ferroviaires et fluviaux au niveau national. Les transports maritimes et aériens et le transport par oléoducs ne sont quant à eux pas pris en compte.

Le premier paramètre étudié est la variation des Tonnes.kilomètres (t.km) transportées en fonction des types de marchandises.

La répartition modale des t.km transportées en fonction des différents moyens de transport listés ci-dessus est le second paramètre pris en compte. Pour affiner cette répartition, le transport routier est subdivisé en trois catégories :

- Véhicules Utilitaires Légers (VUL) - Poids Total À Charge (PTAC) < 3,5 T ;
- Poids Lourds (PL) - PTAC < 32 T ;
- Tracteurs Routiers (TR) - PTAC > 32 T.

Pour chaque catégorie de transport routier, la charge moyenne du véhicule est estimée, ce qui permet d'établir le nombre de véhicules.km annuels.

Enfin, pour chaque type de véhicule, l'évolution des combustibles utilisés et des consommations unitaires est étudiée.

L'ensemble de ces paramètres permet de définir la consommation globale du secteur du transport de marchandises, comme le montre le schéma suivant :

¹³ Op. cit.

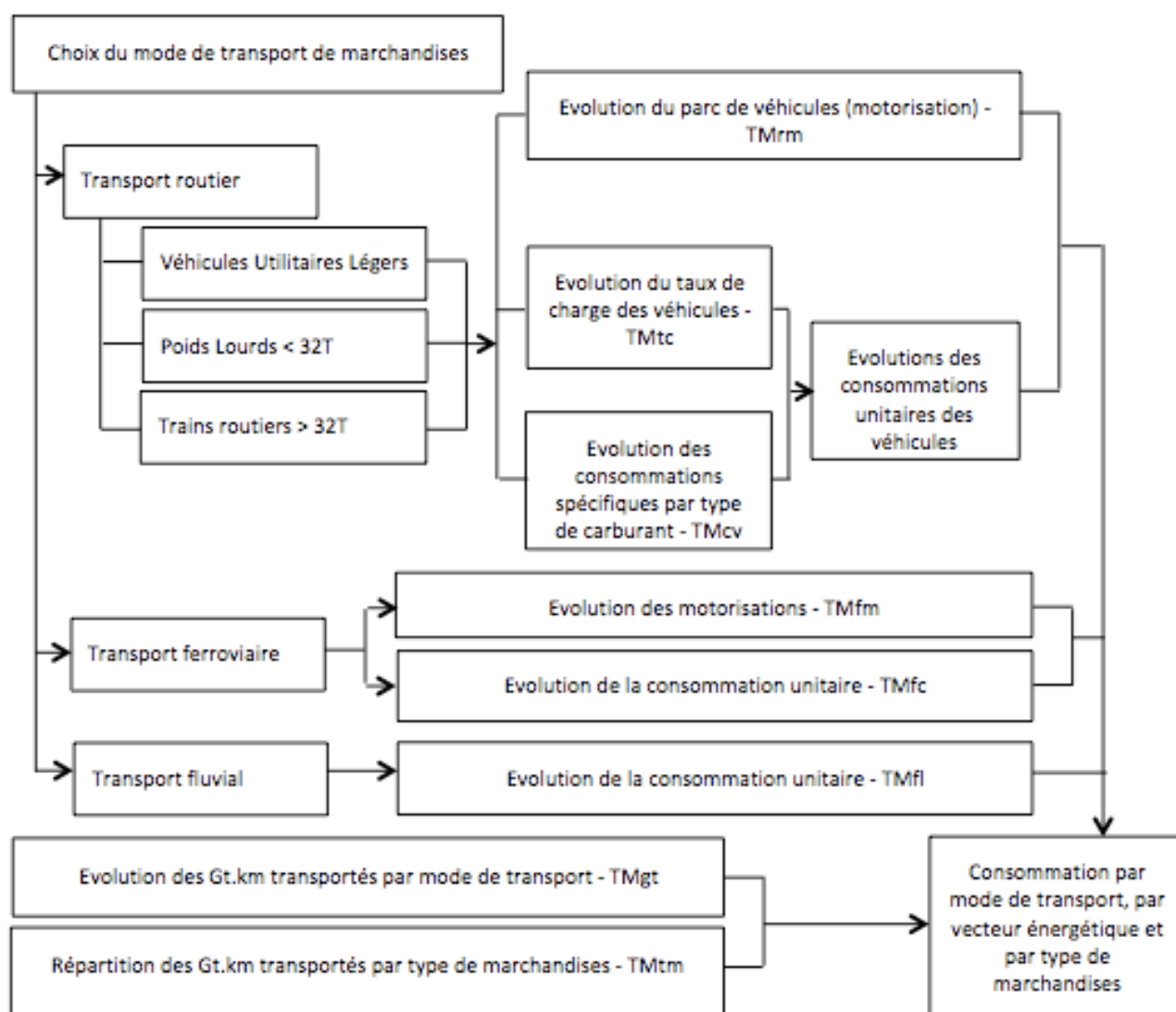


Figure 39 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de marchandises

Les hypothèses à expliciter pour le transport de marchandises sont donc les suivantes :

- évolution des t.km transportées, par type de marchandise ;
- évolution des parts modales des différents modes de transport ;
- évolution du taux de charge des véhicules routiers ;
- évolution des motorisations par véhicule ;
- évolution des consommations unitaires par motorisation.

2.3.2. Hypothèses

2.3.2.1. Évolution des t.km transportées

Dans le scénario négaWatt, les Gt.km transportées se stabilisent au niveau de 2008 - 380 Gt.km transportées annuellement avant le début de la crise financière - puis diminuent très légèrement pour aboutir à 364 Gt.km transportées en 2050. Afin de tenir compte des évolutions contrastées de certains secteurs économiques, l'évolution des tonnages transportés est différenciée selon le type de marchandise.

2.3.2.2. Évolution des parts modales des différents modes de transport (en Gt.km)

Aujourd'hui près de 90 % des Gt.km sont transportées par voie routière. Le scénario négaWatt vise un des objectifs du livre blanc de la commission européenne sur le transport de marchandises : en 2050, 50 % des Gt.km transportées sur des distances supérieures à 300km devront éviter la route¹⁴.

Dans le scénario négaWatt, en 2050, 40 % des Gt.km transportées utilisent le rail et 5 % les cours d'eau. La nécessité de nouvelles infrastructures ferroviaires a bien entendu été prise en compte dans le rythme d'évolution de ces parts modales.

La baisse du transport routier est différenciée en fonction du tonnage des véhicules. Le report sur rail des marchandises transportées par les VUL semble peu envisageable mais il est tout à fait pertinent pour les trajets de plusieurs centaines de kilomètres réalisés aujourd'hui par les TR. Ainsi, alors que les VUL conservent une part modale presque identique entre 2008 (5,8 %) et 2050 (5,2 %) et que les PL < 32 T voient leur part modale diminuer légèrement (de 16 à 13 %), la baisse est surtout significative pour les TR > 32 T : leur part modale chute de 66 à 37 %.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 63 : Évolution des Gt.km transportées et des parts modales, par mode de transport

2.3.2.3. Évolution du taux de charge des véhicules routiers

Comme le montre le retour d'expérience en Allemagne et dans d'autres pays européens ayant mis en place une redevance kilométrique pour les poids lourds, les taux de charge du transport routier aujourd'hui médiocres disposent d'une importante marge de progression : dès lors qu'un camion paie la même redevance qu'il circule à pleine charge ou à vide, les transporteurs optimisent les chaînes logistiques afin de réduire les kilomètres parcourus à vide ou à faible chargement.

Dans le scénario négaWatt on suppose que le taux de charge augmente en moyenne de :

- 0,9 % par an (soit +40 % entre 2012 et 2050) pour les PL ;
- 0,7 % par an (soit +30 % entre 2012 et 2050) pour les TR.

2.3.2.4. Évolution des motorisations

9 types de motorisations sont mis en œuvre dans le scénario négaWatt pour les transports de marchandises sur route : Diesel « classique », électrique, GNV, DualFuel (gazole/GNV) ; hybride non rechargeable Diesel, GNV et DualFuel (gazole/GNV) ; hybride rechargeable Diesel et GNV.

Aujourd'hui le transport routier est presque intégralement alimenté par du gazole, sur des véhicules ne disposant pas de technologie hybride. Dans le scénario négaWatt, l'objectif est de convertir la majorité du parc à des technologies hybrides non rechargeables, alimentées en GNV (et DualFuel pour les PL et TR). Quelques véhicules électriques font leur apparition dans la catégorie VUL. Enfin, 10 % des PL et TR restent sur une motorisation thermique classique, mais alimentés avec du GNV.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 64 : Évolution des types de carburants pour le transport des marchandises (en % des Gt.km transportées)

2.3.2.5. Évolution des consommations par véhicule et par motorisation

Les consommations unitaires des véhicules routiers (VUL, PL et TR) baissent de 16 à 50 % entre 2008 et 2050 en fonction des motorisations, en intégrant l'efficacité énergétique des moteurs et le passage à l'hybride. Plus les véhicules sont lourds et moins les progrès techniques envisagés sont importants. Ainsi,

¹⁴ Feuille de route pour un espace européen unique des transports – Vers un système de transport compétitif et économe en ressources, Mars 2011.

l'hybride non-rechargeable permet de réduire de 20% la consommation unitaire des VUL alors qu'elle ne réduit que de 10 % celle des TR.

Pour les véhicules bénéficiant d'une technologie hybride rechargeable, il a été considéré que 25 % de la consommation était électrique, le reste étant assuré par le carburant.

Pour ceux bénéficiant de la technologie DualFuel, 70 % de la consommation est fournie par le GNV, et 30 % par le gazole pour l'allumage / démarrage.

Le transport ferroviaire voit lui aussi des consommations unitaires par t.km évoluer : elles diminuent de 15 % (baisse principalement due à l'augmentation du taux de remplissage, qui vient compenser la baisse constatée depuis plusieurs années).

Enfin, aucune évolution de la consommation n'est attendue dans le secteur fluvial.

Hypothèses chiffrées et détaillées en Annexe 2 - Tableau 65 : Évolution des consommations unitaires par mode de transport et par motorisation

2.3.3. Résultats obtenus

Dans le secteur du transport des marchandises, l'évolution des consommations d'énergie est la suivante :

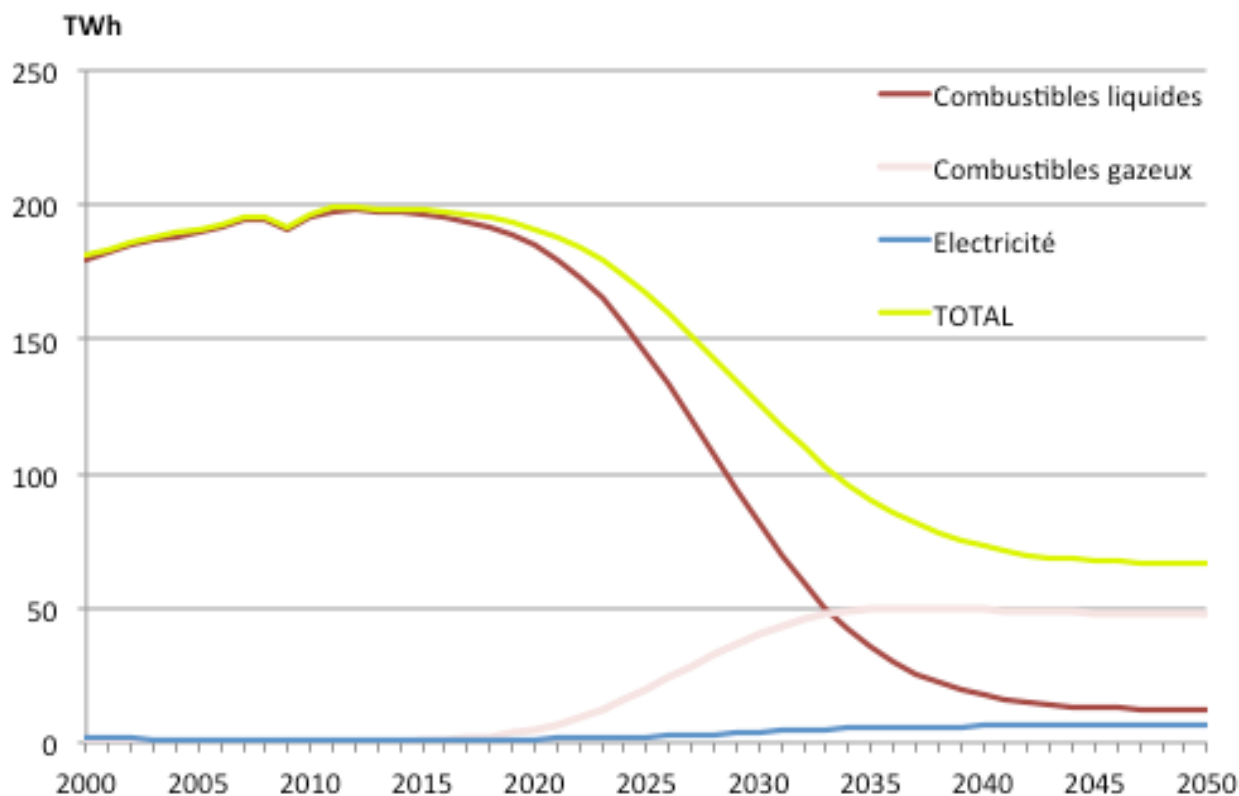


Figure 40 : Évolution des consommations d'énergie dans le secteur du transport des marchandises

Cette consommation d'énergie se répartit de la façon suivante entre les différents modes de transport :

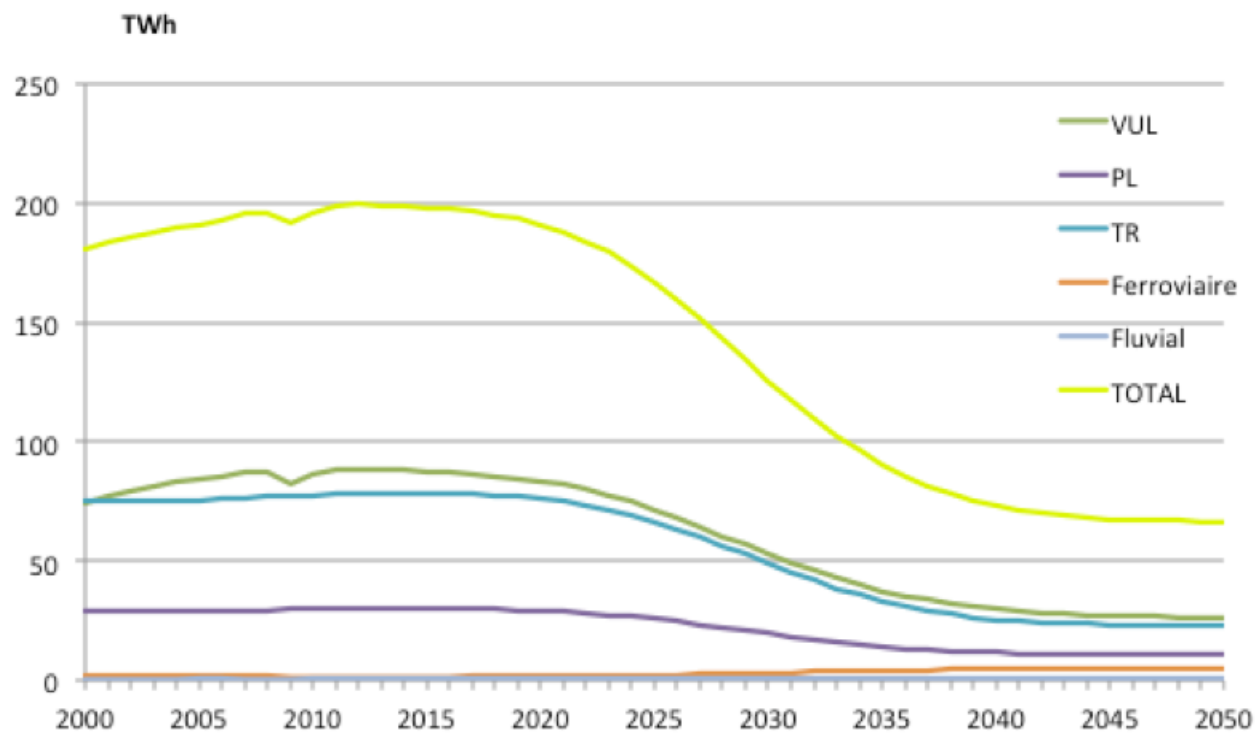


Figure 41 : Évolution des consommations d'énergie par mode de transport

3. Production industrielle et agricole

3.1. Industrie

3.1.1. Constats et enjeux

Avec 384 TWh de consommation énergétique finale en 2010 auxquels il faut ajouter 60 TWh de charbon pour la sidérurgie et 227 TWh de combustibles utilisés à des fins non énergétiques, l'industrie représente environ 30 % du bilan global (23 % pour la consommation d'énergie stricto sensu).

De réels efforts d'économies ont été réalisés dans les années 80 et 90 à l'issue des chocs pétroliers et en vertu d'une nécessaire modernisation. Mais depuis 10 ans, les consommations stagnent, effet conjugué d'un accroissement de la production (mis à part la crise de 2008 et 2009) et d'une diminution très modérée de l'intensité énergétique (-1 % par an).

Le scénario tendanciel tel que le décrivent la plupart des modèles (scénario POLE d'Enerdata, BAU de l'AIE) est la simple poursuite de ces tendances. On a affaire à un environnement identique à celui d'aujourd'hui où le libéralisme économique mondial impose sa loi, à savoir une industrie fortement délocalisée et peu encline à des modifications structurelles dont le temps de retour dépasserait les 3 ans. C'est ce scénario tendanciel qui sert de comparatif et dont la figure ci-dessous résume l'extrapolation des tendances passées.

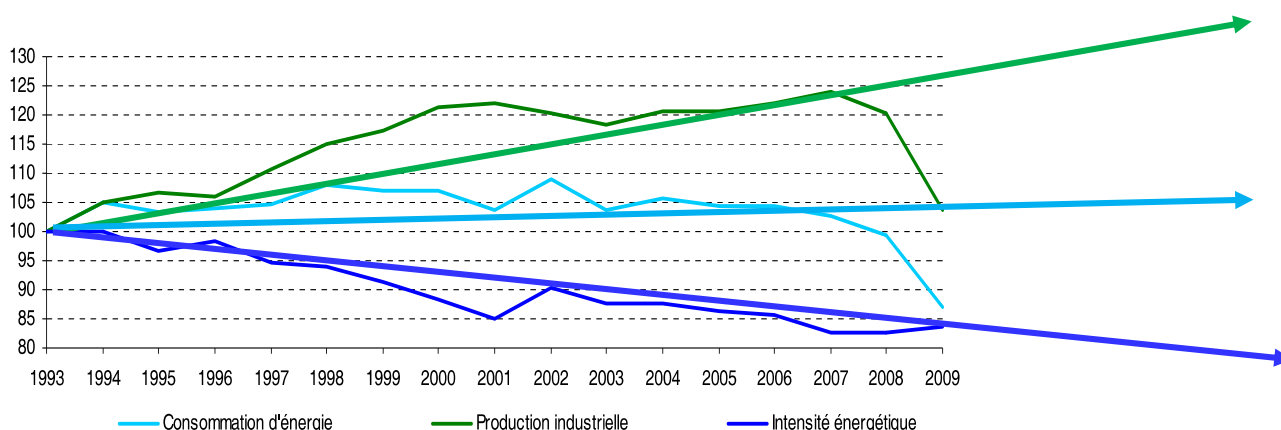


Figure 42 : Projections tendanciennes sur la consommation d'énergie, la production industrielle et l'intensité énergétique

Mais cette vertu apparente de l'industrie cache un biais majeur. Une étude récente du SOeS sur la contribution de la France aux émissions de gaz à effet de serre a mis en évidence que si la production industrielle nationale a émis 280 Mt de CO₂ en 2005, la consommation intérieure de biens est à l'origine de 415 Mt ! Cette importante disparité a deux origines :

- la France est globalement importatrice de biens ;
- mais surtout elle exporte des produits dont l'assemblage requiert beaucoup de savoir-faire mais relativement peu d'énergie (Airbus, TGV, nucléaire, etc.) et importe des quantités plus importantes de matériaux énergivores et à fort impact environnemental.

La crise financière de 2008 et la récession spectaculaire qui a suivi en 2009 indiquent que ce scénario tendanciel a peu de chance de voir le jour. La raréfaction des ressources, les menaces environnementales et les possibles conflits géopolitiques nous amènent à nous interroger sur un autre avenir industriel.

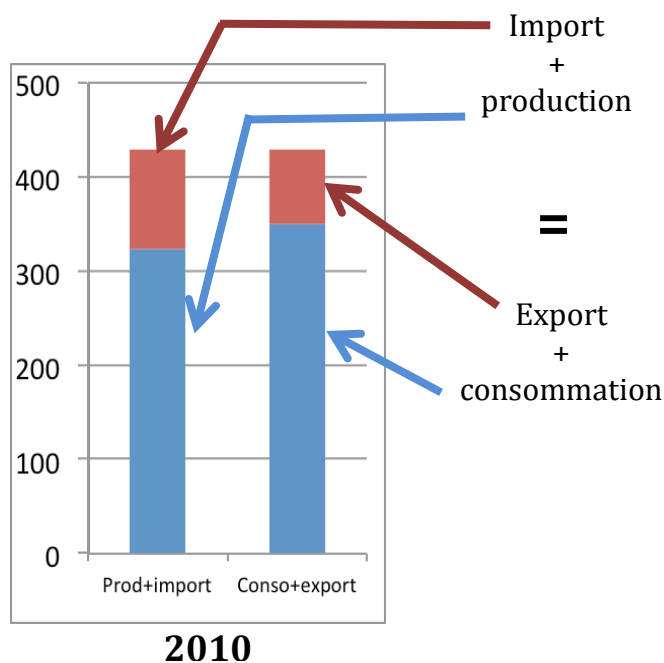


Figure 43 : Bilan production, consommation et solde des importations / exportations de l'industrie

La démarche négaWatt répond à ces défis en partant d'abord de nos besoins réels en produits finis et de l'adéquation entre production et consommation. Puis on remonte la chaîne pour déterminer la façon la plus intelligente de les satisfaire. Dans l'industrie, cette démarche se décline ainsi :

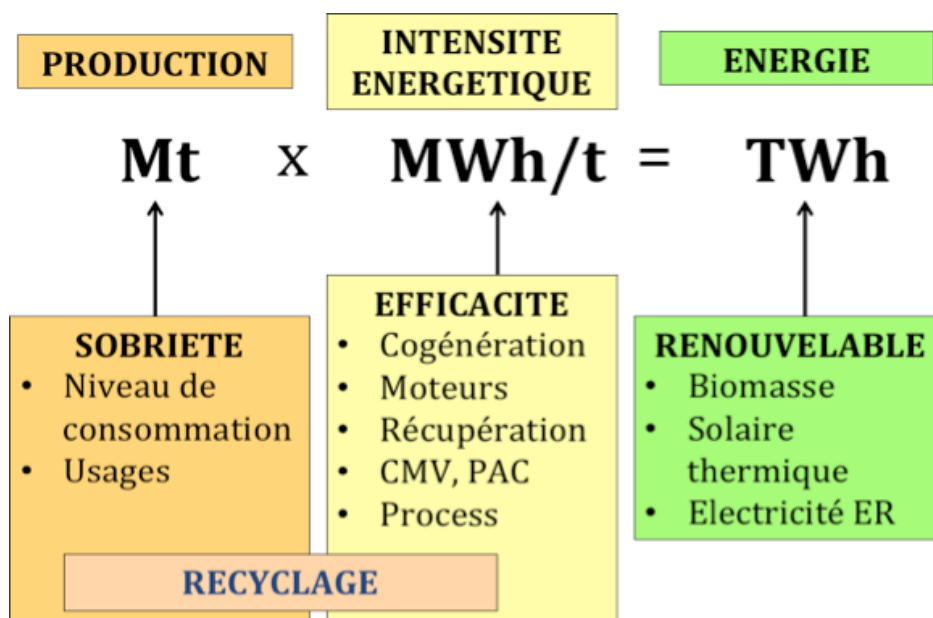


Figure 44 : Application de la démarche négaWatt à la demande énergétique dans l'industrie

L'ensemble de la méthodologie retenue au niveau du scénario est présenté dans le schéma ci-après :

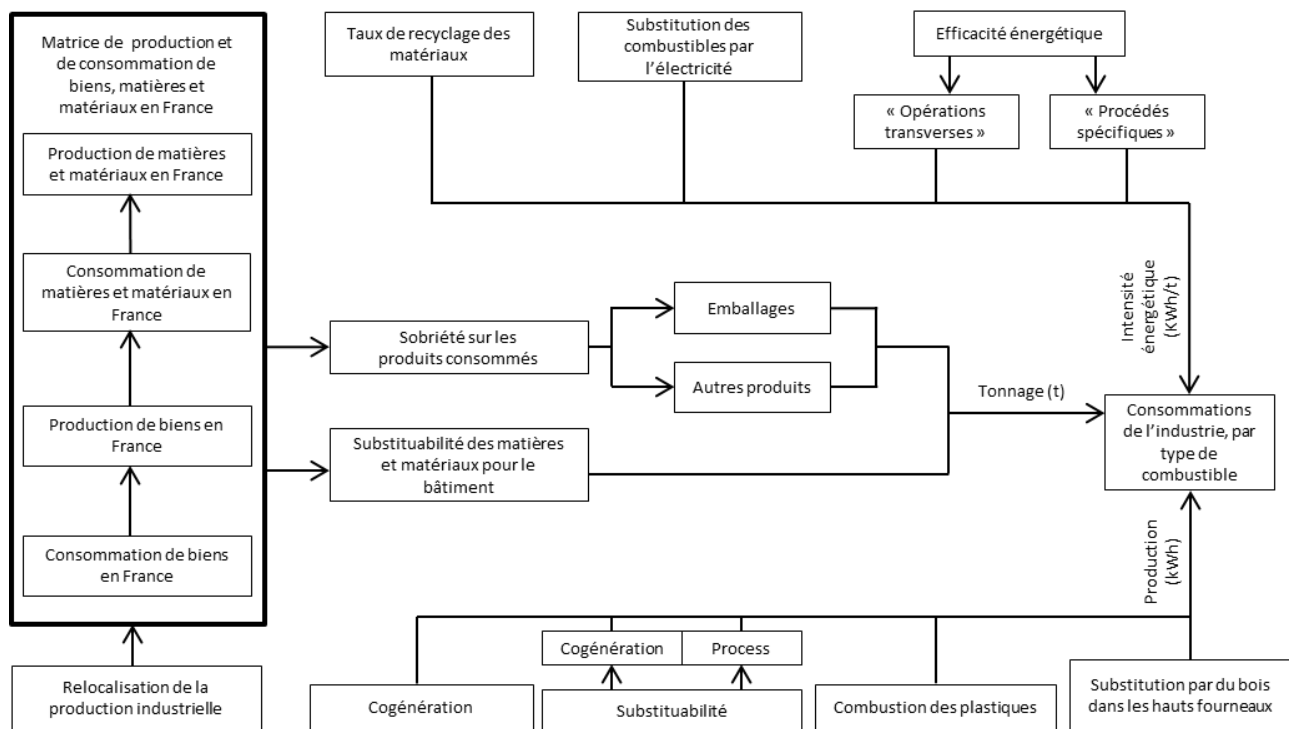


Figure 45 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie dans l'industrie

3.1.2. Production et sobriété

3.1.2.1. La matrice de production

L'originalité du scénario négaWatt consiste à partir de la consommation de produits finis et à calculer les quantités de matériaux nécessaires pour satisfaire ces besoins. Ainsi pour chaque année, on établit une matrice des tonnages consommés calquée sur le schéma suivant :

2010	Prod	Conso	Bois	Biomasse	Terre sable	16 Acier	18 NF	20 Ciment	21 Const	22 Verre	24 Chimie M	25 Plastiques	26 Chimie O	29 Fonderie
Augmentation														
Production						19,25	1,66	23,5	130	5,68	9,01	7,60	8,71	2,42
Conso						18,80	3,24	26,8	131	5,60	9,72	6,50	8,73	
12-14 Alimentation	79	89,7		79										
21 Construction	130	131			103,2									
Bâtiment	95,0	96,0												
Travaux publics	35,5	35,5												
Voirie	16,1	16,1												
25-36-37 Plastiques	7,60	6,49		0,78									5,59	
23 Engrais	3,57	7,23												
Détergeants	4,88	4,60		1,46									1,66	
28 Parachimie	3,27	3,06		0,44									1,31	
Transports														
32 terre	3,66	3,40				2,54						0,69		
33 Transports NAA	0,48	0,27				0,19						0,06		
30 Mécanique	2,89	3,48				2,33								
31 Electricité	2,27	3,20				0,42						0,45		
34 Textile	0,79	1,54		0,30								0,32	0,17	
36 Papiers cartons	10,67	10,67	10,48											
38 Divers	3,92	7,25	3,12									0,80		
Emballages	7,40	7,40				0,75						2,60		
Sidérurgie														

Besoins de matériaux :
 Biomasse, bois,
 Acier, métaux non ferreux,
 Ciment, terre, pierre et sable,
 Plastiques, chimie minérale et organique
 Papiers et cartons

Besoins de produits finis :
 Alimentation
 Bâtiment
 Ouvrages d'art et industriels
 Voirie
 Engrais
 Parachimie et détergents
 Construction mécanique
 Appareillages électriques
 Transports terrestres
 Bateau et Avion
 Papiers et cartons
 Divers
 Emballages

Figure 46 : Matrice de consommation de biens en France en 2010

Cette matrice est reliée aux quantités calculées dans les autres secteurs. Par exemple, les différences d'évolution du nombre de personnes par logement entre les scénarios tendanciel et négaWatt entraînent des disparités dans les quantités de matériaux nécessaires. De la même façon, sont également prises en compte l'augmentation de la construction à ossature bois (30 % en 2050 dans la maison individuelle et 10 % dans le logement collectif et le tertiaire) ou le type de menuiseries employées (en rénovation comme dans le neuf, les menuiseries en PVC cèdent la place à terme au bois et les isolants issus de la pétrochimie sont remplacés par la ouate de cellulose ou la laine de bois. La baisse de l'usage de la voiture a également un impact, à la baisse, sur les productions du secteur automobile, mais aussi sur les secteurs amont (acier, caoutchouc, verre, etc.).

3.1.2.2. La relocalisation

La deuxième originalité du scénario négaWatt est de réfléchir à l'adaptation de la production industrielle à notre consommation intérieure. Le scénario permet de simuler la possibilité de relocaliser les biens que l'on importe aujourd'hui et qui induisent une telle disparité entre les impacts environnementaux des biens consommés et ceux produits.

Cela ne signifie pas qu'en 2050 la France serait autarcique et ne réaliserait plus d'échanges commerciaux avec ses voisins. Ce serait absurde. Cela signifie que le scénario négaWatt modélise la faisabilité d'une économie qui assume pleinement ses choix de consommation et y répond par une véritable indépendance énergétique. Sur cette base, on peut imaginer de multiples échanges mais des échanges vertueux c'est à dire dont la balance des impacts environnementaux soit équilibrée.

Cette relocalisation va se faire progressivement selon les taux suivants :

	2010	2020	2030	2040	2050
Taux de relocalisation de la production*	0 %	20 %	40 %	70 %	100 %

* % des quantités consommées produites en France

Tableau 7 : Taux de relocalisation de la production de biens en France

3.1.2.3. L'évolution générale de la consommation

Cette évolution est conditionnée à de la sobriété mise en œuvre par :

- la réduction de consommation de certains produits considérés comme non utiles (par exemple tracts publicitaires, emballages superflus), mais aussi excessifs (moins de constructions neuves, moins d'autoroutes, etc.) ;
- l'amélioration de certains produits, par l'écoconception (par exemple diminution des tailles et poids des voitures, en particulier celles destinées à un usage urbain, etc.) ;
- une durabilité des produits accrue par la fin de l'obsolescence programmée et un renforcement de la maintenance ;
- un travail sur la réutilisation d'emballages (en particulier avec une remise en place de la consigne sur le verre) ;
- la profonde mutation du secteur agricole.

Le Tableau 66 : Principales hypothèses sur les réductions de consommation liées à la sobriété (Annexe 3) présente ces évolutions.

Les emballages et la construction de bâtiments vont faire l'objet de paragraphes spécifiques.

3.1.2.4. L'évolution des emballages

Si on observe qu'en 2010, 40 % des plastiques, 49 % des papiers cartons et 65 % du verre sont destinés à des emballages, on est tenté d'éliminer leurs usages superflus. Le scénario négaWatt prévoit une diminution des suremballages dispendieux mais également une substitution du plastique par le verre et une généralisation de la consigne pour ce dernier, réutilisation d'ailleurs fortement présente chez nos voisins (Belgique, Allemagne, ...).

La mise en œuvre de la réutilisation est progressive et suit les hypothèses décrites dans le Tableau 67 : Hypothèses de réduction et de réutilisation des emballages (Annexe 3).

Les impacts en termes de production de verre creux, de plastique d'emballage et de papier-carton sont résumés dans le Tableau 68 : Impact sur la production de la réutilisation et de la réduction des emballages (Annexe 3).

Au final, la réduction des usages et surtout la réutilisation permettent de fortement réduire les productions d'emballage, en particulier pour le verre et le plastique, avec respectivement -75 % et -50 % de réduction de production.

3.1.2.5. L'évolution des matériaux de construction

Pour permettre de mieux identifier les besoins de matériaux liés aux constructions neuves et au grand programme de rénovation thermique du bâtiment, une analyse spécifique a été menée sur trois types de bâtiments (maisons individuelles, logements collectifs et bâtiments tertiaires). Les déterminants de cette analyse sont présentés sur la figure suivante.

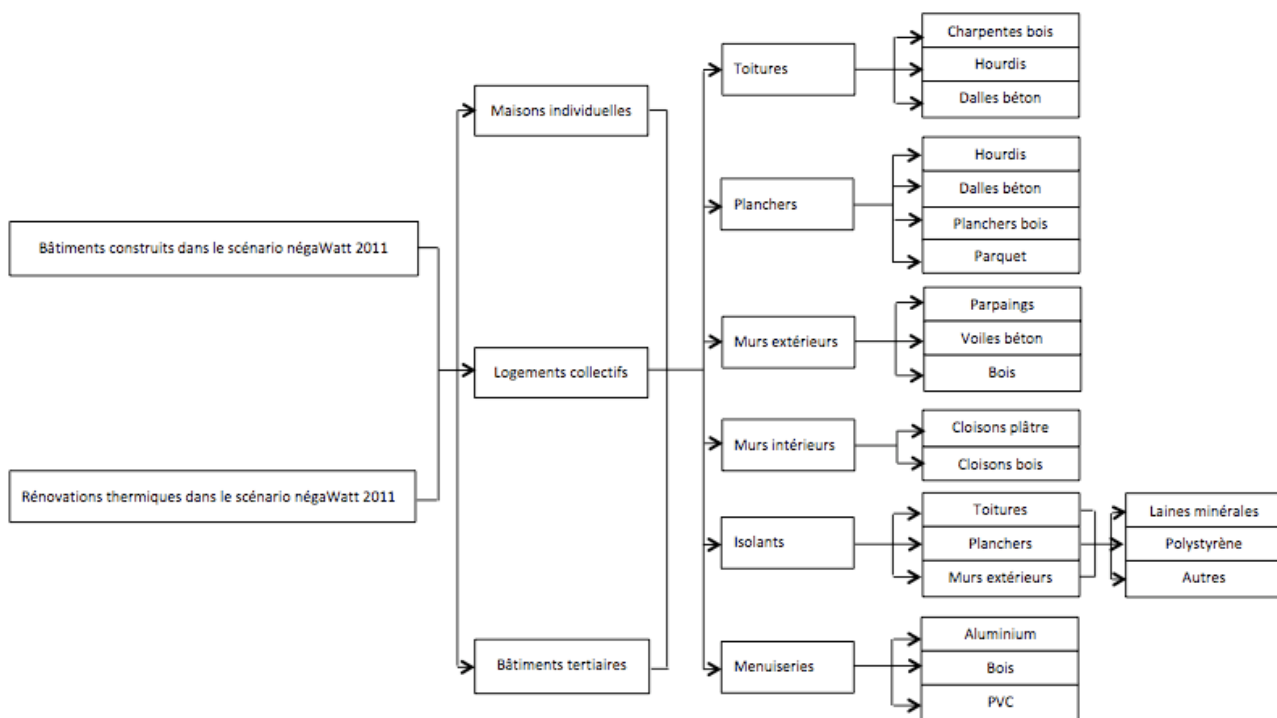


Figure 47 : Déterminants pris en compte pour le calcul des consommations additionnelles liées aux constructions et au programme de rénovations thermiques

Les surfaces prises en compte pour la détermination des quantités de matériaux sont présentées dans le Tableau 69 : Évolution de la répartition des surfaces en constructions neuves et rénovations (Annexe 3). Le Tableau 70 : Évolution de la répartition des matériaux utilisés dans les constructions neuves, le Tableau 71 : Évolution de la répartition des isolants utilisés dans les constructions neuves et les rénovations, et le Tableau 72 : Évolution de la répartition des châssis utilisés dans les menuiseries dans les constructions neuves et les rénovations (Annexe 3) précisent les hypothèses permettant d'obtenir les quantités de matériaux nécessaires dans le domaine du bâtiment.

3.1.2.6. L'évolution globale des tonnages

En tenant compte d'une augmentation de la population de 15 %, les quantités consommées sont malgré tout en baisse globale (Annexe 3 - Tableau 73 : Tonnages de matières consommées par la production industrielle).

3.1.2.7. Le recyclage

Outre l'économie de matière première, une autre source importante d'économie d'énergie est le recyclage. L'aluminium produit à partir de la bauxite consomme 30 kWh d'énergie finale par kilo produit mais lorsqu'on refond du matériau recyclé, cela requière seulement 2 kWh !

Les figures ci-dessous présentent les enjeux du recyclage :

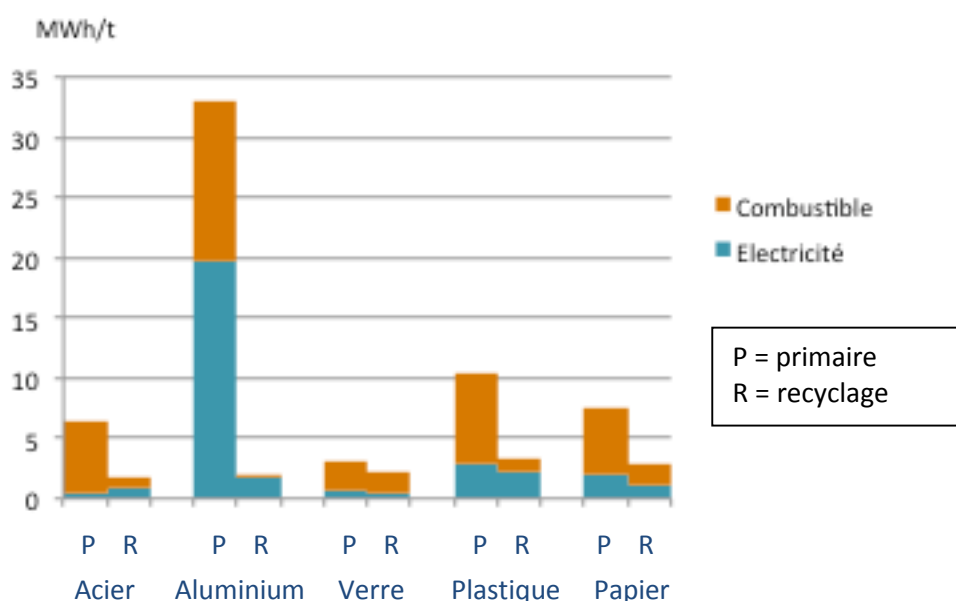


Figure 48 : Gain énergétique rendu possible grâce au recyclage

	Taux de collecte en 2010	Taux de recyclage 2010	Taux de recyclage prévu en 2050
Acier	74 %	52 %	90 %
Aluminium	44 %	37 %	86 %
Verre	35 %	35 %	90 %
Plastiques	15 %	4,5 %	30 %
Papiers-cartons	70 %	60 %	80 %

Tableau 8 : Taux de collecte et taux de recyclage en France

Si la France est bien placée pour ce qui est de la collecte des déchets ménagers et industriels, comme le montre le tableau ci-dessus, elle exporte une large partie de ceux-ci pour n'en réutiliser qu'une fraction ! Il est donc souhaitable d'adapter notre appareil industriel pour atteindre en 2050 des taux de récupération et de recyclage dignes d'une économie moderne et écologique.

Les métaux permettent de très hauts taux de recyclage, les limitations proviennent des oxydations et des produits non récupérés.

Pour le papier-carton, le recyclage et son utilisation dans le processus de fabrication dépendent des produits. D'un extrême à l'autre, il est difficile de recycler des papiers à usage hygiénique, mais très facile pour du papier journal. A la différence des métaux, le recyclage du papier n'est pas infini, la dégradation des fibres nécessite une part de renouvellement pour assurer entre autre les propriétés mécaniques.

Pour le plastique, son recyclage se fait actuellement principalement sous forme dégradée, soit en utilisant la matière plastique dans d'autres usages moins nobles (le « recyclage mécanique »), soit sous forme des matières premières utilisées en amont des procédés d'élaboration.

- Dans le premier cas, on évite tout le processus d'élaboration des plastiques (branche chimie) et seule la branche « plastiques » est concernée.
- Dans le second cas, l'économie est moindre puisque l'on recommence tout le processus d'élaboration, puis de mise en œuvre des matières (dans le secteur de production des plastiques, puis dans le secteur plastique lui-même, ce dernier n'économise rien).

Les taux de collecte et de recyclage en 2010 et leur évolution jusqu'en 2050 dans le scénario négaWatt sont décrits dans l'Annexe 3 - Tableau 74 : Taux de recyclage des matières dans la production industrielle.

Le taux de 30 % de recyclage envisagé pour les matières plastiques en 2030 est celui du « recyclage mécanique », c'est-à-dire l'utilisation des matières en tant que telles. On peut considérer que 30 % supplémentaires peuvent être récupérées et réinjectées sous forme de combustibles notamment dans les hauts fourneaux. Le gain n'est pas négligeable - il est nettement meilleur que la valorisation dans un incinérateur - mais il est moins élevé que pour le recyclage mécanique.

3.1.3. L'efficacité énergétique

3.1.3.1. Généralités

Même si un gros effort a déjà été fourni, le gisement reste très important.

Indépendamment du recyclage, l'efficacité énergétique est envisagée dans les domaines suivants :

Vecteur	Usage	Répartition 2010	Catégorie d'économie
Electricité	Force motrice	72 %	Transversale
	Usage thermique	15 %	Spécifique à 90 %
	Autre	13 %	Spécifique à 30 %
Combustible	Chauffage des locaux	8 %	Transversale
	Cogénération	5 %	Transversale
	Matières premières	31 %	Spécifique
	Process de fabrication	56 %	Spécifique à 90 %

Tableau 9 : Efficacité énergétique envisagée dans le secteur industriel

Les **économies transversales** sont celles qui sont identiques à tous les secteurs : par exemple le chauffage des locaux ou bien les performances des moteurs.

Les **économies spécifiques** sont celles qui dépendent de la nature des process de fabrication et elles sont examinées secteur par secteur.

A cela, nous devons rajouter les **économies qui induisent une substitution** du combustible vers l'électricité. Elles concernent essentiellement la compression mécanique de vapeur (CMV) où l'usage d'un compresseur remplace avantageusement de la vapeur sous pression par chauffage, la pompe à chaleur au lieu d'un chauffage classique et le four à induction dont les performances sont meilleures que le traditionnel four à combustible.

Enfin la cogénération et les réseaux de chaleur seront examinés au paragraphe suivant relatif aux sources d'énergie.

3.1.3.2. Les économies transversales

L'étude se base sur les résultats des enquêtes du CEREN 2010 et du rapport Fraunhofer (p 215) pour l'électricité.

Pour l'électricité, le gisement est le suivant :

	Usage	Economie	TWh 2010	Potentiel TR < 3 ans	Potentiel d'économie
Force motrice	Moteurs	transversale	51	11 %	36 %
	Air comprimé	transversale	9	19 %	33 %
	Ventilation	transversale	16	19 %	37 %
	Pompage	transversale	14	13 %	27 %
Thermique	Chauffage locaux	transversale	2	46 %	50 %
	Chaudières	spécifique	19		
Autres	Transformateur	transversale	2	0 %	71 %
	Eclairage	transversale	5	36 %	64 %
	Froid	transversale	9	18 %	36 %
	Process	spécifique	7		
TOTAL			134		

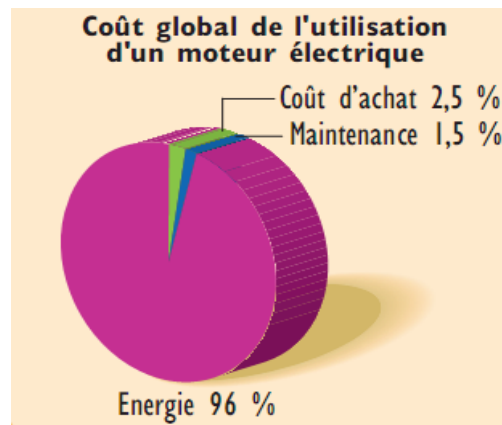
Tableau 10 : Gisement d'économie d'électricité dans le secteur industriel

Les économies possibles sont les suivantes :

Moteurs électriques :

C'est un chantier très important qui concerne les moteurs proprement dits mais également l'ensemble de la force motrice : pompage, ventilation, air comprimé. Le poids de ce secteur dans la consommation est de 70 % des usages électriques. Le volume du gisement d'économie est important. Les gains possibles sont la résultante :

- d'un bon dimensionnement de la machine que l'on souhaite utiliser : les surdimensionnements entraînent généralement un fonctionnement hors de la zone optimale ;
- de l'utilisation des moteurs les plus efficaces (Normes IE3 puis IE4, disparition des anciens labels EFF 1). Même s'il y a un surcoût à l'achat, ce choix est largement rentable quand on sait qu'aujourd'hui, en moyenne, le coût d'achat du moteur ne pèse que 2,5 % du coût d'usage sur sa durée de vie (96 % étant la facture d'énergie, voir figure ci-dessous) ;
- de l'utilisation de variateurs de vitesse, dont le coût a largement diminué ces dernières années, permet d'adapter au mieux la vitesse du moteur au besoin ;
- d'une bonne maintenance, du moteur en lui-même (graissage palier), et de la ligne de transmissions (alignement, tension courroie, etc.).



Source : Guide technique Motor Challenge

Figure 49 : Répartition des coûts d'utilisation d'un moteur électrique

Les fluides : pompage, air comprimé, ventilation

Les machines tournantes de type ventilateur, compresseur ou pompe ont également un bon potentiel d'économie d'énergie :

- choix des machines de meilleurs rendements ;
- optimisation de la conception de circuits de fluide (éviter les pertes de charge inutile) ;
- optimisation de la régulation, privilégier la variation électronique de la vitesse du moteur à des vannes régulatrices ;
- bonne maintenance : chasse aux fuites (c'est souvent le cas sur les installations d'air comprimé), nettoyage des filtres, ...

L'éclairage

Les gains d'efficacité sont encore à explorer. Il s'agit d'utiliser des lampes à basse consommation, mais aussi d'optimiser les postes de travail pour profiter au maximum de la lumière naturelle, et d'éviter les sur-éclairages.

La production de froid

La production de froid se fait principalement par machine frigorifique avec compresseur. Les mesures permettant les gains regroupent celles déjà décrites pour les machines tournantes, et d'autres liées aux aspects thermiques :

- bon usage du froid ;
- compresseurs haute performance ;
- récupération de la chaleur de compression.

Les transformateurs

Les industriels possèdent souvent leurs propres transformateurs. Au même titre que sur les réseaux de transport et distribution électrique, des gains importants sont possibles en utilisant des transformateurs de dernière technologie.

Pour les **combustibles** le gisement est le suivant :

	Usage	Economie	TWh 2010	Potentiel temps de retour < 3 ans	Potentiel d'économie
Fabrication	Chaudières	transversale	10	64 %	77 %
	Réseaux	transversale	8	50 %	68 %
	Séchage	spécifique	60		
	Thermique	spécifique	54		
	Chimique	spécifique	67		
	Autre	spécifique	13		
Thermique	Chauffage locaux	transversale	23	46 %	50 %
Matières premières		spécifique	105		
Production d'électricité		transversale	19	Augmentation du potentiel de cogénération	
TOTAL			358		

Tableau 11 : Gisement d'économie de combustibles dans le secteur industriel

Les usages se répartissent à 30 % pour les matières premières, et 10 % pour le chauffage des locaux et les chaudières où 50 % d'économies sont rapidement envisageables.

Les 60 % restant concernent les usages « fabrication » qui comprennent des process bien spécifiques mais également des chaudières et leurs réseaux.

Les économies à mettre en œuvre sont les suivantes :

Chauffage des locaux

Comme dans les secteurs résidentiel et tertiaire, un gain important d'efficacité est possible sur le chauffage des locaux. Même si les locaux industriels peuvent avoir des spécificités défavorables (gros volumes, nécessité de transit fréquent avec l'extérieur,...). Il s'agit dans ce cas, bien sûr, d'isoler mieux les bâtiments, mais également d'optimiser les systèmes en place : chauffer uniquement quand et où c'est nécessaire, déstratifier des couches d'air...

Production de chaleur

La production de chaleur concerne principalement les chaudières. Les chaudières performantes actuelles peuvent atteindre de meilleurs rendements, notamment en ayant recours à des économiseurs et des réchauffeurs d'air, ce qui permet de récupérer le maximum d'énergie des fumées.

Transport et distribution de chaleur

Cette action consiste principalement à bien calorifuger les conduites de chaleur.

Le Tableau 75 : Estimation CEREN du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 - Industrie française (Annexe 3) résume le gisement global d'économies.

Pour le scénario négaWatt national, les économies ayant un temps de retour sur investissement inférieur à 3 ans sont retenues sur le court terme (2020), l'ensemble du gisement est retenu sur le long terme (2050).

D'autres critères, plus complexes à quantifier, n'ont pas été pris en compte mais pourraient être utilisés pour mieux prendre en compte le rythme de la réduction des consommations d'énergie, comme la taille des entreprises, la normalisation de la part de la facture énergétique dans le chiffre d'affaire, la formation ou le développement de compétences dans l'optimisation énergétique.

Au total, les opérations transverses couvrent 30 % des consommations énergétiques du secteur industriel (mais près de 80 % des consommations d'électricité). Sur ces opérations, le CEREN estime un gisement d'économie techniquement réalisable de 43 %, soit un gain net sur l'ensemble des consommations industrielles de 13 % (30 % sur l'électricité), dont plus de la moitié ayant un temps de retour sur investissement inférieur à 3 ans.

3.1.3.3. Les économies spécifiques

Les process spécifiques ne sont pas toujours connus en détail car le secret professionnel ne permet pas de révéler les procédés, mais en revanche on connaît les meilleures pratiques disponibles. Certaines usines dans le monde ont des consommations spécifiques nettement inférieures à la moyenne. Ces données ont servi de référence pour évaluer secteur par secteur le potentiel disponible hormis les économies transversales.

Quelques exemples sont fournis ci-dessous :

Secteur	Consommation actuelle	Meilleure pratique	Technique spécifique
Acier HF Acier élec	20 GJ/t 0,7 MWhe/t	16 GJ/t 0,4 MWhe/t	Hisarna
Alu primaire Alu recyclé	120 GJ/t 7,2 GJ/t	85 GJ/t 2,25 GJ/t	Four régénératif Passage au four gaz
Céramique	2,57 GJ/t	1,6 GJ/t	Conception des fours et des séchoirs
Clinker Cimenteries	4 GJth/t 122 kWhe/t	3 GJth/t 2 GJth/t 80 kWhe/t	Généralisation de la voie sèche Procédé Novacement au SiMg Broyeurs verticaux et Horomili
Verre	7,4 GJ/t	3,5 GJ/t	Comprend le recyclage
Chlore	2,91 MWhe/t	0,51 MWhe/t	Séparation par membrane
Chimie organique	33 GJ/t	26 GJ/t	Opérations de craquage
Pâte à papier	19 à 23 GJth/t	14 GJth/t	Récupération de chaleur latente

*Unités :

GJ/t : gigajoule par tonne

GJth/t : gigajoule thermique par tonne

kWhe/t : kilowattheure électrique par tonne

MWhe/t : mégawattheure électrique par tonne

Tableau 12 : Industrie : exemples d'économies spécifiques

3.1.3.4. La substitution de combustible vers l'électricité

A cela, il faut ajouter des procédés de conversion de combustibles fossiles vers l'électricité, à savoir :

- la compression mécanique de vapeur qui comprime non pas en chauffant mais en utilisant un compresseur électrique. Pour 1 kWh de combustible économisé, la consommation électrique est seulement de 0,2 kWh. Ce procédé peut être avantageusement mis en œuvre dans l'industrie agro-alimentaire, la chimie et la fabrication de papiers cartons ;
- la pompe à chaleur permet également des substitutions favorables d'énergie et son usage est recommandé lorsque de la production de froid est requise conjointement ;
- les fours à induction nécessitent 0,4 kWh d'électricité par kWh de combustible évité. Ce rapport sera favorable en 2050 avec un mix électrique moins pénalisant qu'aujourd'hui. Ces applications sont amenées à voir le jour dans de nombreux secteurs tels que l'industrie mécanique, électrique, automobile et la fonderie.

Les différentes hypothèses de substitution de combustible vers l'électricité sont détaillées dans le Tableau 76 : Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour la Compression Mécanique de Vapeur (CMV) et les Pompes A Chaleur (PAC) et dans le Tableau 77 : Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour les fours par passage à l'induction (Annexe 3).

3.1.4. Les sources d'énergie

La répartition des sources d'énergie dans l'industrie amène à différents axes de réflexion :

3.1.4.1. La substituabilité des sources

Certaines sources d'énergie sont substituables, d'autres non selon le schéma suivant :

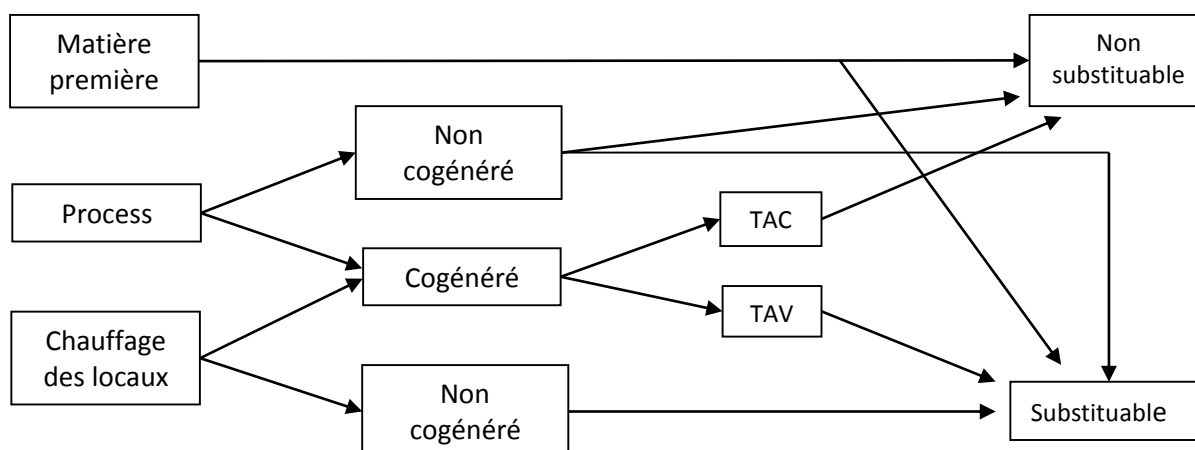


Figure 50 : Substituabilité des sources

Les process de fabrication substituables sont le séchage et les chauffages courants. Les process non substituables sont les réactions chimiques et les traitements thermiques spécifiques. Par exemple, dans la chimie, le gaz n'est pas seulement un combustible mais aussi un élément de réaction. La prudence amène donc à ne pas accepter de substitution.

Par contre, il n'est pas exclu que le gaz soit produit à partir de biomasse s'il conserve ses propriétés (essentiellement celle d'être du méthane).

Pour les process, le mix énergétique évolue conformément au Tableau 78 : Évolution du mix énergétique pour les process industriels (Annexe 3).

La substituabilité peut aussi concerner :

- les déchets industriels banals (DIB) dans la cimenterie où leur taux a été augmenté ;
- les plastiques récupérés et le bois en remplacement du charbon dans les hauts fourneaux.

Les déchets de plastiques non valorisables sous forme matière peuvent représenter un combustible intéressant en substitution des combustibles fossiles dans l'industrie, en particulier dans les hauts fourneaux sidérurgiques, mais aussi dans la pétrochimie. Le Tableau 79 : Part des combustibles plastiques (déchets) venant en substitution des combustibles fossiles (Annexe 3) indique l'évolution de la part des combustibles fossiles substitués par de tels combustibles plastiques.

Outre l'augmentation du recyclage de l'acier (et donc le passage à l'électricité dans les aciéries), le charbon des hauts fourneaux peut également être substitué par de la biomasse – en l'occurrence du charbon de bois. Cette substitution est détaillée dans l'Annexe 3 - Tableau 80 : Part de biomasse dans le combustible des hauts-fourneaux (Annexe 3).

Quant à l'électricité, elle reste reine dans ses usages spécifiques mais peut avantageusement être remplacée dans certaines applications de chaleur.

3.1.4.2. La cogénération

L'électricité étant une énergie noble, il est judicieux de limiter sa consommation surtout si cela se fait au profit d'une faible augmentation de combustibles. C'est le cas de la cogénération qui produit électricité et chaleur en même temps. Aujourd'hui limitée à 2 %, dans le scénario négaWatt la cogénération représente en 2050 25 % de la consommation totale et permet une économie de 13 TWh électriques.

Le potentiel identifié se base sur les besoins en chaleur basse et moyenne température de l'industrie. Ces potentiels ont été chiffrés par 2 études, respectivement à 120 TWh (en 1999) et 112 TWh (en 2008). Notre modélisation prend en compte un potentiel de 113 TWh, correspondant à l'intégralité des besoins basse température (<100°C) et 70 % des usages en moyenne température. Sur ce potentiel brut, seulement 80 % sont retenus, en raison de critères d'exploitation : l'optimisation du dimensionnement des cogénérations actuelles fait qu'il n'est pas intéressant de dimensionner la cogénération pour la puissance thermique maximum d'appel, surtout si celle-ci n'intervient que quelques heures par an.

L'estimation du potentiel se base sur 3 types de cogénérations qui sont aujourd'hui largement utilisés, à savoir les turbines à vapeur (TAV), les moteurs à combustion (MAC) et les turbines à combustion (TAC). En première approche, on peut les regrouper en seulement 2 catégories (voir les performances retenues dans le Tableau 81 : Performance des cogénérateurs (Annexe 3) :

- TAV : ratio chaleur/électricité grand (donc part de production électrique faible), mais permet d'utiliser tous types de combustibles (utilisation d'une chaudière à vapeur en amont, adaptée au combustible souhaité). Valable pour des puissances assez élevées ;
- TAC/MAC : ratio chaleur/électricité plus faible permettant une production plus importante d'électricité. Leur usage est limité aux combustibles gazeux ou liquides (gaz naturel, fioul, biogaz, huiles végétales, etc.). Pour des fonctions de séchage, les gaz d'échappement peuvent être utilisés directement.

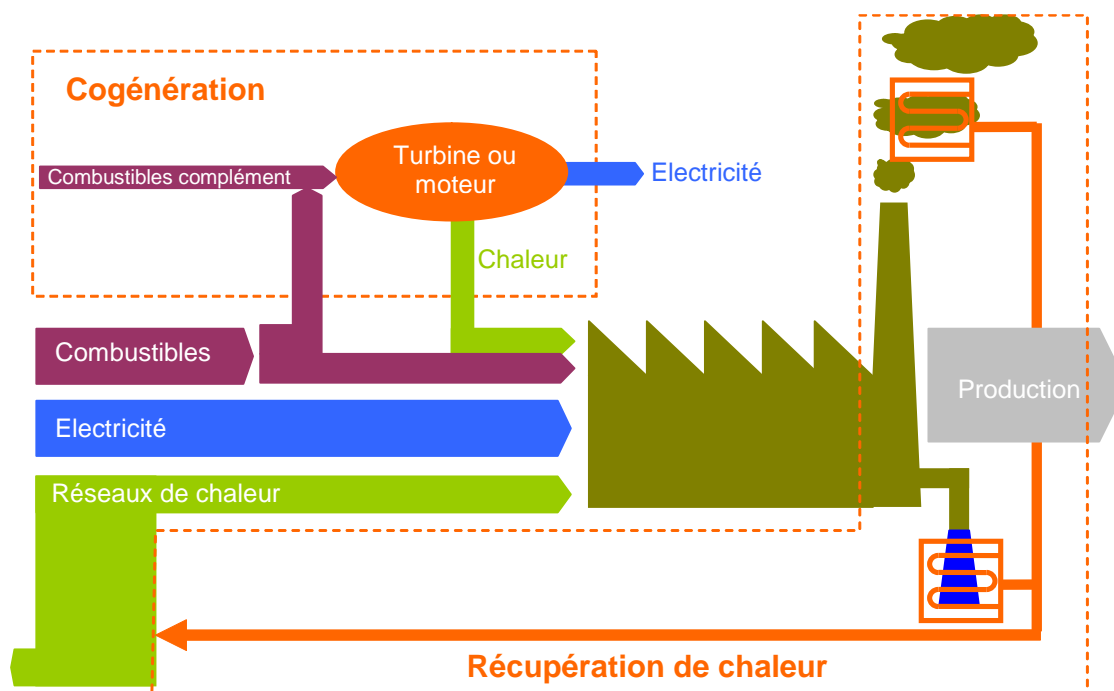
Au final, le potentiel net (= potentiel brut - cogénération existante) de cogénération de l'industrie serait de 25 TWh à court terme et 21 TWh à long terme (hypothèses chiffrées et détaillées dans l'Annexe 3 - Tableau 82 : Potentiel net de cogénération. Ce potentiel technique diminue car la consommation de chaleur dans l'industrie décroît en parallèle en raison des améliorations des procédés.

Ce chiffre est aussi un maximum technique non optimisé du point de vue des émissions de CO₂. En gros, seule une partie centrée sur l'hiver (comme les productions actuelles) a de bonnes chances de permettre une limitation des émissions.

Le développement de cette cogénération pourrait se faire à la fois pour fournir du courant de base, mais aussi de semi-base voire de pointe en considérant des systèmes de stockage de chaleur. Ils seraient bien plus efficaces que les centrales Cycles Combinés Gaz (CCG) qui sont en construction dans toute la France

(en 2010, 7 étaient déjà en fonctionnement, 6 en construction, 8 autorisées et 13 autres en projet soit un total de plus de 14500 MW). Un volume de 20 TWh à court terme représente l'équivalent de 10 centrales de 400 MW fonctionnant à 5000 h.

Ces chiffres sont cependant sujets à discussion, car pour être intéressant, le choix de la cogénération doit avoir un impact positif sur les émissions de CO₂ (ce qui est le cas sur une bonne partie de l'hiver), un impact positif sur la répartition des puissances (point qui dépend des choix techniques sur le réseau), un impact positif sur la compétitivité des entreprises (point qui dépend de la tarification). Enfin, le bilan de la cogénération ne dépend pas que des industries concernées ou même du secteur dans son ensemble, mais des choix des autres secteurs : tertiaire, réseaux de chaleur, énergies renouvelables thermiques, etc.



Source : E&E

Figure 51 : Récupération d'énergie et cogénération

Pour la cogénération, le mix énergétique retenu est décrit dans l'Annexe 3 - Tableau 83 : Évolution du mix énergétique pour la cogénération.

3.1.4.3. Les réseaux de chaleur

Au-delà des gains sur les consommations d'énergie du secteur industriel, il a aussi été recherché comment l'industrie peut être une source d'énergie complémentaire dans notre système énergétique. Bon nombre de procédés industriels, même optimisés, rejettent encore sous forme d'effluents (fumées, eau de refroidissement, etc.), des quantités de chaleur importantes dans l'environnement. Des échangeurs de chaleurs - le cas échéant combinés avec des pompes à chaleur - peuvent permettre de récupérer cette énergie, et alimenter ainsi des réseaux permettant une valorisation en dehors du site industriel (dans une autre unité industrielle, ou un autre secteur – résidentiel ou tertiaire) ;

Cette récupération des chaleurs haute température sous forme de réseaux disponibles vers d'autres industries ou des bâtiments voisins permet une économie de 10 TWh. Ce chiffre très conservateur est probablement en dessous de la réalité mais retenu comme base certaine.

3.1.4.4. La place des énergies renouvelables

La production électrique d'origine renouvelable ne rentre pas dans le chapitre de l'industrie mais sera évoquée après.

L'usage de la biomasse a déjà été évoquée, soit sous forme solide en substitution du charbon et pourquoi pas du pétrole pour certains usages, mais aussi par l'intermédiaire du vecteur gaz.

Enfin le solaire peut trouver sa place dans les usages calorifiques qui sont :

- basse température (moins de 100°C) : 44 TWh en 2010 ;
- moyenne température (de 100°C à 500°C) : 112 TWh en 2010 ;
- haute température (plus de 500°C) : 170 TWh en 2010.

Actuellement, ce potentiel est très peu exploité car les industriels privilégient les investissements à temps de retour court. Cependant, à l'avenir, le renchérissement du prix des énergies conventionnelles, et simultanément la baisse du prix des installations liée au développement du marché, rendra ces solutions plus compétitives.

Dans le scénario négaWatt, il est prévu l'installation de 25 millions de m² pour couvrir 32 % des besoins de chaleur basse température en 2050, et 31 millions de m² couvrant 15 % des besoins de chaleur moyenne température.

3.1.5. Résultats

Les résultats sont ici présentés pas à pas en différenciant chacune des hypothèses relatives à la relocalisation, la sobriété, l'efficacité, le recyclage et la substitution des combustibles.

Le diagramme ci-dessous présente tout d'abord l'effet de la relocalisation seule, indépendamment de toute action de sobriété ou d'efficacité :

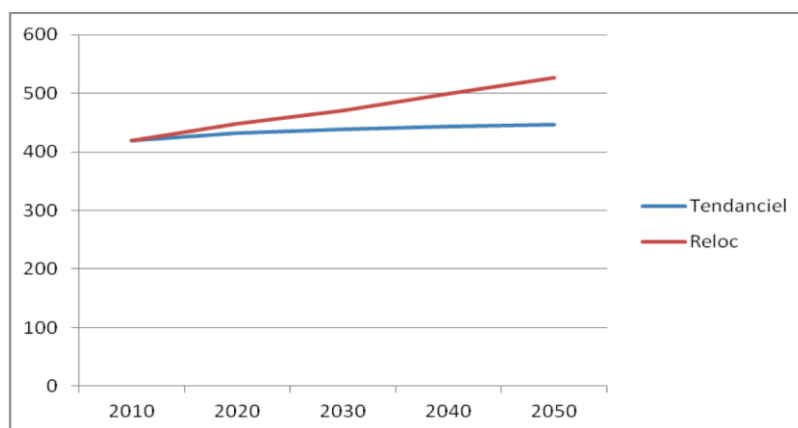


Figure 52 : Impact de la relocalisation sur la consommation d'énergie de l'industrie par rapport à un scénario tendanciel

Le graphique suivant montre l'influence de la sobriété sur la consommation d'énergie, en 2050 :

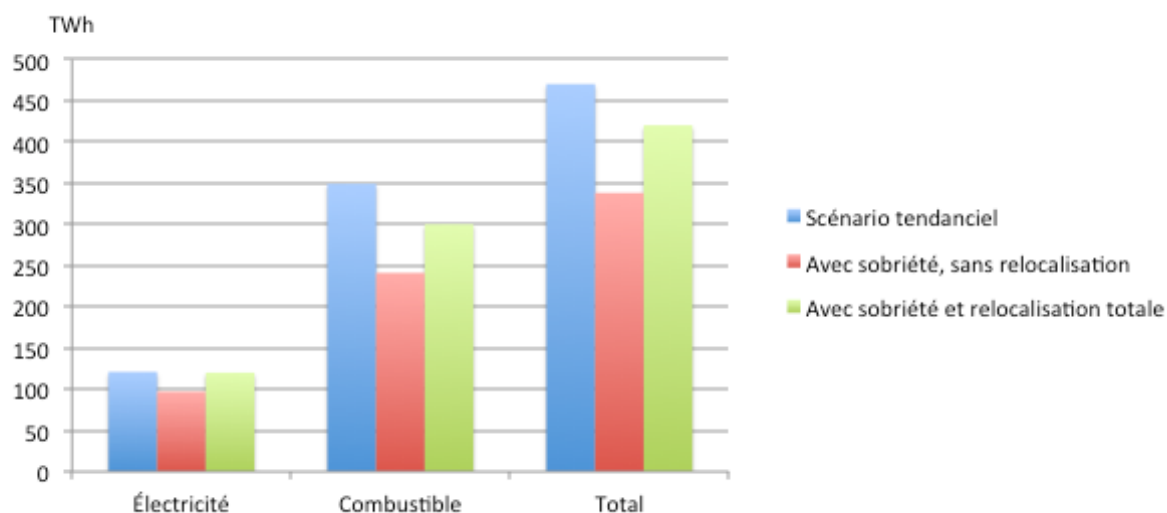


Figure 53 : Bilan en 2050 de la sobriété et de la relocalisation sur la consommation énergétique de l'industrie

Enfin le diagramme ci-dessous présente l'influence des différentes étapes :

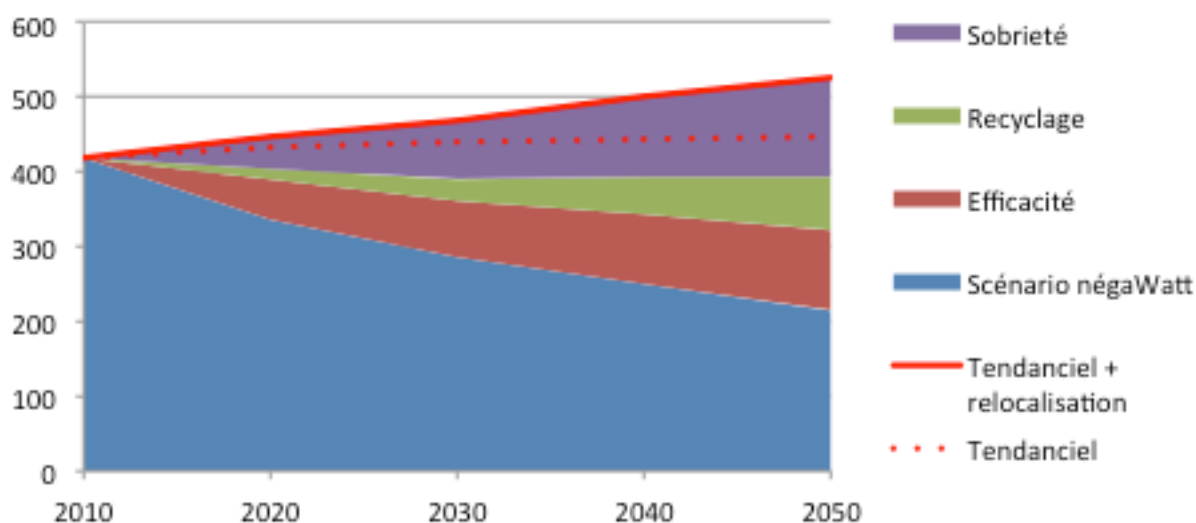


Figure 54 : Impact de la sobriété, du recyclage et de l'efficacité par rapport à une consommation d'énergie tendancielle de l'industrie majorée de la relocalisation

En 2050, la consommation énergétique de l'industrie peut être réduite de moitié sans pénaliser l'activité économique. Au contraire, l'adaptation de notre production à la consommation est une politique de relance génératrice d'emplois. Non seulement le recyclage et la fabrication des matériaux biosourcés économisent l'extraction de ressources, mais ils mettent en œuvre des techniques d'avenir dans un monde où nous serons à la fois plus indépendant et plus solidaire.

3.2. Agriculture

3.2.1. Consommation d'énergie dans l'agriculture

Pour l'ensemble des questions liées à l'agriculture (et à la production de biomasse et biogaz), le scénario négaWatt s'appuie sur la démarche Afterres2050 initiée par l'association SOLAGRO, dont l'objet est de soumettre au débat citoyen un scénario sur l'utilisation des terres à l'horizon 2050. Le but est de concilier des objectifs de production (alimentation, matériaux, énergie) et des objectifs environnementaux et sanitaires (réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole, de l'utilisation des intrants et notamment des produits phytosanitaires, des pollutions azotées, augmentation des services écologiques comme la biodiversité, de la teneur en humus des sols)¹⁵.

Les consommations d'énergie de l'agriculture ont fait l'objet d'une évaluation détaillée dans le scénario Afterres2050. Celle-ci porte sur les consommations directes (les consommations entre entreprises agricoles) et les consommations indirectes (la consommation d'énergie liée à la fourniture des intrants et à la construction des équipements et bâtiments agricoles).

La consommation de carburants représente le poste principal. Les diminutions envisagées sont liées principalement aux modifications de pratiques telles que la généralisation des techniques culturales simplifiées, allant jusqu'au non labour, et secondairement à l'amélioration de l'efficacité des engins agricoles : conception de la motorisation, réglages.

Les consommations d'électricité et de combustibles diminuent fortement grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique, notamment pour le chauffage des serres et des bâtiments dont la conception s'inspire des bâtiments basse consommation du secteur résidentiel et tertiaire. Les consommations d'électricité spécifiques diminuent également de façon sensible sur un grand nombre d'usages (éclairage, ventilation, pompes, etc.).

Les consommations dans le secteur de l'élevage diminuent également avec la réduction des cheptels. En revanche, la consommation d'eau pour l'irrigation ne change pas (la consommation d'eau en été est divisée par deux mais elle augmente au printemps à cause des effets du changement climatique), les surfaces de serres restent inchangées (la relocalisation de certaines productions maraîchères compense la diminution de productions hors saison).

La diminution des consommations d'énergie indirecte est liée principalement à la diminution des consommations d'engrais azotés, ainsi qu'à la poursuite de l'amélioration de l'efficacité de production de ces engrais.

Au total, la consommation d'énergie dans l'agriculture (directe et indirecte) passe de 102 TWh en 2010 à 59 TWh en 2050 (hypothèses chiffrées et détaillées dans l'Annexe 3 - Tableau 84 : Consommation d'énergie dans l'agriculture).

3.2.2. Évolution du système agricole et de l'assiette alimentaire

Comme l'industrie, l'agriculture relie consommation et production. Avec à peine plus de 2 %, son impact direct est faible dans la consommation finale d'énergie. Mais l'agriculture pèse à la fois par ses émissions de gaz à effet de serre non énergétiques (méthane et protoxyde d'azote) et par sa capacité de production d'énergie tirée de la biomasse, qui peut entrer si l'on n'y prend pas garde en concurrence avec les autres utilisations de cette ressource, pour l'alimentation mais aussi comme matériau.

¹⁵ Pour en savoir plus : *Afterres2050 : Un scénario soutenable pour l'agriculture et l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050*, SOLAGRO, 2014

L'analyse s'appuie ici sur le scénario Afterres2050 qui applique la même démarche de sobriété et d'efficacité à toutes les étapes de la chaîne agricole : maîtrise des besoins, réduction des pertes et des gaspillages, recyclage des déchets organiques, etc. Ce scénario est notamment centré sur une évolution de l'alimentation visant un meilleur équilibre nutritionnel et une réduction des surconsommations actuelles de sucres, de lipides (graisses) et de protéines animales. Le régime alimentaire de 2050 comprend ainsi environ moitié moins de viande qu'aujourd'hui, et aussi moins de lait. Il contient en revanche une part accrue de fruits, de légumes et de céréales.

Ce rééquilibrage a un effet bénéfique aussi sur l'énergie et les surfaces disponibles : l'élevage consomme bien plus de surface et d'énergie que les productions végétales, et nous avons atteint un niveau de consommation de viande qui n'est pas soutenable à l'échelle de la planète.

Le scénario Afterres2050 prévoit donc une division par deux des cheptels et une division par cinq de l'élevage intensif. Les modes de production agricole s'orientent plus largement vers le développement de l'agriculture biologique d'une part et de la production dite « intégrée » d'autre part, qui consiste à appliquer des techniques culturales respectueuses des équilibres écologiques (mixité, rotation longue, absence de labours profonds, agro-foresterie, optimisation des semis et utilisation d'intrants naturels, etc.). Ces deux approches se partagent à moitié les surfaces cultivables et permettent de diviser par quatre ou cinq les besoins d'intrants chimiques tout en préservant de bons rendements et en améliorant la qualité des sols.

Comme pour l'industrie, ces équilibres se dessinent dans une perspective de « souveraineté alimentaire » : la France peut continuer à exporter, notamment dans l'espace européen où la surface cultivable par habitant est en moyenne plus faible, et elle importe toujours certains produits tropicaux (thé, café, cacao, etc.), mais elle cesse progressivement d'importer d'Amérique l'alimentation destinée à son propre cheptel.

Agriculture et gaz à effet de serre : un facteur 2

L'agriculture émet des gaz à effet de serre principalement sous forme de protoxyde d'azote (N_2O) et de méthane (CH_4), et secondairement sous forme de gaz carbonique (CO_2). Le protoxyde d'azote est lié au cycle de l'azote, atome constitutif des protéines et donc essentiel pour la croissance des végétaux et pour leur valeur nutritive. Le méthane est quant à lui principalement lié à la digestion des végétaux par les ruminants, il est émis principalement par fermentation entérique (le rot des vaches). Le gaz carbonique est dû au carburant consommé par les tracteurs et à la fabrication des engrais.

En comptabilisant les intrants agricoles (engrais, énergie, phytosanitaires, etc.), les émissions actuelles sont de 41 Mteq CO_2 de N_2O et de 41 Mteq CO_2 de méthane, plus 25 Mteq CO_2 de gaz carbonique, soit un total de 106 Mteq CO_2 .

La version d'Afterres2050 adoptée pour le scénario négaWatt aboutit à une réduction d'un facteur 2, soit 53 Mteq CO_2 répartis entre 24 Mteq CO_2 pour le protoxyde d'azote, 14 Mteq CO_2 pour le méthane et 14 Mteq CO_2 pour le gaz carbonique.

La sobriété et l'efficacité du champ à l'assiette

Les principes de sobriété et d'efficacité peuvent s'appliquer à toutes les étapes de la chaîne alimentaire : réduction des pertes et des gaspillages dans l'agro-alimentaire, la distribution et dans la cuisine, recyclage des déchets organiques.

Une meilleure nutrition passe par une réduction des surconsommations, notamment en sucre, en protéines et en lipides, ce qui contribue par ailleurs à réduire l'indice de masse corporelle et à lutter contre le surpoids, dans une démarche de santé publique.

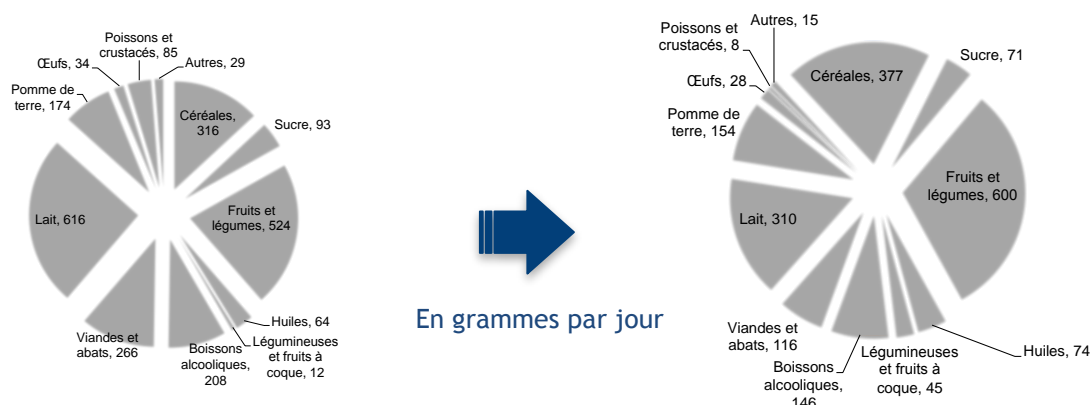


Figure 55 : Évolution du régime alimentaire moyen entre 2010 et 2050

Un régime alimentaire moins carné

Notre régime alimentaire est devenu très carné, puisque plus de 60 % des protéines sont d'origine animale (viande, œufs, lait, poisson). Or, la production d'un kilo de protéines animales nécessite une consommation bien supérieure de protéines végétales. L'alimentation carnée occupe beaucoup d'espace et de ressources (engrais, énergie).

Notre régime alimentaire n'est pas plus durable que notre régime énergétique : si l'ensemble des humains suivaient ce régime carné, la totalité des céréales consommées dans le monde ne suffiraient pas, et de loin, à nourrir les animaux. De la même manière que pour l'énergie, les ressources en terres sont limitées, l'alimentation carnée progresse dans le monde, et le partage des richesses naturelles implique une certaine convergence des régimes alimentaires entre les différentes régions du monde.

Aucune raison nutritionnelle ne s'oppose à diminuer la part dans notre alimentation des produits provenant de l'élevage (viande et lait), bien au contraire. Compte tenu de notre régime actuel, il est possible de diviser par deux nos consommations de viande et de lait sans aucun problème de santé publique ; et d'inverser ainsi la proportion entre protéines animales et protéines végétales. Selon les nutritionnistes, le fait de diminuer la part de viande permet par ailleurs de diminuer également la consommation de lait. Si nécessaire, la fourniture de calcium peut s'effectuer par des apports minéraux plutôt que *via* les produits laitiers.

Il est également probable que la consommation de poissons chute fortement, si les ressources halieutiques ne sont pas reconstituées. Le poisson d'élevage prendra une partie seulement de la relève des poissons pélagiques.

L'assiette alimentaire de 2050 contient donc moins de viande et moins de lait, et beaucoup plus de fruits, de légumes, de céréales, de fruits à coque (amandes, noix, ...). La viande ne disparaît pas pour autant, sa consommation n'est réduite que de 50 %, mais elle ne sera pas à tous les menus, ni tous les jours de la semaine.

Une productivité végétale avec moins d'intrants et plus de biodiversité

Le principal mode de production agricole relève des principes de la production intégrée : rotations longues, assolement intégrant des légumineuses, lutte biologique faisant appel aux auxiliaires vivants plutôt qu'aux traitements chimiques, travail simplifié du sol permettant d'augmenter et conserver la masse d'humus et les propriétés associées (vie biologique, capacité de rétention en eau, résistance à la compaction, etc.), cultures intercalaires permettant de maintenir un couvert végétal permanent, présence d'infrastructures agro-écologiques comme les haies, arbres épars, zones humides.

Ce mode de production permet de réduire fortement la consommation d'intrants chimiques (division par 4 de la consommation d'engrais et de pesticides par rapport à l'agriculture conventionnelle d'aujourd'hui), voire de la supprimer (il s'agit alors d'agriculture biologique – un tiers des surfaces en 2050), d'associer des arbres aux cultures (on parle alors d'agroforesterie – un cinquième des surfaces en 2050), de faire des associations culturales consistant à récolter sur la même parcelle et à la même saison deux cultures différentes, typiquement une céréale et une légumineuse, qui peuvent être récoltées ensemble ou séparément.

Moins d'animaux mais mieux traités

L'ensemble des cheptels diminue : les bovins pour cause d'émissions de méthane et d'occupation d'espace et de ressources – la protéine de bovin coûte 5 à 8 fois plus que la protéine de porc ou de volaille -, mais aussi les porcs et les volailles dont l'alimentation à base de grain est directement concurrente de l'alimentation humaine.

La quantité d'animaux d'élevage chute globalement d'un facteur 2, tant pour les bovins et caprins que pour les porcs et les volailles. Le seul cheptel inchangé est celui des ovins, qui valorisent des espaces spécifiques, inexploitable par ailleurs.

L'élevage bovin reste assez proche des pratiques actuelles, avec un recours encore important à la pâture. Il est déterminé essentiellement par la production de lait, qui est divisée par deux. Le cheptel bovin viande est réduit plus fortement encore, mais conserve néanmoins une place significative compte tenu de ses qualités gastronomiques et de sa valeur patrimoniale.

La moitié de la production de porcs et de volailles passe sous le régime « label », avec une extensification importante : allongement de la durée de vie des animaux, augmentation de la surface par tête, passage en mode plein air, etc. L'élevage intensif diminue globalement d'un facteur 5 par rapport à aujourd'hui ; il est néanmoins conservé pour fournir des protéines animales bon marché, dans un souci d'équilibre entre les exigences sociales et environnementales, afin que la viande ne soit pas réservée aux catégories sociales les plus fortunées.

Un équilibre avec le reste du monde

La démarche Afterres2050 vise également la souveraineté alimentaire : l'agriculture française ne doit pas concurrencer les productions agricoles alimentaires des pays du Sud. Les exportations de denrées alimentaires destinées à l'alimentation humaine – principalement le blé, le lait et la viande - sont confinées à l'espace européen, élargi vers l'espace méditerranéen, Moyen-Orient compris, pour tenir compte du rapport entre la densité de population de ces régions et de leur potentiel de production agricole.

La France exporte actuellement de grandes quantités de denrées agricoles, mais elle en importe également, notamment les produits tropicaux (café, cacao, etc.), des fruits et légumes, et surtout des tourteaux pour l'alimentation animale. En 2050, les importations de soja et des tourteaux dérivés, en provenance des Amériques, sont totalement supprimées. Les exportations de céréales destinées à l'alimentation animale sont elles aussi réduites, sans pour autant être supprimées, car la France conserve malgré tout une certaine vocation exportatrice, dans un monde qui globalement voit la part de l'alimentation carnée augmenter, la réduction de celle-ci dans les pays riches ne compensant pas son augmentation dans les pays en développement.

Partie 3 -

Substitution par les énergies renouvelables : analyse de bouclage sur l'offre

Pour répondre à la demande résiduelle d'énergie qui reste nécessaire après la réduction des besoins grâce à la mise en œuvre des actions de sobriété et d'efficacité, le scénario négaWatt donne la priorité aux énergies renouvelables. Dans le modèle utilisé, le développement progressif de ces dernières permet de déterminer le rythme de la réduction du recours aux sources fossiles d'une part, fissiles d'autre part, tout en assurant la sécurité de l'approvisionnement énergétique pour répondre à l'ensemble des besoins. Les contraintes de sûreté liées notamment au vieillissement du parc nucléaire sont également prises en compte dans la réflexion.

Dans une approche prudente et réaliste, la montée en puissance des énergies renouvelables tient compte, pour chaque type de ressource, de technologie et de vecteur, à la fois des potentiels physiques disponibles à court, moyen et long terme, des capacités et des limites technico-économiques de chaque filière, et des contraintes de leur intégration dans les différents réseaux.

Dans cette perspective, le scénario négaWatt cherche à tirer le meilleur parti de la diversité et de la complémentarité des énergies renouvelables qui, outre leur abondance, ont comme principaux avantages un caractère inépuisable, un moindre impact sur l'environnement et une très grande diversité.

Ce sont généralement les énergies renouvelables électriques qui focalisent le plus l'attention : pourtant, l'électricité ne représente aujourd'hui que 25 % de nos besoins énergétiques finaux. Le scénario négaWatt prévoit que cette contribution passe à 38 % en 2050 grâce notamment au développement de l'éolien et du photovoltaïque, plus marginalement des énergies marines, qui viennent s'ajouter à l'hydro-électricité historique.

Mais c'est la biomasse qui, d'un point de vue quantitatif, constitue la première ressource énergétique en couvrant près de la moitié des besoins en 2050. On mobilise pour cela une grande variété de gisements et on fait appel à un large éventail de techniques pour leur exploitation et leur utilisation sous forme solide, gazeuse ou liquide. Enfin, le solaire thermique et la géothermie apportent un complément indispensable sous la forme de flux de chaleur locale notamment dans le bâtiment.

Sauf indication contraire, l'ensemble des données de production qui vont suivre sont exprimées en Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS), reflétant ainsi bien mieux le contenu énergétique des ressources.

1. Production d'énergie - la biomasse

Comme pour l'évolution du secteur agricole décrite précédemment, le scénario négaWatt s'articule dans ce domaine avec les projections du scénario Afterres2050 développé par l'association Solagro, dans lequel la valorisation des connexes, des résidus et des déchets issus de la production et de la consommation de produits agricoles, agro-alimentaires et sylvicoles ainsi que du traitement des eaux usées permettent non seulement de faire face aux besoins en énergie, mais aussi en matériaux « bio-sourcés ». Ces derniers viennent se substituer aux matériaux classiques issus de ressources non-renouvelables et participent ainsi aux économies d'énergie dans d'autres secteurs que l'agriculture comme le bâtiment ou l'industrie.

À terme, l'évolution du système agricole libère des espaces qui peuvent être utilisés pour une production spécifique de biomasse-énergie, mais la dynamique entre l'offre et la demande n'impose à aucun moment sur la durée du scénario de développer des cultures énergétiques qui viendraient concurrencer la production alimentaire.

Au total, les ressources issues de la biomasse s'élèvent en 2050 à 410 TWh d'énergie primaire, soit un triplement par rapport à la situation actuelle. La répartition de cette ressource et son évolution dans le scénario négaWatt sont décrites dans le Tableau 85 : Biomasse : ressources brutes (TWh PCI) (Annexe 4).

1.1. Le bois énergie

Le bois énergie représente aujourd'hui 110 TWh d'énergie primaire (base PCI), dont 48 TWh provenant directement de la forêt, 17 TWh de ressources hors forêt (haies, arbres urbains, etc.), et 45 TWh des industries de première et seconde transformation, incluant les liqueurs noires, ainsi que du bois de récupération (données détaillées dans l'Annexe 4 - Tableau 86 : Origine du bois énergie).

1.1.1. La forêt

Le scénario Afterres vise à réduire les importations de bois et dérivés (pâte, papier), notamment de bois non certifié provenant de la déforestation, et à augmenter la part du bois dans la construction. La consommation de bois d'industrie augmente également : en effet, la diminution de la consommation de papiers cartons, permise par des efforts de sobriété et un plus fort taux de recyclage, est compensée par une augmentation de l'utilisation de produits dérivés du bois en remplacement des matières issues de la pétrochimie. La filière bois est aujourd'hui l'un des principaux postes déficitaires du commerce extérieur.

L'enjeu est d'augmenter significativement les prélèvements, de maintenir un haut niveau de production tout en améliorant les services écosystémiques rendus et la valeur écologique des systèmes forestiers, dans un contexte climatique qui devrait devenir de moins en moins favorable¹⁶.

Il existe peu de scénarios prospectifs sur la forêt française à long terme. On peut signaler les travaux du Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux (CGAAER)¹⁷, effectués avant la révision de la méthode d'inventaire. Son scénario « développement durable » misait sur un volume prélevé de 129 Mm³, pour une forêt de 17 millions d'hectares.

Les hypothèses d'Afterres2050 sont plus prudentes. Elles intègrent deux facteurs qui tiennent compte d'objectifs environnementaux et organisationnels :

¹⁶ *Construire une société soutenable : quelle production pour quels usages du bois des forêts françaises ?* Les Amis de la Terre, Mai 2009.

¹⁷ *La forêt française en 2050 – 2100 : Essai de prospective*. Juin 2008. Jean-Marie Bourgau, coordonnateur, CGAAER (Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux). Présidé par le ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire, le CGAAER assure des missions d'audit, de conseil, de prospective et d'accompagnement des ministres.

- le taux de prélèvement global sur un massif forestier ne doit pas dépasser 75 %¹⁸ de l'accroissement annuel ;
- le taux d'exploitation des forêts dites « de production » du territoire métropolitain (soit 15,4 millions d'hectares aujourd'hui) ne doit pas dépasser 95 %.

Ces ratios tiennent compte de contraintes écologiques et de la non accessibilité de certaines parcelles. Il en résulte un taux de prélèvement maximal de 70 %. Appliqué à une production biologique totale de l'ordre de 140 à 160 Mm³, les quantités mobilisables sont de l'ordre de 100 Mm³.

Les statistiques sur la forêt française sont produites principalement par l'IGN¹⁹, qui réalise régulièrement un inventaire national. Les modes de calcul ont été profondément révisés en 2011, conduisant à une remise en cause de nombreuses données statistiques²⁰. Il est nécessaire de revenir sur ces questions qui sont au cœur des controverses sur le rôle productif de la forêt.

La production biologique annuelle de ces 15,4 millions d'hectares était de 50 Mm³ en 1970, elle est actuellement de 86,4 Mm³ par an de « bois fort tige » selon le Mémento 2012 de l'IGN^f, ce qui correspond à environ 130 Mm³ de bois total.

Dans le scénario Afterres2050, la surface de la forêt française augmente de 1 million d'hectares, et on considère que l'augmentation tendancielle de la production biologique annuelle va plafonner à un niveau de l'ordre de 105 Mm³/an (bois fort tige), avant de diminuer.

Les prélèvements actuels sont de 41,8 Mm³ de bois fort tige, et environ 62 Mm³ de bois total, en comptant les quantités « autoconsommées », notamment pour le bois énergie²¹. Soit environ 50 % de la production biologique annuelle.

Dans le scénario Afterres, ces prélèvements atteignent environ 110 Mm³ en 2050, avec une augmentation d'environ 50 % de la production de bois d'œuvre et de bois industrie. La production de bois énergie est de 50 Mm³ (hypothèses chiffrées et détaillées dans l'Annexe 4 - Tableau 87 : Biomasse : production de bois et prélèvements).

Le scénario s'appuie sur les prospectives réalisées par l'IRSTEA²² ou le FCBA²³ qui évaluent le potentiel en bois d'œuvre supplémentaire à 10 Mm³ dès 2020 : par prudence, le scénario Afterres considère que ce volume n'est atteint qu'en 2050.

Le bois énergie issu directement de la forêt provient pour l'essentiel des opérations sylvicoles (éclaircies) et de bois « lié » au bois d'œuvre (houppiers) : la filière bois énergie est complémentaire de la filière bois d'œuvre, et non en concurrence. Il est indispensable d'associer toute politique en faveur du bois énergie à une politique forestière qui vise à maximiser les bénéfices économiques et environnementaux par l'association des filières.

¹⁸ Note de position : *Production, gestion et utilisation du bois énergie*, France Nature Environnement Août 2010.

¹⁹ Institut national de l'information géographique et forestière.

²⁰ *Rapport de la mission d'expertise sur les méthodes de l'IFN*, Charles Dereix, Jean-Jacques Lafitte, Jean-Pierre Puig, Juillet 2011.

²¹ Les quantités de bois non comptabilisées par l'Enquête Annuelle de Branche sont dites « autoconsommées », ce qui inclut également les circuits de proximité (entraide, échanges avec les voisins, amis, famille), des ventes non assujetties à la TVA, ainsi qu'une quantité inconnue mais minoritaire de ventes illégales du point de vue du droit fiscal et/ou du droit social.

²² *Biomasse forestière disponible pour de nouveaux débouchés énergétiques et industriels*, IRSTEA (ex-CEMAGREF), 2009.

²³ *Perspective de valorisation de la ressource de bois d'œuvre feuillus*, FCBA, Février 2011. Cette étude donne un potentiel de 10 Mm³ supplémentaires pour le bois d'œuvre feuillus en 2020.

Une partie du bois énergie est issue de l'exploitation de formes traditionnelles comme les taillis, ou à partir de peuplements à faible valeur comme bois d'œuvre. La sylviculture peut améliorer ces peuplements pour transformer, lorsque cela est utile et nécessaire, des taillis en futaies à objectif de production de bois d'œuvre.

Le scénario Afterres ne prévoit pas de développement massif des TCR (Taillis à Courte Rotation), sauf applications spécifiques (par exemple le traitement des eaux usées).

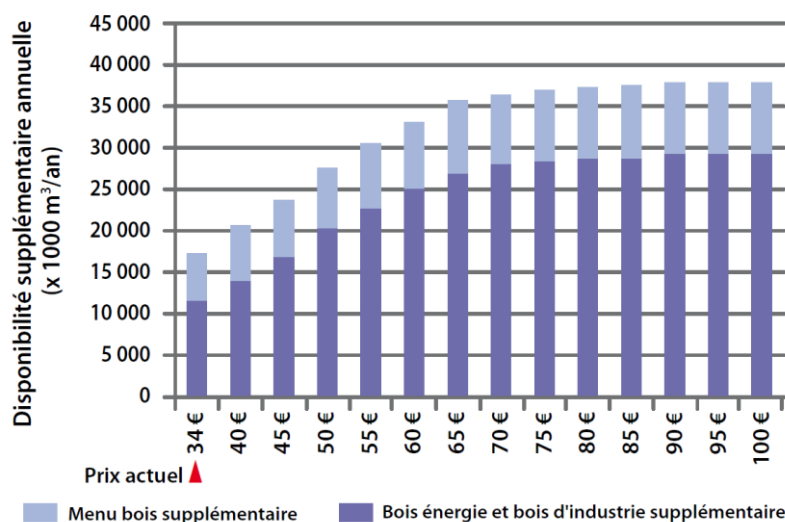
Selon l'étude sur la disponibilité en bois énergie réalisée par le groupement IFN/FCBA/Solagro²⁴ en 2009 pour le compte de l'ADEME, la ressource disponible supplémentaire en bois-industrie/bois-énergie (BIBE) en 2020 est de 30 Mm³ pour la forêt (hors peupleraies et haies). Ce chiffre tient compte des contraintes environnementales, notamment des besoins en minéraux sur les sols sensibles, qui limitent l'exportation des menus bois.

En revanche il ne tient pas compte des contraintes organisationnelles (pistes d'accès, morcellement de la propriété forestière, notamment privée, qui recèle l'essentiel du potentiel supplémentaire), ni économiques.

Seule la moitié du potentiel est disponible dans les conditions économiques actuelles. Mais un doublement du prix du bois « bord de route »²⁵ rendrait exploitable la quasi-totalité de la ressource.

Une hausse de 30 €/m³ de bois (soit un quasi doublement par rapport au prix moyen actuel) correspond à une augmentation de 20 € du baril de pétrole brut (un m³ de bois vaut environ 1,5 baril de pétrole brut).

Afterres2050 fait l'hypothèse que d'ici 2050, l'augmentation du prix de l'énergie rendra cette ressource plus compétitive, et la disponibilité sera assurée grâce à l'amélioration des conditions de mobilisation (gestion de la forêt privée morcelée, logistique, structuration de la filière).



Source : IFN/FCBA/SOLAGRO

Figure 56 : Impact du prix moyen du bois bord de route sur la disponibilité supplémentaire de bois industrie/bois énergie (BIBE) ET de menus bois (MB)

²⁴ Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. Rapport final, Novembre 2009, Antoine Colin et al. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'Inventaire Forestier National (IFN), avec l'institut technologique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA) et Solagro. Voir <http://www.dispo-boisenergie.fr>

²⁵ On distingue le cours du bois sur pied et le prix du bois façonné et débardé, appelé « bois bord de route ».

1.1.2. L'agroforesterie et les arbres hors forêt

Les arbres hors forêt fournissent aujourd'hui environ 7 Mm³ de bois énergie. Leur contribution augmenterait significativement avec le développement des infrastructures agro-écologiques (haies, bosquets, arbres isolés, ripisylves, etc.) qui comportent très souvent des formations arborées, et avec l'agroforesterie. L'agroforesterie fournit à terme du bois d'œuvre, mais cette production ne devient significative qu'à long terme. À moyen terme, les infrastructures agro-écologiques et l'agroforesterie fournissent surtout du bois destiné à l'énergie, et ce débouché constitue une forme d'encouragement au développement de ces pratiques.

1.1.3. Les déchets de bois

Les déchets de bois constituent une « ressource dérivée » provenant soit de la transformation de la ressource primaire directement issue des formations arborées (forêt et arbres hors forêt), scieries et usines de trituration, soit des produits en fin de vie : déchets d'emballage, papiers et cartons non recyclables, meubles et menuiseries en fin de vie, déchets issus de la déconstruction (charpentes, parquets, huisseries), traverses de chemin de fer, poteaux, palettes, etc.

Cette « ressource dérivée » est égale à la ressource primaire, aux pertes près (incendie, termites) et avec un différentiel de temps qui tient compte de la durée de vie des différents matériaux. L'augmentation de la production primaire se traduit donc par une augmentation de la ressource secondaire avec un décalage de quelques années (pour les produits à courte durée de vie comme la majorité des papiers) à quelques décennies (pour les produits à durée de vie longue comme le bois de construction). Le scénario Afterres prévoit une utilisation plus importante du bois dans la construction, ce qui se traduit par une augmentation de la production de produits connexes de scierie qui seront destinés pour l'essentiel à la production d'énergie. Le taux de récupération des déchets de bois augmente, notamment à partir des chantiers de déconstruction. L'ensemble de ces évolutions conduit à une augmentation de 40 % de la production d'énergie à partir des déchets de bois.

1.2. Le biogaz

Le biogaz voit sa production multipliée et atteint 140 TWh en 2050. Il est d'origine agricole à plus de 90 %.

On considère que la méthanisation devient un standard de toute production agricole, qu'il s'agisse des systèmes d'élevage comme de cultures. Elle pourra prendre des formes multiples, comme aujourd'hui : depuis des unités à la ferme jusqu'aux installations collectives territoriales.

La méthanisation est utilisée à la fois comme outil de production d'énergie à partir des diverses ressources agricoles disponibles sur un territoire, mais également comme un outil d'optimisation de la fertilisation. Elle participe efficacement au recyclage de l'azote d'origine organique, de manière à limiter les besoins en engrais azotés.

1.2.1. Biodéchets, déjections d'élevage, résidus de culture

Actuellement la principale production de biogaz provient des déchets des ménages et des entreprises : biodéchets, boues de station d'épuration, effluents industriels, déchets agro-alimentaires, etc. On assiste dans Afterres2050 à un double phénomène : une part croissante de ces déchets sont méthanisés, mais la quantité de déchets diminue grâce à la réduction des pertes et gaspillages. Les biodéchets fournissent 8 TWh en 2050.

De la même façon, la quantité de déjections d'élevage diminue, en lien avec la diminution des cheptels et l'augmentation du temps de pâture, mais le taux de mobilisation en méthanisation augmente. Le potentiel estimé en 2050 est 12 millions de tonnes de matières sèches, produisant 22 TWh. Le taux de mobilisation

tient compte des ressources trop dispersées pour pouvoir alimenter une unité de méthanisation, mais il est élevé, de l'ordre de 90 %.

La généralisation de la méthanisation des déjections d'élevage contribue à réduire très significativement les émissions de gaz à effet de serre générées par le stockage de ces déjections.

Afterres2050 prévoit de mobiliser un quart des résidus de culture pour alimenter des unités de méthanisation. La diminution des cheptels conduit à réduire les quantités de paille utilisées en litière animale. Le taux de mobilisation de la paille augmente néanmoins par rapport à aujourd'hui. La méthanisation conserve l'intégralité du potentiel humique de la paille et de sa valeur fertilisante (éléments minéraux). Elle transforme moins de la moitié du carbone total en biogaz, qui est autant d'énergie non disponible pour la vie du sol. Il faut donc limiter les prélèvements ou les compenser, d'autant que la paille joue un effet structurant pour le sol. Un taux de prélèvement de 25 % des pailles, dont 60 % du contenu en carbone total restitué aux sols, est compatible avec les objectifs de conservation des sols. La généralisation des pratiques de couverts permanents et de travail superficiel du sol contribue à maintenir des sols riches en matière organique. Le potentiel total en 2050 est de 37 TWh.

1.2.2. Les ressources fourragères

Le scénario Afterres2050 prévoit une diminution du cheptel bovin, permettant de libérer des prairies destinées aujourd'hui à l'élevage animal. En 2050, environ 20 % de la production d'herbe des prairies sont ainsi libérées, permettant d'obtenir 10 millions de tonnes de matières sèches qui alimentent des unités de méthanisation, ce qui génère 28 TWh de biogaz.

Les cultures intermédiaires sont collectées et méthanisées, toujours dans une double vocation de production d'énergie et d'engrais vert.

Les cultures intermédiaires sont récoltées en vert, c'est-à-dire qu'elles présentent une valeur fourragère mais les grains n'atteignent jamais le stade de maturité, et peuvent donc être utilisées comme aliment pour le bétail. Dans Afterres2050, elles sont cependant destinées en grande partie à la production d'énergie. Leur potentiel de récolte est estimé à près de 20 millions de tonnes de matières sèches, sur un peu moins de 18 millions d'hectares de terres arables. Il tient compte des contraintes inhérentes à ces productions : la production n'est en effet pas récoltable en cas de trop faibles rendements, soit en raison de la nature des sols, soit en raison des aléas climatiques qui peuvent modifier fortement les récoltes d'une année sur l'autre. Le potentiel de ces cultures intermédiaires est estimé à 47 TWh.

1.2.3. La méthanisation au cœur de la durabilité des agrosystèmes

Dans le scénario Afterres, la méthanisation est l'un des composants clé de la mutation agroécologique. Le schéma général est le suivant.

Les unités de méthanisation seront en grande partie des équipements collectifs accessibles à l'ensemble des agriculteurs d'un territoire dont la taille n'excède pas le canton. Ces équipements collectifs sont de tailles aussi diverses que le sont les terroirs agricoles. Ils peuvent concerner un très petit nombre d'exploitations agricoles, ou des groupes de plusieurs dizaines. Les matières méthanisées reflètent le tissu économique local, avec un mélange de déjections d'élevage, de résidus de culture, de cultures intermédiaires, d'herbe, de déchets des industries agroalimentaires, de biodéchets des collectivités locales ou des entreprises.

Ces installations ne sont pas réservées aux régions d'élevage. Elles concernent également les régions de grande culture, où elles sont conçues tout d'abord comme un moyen de produire des engrais verts à partir de ressources renouvelables : cultures intermédiaires et herbe, avec une proportion importante de légumineuses dans ces cultures intermédiaires. La méthanisation minéralise les matières organiques et transforme l'azote qu'elles contiennent en ammoniac, directement utilisables par les plantes, à la différence de l'azote organique. L'apport de digestat aux moments clé de la croissance des plantes permet

d'optimiser les rendements : la méthanisation est l'une des seules manières d'obtenir de l'azote sous une forme minérale, donc immédiatement assimilable.

Le fait de pouvoir disposer d'un revenu direct à partir du biogaz issu des engrais verts est un encouragement à la généralisation de ceux-ci, ce qui est un facteur de réduction de l'érosion, de limitation des pertes d'azote par volatilisation ou par lessivage, et d'amélioration du bilan humique. Ces pratiques sont associées à des techniques de culture simplifiées allant jusqu'au non labour, qui permet d'éviter de détruire l'humus et de préserver l'activité biologique des sols. Au contraire, cette vie des sols est stimulée par la présence de cultures intermédiaires, qui revient à élargir la période de croissance végétale sur presque toute l'année, et non uniquement lors de la croissance de la culture principale, comme dans les systèmes conventionnels. Ces pratiques exploitent significativement plus d'énergie solaire puisque la durée de l'activité photosynthétique est nettement allongée, ce qui se traduit par une augmentation de la fonction de puits de carbone de l'agriculture. Les surfaces exploitées selon ces principes stockent plus de carbone qu'elles n'en perdent, comme c'est le cas usuellement en agriculture conventionnelle.

Ces agrosystèmes peuvent être comparés aux prairies naturelles, puisque ce sont des terres arables mais qui sont couvertes de végétation en permanence, ne sont pas labourées, et reçoivent une fertilisation d'origine organique similaire à des apports de fumier. Les bénéfices induits sont multiples : économie de produits phytosanitaires, engrais, énergie directe et indirecte, réduction des fuites (nitrates, ammoniac) et émissions (méthane, protoxyde d'azote, particules), augmentation de la biodiversité et de l'activité biologique des sols.

En région d'élevage bovin, la méthanisation apporte un complément d'activité qui permet de consolider les exploitations agricoles. L'alimentation des méthaniseurs est différente car généralement l'assolement comporte moins de terres arables et plus de prairies naturelles. Les unités de méthanisation reçoivent des déjections d'élevage, des résidus de culture et cultures intermédiaires sur les terres arables.

Le scénario Afterres propose également de compléter cette recette avec du foin, c'est-à-dire de l'herbe de fauche des coupes tardives, dont la valeur fourragère est moyenne. L'objectif est de permettre aux éleveurs d'améliorer leur revenu tout en réduisant leur cheptel, et de conserver les mêmes surfaces de prairies naturelles permanentes qu'aujourd'hui. Celles-ci sont en effet menacées par la crise de l'élevage bovin, due principalement à l'augmentation du prix des céréales et des aliments pour le bétail. Ce phénomène est amené à durer et à s'amplifier. Sauf à augmenter le prix du lait et de la viande bovine pour le consommateur, les élevages bovins et les surfaces de prairies naturelles continueront à décliner comme c'est le cas actuellement.

Ces « nouveaux » débouchés pour l'herbe sont en réalité à rapprocher des prairies utilisées autrefois par les animaux de traits, bœufs et chevaux, qui représentaient une part importante de l'assolement.

1.3. Les agrocarburants

On considère que 1,8 million d'hectares sont utilisés aujourd'hui pour la production d'agrocarburants. Dans le scénario Afterres, ce chiffre diminue à moyen terme et ne remonte qu'à partir de 2035, lorsque la triple transition – nutritionnelle, agricole et énergétique – sera suffisamment engagée pour rendre à nouveau légitime l'utilisation de terres arables pour des productions non alimentaires.

En 2050, les surfaces destinées à ces usages représentent environ 2,3 millions d'hectares. Les agrocarburants produits en 2050 seront certainement différents de ceux d'aujourd'hui (carburants dits de seconde ou de troisième génération à partir de plantes entières, ou sous-produits issus de bioraffineries).

Pour avoir un ordre de grandeur de leur potentiel énergétique, on peut néanmoins donner une estimation sur la base des productions actuelles. Ces 2,3 millions d'hectares permettent de produire par exemple 3 Mt de céréales et 4 Mt de graines d'oléagineux, soit une production brute d'énergie de 29 TWh, plus 6 millions de tonnes de drèches (en matière sèche) et de tourteaux utilisables en alimentation animale.

Les modes d'obtention des carburants à partir de matières végétales seront sensiblement différents. Il est probable que certaines filières dites de 2^{nde} génération soient disponibles à cette date, intégrées à des solutions de type « bioraffinerie » de transformation de matières végétales en différents produits biosourcés (par exemple en substitution aux produits issus de la pétrochimie), et générant des coproduits utilisables comme combustibles ou carburants.

1.4. Vecteurs énergétiques et énergies finales issus de la biomasse

La biomasse est convertie en différents vecteurs énergétiques :

- Les combustibles représentent les biomasses utilisées de manière directe par les usagers finaux : il s'agit principalement du bois-énergie utilisé dans l'habitat, sous forme de bûches ou de combustibles élaborés (granulés par exemple), et des produits issus du bois utilisés notamment dans l'industrie du bois (connexes de scieries, liqueurs noires) ou dans des chaufferies dédiées à un établissement unique ;
- L'électricité est produite à partir de centrales de cogénération ;
- Le vecteur chaleur comptabilisé ici est l'énergie thermique livrée aux usagers finaux ; il englobe la chaleur délivrée par les réseaux de chaleur, et la chaleur cogénérée par les centrales produisant de l'électricité, du gaz de synthèse, ou des carburants ;
- Le vecteur gaz comprend le biométhane issu de la méthanisation et le méthane produit par la méthanation de syngas issu de la gazéification ;
- Les carburants liquides sont les carburants produits à partir des plantes, huile et éthanol ; les carburants de seconde génération ne sont pas modélisés ici.

Les quantités d'énergie sont exprimées ici en valeur PCS. Le scénario décrit les différents modes de conversion de l'énergie primaire en vecteurs énergétiques, avec une estimation des pertes d'une part, et des consommations d'énergie nécessaires à ces conversions d'autre part. La somme des vecteurs énergétiques et des pertes est égale à la production primaire. Les dépenses d'énergie nécessaires à la transformation des ressources primaires en vecteurs énergétiques sont comptabilisées dans les consommations de la « branche énergie » du bilan énergétique global.

Dans le résidentiel, la consommation de chauffage au bois se stabilise à très court terme. Elle augmente en effet actuellement de 2 % par an (en données corrigées du climat), sous l'effet de deux facteurs : nombre d'usagers et taux d'utilisation (des usagers irréguliers devenant des usagers réguliers, le bois passe d'une énergie d'appoint à l'énergie de base). A partir de 2020, les facteurs de diminution des consommations unitaires - amélioration des rendements des appareils et isolation des logements – l'emportent sur les facteurs d'augmentation du nombre des usagers.

Cette évolution s'accompagne également d'une forte diminution des émissions atmosphériques polluantes grâce au remplacement total des appareils peu performants, notamment les cheminées ouvertes et les foyers fermés anciens, avant 2030. Les bâtiments basse consommation qui consomment du bois énergie utilisent des appareils à granulés, adaptés à ces niveaux de consommation, y compris dans l'habitat collectif.

Dans l'industrie, la consommation ne diminue pas, car la biomasse se substitue massivement aux combustibles fossiles dans la quasi-totalité des applications. Il en va de même pour les grands établissements du secteur tertiaire à forte consommation unitaire, qui sont en mesure de se doter de chaufferies biomasse performantes.

La fourniture de chaleur *via* les réseaux augmente fortement : le Grenelle de l'Environnement a fixé un objectif de triplement d'ici 2020 du nombre de logements desservis par les réseaux de chaleur, l'intégralité

de la hausse de la fourniture associée provenant d'énergies renouvelables ou de récupération. Le scénario négaWatt est en cohérence avec ces objectifs.

La production de gaz renouvelable issu de la biomasse augmente de manière spectaculaire, avec 57 TWh de méthane dès 2030 et 210 TWh en 2050, avec à terme une répartition de 53 % issus de la voie biologique (méthanisation) et 47 % issus de la voie thermochimique (gazéification). Ces objectifs sont cohérents avec les travaux prospectifs réalisés par les opérateurs de réseaux de gaz²⁶.

La production de carburants liquides diminue à court et moyen terme, faute de ressources satisfaisantes pour ces formes d'énergie. Elle augmente à nouveau à partir de 2040, sous réserve que la transition alimentaire et agricole ait eu lieu également.

Données chiffrées et détaillées dans l'Annexe 4 - Tableau 88 : Biomasse : vecteurs énergétiques et énergies finales

²⁶ Voir notamment *Biométhane de gazéification : évaluation du potentiel de production en France en 2020 et 2050*, Février 2013, CRIGEN pour GrDF ; et *Vers un système gazier 100 % décarboné*, Juillet 2013, E-Cube pour GRTGaz.

2. Production d'énergie : les énergies renouvelables électriques

La quasi-totalité des besoins en électricité sont couverts par les sources renouvelables à partir de 2040, avec une production annuelle de l'ordre de 330 TWh, soit une multiplication par plus de cinq comparé à aujourd'hui. La première contribution est celle de l'éolien, qui représente 55 % du total en 2050, puis vient le photovoltaïque (24 %), l'hydraulique (20 %) et enfin les énergies marines (2 %) utilisant la force des marées et courants.

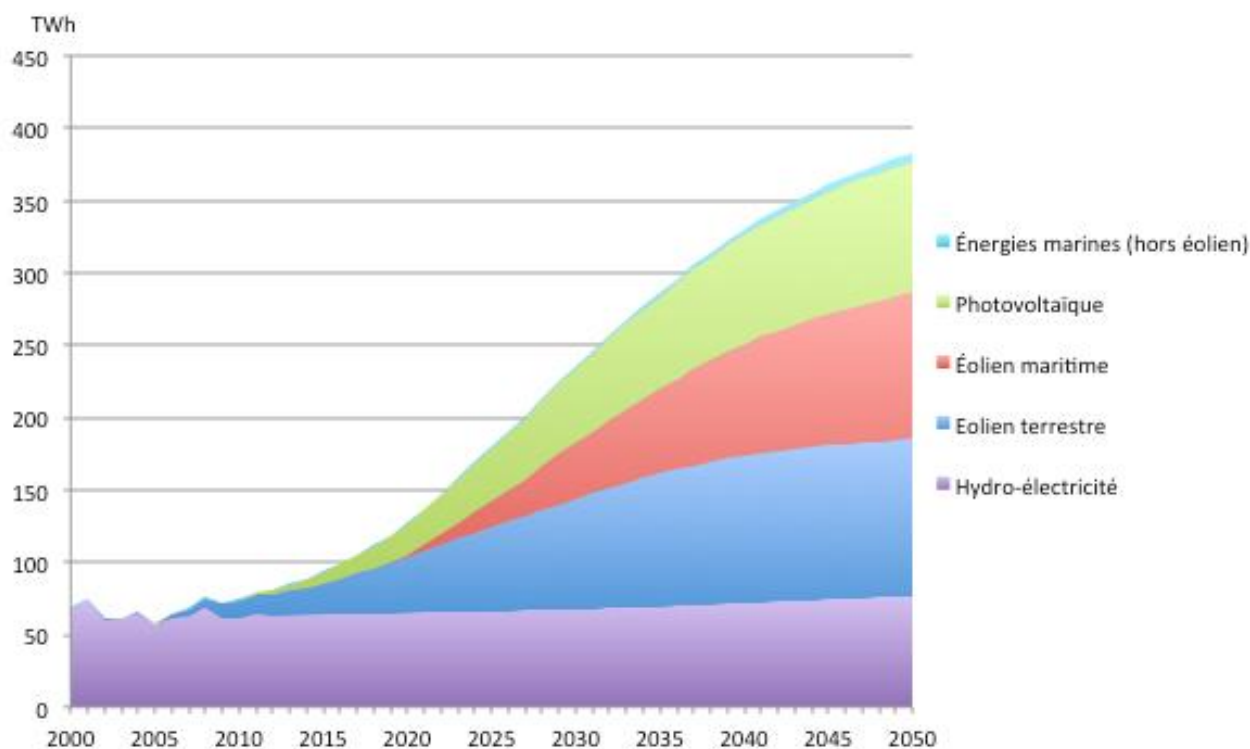


Figure 57 : Développement des énergies renouvelables électriques

Alors que le potentiel de développement de l'hydro-électricité, dont la croissance s'est faite par vagues successives entre la fin du XIX^{ème} siècle et le début des années 1960, est aujourd'hui fortement limité du fait de la saturation des sites adaptés, de la concurrence d'usage de l'eau et de la nécessité de protéger les milieux naturels, l'éolien et le photovoltaïque ont pour point commun de disposer à la fois de gisements physiques très largement supérieurs aux besoins de production et de technologies suffisamment matures pour pouvoir envisager un déploiement massif dès aujourd'hui. Des progrès notables en termes de performance et de coût sont encore à prévoir dans le cadre du processus continu d'amélioration qui les caractérise, même si des facteurs externes comme l'intégration au réseau ou le droit de l'urbanisme peuvent agir comme des freins à leur développement.

La situation n'est pas la même pour les énergies marines hors éoliennes : si la diversité des côtes françaises leur offre probablement un gisement important quoique dans des conditions très différentes d'un endroit à l'autre, les technologies nécessaires à leur déploiement à grande échelle sont loin d'avoir atteint un stade de maturité suffisant pour que l'on puisse affirmer sans risque de se tromper qu'elles seront en mesure de contribuer significativement à l'approvisionnement électrique de la France de demain.

C'est ce constat qui a conduit les concepteurs du scénario négaWatt à être très prudents, voire conservateurs, quant à la part des énergies marines dans le mix électrique qu'ils envisagent pour 2050. Si les expérimentations en cours ouvraient la voie d'une production significative, cette nouvelle corde à l'arc des énergies renouvelables viendrait renforcer la robustesse des projections réalisées.

Ainsi, l'agrégation des dynamiques retenues pour chacune des filières d'électricité renouvelable permet de décrire une évolution du parc en puissance installée, mais aussi en énergie produite annuellement en s'appuyant sur des données historiques moyennes de production. Ceci permet de garantir un premier niveau de sécurité d'approvisionnement en vérifiant l'équivalence annuelle entre les besoins en électricité issus de l'évolution de la consommation et la quantité d'électricité produite par les différentes filières renouvelables venant se substituer aux moyens de productions conventionnels, notamment nucléaires.

Ce premier niveau d'équilibre annuel n'est toutefois pas suffisant puisque tout réseau électrique exige pour son fonctionnement normal un équilibre « à tout instant » entre l'offre et la demande. Ce point est d'autant plus sensible que l'électricité se stocke très mal et qu'il faut donc être en mesure de faire face en permanence à tout événement imprévu susceptible de provoquer un *black-out*, événement dont les conséquences peuvent être catastrophiques pour la sécurité nationale, l'économie et la vie quotidienne de nos concitoyens.

Le scénario négaWatt prend en compte cette contrainte par un modèle d'équilibre offre-demande au pas horaire détaillé dans le chapitre suivant consacré au rôle des réseaux.

2.1. L'énergie éolienne

2.1.1. L'éolien terrestre

L'éolien terrestre est maintenant une technologie mature et fiable, et pour laquelle la France bénéficie à la fois d'un potentiel remarquable, le second d'Europe, et de trois grands régimes de vents décorrélés.

L'éolien terrestre est à ce titre un composant essentiel de la production électrique nationale dans le scénario négaWatt : la production éolienne passe de 15 TWh en 2013 à 109 TWh en 2050, avec des aérogénératrices de puissance unitaire moyenne passant de 2,10 MW (2009) à 3,50 MW (2050).

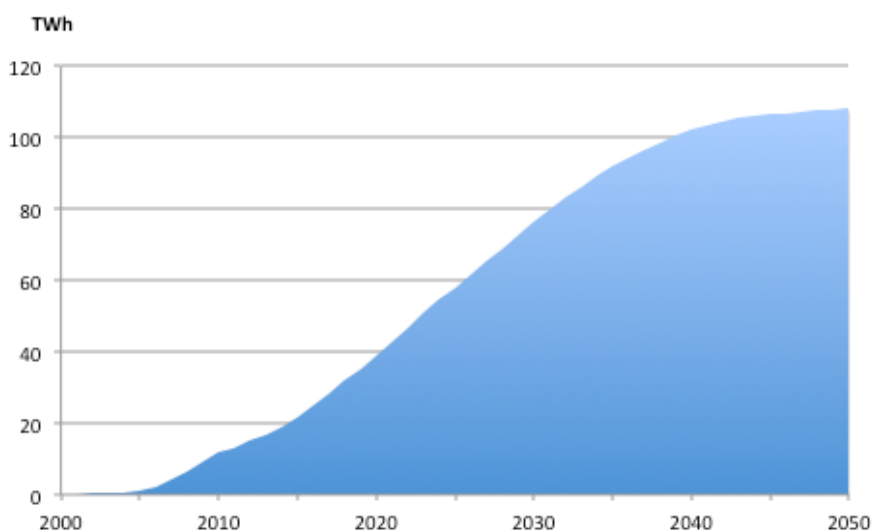


Figure 58 : Eolien terrestre : évolution de la production

Pour y parvenir, la puissance installée annuellement croît progressivement jusqu'à + 1750 MW/an en 2020-2023. Elle se maintient ensuite à partir de cette date jusqu'à 2030 à un niveau proche (+ 1600 MW/an) avant de redescendre régulièrement jusqu'à un niveau constant de + 150 MW/an vers 2045. L'augmentation de la puissance installée n'est alors plus liée à une croissance en volume du nombre de mats mais à des substitutions et améliorations du parc existant.

Pour rappel et à titre comparatif, l'objectif annuel du gouvernement est de + 1300 MW par an, et l'augmentation réelle annuelle de la puissance installée a été de + 740 MW en 2012, en recul à + 630 MW en 2013. Toujours à titre comparatif, l'Allemagne installe depuis plusieurs années plus de 2000 MW/an.

Au total, la puissance totale installée en éolien terrestre envisagée dans le scénario négaWatt s'élève à 19300 MW en 2020 (très proche des objectifs nationaux, 19000 MW en 2020), puis à 35800 MW en 2050 et 48500 MW en 2050.

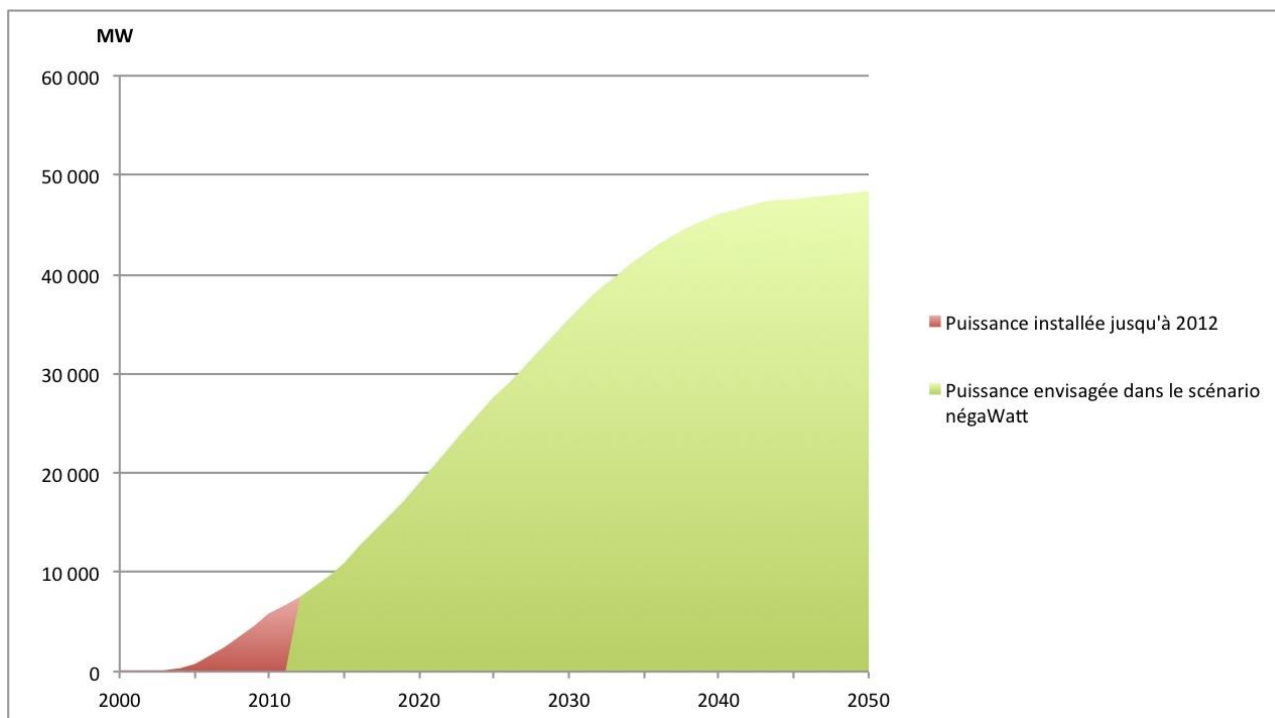


Figure 59 : Eolien terrestre : évolution de la puissance installée

Le nombre d'éoliennes terrestres est de l'ordre de 8 800 en 2020 puis double sur la période 2020-2035 pour atteindre un niveau de 15 600 à la fin de cette étape. Ce nombre croît ensuite à un rythme moins rapide sur les 15 années suivantes (17 400 en 2050).

Il est intéressant de noter que l'énergie produite augmente d'un facteur 8 en 2050 par rapport à la production actuelle, alors que nombre total de mats en 2050 correspond simplement à un triplement du nombre des installations.

Cette différence est due :

- à l'augmentation de la taille unitaire des éoliennes et donc de leur puissance ;
- pour une moindre mesure, à l'augmentation du productible (augmentation du taux de disponibilité, gain sur le rendement d'exploitation).

Cette évaluation prospective ne tient pas compte du développement récent des éoliennes pouvant produire à des régimes de vent plus faibles, ce qui ouvre la voie à des équipements mieux répartis spatialement dans des zones moins ventées (en Aquitaine par exemple).

Enfin la production par le "petit éolien" n'a pas été évaluée : ce type de machine peut s'avérer intéressant en zones rurales ventées, mais sa contribution à la production totale éolienne reste marginale.

2.1.2. L'éolien maritime

2.1.2.1. Eolien offshore "posé" (ou "planté")

Cette technologie permet d'installer des éoliennes posées sur des fondations implantées sur les hauts-fonds dans les zones maritimes proches des côtes. Cette technologie est maintenant en plein déploiement industriel avec de nombreux retours d'expérience et 4700 MW déjà en service en Europe²⁷, soit de l'ordre de 2000 turbines installées (mais toujours aucune en France).

L'éolien offshore sur fondation présente cependant différentes contraintes :

- il nécessite d'importants travaux sous-marins pour les fondations, ce qui limite le potentiel aux zones maritimes de moins de 30 à 40 m de profondeur donc assez proche des côtes, là où les conflits d'usage et les contraintes spatiales et visuelles peuvent être fortes ;
- l'érection du mat, des pales et de la génératrice doit se faire sur les fondations, avec des équipements spécifiques de transport et de levage : il n'est pas possible, contrairement aux éoliennes offshore flottantes ancrées, d'effectuer le montage à terre sur une barge puis de remorquer celle-ci sur site ;
- pour tous travaux lourds de réparation, d'entretien ou de "repowering" (remplacement d'une éolienne par un aérogénérateur de puissance supérieure), il est nécessaire d'intervenir directement sur l'éolienne sur site, opération plus contraignante que le remorquage d'une éolienne flottante sur sa barge.

Pour toutes ces raisons, dans le scénario négaWatt la puissance envisagée en éolien offshore "posé" est au niveau de celle prévue dans les deux appels d'offre lancés par le gouvernement - et avec une progressivité proche - soit 6000 MW principalement installée entre 2020 (900 MW) et 2030 (5300 MW).

La production éolienne correspondante est de 1,6 TWh en 2020 - année où les premières éoliennes offshore sont installées - et de 16,2 TWh en 2030. Elle progresse ensuite plus modérément jusqu'à 18,6 TWh en 2050.

La puissance unitaire des éoliennes croît de 5 MW (2020) à 8 MW (dès 2035) : Siemens, leader mondial de l'éolien offshore, produit d'ores et déjà des turbines offshores de 6 MW, et étudie des machines de 10 MW).

2.1.2.2. Eolien offshore "flottant" (ou "ancré")

Avec cette technologie, l'éolienne n'est plus "posée" (fondée) sur les hauts-fonds marins, mais elle s'appuie sur une barge flottante, ancrée sur les fonds jusqu'à 200 m de profondeur.

²⁷ Eurobaromètre des énergies renouvelables, 2012, http://www.energies-renouvelables.org/observer/stat_baro/observ/baro-jde12.pdf



Figure 60 : Eolienne « flottante », ou « ancrée »

Cette technologie offre un remarquable potentiel de développement :

- les parcs éoliens peuvent être installés très au large, l'éolien offshore flottant s'affranchissant des problèmes d'acceptation visuelle et limitant les conflits d'usage ;
- elle autorise de ce fait des éoliennes de plus grande hauteur, donc de plus grande puissance (jusqu'à 10 MW) ;
- les régimes de vent sont à la fois plus élevés et plus réguliers au large ;
- la technologie des barges ancrées est bien connue de l'industrie parapétrolière ;
- les contraintes sont moindres à la construction que l'offshore "posé" : pas de fondations immergées, érection et pré-montage à terre, transport de l'éolienne érigée sur barge remorquable, etc. ;
- les zones potentielles de déploiement peuvent se situer au large des agglomérations urbaines littorales et donc des points de consommation les plus importants.

Pour toutes ces raisons, l'éolien offshore "ancré" est considéré dans le scénario négaWatt comme une filière à fort potentiel au regard des solutions fixes ("plantés") ou des autres énergies marines.

L'implantation de fermes offshores sur barges sur l'arc Méditerranée (fortement consommateur et très peu producteur d'électricité) et en Atlantique pourrait se faire à partir d'équipements réalisés sur des chantiers navals, points d'appui pour la maintenance et l'entretien.

Au total, la puissance installée en éolien offshore ancré envisagée dans le scénario négaWatt ne démarre véritablement qu'en 2021, au terme d'une phase pilote. Elle progresse à 2200 MW en 2025, puis croît régulièrement jusqu'à 7500 MW en 2030, 18000 MW en 2040 et 24000 MW en 2050.

La production éolienne correspondante est de 5,5 TWh en 2025 puis s'élève à 23 TWh en 2030, 60 TWh en 2040 et 82,0 TWh en 2050, avec des aérogénérateurs de puissance unitaire augmentant comme pour l'éolien offshore "posé" de 5 MW (2020) à 8 MW (2035-2050).

Au total la puissance éolienne terrestre et en mer installée atteint 78000 MW en 2050 (48000 MW en 2030), pour une production annuelle de 209 TWh (115 TWh en 2030).

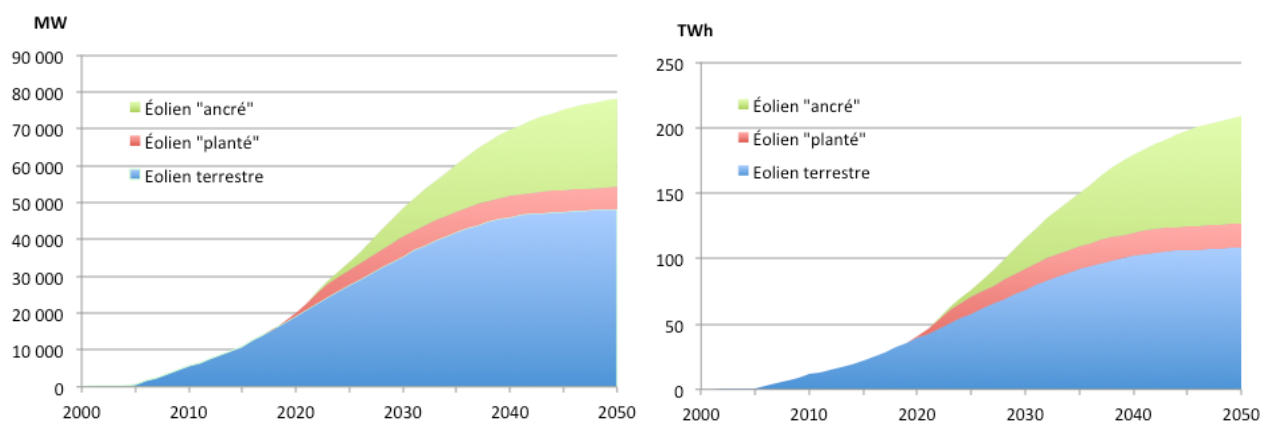


Figure 61 : Éolien : évolution de la puissance installée et de la production

2.2. Le solaire photovoltaïque

Au sein de l'Union européenne, la France figure parmi les pays bénéficiant de l'un des meilleurs gisements solaires, avec la particularité de détenir le record d'écart entre les régions les plus et les moins ensoleillées : en effet, l'irradiation annuelle varie de 1 100 kWh par m² de surface plane au sol dans le Nord-Pas-de-Calais à plus de 2 000 en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, soit un écart d'un facteur proche de 2.

Compte tenu des rendements de conversion constatés pour les solutions commercialisées aujourd'hui, ceci permet de produire, en fonction du lieu, dans des conditions optimales d'orientation (plein Sud, inclinaison de 30° par rapport à l'horizontale) et en l'absence de toute ombre portée, entre 800 et 1500 kWh d'électricité par kW de puissance installée, ce qui correspond à un champ de modules de 8 à 10 m² selon la technologie employée.

Le scénario négaWatt table sur une production solaire photovoltaïque de 90 TWh en 2050. Si l'on prend de manière prudente une productivité moyenne observée par exemple à Lyon de 1100 kWh par kW installé, les 90 TWh d'électricité photovoltaïque attendus pour 2050 nécessitent une puissance totale installée de l'ordre de 80000 MW, soit une multiplication par 25 des 3700 MW en service fin 2013. À titre indicatif l'objectif issu du Grenelle de l'environnement est de 5400 MW installés en 2020, objectif 10 fois inférieur à notre voisin allemand (35000 MW installés fin 2013 pour un objectif 2020 de 54000 MW).

Avec les performances actuelles des systèmes photovoltaïques, cette puissance de 80000 MW requiert l'installation d'une surface totale de panneaux d'environ 900 km², soit un carré de 30 km de côté : à titre de comparaison, cette surface est 20 fois inférieure aux 1,8 millions d'hectares évoqués plus haut qui sont aujourd'hui consacrés à la production d'agrocultures, et elle est du même ordre de grandeur que la surface agricole perdue chaque année en France entre 2006 et 2010 pour la création d'infrastructures et de zones d'activité.

La lente mais constante amélioration des rendements²⁸ que l'on peut raisonnablement attendre dans les années et les décennies à venir est susceptible d'alimenter une réduction tendancielle de cette surface, mais les effets palpables de cette amélioration tarderont à se faire sentir du fait de l'allongement de la

²⁸ On parle ici du rendement de conversion de la lumière solaire en électricité par un système complet (environ 18 % actuellement), mais, à la différence des systèmes thermodynamiques, les 82 % de « pertes » n'ont aucune incidence négative sur l'environnement puisqu'il s'agit de lumière.

durée de vie des panneaux : actuellement supérieure à 30 ans, elle devrait atteindre voire dépasser 40 ans dans les prochaines décennies²⁹.

On conservera donc comme référence le chiffre de 900 km² (ou 90 000 ha), qui représentent 0,16 % des 552 000 km² de la superficie du territoire métropolitain : au-delà de la surabondance de la ressource primaire, on voit donc que le photovoltaïque ne pose *a priori* aucun problème d'occupation de l'espace, d'autant plus que l'on peut s'attendre à ce que la production soit majoritairement issue d'installations sur bâtiments et non au sol (voir plus loin).

Les 80000 MW de puissance installée totale du parc photovoltaïque sont atteints progressivement par l'installation de 2000 MW en moyenne chaque année à partir de 2014, à mettre en regard des 1500 MW de puissance nouvellement installée enregistrés en 2011, l'année historiquement de plus forte activité de l'industrie photovoltaïque en France.

Cette moyenne sur plusieurs décennies masque en fait trois périodes successives contrastées : la première qui court jusqu'en 2020 est celle d'une montée en puissance relativement rapide de la filière passant de 1600 MW par an en 2014 à 2900 MW en 2020 ; la seconde, entre 2020 et 2025, est marquée par la stabilité du marché annuel autour de ce chiffre de 2900 MW par an ; la troisième, qui s'étale sur les 25 années suivantes, voit une lente érosion de la puissance installée annuellement qui passe de 2900 MW en 2025 à 500 MW en 2050.

Le marché annuel en fin de période reste toutefois nettement supérieur à ce dernier chiffre puisqu'il faut ajouter le marché de renouvellement des systèmes qui commence à apparaître entre 2030 et 2035 et augmente logiquement dans des proportions similaires à celles qu'a connu le marché des nouvelles installations 20 ou 25 ans plus tôt.

Au total, le rythme de développement du parc photovoltaïque apparaît tout à fait raisonnable d'un point de vue industriel et opérationnel puisque les volumes installés annuellement restent dans tous les cas inférieurs à ceux observés récemment dans des pays comparables comme l'Allemagne (7000 MW par an en 2011 et 2012, 3300 MW en 2013) ou l'Italie (9500 MW en 2011, 3400 MW en 2012 et 3100 MW en 2013).

Si le scénario négaWatt envisage de manière relativement précise la montée en puissance de la filière photovoltaïque au service de la transition énergétique, c'est dans une approche qui reste assez globale en se contentant d'évoquer une répartition indicative entre les deux principaux modes d'implantation que sont d'une part les systèmes liés à des bâtiments (2/3 de l'énergie produite), qu'ils soient posés en intégration ou en surimposition, d'autre part ceux qui sont installés au sol ou sur structure porteuse comme les ombrières de parking (1/3 de l'énergie produite).

Il ne donne en revanche pas d'indication sur la structure du parc en termes de localisation, de répartition sectorielle, de type d'implantation et de gamme de puissances, considérant que cette structure sera déterminée par un grand nombre d'éléments de natures très différentes dont la modélisation, outre qu'elle serait difficile à réaliser et toujours sujette à caution, n'apporterait pas d'arguments supplémentaires à la crédibilité de la méthode et de ses résultats.

Cette indication, largement suffisante en première approche, n'interdit pas d'aller plus loin dans l'analyse des principaux déterminants d'une répartition qui se voudrait optimale d'un point de vue technico-économique, en vue par exemple d'apporter des éléments pertinents de décision pour l'élaboration des politiques publiques.

²⁹ Il s'agit de la durée sur laquelle les fabricants garantissent une baisse du rendement initial inférieure à une certaine limite, aujourd'hui typiquement -10 % sur 30 ans, à ne pas confondre avec la durée de vie « commerciale » des systèmes qui correspond à celle des contrats d'achat, généralement de 20 ans.

Il est largement admis que le photovoltaïque a vocation à être installé prioritairement au plus près des points de consommation, y compris dans les zones urbaines et jusque dans le centre des villes où vivent et travaillent plus de 80 % de la population.

Cette option qui répond à des motivations de rationalité énergétique (réduction des pertes de transport et de distribution) et économique (optimisation des investissements et du fonctionnement des réseaux) est rendue possible par les caractéristiques intrinsèques de la technologie comme l'absence totale de nuisances de fonctionnement (pas de bruit, pas de rejets ni d'effluents, pas de pièces en mouvement) et une fiabilité réduisant les besoins de maintenance à leur plus simple expression.

Dans cette optique, on pense bien entendu d'abord à la pose en toiture ou en façade des bâtiments neufs ou existants de façon à fournir tout ou partie de l'électricité qui est consommée à l'intérieur par les appareils en fonctionnement, et contribuer ainsi à la réalisation des « bâtiments à énergie positive » (BEPOS) qui devraient devenir la norme à partir de 2020 dans le cadre de l'évolution de la réglementation thermique des bâtiments (RT 2012).

La poursuite de ce raisonnement de bon sens conduit à la logique « d'autoconsommation » qui est de plus en plus souvent mise en avant par les décideurs qui craignent une augmentation incontrôlée du poids de la fameuse « CSPE » (Contribution au Service Public de l'Electricité) sur la facture des ménages ou par certains acteurs qui pensent ainsi réduire les besoins d'investissement dans les réseaux publics d'électricité, mais cette approche séduisante en apparence est rapidement confrontée à de sérieuses limites.

La première est celle de la corrélation entre la consommation électrique d'un bâtiment et son « potentiel photovoltaïque », qui peut certes être avérée dans certains cas, mais n'a rien de systématique ni de spontané : la surface totale bâtie *stricto sensu* étant, d'après le recensement de 2010, de l'ordre de 8 500 km², il suffirait théoriquement de recouvrir un peu plus de 10 % des toitures existantes pour fournir la totalité de la production photovoltaïque attendue, mais on comprend bien qu'appliquer ce ratio à chaque bâtiment individuellement n'a aucun sens.

Si la consommation annuelle moyenne d'électricité spécifique d'un ménage français peut effectivement être couverte par 25 à 50 m² de panneaux installés sur le toit de sa maison individuelle, cette image qui vient rapidement à l'esprit n'est pas sans soulever quelques questions, à commencer par la difficulté de faire de même en habitat collectif puisque la surface ensoleillée disponible par logement peut rapidement s'avérer insuffisante.

Ainsi, des études techniques menées dans le cadre de projets d'éco-quartiers en région parisienne ont montré que, même dans le cas de bâtiments très performants avec des conditions optimales d'ensoleillement, il devient très difficile, du fait d'un ratio insuffisant entre surface construite et surface exposée au soleil, de fournir l'équivalent de la consommation annuelle d'électricité dans des immeubles de logements ou de bureaux de plus de 4 à 5 étages, sans compter les contraintes multiples (autres usages, ombrages, classement, ...) qui réduisent fortement les surfaces effectivement adaptées.

De fait, la disponibilité de surfaces correctement ensoleillées constitue le principal facteur limitant au développement du photovoltaïque en milieu urbain dense, là où se concentrent pourtant les consommations les plus importantes : même une valorisation optimale des toitures et des façades de tous les bâtiments en termes de production d'énergie ne pourra suffire à atteindre des taux significatifs de couverture de la consommation par une production photovoltaïque.

Nous avons la chance de pouvoir profiter de la densité d'un réseau électrique développé pour faire face aux besoins de consommation, et qui peut donc très facilement accueillir de la production locale en quantité. Dans ce contexte, il serait intéressant de chercher à exploiter les nombreux autres types de surfaces déjà artificialisées qui peuvent recevoir une couverture photovoltaïque, tels que les tranchées routières ou ferroviaires, les aires de stationnement et les parkings, les abords d'infrastructures, les quais de gare et certains espaces publics, etc.

En milieu rural à l'inverse, où les bâtiments agricoles offrent souvent de grandes surfaces de toitures propices à l'installation de systèmes photovoltaïques, c'est la capacité du réseau de distribution à évacuer une production qui pourra difficilement être consommée sur place qui constitue le principal facteur limitant, le coût de son renforcement pouvant rapidement devenir prohibitif.

Dans ce cas, il sera parfois préférable d'envisager le regroupement en un seul point sous la forme de « centrales villageoises » sur des équipements publics, voire de parcs au sol de puissance moyenne, des systèmes photovoltaïques qui seraient autrement raccordés sur des extrémités de réseau.

Quant aux zones pavillonnaires et commerciales péri-urbaines qui se sont développées parfois à outrance, elles se situent du point de vue du potentiel photovoltaïque entre ces deux extrêmes : on y trouve à la fois des surfaces disponibles importantes sur les toits des maisons individuelles, des bâtiments commerciaux ou des entrepôts logistiques, et une densité de réseau suffisante pour accueillir des puissances photovoltaïques significatives, moyennant si nécessaire l'adaptation des conditions d'exploitation notamment en été, lorsque la production est maximale et la consommation minimale, de façon à éviter les surtensions potentiellement dommageables pour les appareils en fonctionnement. Cela passe, par exemple, par l'écrêtement tournant de puissance injectée qui permet d'augmenter sensiblement la puissance totale raccordable sur un même transformateur en répartissant de manière équitable les pertes entre les producteurs raccordés.

Dernier domaine d'application du photovoltaïque raccordé au réseau, les parcs au sol de moyenne ou grande puissance (de quelques centaines de kW à plusieurs dizaines de MW) auront aussi leur rôle à jouer dans l'éventail des types d'installation dans une optique plus industrielle, proche de celle de l'éolien terrestre, à la condition impérative qu'ils ne contribuent pas à leur tour à l'artificialisation des terres agricoles ou des espaces naturels.

Cette contrainte ne pose aucun problème autre que la mise en place d'une réglementation adaptée, puisque, dans l'hypothèse où les parcs au sol fourniraient effectivement le tiers de la production photovoltaïque prévue par le scénario négaWatt en 2050, soit 30 TWh par an, ils occuperaient moins de 2 % des 4 à 5 millions d'hectares de terrains déjà artificialisés, avec une préférence pour la typologie des « zones appropriées » exemptes de conflit d'usage établie dès 2008 par le ministère de l'Écologie (figure ci-dessous) dans le cadre d'un arbitrage qui ne peut qu'être confié aux acteurs locaux, notamment les collectivités locales dans la perspectives de leurs propres stratégies et politiques énergétiques.

Zones présentant un faible potentiel de conflit (zones appropriées)
<ul style="list-style-type: none"> • Terrains vagues à proximité d'habitations (friches) • Surfaces artificialisées (ex. zones de parking – ajout d'un nouvel usage) • Zones industrielles • Sites présentant une pollution antérieure et ayant accueilli de grandes installations techniques (ex. friches industrielles) • Zones tampons le long de grandes artères, installations antibruit • Zones de stockage de déchets, terroirs • Surfaces à haut niveau d'imperméabilisation sans fonctions écologiques ou esthétiques particulières • Autres surfaces en friches utilisées autrefois pour la construction • Zones de déprise, milieux fermés

Figure 62 : Liste des zones présentant un faible potentiel de conflit d'usage pour l'installation de parcs photovoltaïques au sol

(Extrait du « Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol – l'exemple allemand » - ministère de l'Écologie, janvier 2009)

On voit donc au final que l'intégration du photovoltaïque dans l'environnement urbain comme rural ne pose pas de problèmes rédhibitoires dès lors que les interactions avec les autres usages et les diverses contraintes liées à l'urbanisme sont identifiées et prises en compte et qu'un certain nombre de règles sont clairement établies à cet effet.

Une démarche similaire devra être suivie pour ce qui est de l'intégration au réseau électrique de la production photovoltaïque, qui est l'autre grand enjeu de la filière, mais les rapides progrès déjà enregistrés en matière de ce qu'il est convenu d'appeler les « réseaux intelligents » (ou Smart Grids) ne peuvent que rendre très optimiste d'abord sur la capacité d'accueil des infrastructures déjà existantes notamment au niveau de la distribution (moyenne et basse tension), d'autre part sur le coût des éventuels besoins d'adaptation qui resteront probablement marginaux au moins sur le moyen terme.

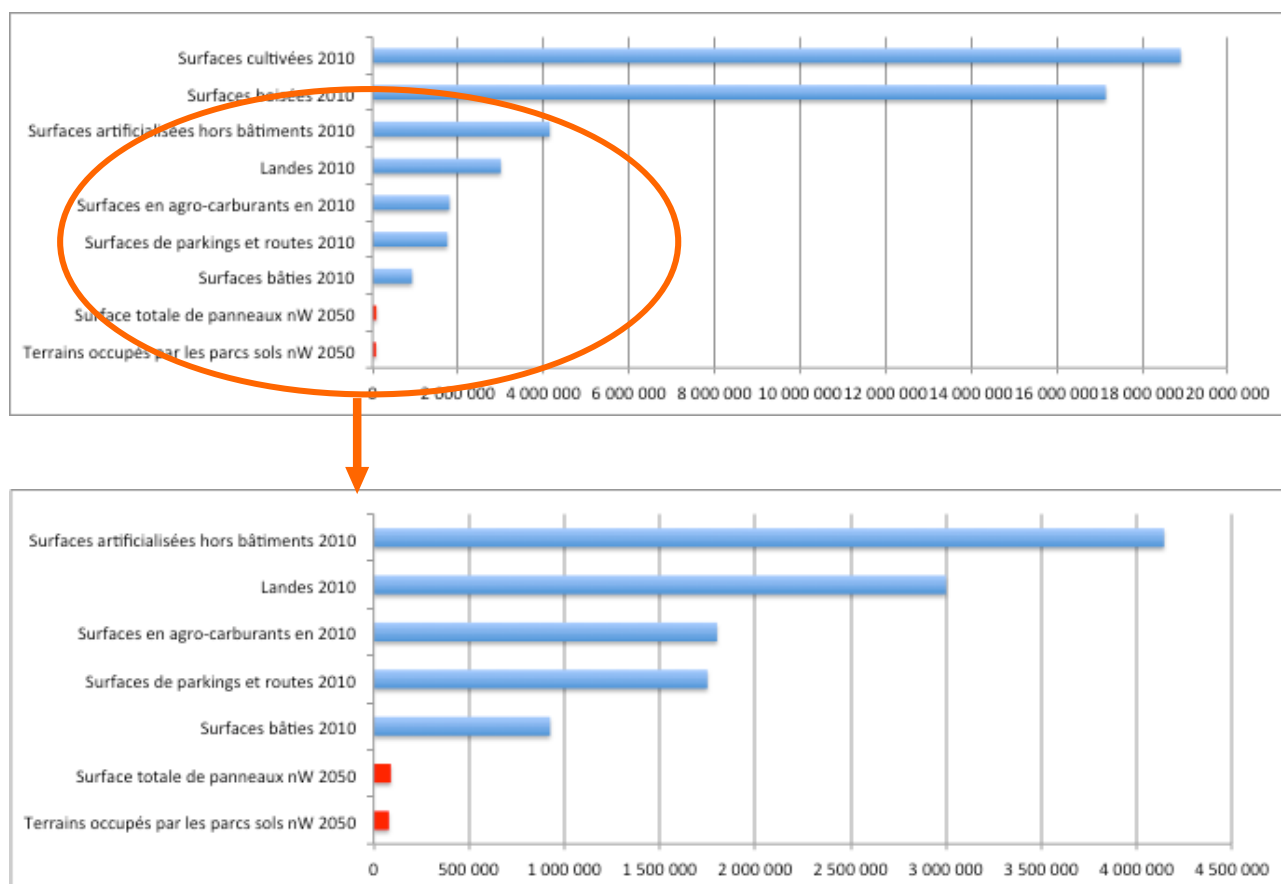


Figure 63 : Surfaces artificialisées en 2010 et surfaces occupées par le photovoltaïque en 2050, en hectares

Dans le scénario négaWatt, l'évolution envisagée du parc photovoltaïque est donc la suivante :

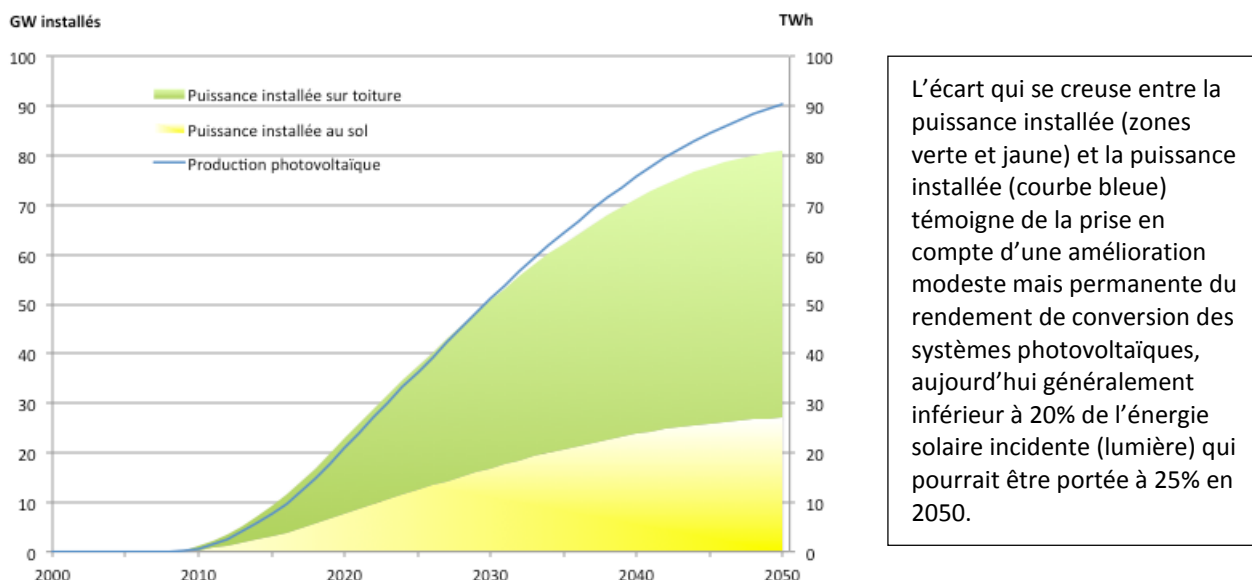


Figure 64 : Photovoltaïque : évolution de la puissance installée et de la production

2.3. La production hydraulique

L'hydro-électricité est aujourd'hui la source d'électricité renouvelable la plus développée en France. Logiquement, c'est également celle qui subit le moins d'évolutions dans le scénario négaWatt.

Aucune modification de la puissance installée n'est envisagée pour les grands ouvrages actuels : les ouvrages au fil de l'eau, éclusés ou de lac sont conservés, sous réserve de la réalisation d'aménagements permettant de diminuer l'impact environnemental de certains ouvrages. Si, dans de très rares cas, l'effacement d'ouvrages représente la seule solution acceptable, une baisse de la puissance hydraulique installée pourra être envisagée. Par ailleurs, aucun nouveau grand ouvrage n'est prévu dans le scénario négaWatt.

La petite hydraulique présente de son côté un potentiel de développement non négligeable. Sa puissance installée évolue de 200 MW en 2010 à 3500 MW en 2050.

Enfin, la puissance installée des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) reste inchangée mais leur taux d'utilisation est augmenté.

Ces évolutions entraînent une augmentation de la production d'électricité d'origine hydraulique : d'une valeur actuelle comprise entre 60 et 70 TWh (en fonction des conditions météorologiques notamment), elle atteint 77 TWh en 2050.

2.4. Les énergies marines

Dans le scénario négaWatt, les énergies marines regroupent les technologies utilisant l'énergie des vagues (houlomotrice), des courants marins (énergie hydrolienne), et celle des marées (énergie marémotrice).

Il ne comprend donc pas l'éolien offshore ("posé" et "flottant") et l'énergie issue de la biomasse marine (méthanisation des algues) qui sont comptabilisés séparément. Pour rappel, le périmètre d'analyse du scénario ne concerne pas la production ultra-marine, où l'énergie thermique des mers (ETM), la climatisation par eau de mer (SWAC) et l'énergie osmotique (potentiel physico-chimique produit par la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce) peuvent trouver des applications spécifiques.

Les ressources sont potentiellement considérables : la France métropolitaine (Corse incluse) dispose d'une longueur de côtes de 5 800 km³⁰, avec des gisements localisés mais intéressants. Il n'existe pas de projection détaillée à moyen ou long terme, mais un récent rapport d'une mission d'étude sur les énergies marines renouvelables fournit quelques indications³¹ :

- la France détient après l'Angleterre l'essentiel du potentiel hydrolien en Europe. Le potentiel français serait compris entre 2000 et 3000 MW, voire 5000 à 6000 MW (soit 13 à 23 TWh/an) si l'on va jusqu'aux îles Anglo-Normandes. Le stade commercial devrait être atteignable en 2020 ;
- l'énergie des vagues et de la houle présente en France un potentiel théorique bien plus important, de l'ordre de 400 TWh. EDF estime que le potentiel qui serait exploitable en l'état actuel de la technique est en fait de l'ordre de 40 TWh³². Il est principalement situé sur la façade atlantique où les vagues sont en moyenne plus importantes.

Le GICAN (Groupement des Industriels des Constructions et Activités Navales) considère pour sa part³³ que 3500 MW d'hydrolien pourraient être installés, et 2000 MW en énergie des vagues et énergie thermique des mers.

Cependant ces technologies, prometteuses, restent encore assez peu matures :

- il reste à résoudre de nombreux problèmes techniques et de corrosion ;
- les coûts d'équipements et d'exploitation sont encore assez incertains ;
- les impacts environnementaux éventuels restent à mieux identifier.

En conséquence, la projection envisagée dans le scénario négaWatt reste très prudente :

- aucune autre usine marémotrice n'est construite, celle de la Rance poursuivant son exploitation (puissance inchangée de 250 MW) ;
- pour les autres énergies marines houlomotrice et hydrolienne, la puissance équipée s'élèverait à 240 MW en 2030, puis à 670 MW en 2040 et 1390 MW en 2050.

La production correspondante, aujourd'hui de 0,5 TWh (La Rance) s'accroîtrait ainsi à 0,7 TWh en 2020³⁴ et 1,7 TWh en 2030 pour décoller progressivement et atteindre 6,5 TWh en 2050.

³⁰ <http://www.shom.fr/les-activites/projets/delimitations-maritimes/espaces-francais/>

³¹ *Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelable* - CGDD-CGEIET, mars 2013

³² *op. cit.* - page 26

³³ <http://www.actu-environnement.com/ae/news/emr-hydroliennes-eoliennes-flottantes-gican-emplois-2030-17574.php4>

³⁴ À titre indicatif, le plan d'action pour les énergies renouvelables de la France fixe l'objectif de 0,91 TWh produits en 2020.

3. Production d'énergie : autres énergies renouvelables

3.1. Le solaire thermique

Comme évoqué dans le paragraphe consacré au solaire photovoltaïque, la France bénéficie d'un fort gisement solaire aujourd'hui largement sous-exploité. Le potentiel de développement du solaire thermique reste donc très important, et peut être décliné en quatre cibles prises en compte dans le scénario négaWatt :

- CESI : Chauffe-Eau Solaire Individuel dans l'habitat individuel ;
- SSC : Système Solaire Combiné (en maison individuelle) dans l'habitat, permettant de produire de la chaleur pour le chauffage de la maison en plus de l'eau chaude sanitaire. Les SSC sont essentiellement installés dans des maisons existantes, mais après réhabilitation thermique permettant une forte réduction des besoins de chauffage qui amènent les consommations à environ 50 kWh/m². Dans le neuf, les maisons individuelles atteignant un niveau passif n'ont quasiment pas besoin de système de chauffage, et un SSC ne se justifie plus ;
- CESC : Chauffe-Eau Solaire Collectif dans l'habitat et dans le tertiaire ;
- CIND : production de Chaleur basse ou moyenne température pour l'INDustrie.

Les solaires combinés en logement collectif ne sont pas pris en compte dans ce scénario car leur potentiel de développement est considéré comme marginal, ou pour le moins lié à beaucoup d'inconnues. Si, comme cela commence à être le cas dans les pays germaniques, les réalisations de SSC en collectif ou sur réseaux de chaleur se diffusent, les économies engendrées par ce développement se rajouteront au potentiel estimé ci-dessous.

Dans le scénario négaWatt, le potentiel est estimé de la manière suivante :

- Calcul des surfaces de toitures disponibles pour les logements individuels et les logements collectifs : pour cela on part des surfaces habitables des maisons individuelles et des logements (projection 2050, compte tenu des hypothèses décrites au paragraphe 1.1.2), sur lesquelles on applique successivement :
 - un facteur d'étage pour tenir compte du fait que le ratio surface de toiture sur surface habitable est d'autant plus faible que le nombre d'étages est élevé. On retient une valeur de 0,67 pour les maisons individuelles et de 0,38 pour les immeubles collectifs. Cette dernière valeur est calculée en tenant compte de la distribution des logements collectifs en fonction du nombre d'étages (données INSEE) ;
 - un coefficient de toiture de 40 % pour tenir compte à la fois des parties de toiture mal orientées et de celles rendues indisponibles par différents équipements (cheminées, fenêtres de toit, cages d'ascenseur, matériel de ventilation, installations photovoltaïques, etc...)

Ce calcul permet de vérifier que les hypothèses de taux d'équipement et de surfaces unitaires faites ci-dessous conduisent à des taux d'occupation des toitures disponibles acceptables. On arrive ainsi en 2050 à moins de 10 % des surfaces disponibles utilisées en maison individuelle (7% pour le logement collectif et 6% pour le tertiaire).

- Estimation des surfaces unitaires par équipement :
 - pour les CESI : baisse progressive de 4,5 m² (2010) à 2 m² (2050) par maison équipée. Cette baisse est pour une partie liée à l'amélioration de l'efficacité des systèmes, pour une autre

à la suppression des surdimensionnements observés actuellement, et enfin et surtout à une baisse des consommations d'eau chaude sanitaire par plus de sobriété ;

- pour les SSC : 10 m² par maison équipée, soit une surface qui reste stable entre 2010 et 2050. L'essentiel des réductions s'est opéré avant, entre les années 2000 et 2010 puisque la surface moyenne des capteurs solaires est passée de 13,3 à 10,4 m². Les raisons de cette réduction des surfaces sont analogues à celles évoquées plus haut pour le CESI : amélioration de l'efficacité et réduction des besoins de chauffage apportée par une réhabilitation thermique des maisons ;
 - pour les CESC en collectif : 1,5 m² par logement. Contrairement aux CESI, la surface moyenne a été maintenue entre 2010 et 2050 : ceci permet qu'une partie de plus en plus significative des pertes de distribution, importantes en collectif du fait de la nécessité du maintien en température des réseaux bouclés, soit également couverte par des apports solaires, au fur et à mesure de la baisse de la demande en eau chaude.
- Estimation d'un taux d'équipement par cible en 2050 :
 - pour les CESI : 48 % des maisons équipées ;
 - pour les SSC : 24 % des maisons équipées ;
 - pour les CESC en collectif : 44 % des logements équipés.

Pour les CESC en tertiaire, on considère que 5 % des surfaces de toitures disponibles sont équipées. Pour l'industrie, les cibles potentielles sont les besoins de chaleur basse température et moyenne température.

A partir de plusieurs simulations calées sur les besoins de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire en 2050 conformes aux objectifs de sobriété explicités dans les paragraphes précédents, une estimation de la moyenne nationale des productivités en kWh utiles par cible (correspondant à une réduction des besoins) est réalisée :

- pour les CESI : 267 kWh/m² de capteur solaire ;
- pour les SSC : 281 kWh/m² de capteur solaire ;
- pour les CESC en logement : 300 kWh/m² de capteur solaire ;
- pour les CESC en tertiaire : 300 kWh/m² de capteur solaire.

Aucune distinction géographique quant aux zones de diffusion prioritaires des différents systèmes n'a été introduite : en effet, si l'irradiation varie environ d'un facteur 1 à 1,7 du Nord au Sud de la France, la productivité ne varie que d'un facteur 1 à 1,2, toutes choses égales par ailleurs, parce que les besoins de chaleur pour le chauffage ou la production d'eau chaude sont plus élevés au Nord qu'au Sud.

Enfin, les rendements des systèmes d'appoint sont ensuite appliqués pour permettre d'obtenir les économies correspondantes en énergie finale.

Pour l'industrie, le potentiel de développement du solaire thermique est obtenu à partir de la répartition des besoins de chaleur dans l'industrie entre les besoins dits « basse température » (< 100°C), « moyenne température » (entre 100 et 500°C) et « haute température » (> 500°C). Même si certaines technologies (paraboles notamment) permettent d'obtenir des températures très élevées, supérieures à 1000 ou 2000°C, le développement à grande échelle du solaire thermique sur les usages haute température n'a pas été envisagé dans le scénario négaWatt. Les moyennes températures peuvent être atteintes facilement par des capteurs à concentration linéaire, développés d'ores et déjà à l'échelle industrielle, notamment pour la production d'électricité par voie thermodynamique. Quant aux basses températures, elles font appel aux mêmes types de capteurs solaires plans sélectifs que ceux utilisés dans le résidentiel ou le tertiaire.

Les apports solaires sont calculés directement à partir des productivités en énergie finale, et intègrent donc les rendements des systèmes d'appoint. Les valeurs suivantes sont retenues :

- pour les usages basse température dans l'industrie : 600 kWh/m² de capteur solaire ;
- pour les usages moyenne température dans l'industrie : 500 kWh/m² de capteur solaire.

Les graphiques suivants présentent l'évolution des surfaces de solaire thermique installées par type de bâtiment :

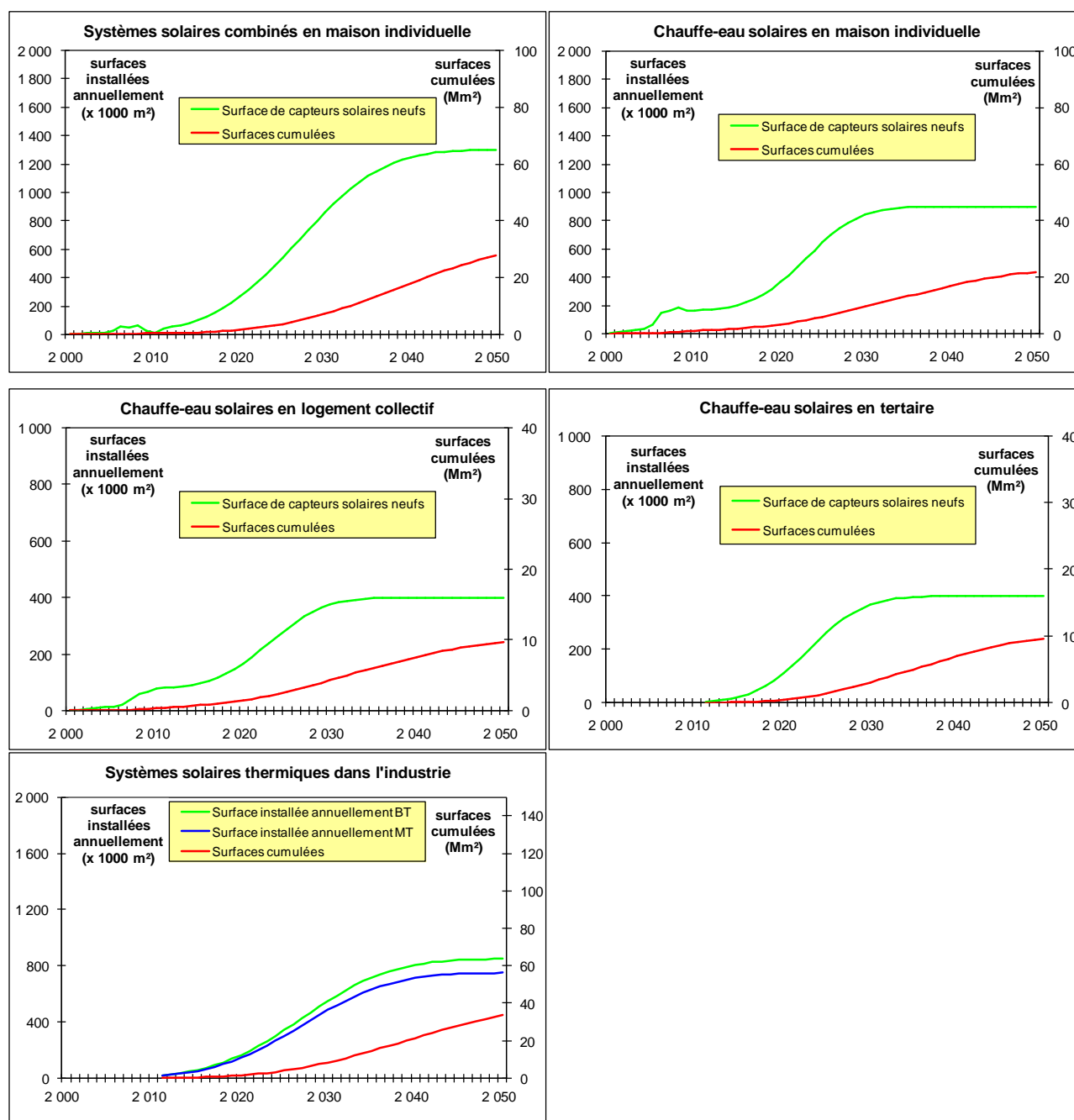


Figure 65 : Évolution des surfaces de capteurs solaires thermiques installés pour les différents usages envisagés.

Finalement en 2050, on obtient les résultats suivants :

- surface de capteurs solaires thermiques installés : 102 millions de m², soit 9,5 % des surfaces disponibles en maison individuelle et 6,5 % en logement collectif (le potentiel de toiture utilisable est loin d'être atteint). Cela représente environ 1,4 m²/habitant ;
- contribution en énergie finale : 39 TWh (soit presque 5 % de l'énergie finale totale) :
 - environ 38 % de l'ECS pour les maisons individuelles et 37 % pour les logements collectifs ;
 - 7 % du chauffage des maisons individuelles ;
 - 27 % de l'ECS du tertiaire ;
 - 14 % des besoins thermiques de l'industrie.

3.2. La géothermie

Dans le scénario négaWatt, ce terme correspond aux techniques d'exploitation énergétique des roches chaudes à environ 200°C, pour la production d'électricité le plus souvent cogénérée (électricité + chaleur). Les productions correspondantes n'incluent donc pas la géothermie de surface (basse énergie) ou bien de profondeur sur des nappes phréatiques à basse ou moyenne température³⁵, ni bien sûr le potentiel dans les DOM-COM puisque ceux-ci ne sont pas dans le périmètre d'analyse du scénario.

La géothermie à haute énergie consiste à réaliser de forages pour atteindre ces roches chaudes profondes, avec un puits d'exhaure et un (ou plusieurs) puits de rejet, le fluide soutiré circulant ainsi en boucle fermée. En surface, le fluide soutiré passe dans un échangeur qui transfère sa chaleur vers un autre fluide permettant de faire fonctionner une turbine.

La ressource existe surtout :

- dans le Massif central ;
- dans le Bassin rhénan où un fossé d'effondrement s'est rempli de dépôts du tertiaire et du quaternaire et présente le gradient géothermal le plus élevé de France métropolitaine, jusqu'à + 10°C par 100 m. Une unité-pilote a été réalisée à Soultz-sous-Forêts en Alsace. Elle puise de la chaleur jusqu'à 200°C entre 4 500 et 5 000 mètres de profondeur.

Cette technologie présente certaines difficultés : risques de pertes de l'eau injectée, et problèmes de corrosion dus à la saumure sur les échangeurs. Il convient avant tout de s'assurer que l'exploitation ne provoque pas d'incidence sur les éventuelles ressources thermales en surface.

Cependant, la géothermie à haute énergie dispose d'une caractéristique particulièrement précieuse pour un mix de production électrique visant 100 % de renouvelables : elle est adaptée à la production en base, de l'ordre de 7000 à 7500 h/an, soit 80 à 86 % de disponibilité.

De plus, grâce aux progrès réalisés sur les performances des échangeurs et les cycles thermodynamiques, il est désormais envisageable de produire de l'électricité en cogénération à une profondeur moindre que le pilote de Soultz-sous-Forêts, ce qui permettrait de répondre à des besoins de chaleur locaux. Selon le Bureau de recherches Géologiques et Minières (BRGM) de telles applications pourraient être envisagées d'ici 5 à 10 ans.

³⁵ La géothermie basse ou moyenne température, verticale ou horizontale, n'est pas explicitement indiquée dans les résultats du scénario négaWatt. Seules les consommations d'électricité des systèmes correspondants sont intégrées aux bilans, à partir des Coefficients de Performance pris en compte dans le scénario.

En tenant compte de ces contraintes et de ces perspectives, la production par cogénération électricité et chaleur haute température de la géothermie à haute énergie a été évaluée dans le scénario négaWatt de façon prudente, avec un déploiement surtout à moyen terme (2024-2037).

Pour un taux d'utilisation moyen de 7000 h à puissance nominale et pour un rendement de conversion de 30 %, la puissance électrique installée s'élève à 420 MW en 2030, pour atteindre un plafond à 820 MW en 2037, les sites les plus intéressants étant alors équipés. La chaleur cogénérée fait l'objet d'une récupération partielle, évoluant en fonction de la demande sur les réseaux de chaleur entre 5 et 10 TWh.

La production électrique correspondante est de 0,4 TWh en 2020 et 2,9 TWh en 2030. Elle croît à 5,7 TWh en 2037 pour rester ensuite à ce niveau de production.

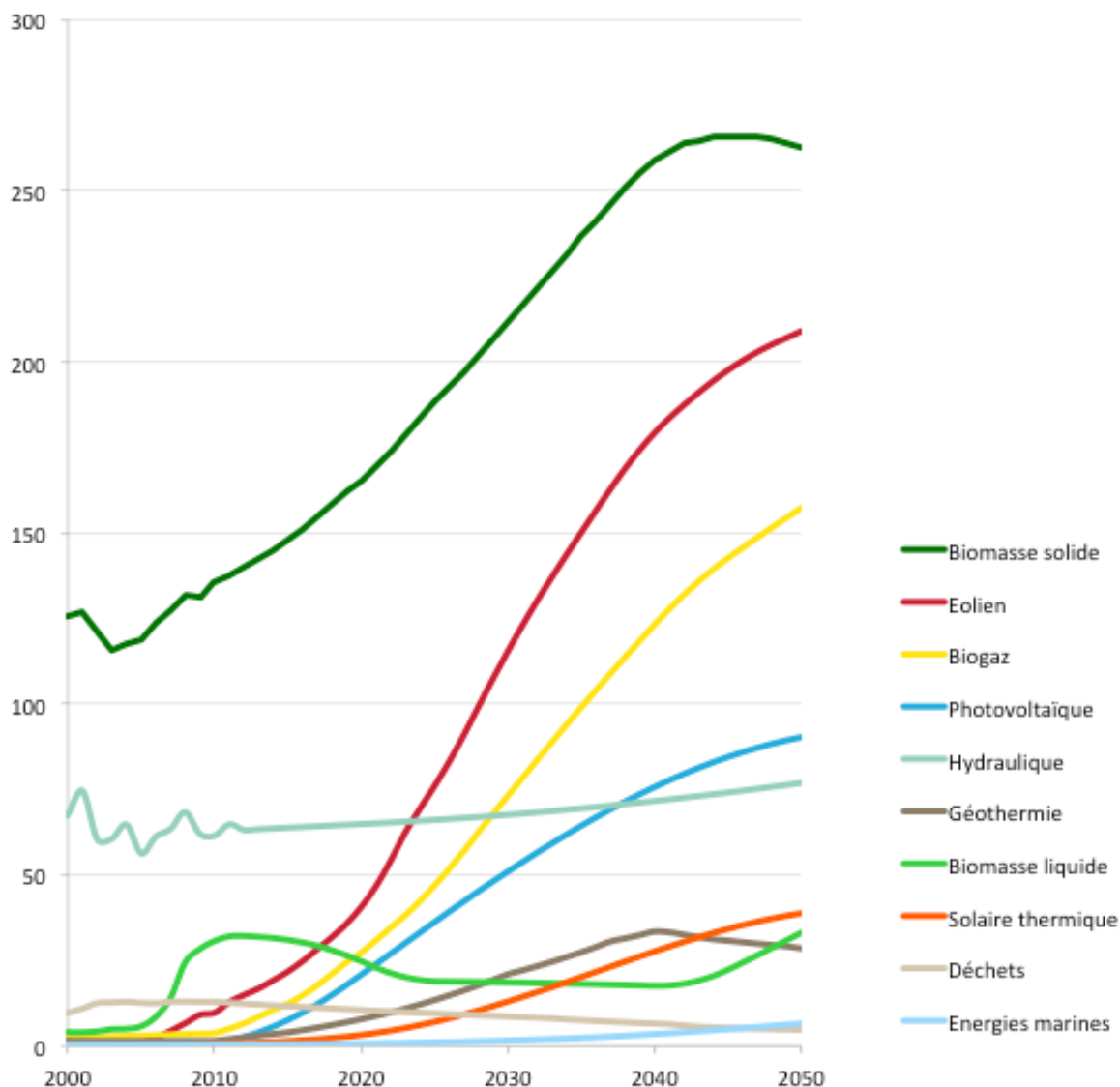


Figure 66 : Développement des différentes filières renouvelables dans le scénario négaWatt (en TWh)

Au final, un développement réaliste des énergies renouvelables conduit, en 2050, à une ressource disponible sur le territoire de plus de 900 TWh sur un total de 1 010 TWh de besoins en énergie primaire. Ainsi, la société française du scénario négaWatt, avec 90 % d'énergies renouvelables, a réussi en 2050 sa transition énergétique.

4. Production d'énergie : les énergies fissiles et fossiles

4.1. Le nucléaire

L'effacement progressif de la production d'électricité nucléaire au fur et à mesure de la montée en puissance des renouvelables permet d'envisager à terme un abandon complet de cette énergie qui représente en 2010 plus de 75 % de la production d'électricité française. Le scénario négaWatt applique dans cette perspective une logique très pragmatique : il s'agit, dès que le développement des alternatives par une combinaison sobriété-efficacité-renouvelables le permet, de fermer les réacteurs sans les remplacer, selon un rythme prenant en compte à la fois les enjeux de sûreté et l'évolution des besoins énergétiques.

La démarche consiste donc d'abord à considérer le besoin d'électricité correspondant aux différents usages, puis la part qui peut au fil des ans être couverte par les énergies renouvelables. La différence, qui est chiffrée en besoin annuel de production (en TWh) en tenant compte heure par heure de l'exigence d'équilibre entre l'offre et la demande, indique le niveau de production non renouvelable qu'il est nécessaire de maintenir.

En croisant ce besoin avec l'état de vieillissement des réacteurs nucléaires, qui influence fortement le niveau de sûreté du parc, on peut déterminer le rythme de fermeture des réacteurs. Le cas échéant, les énergies fossiles, notamment le gaz naturel, assurent le complément de manière transitoire en attendant que les « alternatives négaWatt » soient disponibles.

Le vieillissement du parc est un problème délicat. Un certain nombre des réacteurs ont d'ores et déjà atteint voire dépassé une durée d'exploitation de 30 ans, qui avait été jugée comme un horizon maximal raisonnable lors de leur conception. L'industrie nucléaire veut se fixer désormais un objectif de 40 ans sur lequel on ne dispose d'aucun retour d'expérience. Dans le contexte de réévaluation de la sûreté suite à l'accident de Fukushima, cette limite constitue en tout état de cause un maximum absolu : aucun renforcement des dispositifs de sûreté ne pourra en effet remettre à niveau la conception initiale de ces réacteurs ni compenser l'usure de composants impossibles à remplacer.

Il faut compter avec l'effet de « falaise » de la pyramide des âges du parc : 80 % des réacteurs, représentant plus de 60 % de la production électrique actuelle, ont été mis en service entre 1977 et 1987 (et tous les autres dans la décennie suivante, à l'exception du dernier fin 1999). Il est donc nécessaire de prévoir, à l'image de la règle introduite dès 2000 dans l'accord d'abandon du nucléaire en Allemagne, une certaine flexibilité sur l'âge de fermeture des réacteurs autour d'une moyenne visée, en fonction de différents critères liés à la sûreté.

Une modélisation du rythme de sortie réacteur par réacteur permet de trouver un optimum entre ces différentes contraintes. La fermeture du parc comprend trois phases.

Dans la première, la surcapacité du parc actuel et les réserves d'exportation permettent de fermer rapidement les réacteurs les moins sûrs, en commençant par les plus anciens. On ferme ainsi jusqu'à 3 500 MW de capacité par an.

Le rythme de fermeture se stabilise ensuite à un niveau plus modéré de 2 500 MW par an environ. Ce rythme régulier est essentiel pour permettre aux renouvelables de prendre le relais.

Enfin, le rythme s'accélère à nouveau dans les dernières années, où l'on ferme jusqu'à 4 000 MW par an : il s'agit, même si cela peut toucher les réacteurs les plus récents avant leurs 40 ans, de gérer la fin du repli industriel.

La sortie du nucléaire ne concerne en effet pas que les réacteurs : ceux-ci ont besoin pour fonctionner d'usines (pour la préparation et la fabrication du combustible, pour la prise en charge des déchets, etc.), mais aussi de structures d'évaluation et de contrôle. Cela n'a pas de sens, du point de vue industriel et

économique comme de celui de la sûreté, de prolonger ou de renouveler ces moyens pour le fonctionnement de quelques réacteurs pendant quelques années seulement.

Ainsi, le dernier réacteur du parc est fermé en 2033, ce qui correspond à un abandon de la production nucléaire en 22 ans. Ce rythme calculé au plus juste sans être volontariste est le fruit d'un optimum étroit entre les différentes contraintes. Il s'agit d'un côté, de fermer les réacteurs à un rythme suffisant pour respecter les enjeux de sûreté : la fermeture de chaque réacteur doit intervenir entre sa trentième et sa quarantième année de fonctionnement. De l'autre côté, il faut faire en sorte que la production nucléaire reste aussi proche que possible du besoin de compléter la production des renouvelables, afin de minimiser le recours au gaz fossile pour assurer la transition et d'éviter un pic non maîtrisé de l'usage de ce dernier.

La mise en regard de ces objectifs avec la nécessaire cohérence industrielle conduit à un croisement des contraintes au cours des prochaines décennies : dans la première partie de la période, c'est le rythme de développement des efforts sur la consommation et sur les renouvelables qui est dimensionnant ; à l'inverse, vers la fin de la période, c'est le vieillissement du parc qui constitue la principale contrainte avec un « point de resserrement » en 2027.

C'est pourquoi il est indispensable d'engager rapidement le processus d'abandon du nucléaire pour permettre en 15 ans un niveau suffisant de développement des alternatives avant le « mur » des 40 ans du parc. Au final, cette analyse multi-contraintes montre surtout que la fenêtre est étroite : elle se situe entre 2030 et 2035, et elle se joue dans les prochaines années.

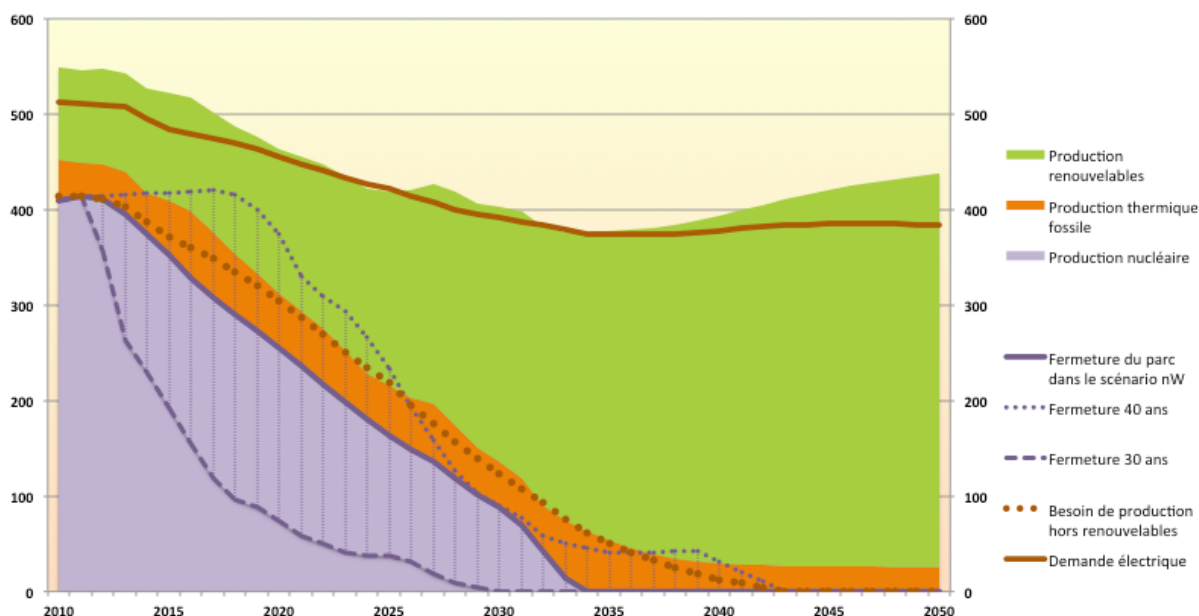


Figure 67 : Optimisation des contraintes sur le rythme de fermeture du parc de réacteurs nucléaires

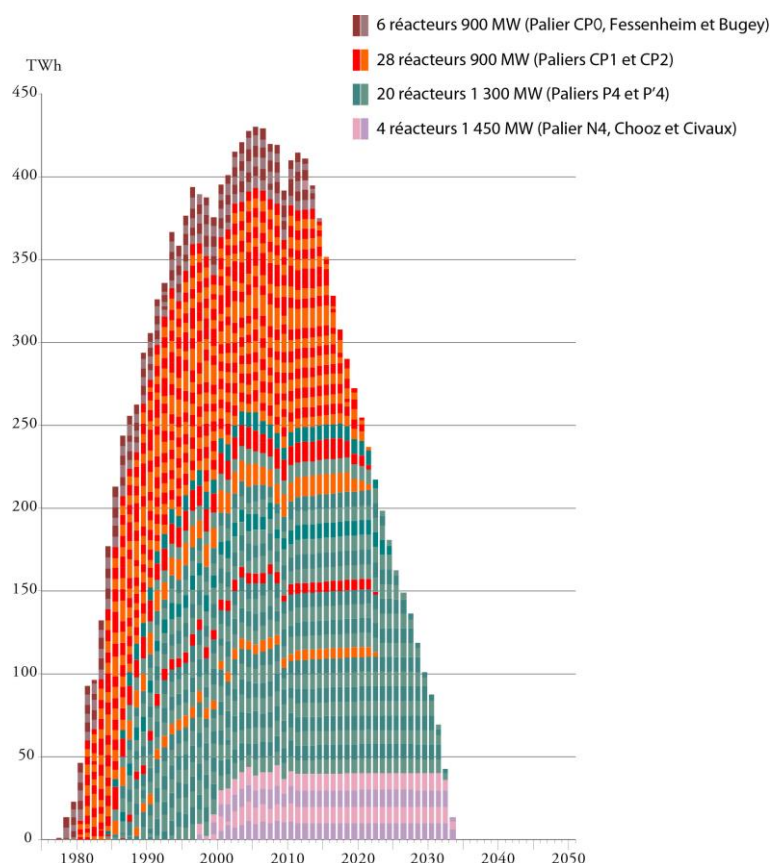


Figure 68 : Le parc nucléaire dans le scénario négaWatt (en TWh)

4.2. Les énergies fossiles

À terme, la différence entre la production d'énergies renouvelables et les besoins totaux, environ 10 % de ces derniers en 2050, représente la part résiduelle d'énergies fossiles qui sont encore nécessaires.

Partant de plus de 70 % de consommation de pétrole, gaz naturel fossile et charbon en 2010, la France peut en moins de quarante ans s'affranchir quasiment en totalité de sa très forte dépendance aux hydrocarbures. La consommation d'énergies fossiles est près de 15 fois plus faible en 2050 qu'en 2010, mais leurs utilisations sont de natures différentes.

Pétrole

Comme c'est déjà le cas aujourd'hui, en 2050 l'usage du pétrole subsiste essentiellement dans les transports. Il est réservé principalement à l'alimentation du secteur aérien - le scénario négaWatt restant très prudent sur les carburants alternatifs au kérosène. Il est également utilisé dans le parc résiduel de véhicules thermiques ne pouvant fonctionner au gaz du fait du trop fort éloignement du réseau de distribution, en milieu rural.

La consommation de pétrole, évaluée à plus de 850 TWh en 2010, atteint 48 TWh en 2050. Sa diminution suit l'évolution de la consommation de pétrole dans le secteur des transports.

Charbon

La consommation de charbon, déjà faible en 2010 (151 TWh) au regard d'autres pays industrialisés, devient presque anecdotique en 2050 (13 TWh). Son utilisation se fait intégralement dans le secteur industriel, à la fois comme matière première indispensable dans la sidérurgie et pour répondre à des besoins de chaleur de certains processus industriels.

Gaz naturel fossile

Le gaz fossile vient compléter la production de gaz d'origine renouvelable pour l'ensemble de ses usages. En 2050, il représente environ 16 % de l'ensemble du gaz consommé.

La consommation de gaz fossile est relativement stable de 2010 à 2035 : elle oscille entre 424 et 543 TWh, contre 501 TWh aujourd'hui. Ce « plateau » est en fait la traduction de deux phénomènes opposés : d'un côté le recours temporaire à des centrales au gaz comme solution de transition pour assurer l'équilibre électrique en accompagnement de la fermeture progressive des réacteurs nucléaires ; de l'autre, la forte diminution de consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, où le gaz est le principal combustible utilisé.

Les quantités de gaz fossile nécessaires à la production d'électricité n'excèdent jamais 80 TWh par an, si bien que cette augmentation temporaire reste globalement inférieure aux économies de gaz réalisées par la rénovation énergétique et par la substitution de gaz renouvelable, qu'il s'agisse de biogaz ou de gaz de synthèse.

Une sortie complète de l'usage des énergies fossiles pour atteindre 100 % d'énergies renouvelables serait envisageable à l'horizon 2050 mais demanderait des efforts supplémentaires qui pourraient s'avérer coûteux et complexes : il faudra le cas échéant en mesurer l'intérêt et la pertinence au regard de l'ensemble des paramètres. Sans l'exclure, le scénario négaWatt ne la prévoit pas explicitement.

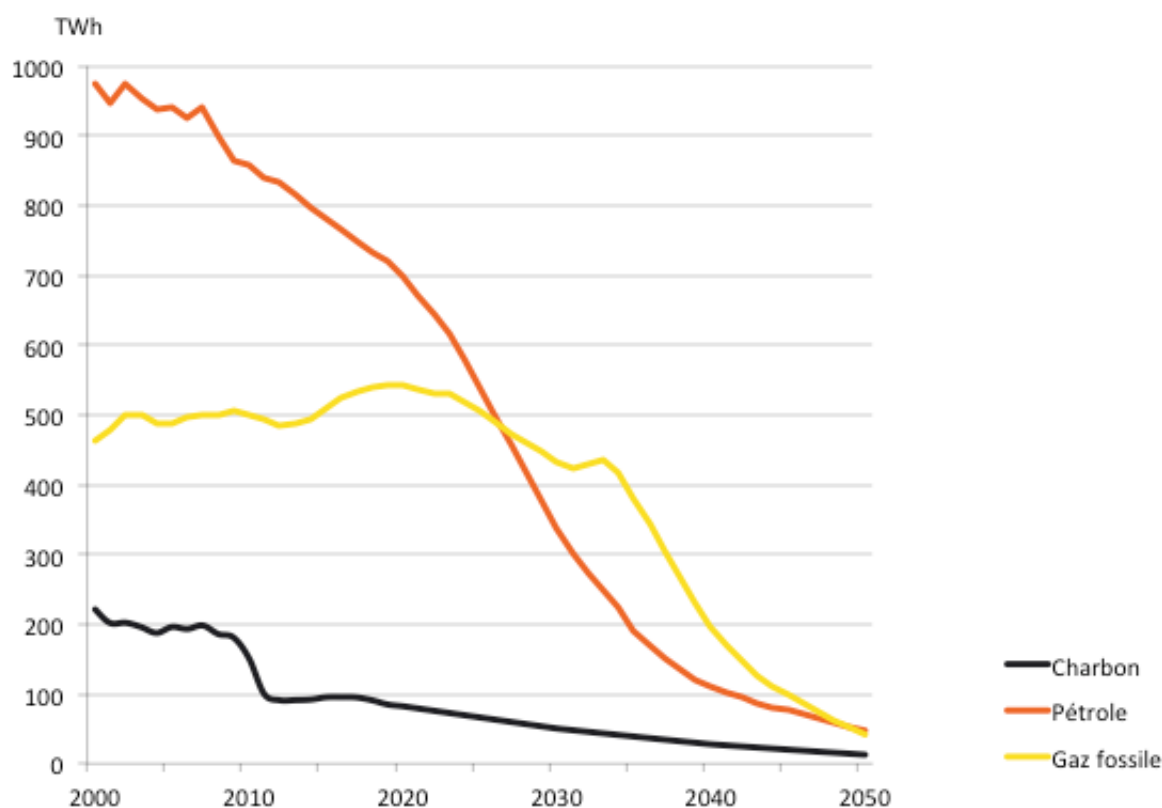


Figure 69 : Évolution des consommations de pétrole, de gaz naturel fossile et de charbon

5. L'équilibre offre-demande : le rôle primordial des réseaux

On a vu à travers les chapitres précédents que la combinaison de la réduction des consommations grâce aux actions de sobriété et d'efficacité dans les différents secteurs d'activités, et de la substitution progressive des énergies renouvelables aux sources fossiles et nucléaires permet d'assurer en permanence un équilibre global entre l'offre d'énergie caractérisée par la disponibilité des ressources primaires et la demande d'énergie représentée par la consommation finale.

Mais cet équilibre global, pour essentiel qu'il soit afin d'assurer la sécurité d'approvisionnement, ne suffit pas à garantir le fonctionnement permanent dans des conditions acceptables d'un système énergétique qui se doit de répondre à tout instant, et non simplement en moyenne annuelle, aux besoins de l'économie et des habitants.

5.1. Le cas particulier de l'électricité

Dans cette perspective, c'est le système électrique qui représente l'enjeu le plus sensible du fait de ses caractéristiques physiques, puisque l'équilibre offre-demande instantané est dans son cas un impératif absolu sous peine d'effondrement (black-out) et que l'on sait que l'électricité se stocke très mal.

Cette problématique n'est pas spécifique aux énergies renouvelables, elle est consubstantielle de l'existence même des réseaux électriques depuis leur origine et les opérateurs desdits réseaux ont appris depuis longtemps à trouver des réponses adaptées pour faire face aux fluctuations permanentes de l'offre et de la demande, parfois dans des proportions très importantes sur des pas de temps très réduits.

Le caractère fluctuant et *a priori* non pilotable d'une production éolienne et photovoltaïque massive introduit de fait une difficulté supplémentaire dans l'équation, mais cette introduction ne se fait pas d'emblée ni de manière soudaine puisque le développement de ces filières est progressif et s'étale sur plusieurs dizaines d'années.

L'impact de l'évolution de l'offre et de la demande en électricité dans le scénario négaWatt sur l'équilibre offre-demande a été étudié de manière fine, heure par heure jusqu'en 2050.

5.1.1. L'évolution de la demande

Dans le modèle d'équilibre offre-demande constitué pour cet exercice, l'évolution de la demande en électricité a été déterminée de la façon suivante : 31 usages de l'électricité ont été pris en compte, regroupant l'ensemble des usages actuels. Chacun de ces usages a été associé d'une courbe de charge normée horaire, permettant ainsi de reconstituer la puissance appelée heure par heure.

Ces courbes de charge ont été établies à partir de sources diverses et variées, en fonction des secteurs :

- courbes de charge issues de mesures faites *in situ* pour le résidentiel hors chauffage ;
- pour les usages soumis à des aléas (chauffage, éclairage), les courbes de charge ont été couplées aux données météorologiques ;
- pour l'industrie, les reconstitutions des courbes de charge ont été faites à partir d'une connaissance sectorielle : type de process (en particulier process continue des électro-intensifs), amplitude des horaires de travail (2x8, 3x8, décrochage week-end ou non) ;
- pour le transport ferroviaire de voyageurs, ce sont les statistiques de trafic passager journalier et d'horaires qui ont permis de reconstituer les courbes de charge ;
- véhicules électriques : courbes de charges issues des données RTE.

Résidentiel	Chauffage rés
	ECS rés
	Cuisson rés
	Climatisation rés
	Lavage rés
	Froid rés
	Eclairage rés
	Electronique de loisir
	Gestion & hygiène
Tertiaire	Chauffage
	ECS
	Cuisson
	Climatisation
	Eclairage
	Eclairage public
	Informatique
	Gestion bâtiment
	Secteurs hors bâtiments

Industrie	Métaux ferreux
	Métaux non ferreux
	Equipeement
	Chimie
	Matériaux de construction
	Agroalimentaire
Mobilité	Trains
	Transports urbains
	VE - recharge lente
	VE - recharge rapide
	VE-marchandise
Auti	Agriculture
	Eurodif

Figure 70 : Liste des usages de l'électricité recensés

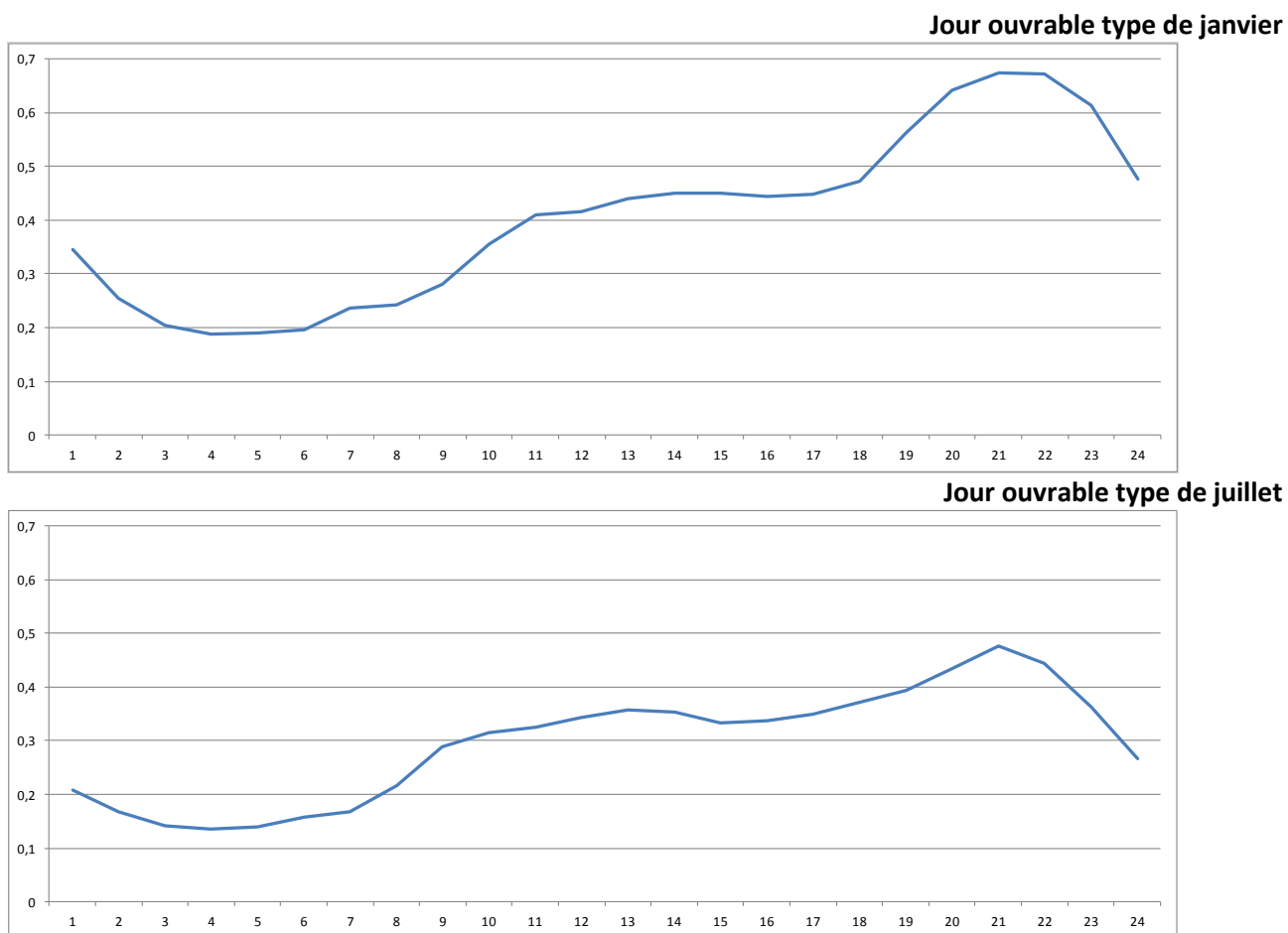


Figure 71 : Exemple de courbe de charge d'un usage : l'audio-visuel

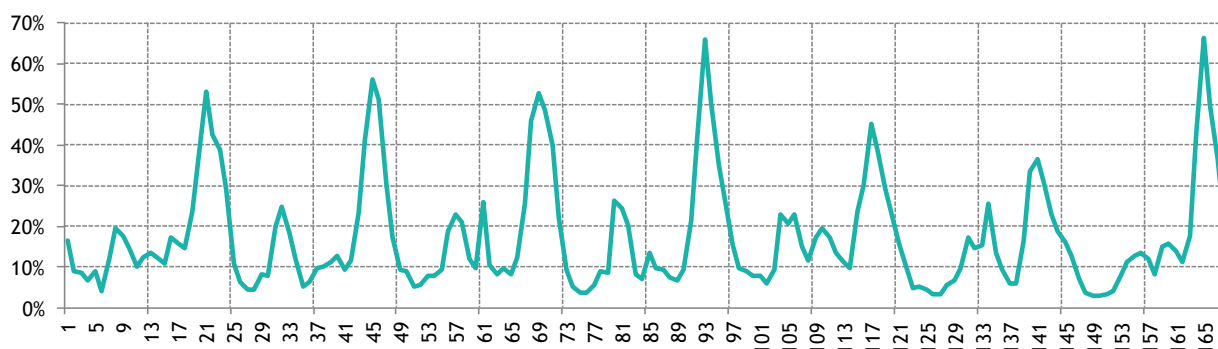


Figure 72 : Exemple de courbe de charge d'un usage : l'éclairage résidentiel au mois de mars

	<u>2010</u>	<u>2011</u>	...	<u>2050</u>
Energie	E_{2010}	E_{2011}	...	E_{2050}
	\times	\times	...	\times
Courbe de charge normée	$\begin{bmatrix} \sigma_{2010}^1 \\ \sigma_{2010}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{2010}^{8760} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_{2011}^1 \\ \sigma_{2011}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{2011}^{8760} \end{bmatrix}$...	$\begin{bmatrix} \sigma_{2050}^1 \\ \sigma_{2050}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{2050}^{8760} \end{bmatrix}$
	$=$	$=$	$=$	$=$
Puissance appelée	$\begin{bmatrix} P_{2010}^1 \\ P_{2010}^2 \\ \vdots \\ P_{2010}^{8760} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_{2011}^1 \\ P_{2011}^2 \\ \vdots \\ P_{2011}^{8760} \end{bmatrix}$...	$\begin{bmatrix} P_{2050}^1 \\ P_{2050}^2 \\ \vdots \\ P_{2050}^{8760} \end{bmatrix}$

Figure 73 : Pour chaque usage, méthode de reconstitution de la puissance électrique appelée

Au regard de ce travail, deux évolutions majeures apparaissent dans le scénario négaWatt : la baisse de la puissance moyenne appelée au cours de l'année, qui traduit la diminution globale des consommations d'électricité (-12 % entre 2010 et 2050), et surtout les baisses de la puissance maximale appelée au cours de l'année (96700 MW en 2010, 54000 MW en 2050) et des écarts de puissance appelée, qui découlent de la suppression quasi-générale du chauffage électrique direct (à effet joule) et de la rénovation thermique des logements, entraînant une forte diminution du gradient thermique³⁶ (2300 MW/°C en 2011, environ 400 en 2050).

³⁶ Le gradient thermique représente, pour une diminution d'1°C en hiver, la puissance électrique supplémentaire à fournir au réseau pour alimenter les bâtiments munis de chauffages électriques lors de la pointe de consommation à 19h.

Aujourd'hui c'est bien la demande qui représente la majeure partie de la contrainte pour l'équilibre offre-demande, comme le rappelle régulièrement le Réseau de Transport d'Electricité (RTE) dans ses bilans prévisionnels. La forte baisse de la contrainte sur la demande envisagée dans le scénario négaWatt permet de l'augmenter du côté de l'offre.

5.1.2. L'évolution de l'offre

À l'instar de la demande, l'offre évolue considérablement dans le scénario négaWatt, avec une très forte augmentation des énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque principalement) et un arrêt de la production d'électricité nucléaire, comme décrit précédemment.

Dans le modèle d'équilibre offre-demande, l'ensemble des moyens de production est réparti en 50 filières :

- filière de production non-dispatchable : courbe de production fixée *a priori* :
 - éolien, photovoltaïque, hydraulique au fil de l'eau, etc.
- filière de production dispatchable appelée selon *merit order* prédéfini :
 - nucléaire ;
 - gaz de réseau - gaz naturel fossile progressivement remplacé par du biogaz ;
 - combustible solide - charbon puis biomasse solide ;
 - combustible liquide - fioul puis partiellement biomasse liquide.
- filière dispatchable à stocks finis (hydraulique de barrage) et stockage/conversion (STEP & méthanation) – optimisation annuelle.

Pour les filières non-dispatchable, le productible horaire est calculé à partir de la puissance installée et de sa disponibilité : pour chacune des filières, année par année, la courbe de disponibilité normée horaire associée à la puissance installée permet de reconstituer la puissance horaire.

	<u>2010</u>	<u>2011</u>	...	<u>2050</u>
Productible	Pr_{2010}	Pr_{2011}	...	Pr_{2050}
	\times	\times	...	\times
Courbe de productible normée	$\begin{bmatrix} \sigma_{2010}^1 \\ \sigma_{2010}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{2010}^{8760} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_{2011}^1 \\ \sigma_{2011}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{2011}^{8760} \end{bmatrix}$...	$\begin{bmatrix} \sigma_{2050}^1 \\ \sigma_{2050}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{2050}^{8760} \end{bmatrix}$
	$=$	$=$	$=$	$=$
Puissance produite horaire	$\begin{bmatrix} P_{2010}^1 \\ P_{2010}^2 \\ \vdots \\ P_{2010}^{8760} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_{2011}^1 \\ P_{2011}^2 \\ \vdots \\ P_{2011}^{8760} \end{bmatrix}$...	$\begin{bmatrix} P_{2050}^1 \\ P_{2050}^2 \\ \vdots \\ P_{2050}^{8760} \end{bmatrix}$

Figure 74 : Reconstitution de la production horaire des filières non-dispatchables

Pour les filières dispatchables, chacun des moyens de production est associé année par année d'un taux de disponibilité normée horaire, pour reconstituer la puissance horaire.

L'évolution de l'ensemble des sources de production d'électricité, en puissance et en énergie, sont rappelées dans le Tableau 89 : Évolution des sources de production d'électricité.

5.1.3. L'équilibre offre-demande électrique

Les évolutions de l'offre et de la demande ainsi reconstituées, le modèle assure heure par heure, année par année, l'équilibre production-consommation d'électricité en faisant appel à de la flexibilité par ordre de mérite négaWatt.

5.1.3.1. Piloter la demande et l'offre flexible

Le pilotage de l'offre et de la demande présente l'avantage indéniable de n'entraîner aucune perte d'énergie.

La demande

Aujourd'hui RTE dispose de capacités d'effacement de la consommation à travers plusieurs mécanismes³⁷ :

- les options tarifaires (offres EJP ou Tempo) ; ces offres procurent globalement une réduction de la puissance appelée de l'ordre de 2100 MW ;
- les mécanismes d'ajustement (contrats bilatéraux entre des consommateurs d'électricité et leur fournisseur), qui représentent un potentiel d'effacement de l'ordre de 700 MW ;
- l'effacement diffus chez les particuliers, à travers le dispositif Ecowatt (pour l'instant en vigueur uniquement en Bretagne et en PACA).

Les capacités totales d'effacement représentent donc actuellement environ 3000 MW.

L'apparition des réseaux intelligents pourra très certainement permettre une augmentation de l'effacement diffus, mais la diminution des usages thermiques de l'électricité entraînera également une moins grande flexibilité. Par mesure de prudence, cette valeur de 3000 MW est donc conservée jusqu'en 2050 dans le scénario négaWatt.

L'offre

Les capacités de pilotage de la production renouvelable n'augmentant pas non plus dans ce scénario : la croissance envisagée de la micro-hydraulique se concentrera dans des petites installations, au fil de l'eau, non pilotables, afin de limiter les conséquences environnementales de ces nouvelles installations.

Ces capacités de pilotage voient néanmoins augmenter leur contribution relative puisque la puissance maximum appelée sur le réseau diminue au fil des ans.

5.1.3.2. Utiliser le réseau de transport

En maillant davantage certaines zones du territoire et en renforçant le réseau de transport, la zone d'interconnexion entre la production et la consommation peut être augmentée, tout en permettant de foisonner davantage les aléas de production (éolien et photovoltaïque). Le développement déjà programmé des interconnexions entre pays européens va clairement dans ce sens.

Dans le scénario négaWatt, ce développement du réseau de transport n'est pas pris en compte. Au-delà de la question de l'acceptabilité des ouvrages, l'objectif est de montrer que la transition énergétique peut se faire sans le concours des pays voisins. Les échanges intra-européens qui auront forcément lieu ne viendront que faciliter une situation d'ores et déjà soutenable.

Ce choix méthodologie est également guidé par la méconnaissance du paysage énergétique européen à l'horizon 2050. Nul ne sait si nos voisins présenteront un bilan déficitaire ou excédentaire, ni s'ils disposeront de davantage de moyens pilotables qu'aujourd'hui.

³⁷ RTE - *Bilan prévisionnel* - Édition 2012.

Malgré cette hypothèse conservatrice, sur le territoire national le réseau de transport continue à être fortement sollicité afin de relier les zones de production et de consommation. L'utilisation de ce réseau entraîne des pertes comprises entre 1 et 10 % en fonction de la distance parcourue et de la nature des ouvrages rencontrés.

5.1.3.3. Stocker l'électricité

Comme le fait déjà RTE de façon très régulière, le scénario négaWatt fait appel aux STEP pour permettre un stockage d'énergie en période excédentaire et un appel à ces moyens de production en cas de déficit des moyens classiques. Les STEP permettent d'obtenir en quelques minutes une quantité importante d'électricité (puissance de 4300 MW) mais sur une courte période. Elles répondent donc très bien au besoin de stockage intra-journalier mais sont peu pertinentes pour répondre au besoin de stockage de plusieurs semaines, nécessaire en cas de forte puis faible production éolien+photovoltaïque.

Le taux de pertes associées à ce moyen de stockage est évalué à 25 %.

À l'opposé de certains autres exercices, le scénario négaWatt ne prévoit pas d'augmentation de la puissance installée des STEP, pour cause d'acceptabilité et d'impact environnemental de ces nouveaux ouvrages.

D'autres technologies de stockage présentent des potentiels de développement : stockage à air comprimé, stockage sous forme électrochimique (batteries lithium-ion, vanadium ou sodium-soufre), volant d'inertie, ou encore l'avènement des véhicules électriques parfois présentés comme un « parc de batteries sur roues ».

Mais si chacune de ces solutions peut avoir un certain domaine de pertinence, toutes se heurtent plus ou moins rapidement à un ou plusieurs facteurs limitant comme une faible disponibilité de sites propices ou de certaines matières premières, un coût d'investissement qui pourrait rester très probablement élevé pour des raisons structurelles, la difficulté de dégager un modèle économique viable, sans oublier le casse-tête pour le réseau électrique de la régulation des puissances et des vitesses de charges d'un nombre important de véhicules 100 % électriques si la flotte devait se développer à grande échelle.

Au-delà de ces limites individuelles, force est de constater que même mises bout-à-bout ces solutions ne sont pas en mesure de répondre sur le moyen-long terme à la fois aux enjeux quantitatifs et à l'exigence de flexibilité d'une production dont la part fluctuante augmente de manière continue : elles ne peuvent apporter que des réponses partielles et de toutes façons insuffisantes à la principale problématique qu'est le stockage d'une quantité importante d'énergie sur une longue période (plusieurs semaines).

5.1.3.4. Transformer l'électricité en méthane

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, aucun système de stockage actuel ou envisagé ne permet de stocker de grandes quantités d'électricité. Or le développement significatif de moyens de production variables, tels que l'éolien et le photovoltaïque, nécessite de disposer de tels moyens de stockage afin de valoriser les excédents de production.

Seule la transformation des quantités de plus en plus importantes d'électricité disponible à coût marginal lors de ces périodes de production excédentaire en molécules à fort contenu énergétique, stockables et utilisables de diverses manières, est susceptible de fournir une solution à la hauteur des enjeux : on pense bien entendu à la production d'hydrogène (H₂) par électrolyse de l'eau, un procédé bien connu, parfaitement maîtrisé et exploité de longue date dans l'industrie.

Cette nouvelle application « au fil des excédents » par nature fluctuants nécessitera d'améliorer les performances techniques et économiques des procédés en adaptant les technologies de type « alcalines » aujourd'hui les plus courantes, qui ont été optimisées pour un fonctionnement « en base », ou de développer de nouvelles filières à membranes comme les « PEM » ou les « SOEC », mais, quelque soit la ou les voies qui seront privilégiées, cela pourra se faire par simple évolution et sans « rupture » puisque toutes les « briques de base » qui sous-tendent ces technologies sont aujourd'hui disponibles.

L'hydrogène une fois produit peut être utilisé directement dans l'industrie ou, *via* des piles à combustibles, dans certaines applications commerciales stationnaires (co-génération) ou mobiles (véhicules), ou encore être injecté dans le réseau de gaz naturel – mais dans des proportions limitées pour des raisons de sécurité, l'hydrogène étant un gaz particulièrement explosif et volatil.

Toutefois, ici encore un certain nombre de facteurs limitant ne permettent pas d'envisager raisonnablement l'avènement d'une « société de l'hydrogène » que certains prédisent : l'absence d'une infrastructure de transport et de distribution adaptée aux risques, le coût des diverses filières de piles à combustible qui tarde à décroître malgré les promesses faites il y a plus de vingt ans qui s'ajoute à celui de la nécessaire révolution de l'industrie automobile, les risques de tension sur les matières premières à haute valeur ajoutée se trouvant en compétition avec d'autres usages (platine) militent pour un recours modéré au vecteur hydrogène dans les usages finaux.

Dans ce contexte l'une des voies les plus prometteuses pour sa valorisation est celle de sa combinaison avec du dioxyde de carbone (CO₂) de façon à produire du gaz méthane (CH₄) à travers le processus dit de « méthanation », aussi connu sous le nom de « réaction de Sabatier »³⁸, selon la formule $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (il y a aussi production d'eau, la moitié à peu près de celle utilisée pour l'électrolyse).

Le méthane synthétique issu de la méthanation peut être injecté dans le réseau public de distribution ou de transport du gaz, où il vient s'ajouter au bio-méthane issu de la purification du biogaz dont les molécules sont en tous points semblables, de façon à remplacer le gaz naturel fossile et à augmenter progressivement la part de gaz renouvelable dans tous les usages qui peuvent en être faits.

La transformation de l'hydrogène en méthane permet de s'affranchir des limitations d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz et de bénéficier ainsi à plein d'une infrastructure existante de transport et de distribution, et surtout d'une très grande capacité de stockage, estimée à plus de 150 TWh en France (près de la moitié de la consommation annuelle de gaz en 2050), ce qui positionne cette solution au tout premier rang en termes de quantité et de durée.

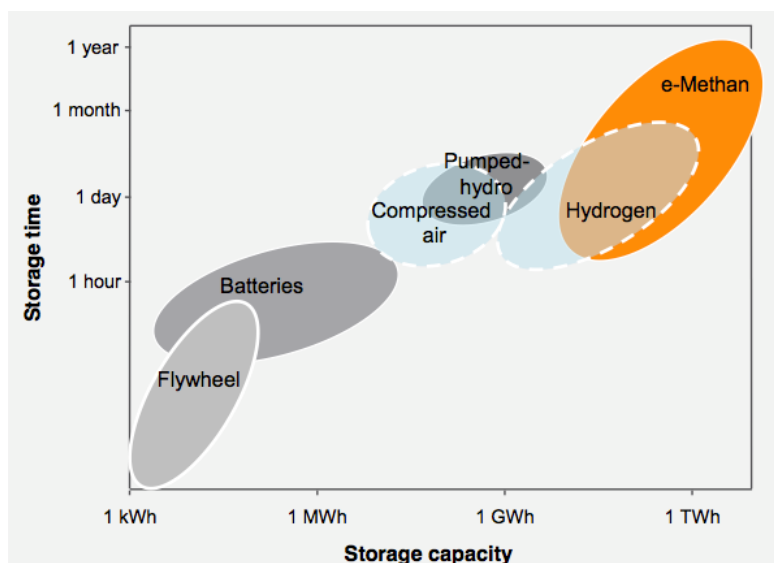


Figure 75 : Capacité et temps de décharge des différents moyens de stockage de l'électricité (source Etoqas)

³⁸ Du nom du chimiste français Paul Sabatier, originaire de Carcassonne, qui l'a découverte avant de recevoir le prix Nobel en 1912 et de donner son nom à une célèbre université toulousaine.

En outre, comme l'électrolyse, la méthanation est un procédé couramment utilisé de longue date dans l'industrie, notamment pour la synthèse de l'ammoniac. Elle ne nécessite donc pas de rupture technologique mais une simple adaptation à un contexte technique, industriel et économique différent, ce qui est d'autant plus à portée de main que l'on dispose pour cela d'une quinzaine d'années avant d'avoir besoin d'un outil de dimension industrielle.

Dans le scénario négaWatt, les premières unités de méthanation voient le jour à partir de 2021, mais c'est surtout après 2035 que la production de méthane de synthèse devient significative. Les installations pourront présenter des puissances installées allant de quelques kW à plusieurs dizaines de MW.

	2010	2020	2030	2040	2050
Puissance installée (MW élec)	0	0	5 500	18 400	20 000
Production de méthane de synthèse (TWh)	0	0	2	15	47

Tableau 13 : Méthanation : Puissance installée et production annuelle

La production de méthane de synthèse (électrolyse + méthanation) dégage d'importantes quantités de chaleur qui, si elles sont récupérées, permettent d'obtenir un rendement global de l'ordre de 70-75 % (rendement de la production de méthane de synthèse à partir d'électricité). Le scénario négaWatt fait le choix d'une hypothèse de rendement extrêmement prudente et conservatrice puisque cette valeur est fixée à seulement 51 % en 2050 (47 % en 2025). Au cours de cette année, 92 TWh d'électricité (soit 28 % de la production brute) sont ainsi convertis en 47 TWh de méthane de synthèse, représentant 16 % de la consommation totale de gaz (287 TWh) et davantage que la consommation de gaz fossile (42 TWh).

Mélangé au gaz fossile et aux autres sources de gaz renouvelable (biogaz et gazéification de la biomasse solide), ce méthane de synthèse contribue à la couverture des besoins pour les nombreux usages auxquels est en mesure de répondre le vecteur gaz, dont la flexibilité est encore plus étendue que celle de l'électricité, non seulement dans le bâtiment (chauffage, eau chaude, cuisson) et l'industrie (chaleur haute température, chimie), mais aussi dans les transports grâce à la motorisation type GRV, ainsi le cas échéant que dans la production d'électricité, mais de manière très marginale puisque la problématique d'origine n'est pas le manque mais l'excès d'électricité et qu'une nouvelle étape de conversion du gaz vers l'électricité dégraderait inutilement le rendement global de la chaîne énergétique.

5.1.3.5. Production conventionnelle et déconnexion des renouvelables

Si l'ensemble des moyens détaillés précédemment ne permet pas de répondre à la demande d'électricité, l'appel à des moyens conventionnels de production d'électricité sera envisagé, par ordre de mérite croissant :



Figure 76 : Ordre de mérite des moyens conventionnels appelés

Le faible rendement de ces productions thermiques et leurs externalités sont à éviter autant que possible : seuls quelques cycles combinés gaz et turbine à combustible liquide restent en 2050, en cogénération dans la majorité des cas.

À l’opposé, en cas d’excès de production renouvelable ne pouvant être absorbé par les moyens de stockage précédemment détaillés, les moyens de production éoliens ou photovoltaïques peuvent être déconnectés du réseau. Dans le scénario négaWatt, en 2050, 17 TWh d’électricité sont ainsi supposés « perdus » et non valorisés. Cet ordre de grandeur est tout à fait acceptable d’un point de vue économique et ne remet nullement en question le modèle économique des moyens de production installés.

Avant d’être perdue, cette production excédentaire d’électricité peut aussi être valorisée auprès de nos voisins européens si ces derniers sont en déficit de production au cours de nos périodes d’excédent, dans la limite des capacités des interconnexions (hypothèse non prise en compte dans ce scénario, comme détaillé au § 5.1.3.3).

L’ensemble des mécanismes d’ajustement entre l’offre et la demande d’électricité permet de garantir un approvisionnement fiable en électricité en tout point du territoire, pendant toute la durée de la transition énergétique décrite dans le scénario négaWatt. Loin des anathèmes couramment apportés au caractère imprévisible des systèmes de production éoliens et photovoltaïque, le système électrique peut aisément intégrer une part prépondérante de ces énergies variables sans pour autant menacer la sécurité d’approvisionnement. Seule la mise en place d’installations de production de gaz de synthèse reste une condition pour valoriser en carburant ou combustible les excédents de production renouvelable.

L’établissement de ce nouveau mix énergétique présentant un aléa plus fort sur la production nécessite en parallèle de diminuer l’aléa sur la consommation, ce que prévoit précisément le scénario négaWatt à travers son plan ambitieux de rénovation thermique des bâtiments et la suppression quasi-généralisée du chauffage électrique direct (à effet Joule). La complémentarité des trois piliers de la démarche négaWatt prend ici tout son sens.

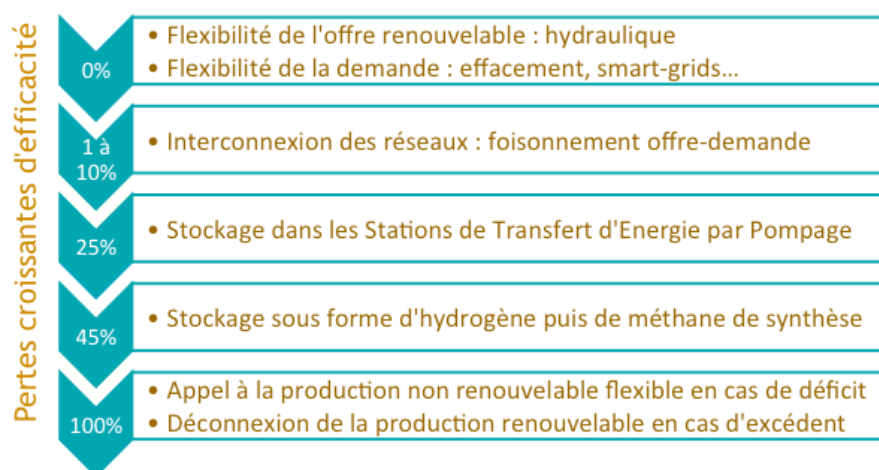


Figure 77 : Ordre de mérite des mécanismes d’ajustement entre l’offre et la demande d’électricité dans le scénario négaWatt

5.2. De l'équilibre électrique à l'écologie industrielle

La production d'hydrogène et la méthanation, que les anglophones rassemblent sous le vocable commun de « Power-to-Gas », donnent un exemple particulièrement illustratif de la complémentarité entre les différents vecteurs énergétiques : partant d'une problématique de gestion d'excédents électriques qui deviennent de plus en plus structurels au fur et à mesure de la pénétration des sources fluctuantes, elles apportent une réponse qui va au-delà de la question posée.

Loin de se résumer à une simple technique de stockage d'électricité, elles s'inscrivent dans une logique systémique bien élaborée en contribuant de manière significative à la substitution dans les transports du pétrole importé - qui jouit aujourd'hui d'un monopole quasi absolu - par du gaz à 90 % renouvelable et produit sur le territoire national. Cela constitue une solution bien plus pertinente, efficace et robuste qu'une généralisation des véhicules électriques - qui ont néanmoins un rôle à jouer dans la transition énergétique, mais principalement dans les milieux urbains - ou qu'un développement à grande échelle des agrocarburants produits à partir de cultures dédiées.

Pour cela, la méthanation devra s'insérer dans un environnement physique, propre à chaque territoire. Si l'accès aux excédents d'électricité ne devrait pas présenter un problème majeur, puisque cette dernière se transporte relativement bien, l'accès direct à une portion du réseau de gaz en capacité d'accueillir les volumes produits est évidemment une nécessité.

Une autre contrainte réside dans l'accès à une source de CO₂ que la cohérence avec les prémisses de la démarche négaWatt doit naturellement conduire à préférer d'origine renouvelable : les meilleurs candidats dans cette optique sont le CO₂ extrait du biogaz³⁹, les stations d'épuration des eaux usées, les chaufferies et autres sites de combustions de biomasse, voire la capture dans l'air, ainsi que les cimenteries et aciéries bien qu'elles soient alimentées par des sources non-renouvelables dans la mesure où ces dernières, qui sont aussi des matières premières de process, ne sont pas substituables.

Enfin, la réaction de méthanation est « exothermique », elle produit de la chaleur dont une partie à haute température - 200 à 300°C - peut alimenter des process industriels et une autre à basse température - 50 à 70°C - est bien adaptée aux réseaux de chauffage urbain. La chaleur se transportant mal, il y a un intérêt économique à disposer à proximité immédiate de débouchés de valorisation, ce qui incite fortement à développer une approche de type « écologie industrielle » pour le choix d'implantation des sites de production.

À l'opposé de la logique de concurrence entre vecteurs et entre réseaux qui prévaut actuellement, c'est la coordination et la coopération entre opérateurs aux différentes étapes de chaînes énergétiques plus diversifiées qu'aujourd'hui qui constitue la clé de voûte du système énergétique décrit par le scénario négaWatt.

Dans cette perspective, les collectivités locales qui sont propriétaires des réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur (auxquels on peut ajouter les réseaux de froid, de transports en commun, d'eau potable, d'eaux usées et d'information), qui disposent de prérogatives en matière de planification urbaine, d'aménagement du territoire et de programmation énergétique qui ont tendance à se renforcer, et qui se trouvent au contact direct des acteurs économiques et des citoyens, ont un rôle prépondérant et structurant à jouer dans l'identification des interactions pertinentes entre gisements et vecteurs présents sur leurs territoire et dans la mise en œuvre des actions permettant de les exploiter au mieux.

³⁹ Le biogaz brut contient entre 50 et 60 % de méthane (CH₄) et entre 40 et 50 % de dioxyde de carbone (CO₂) qu'il est nécessaire d'ôter si l'on veut obtenir du bio-méthane, injectable dans le réseau de gaz.

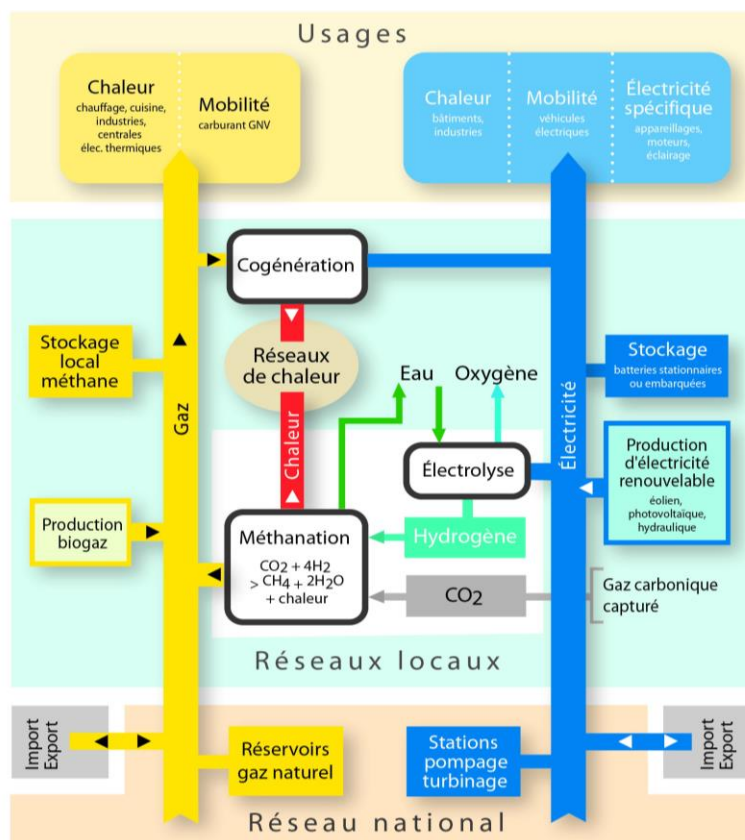


Figure 78 : Complémentarité des réseaux et rôle de la méthanation

Partie 4 -

Résultats du scénario négaWatt 2011

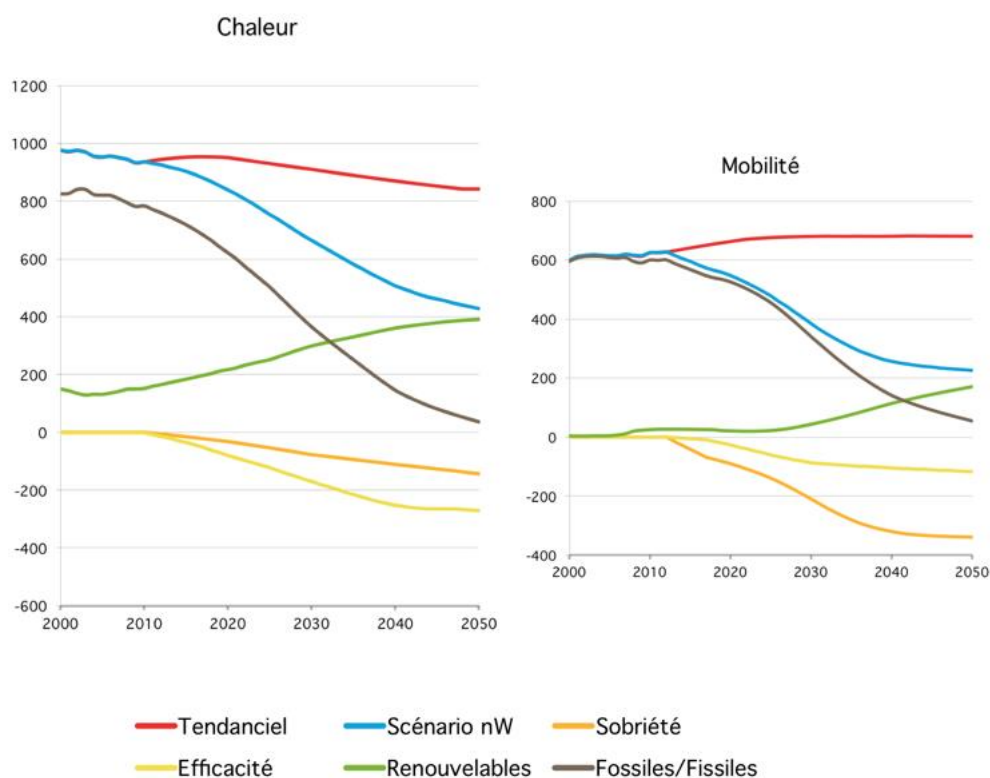
1. Énergie finale, vecteurs, énergie primaire

Traduit par plus de 1500 hypothèses, le détail de l'ensemble des postes de consommation d'énergie, année après année, couplé à l'étude minutieuse des moyens de production d'énergie envisageables à l'échelle des quarante prochaines années, permet de définir une trajectoire énergétique cohérente pour la France, de 2011 à 2050.

L'application systématique d'actions de sobriété et d'efficacité énergétique dans l'ensemble des secteurs de consommation permet d'envisager en 2050 une réduction de 55% de la demande en énergie finale par rapport à la situation actuelle (849 TWh contre 1908 en 2010), et de 56 % par rapport au scénario tendanciel en 2050. Loin d'entraîner un retour à la bougie, cette forte baisse s'accompagne dans la grande majorité des cas d'une hausse des services rendus et/ou du confort des usagers (amélioration des performances thermiques des logements, diminution des temps de transport contraints, relocalisation de l'économie, alimentation plus saine, etc.).

Une observation plus fine montre que cette diminution n'est pas similaire dans les trois usages de l'énergie recensés. Elle est de :

- 49 % pour les usages « chaleur » (chauffage et climatisation des bâtiments, production d'eau chaude sanitaire et cuisson des aliments) ;
- 67 % pour les usages liés à la mobilité ;
- 48 % pour les usages spécifiques de l'électricité.



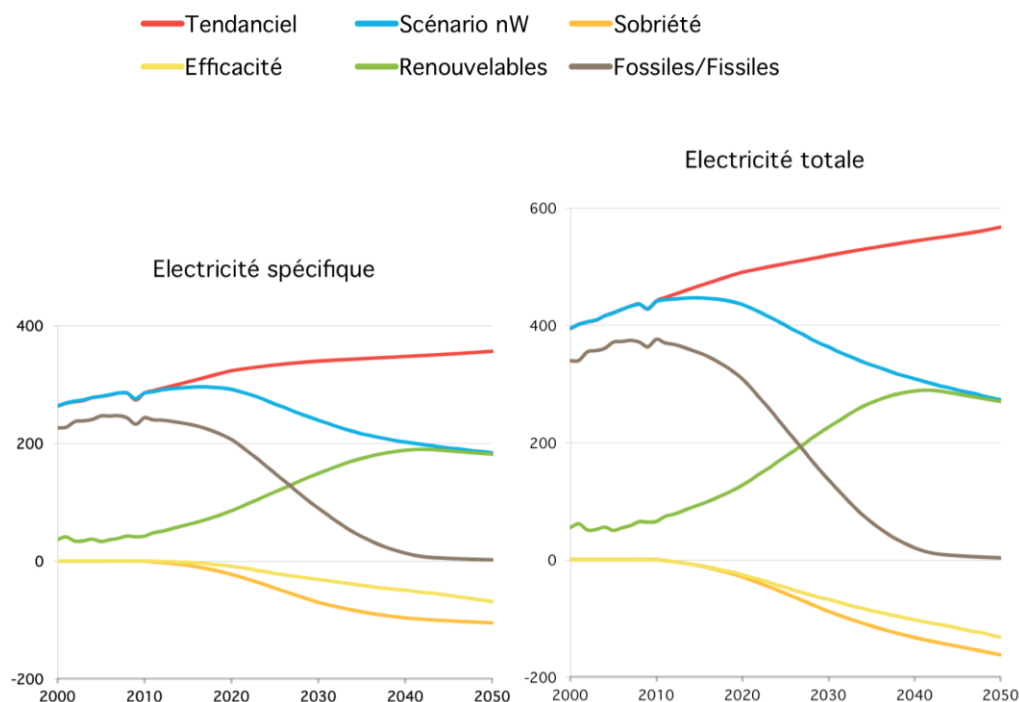


Figure 79 : Évolution des besoins en énergie finale, de la sobriété, de l'efficacité et de la part d'énergies fossiles et fissile et d'énergies renouvelables par grand usage (en TWh)

C'est dans le domaine des transports que l'on observe la plus forte baisse de consommation, grâce à des actions volontaristes de sobriété (réduction des trajets contraints, sobriété dans les usages « loisir », report modal important vers les modes actifs, les transports en commun terrestres et le fret ferroviaire, augmentation des taux de remplissage) mais également d'efficacité (réduction de la consommation unitaire des véhicules individuels et des poids lourds).

Les mêmes principes d'efficacité énergétique appliqués cette fois-ci à l'intégralité de la chaîne énergétique permettent d'envisager une réduction de la consommation d'énergie primaire encore plus forte - notamment par la fermeture de la majorité des centrales thermiques de production d'électricité - : estimée à 3009 TWh en 2010, elle atteint 1010 TWh en 2050, soit une réduction de 66 % par rapport à la situation actuelle (diminution similaire par rapport au scénario tendanciel, en 2050).

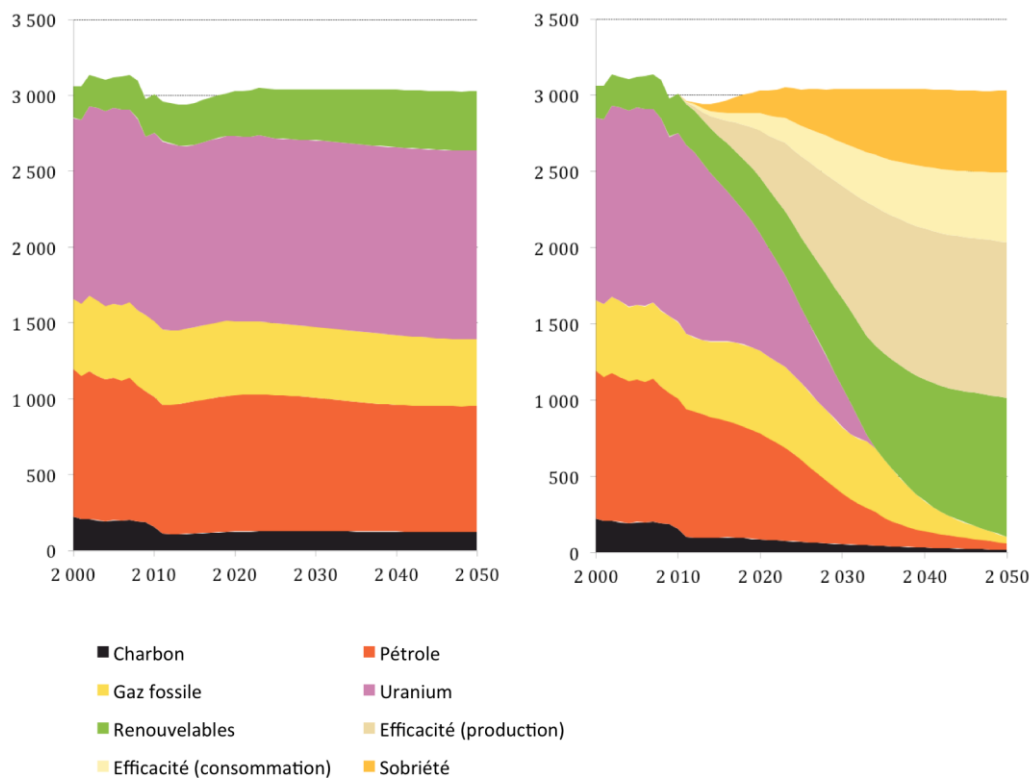


Figure 80 : Évolution comparée des productions en énergies primaires par source entre le scénario tendanciel (à gauche) et le scénario négaWatt 2011 (en TWh)

L'énergie primaire ainsi consommée trouve une nouvelle répartition entre ses différents usages :

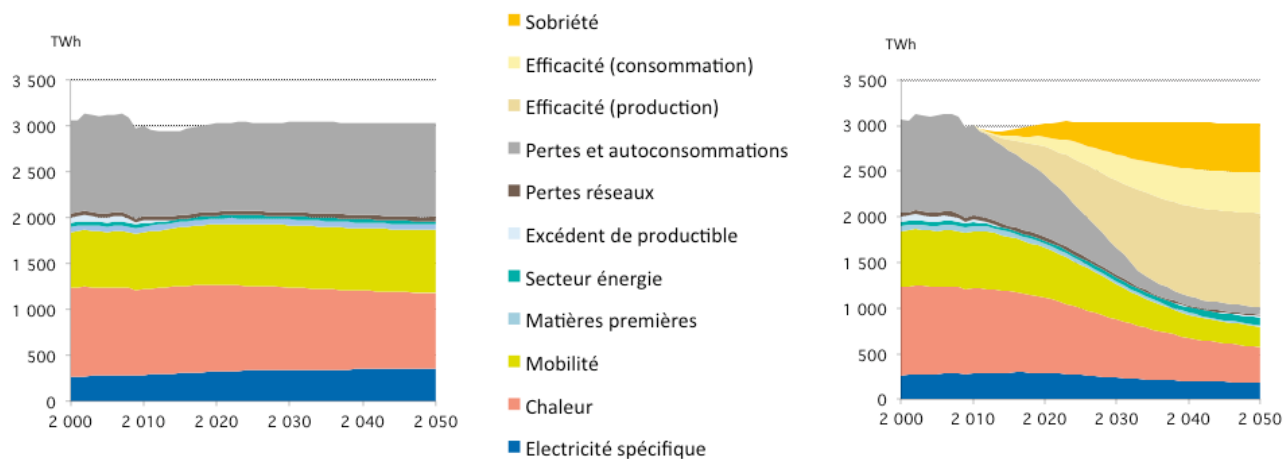


Figure 81 : Évolution de la répartition de la consommation d'énergie primaire en fonction des usages, dans le scénario tendanciel (à gauche) et dans le scénario négaWatt 2011 (à droite)

Pour répondre aux différents usages que l'on fait de l'énergie - se déplacer, se nourrir, se chauffer, s'éclairer, etc. - plusieurs vecteurs énergétiques peuvent être employés. Tous n'ont pas la même facilité d'usage. Si le pétrole est particulièrement adapté à un usage diffus, la présence de réseaux de gaz et d'électricité permet un foisonnement de la consommation et de la production, facilitant l'équilibrage entre l'offre et la demande.

Si nos usages évoluent dans le scénario négaWatt, les vecteurs utilisés connaissent également des évolutions conséquentes. De par un transfert d'usage (véhicules électriques notamment) et une diminution moins importante des usages spécifiques de l'électricité, la part de ce vecteur dans la consommation d'énergie finale augmente : il passe de 23 % en 2010 à 32 % en 2050.

De même, la part du gaz (combustible et carburant, renouvelable ou non) dans la consommation finale d'énergie subit une hausse importante, de 22 % en 2010 à 34 % en 2050. Enfin, la part de la biomasse solide connaît elle aussi une évolution positive : 13 % en 2050 contre 6 % en 2010.

En 2050, ces trois vecteurs représentent 80 % de notre consommation d'énergie finale.

À l'opposé, le pétrole, aujourd'hui souverain - l'essence et le gazole représentent 31 % de la consommation d'énergie finale en 2010, le fioul 8 % -, connaît une très forte régression puisqu'il ne représente plus que 6 % de l'énergie finale consommée en 2050 (carburant : 5 % ; combustible : 1 %).

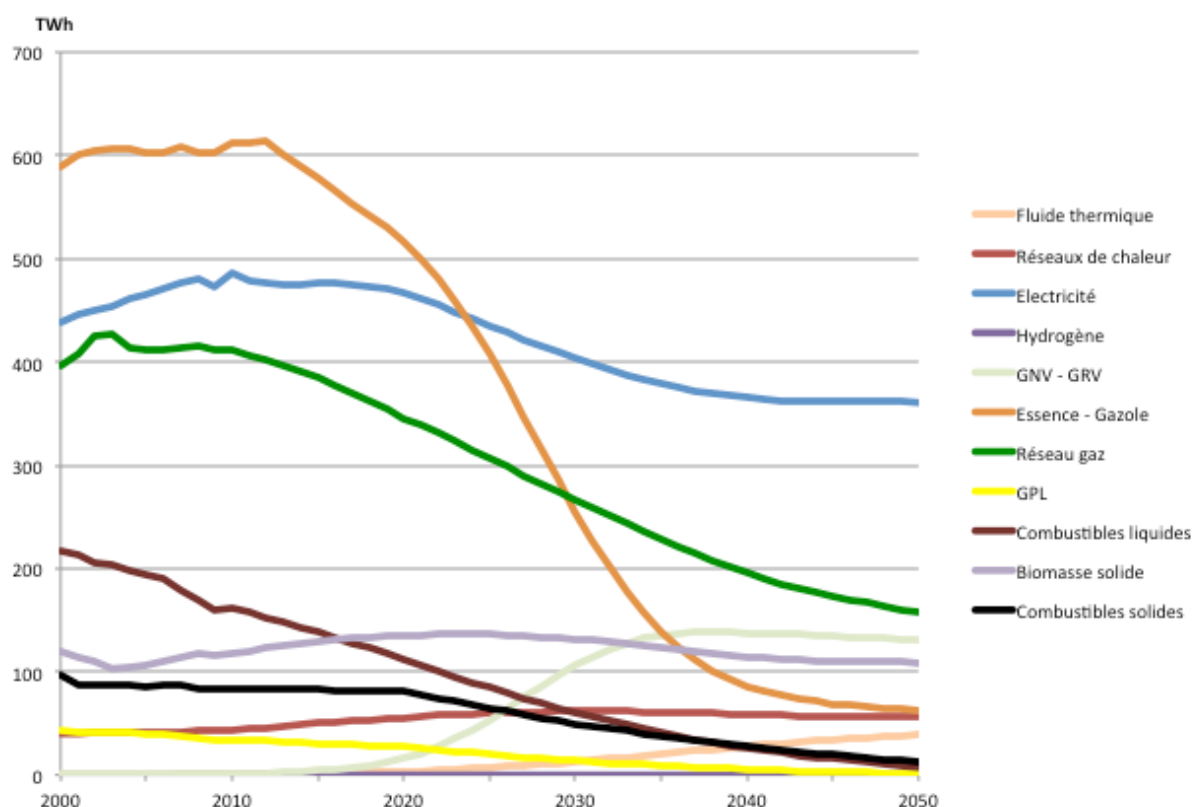
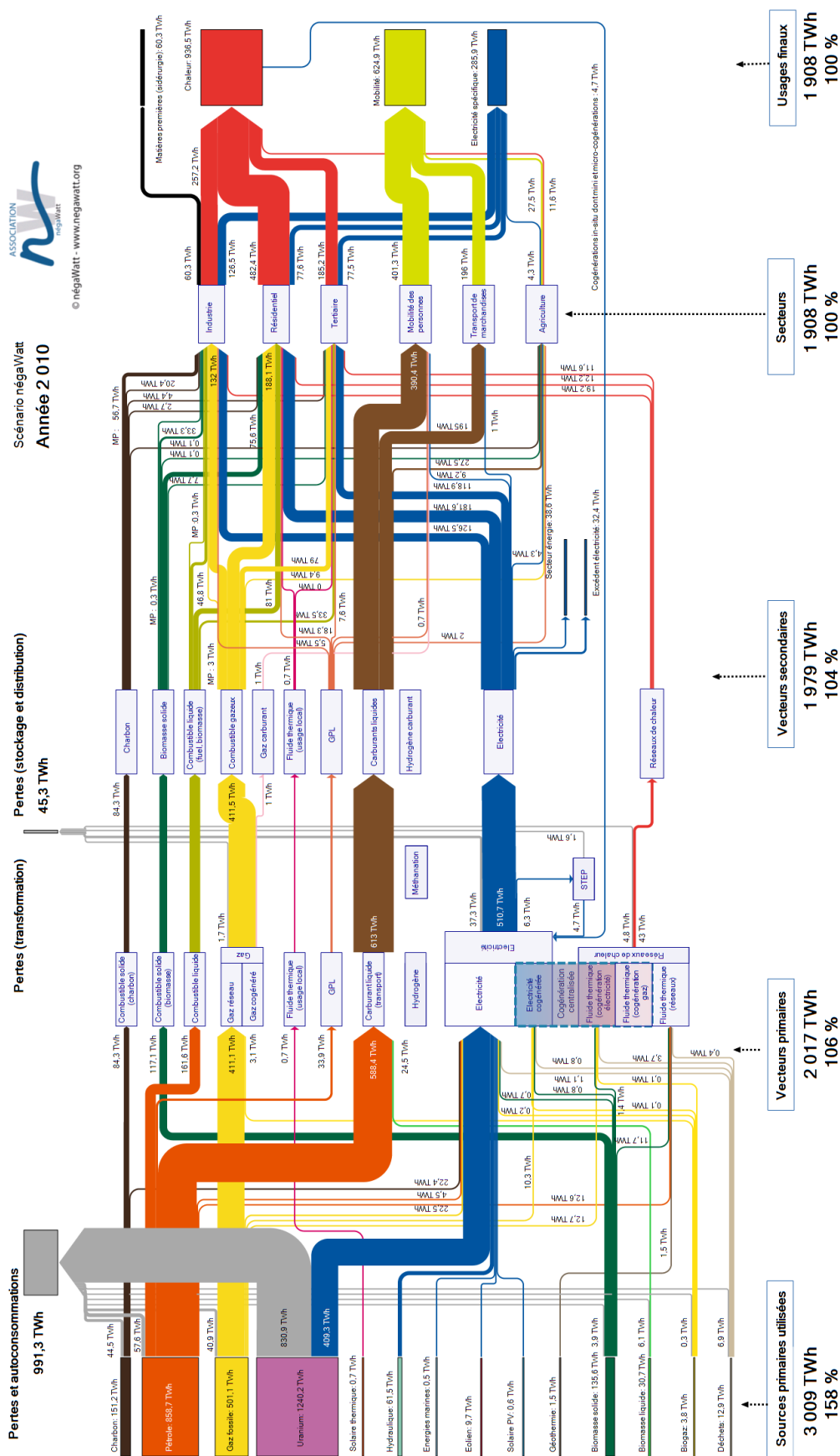


Figure 82 : Évolution des différents vecteurs d'énergie

L'ensemble de ces évolutions est synthétisé dans les diagrammes de Sankey 2010 et 2050 :



Nota :
 (1) Ce diagramme n'est pas une représentation physique des réseaux, mais une représentation des flux et pertes liées aux différentes transformations des énergies depuis les sources primaires jusqu'aux usages finaux. Ainsi, en 2010, le biogaz n'est pas réellement injecté dans le réseau de distribution gaz, mais utilisé localement. Cela ne change rien au bilan présent.
 (2) La plupart des valeurs sont arrondies à l'unité, pour ne pas alourdir le schéma. Il peut en résulter des bilans non parfaitement équilibrés.

Figure 83 : Diagramme de Sankey pour la France, en 2010

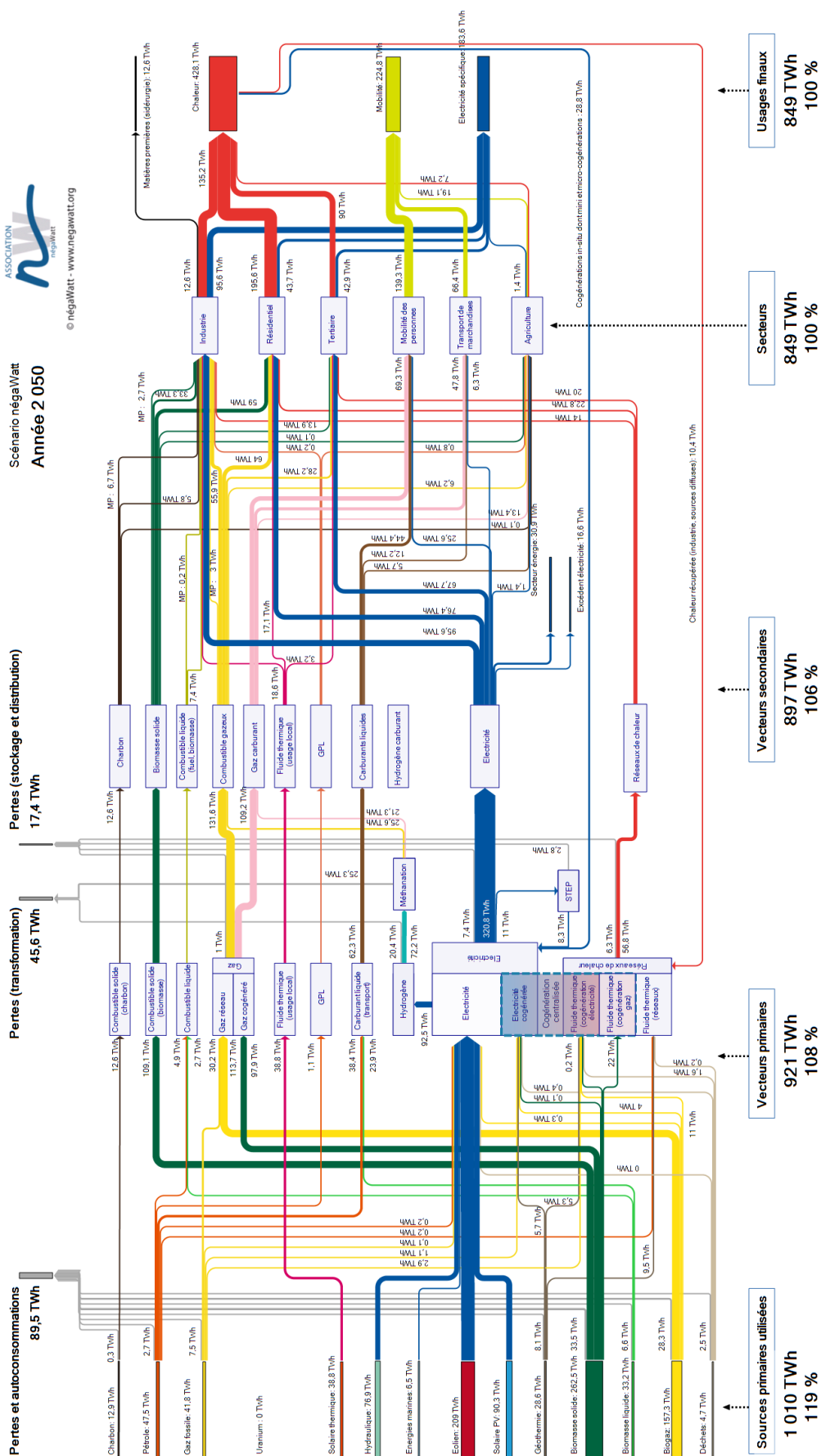


Figure 84 : Diagramme de Sankey pour la France, en 2050

2. Impact sur les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES)

2.1. Emissions du secteur énergétique

Malgré la fin de la production d'électricité d'origine nucléaire, les émissions de GES liées à la combustion d'énergies fossiles diminuent nettement entre 2010 et 2050 : elles sont divisées par un facteur 15 (facteur 2 en 2030). La très forte baisse de l'utilisation du pétrole dans le secteur des transports constitue de loin la première source de réduction d'émission de CO₂, et le développement des énergies renouvelables permet de compenser à la fois cette réduction du pétrole mais aussi celle du nucléaire.

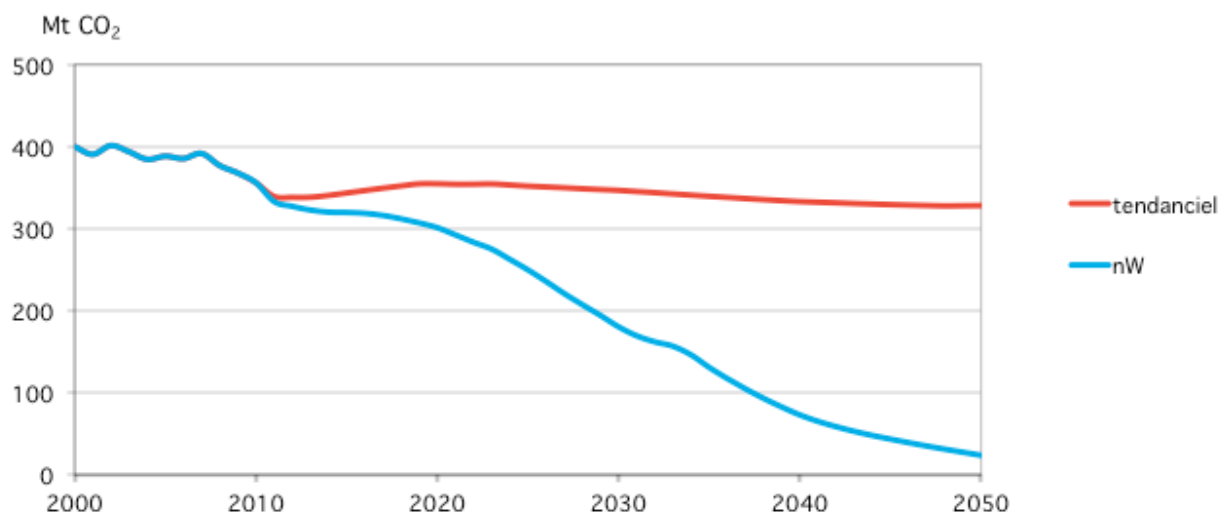


Figure 85 : Évolution comparée des émissions de CO₂ liées à l'énergie dans les scénarios tendanciel et négaWatt

Si pour un scénario donné le facteur de réduction à 2050 des émissions de CO₂ est une valeur qui permet facilement une comparaison avec les objectifs de facteur 4, c'est davantage le cumul de ces émissions qui, d'un point de vue physique, a son importance dans l'évaluation de l'impact d'une politique énergétique climatique.

Des chercheurs de l'université de Potsdam⁴⁰ ont calculé, à partir de modèles climatiques, la quantité maximale de CO₂ qu'il est possible d'émettre dans l'atmosphère jusqu'en 2050 tout en conservant 75 % de chances de limiter le risque d'une hausse moyenne de la température à la surface de la Terre à 2 °C en 2100.

D'après ces calculs, le total de toutes les émissions mondiales cumulées entre 2000 et 2050 ne doit pas dépasser, pour le seul CO₂, 1 000 milliards de tonnes. Entre 2000 et 2009, l'humanité a déjà émis dans l'atmosphère 285 milliards de tonnes de CO₂. Il reste donc 715 milliards à émettre pour les quarante années suivantes.

Par ailleurs, les démographes estiment qu'entre 2011 et 2050, la population mondiale va passer de 7 à 9,5 milliards d'habitants. Le poids de la France ne dépasse pas 0,85 % de la population mondiale, ce qui signifie qu'une approche équitable ne nous autorise pas, d'ici à 2050, à dépasser 6 à 7 milliards de tonnes d'émissions cumulées de CO₂ dans l'atmosphère.

⁴⁰Meinshausen M., Meinshausen N., Hare W., Raper S. C. B., Frieler K., Knutti R., Frame D. J. et Allen, M. R., *Greenhouse Gas Emission Targets for Limiting Global Warming to 2 °C*, Nature 458, 25 mars 2009

Le scénario négaWatt, avec 7 milliards de tonnes d'émissions cumulées en 2050, reste tout juste dans cette limite. De son côté, le scénario tendanciel dépasse cette valeur maximale d'émission dès 2030.

Milliards de tonnes de CO₂

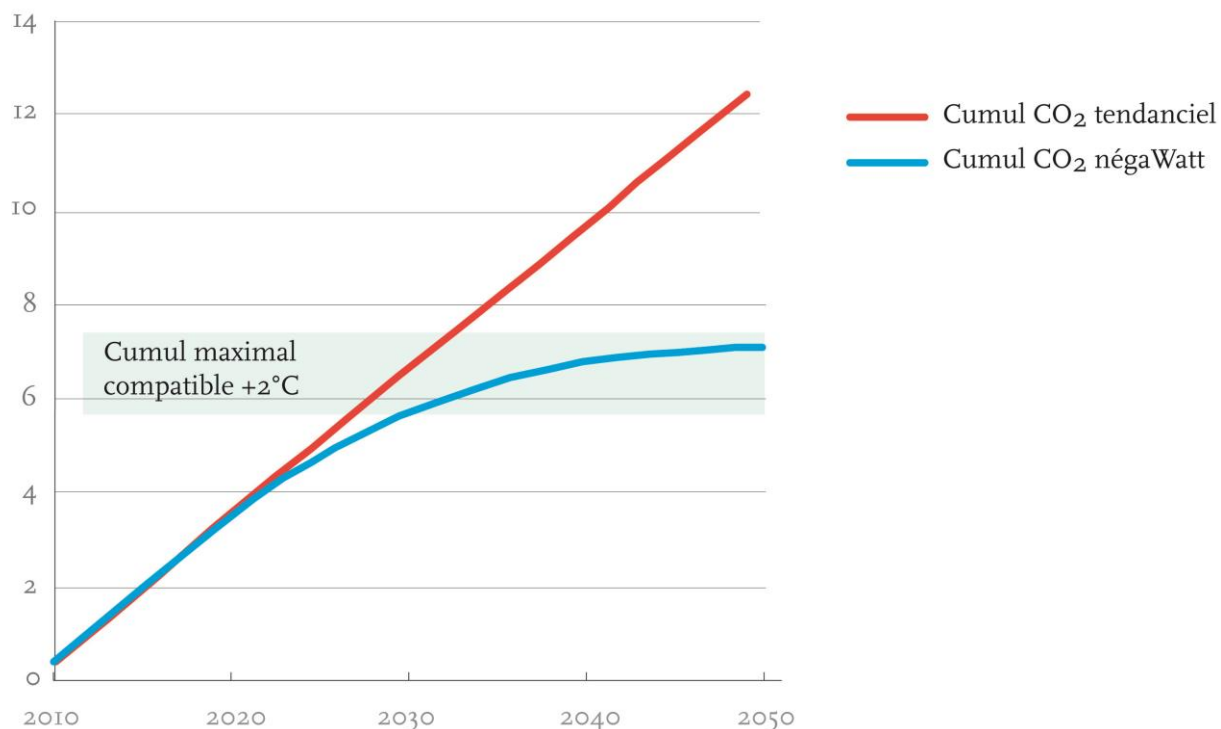


Figure 86 : Cumul des émissions de CO₂ sur la période 2010-2050, dans le scénario négaWatt et dans le scénario tendanciel

Plus que le point d'arrivée, c'est bien la trajectoire 2010-2050 dans sa globalité qui est déterminante.

2.2. Ensemble des émissions de GES

La réduction spectaculaire des émissions de CO₂ engendrées par nos consommations d'énergie dépasse le facteur 4, objectif de la France à l'horizon 2050 présent dans la loi Pope (2005) et la loi Grenelle 1 (2009). Mais cet objectif facteur 4 ne concerne pas le seul CO₂ mais l'ensemble de nos émissions de GES, issues de la combustion d'énergies fossiles mais également du secteur agricole et des déchets (méthane, protoxyde d'azote) et du secteur industriel (méthane, protoxyde d'azote et gaz réfrigérants).

Aujourd'hui la répartition des émissions est la suivante :

- 69 % des émissions de GES relèvent du « CO₂ combustion », émis par la combustion d'énergies fossiles ;
- 22 % des émissions concernent les pratiques agricoles et les déchets,
- 9 % des émissions ont pour origine à un processus industriel ou technologique hors combustion.

La réduction des émissions de GES est soumise à de fortes contraintes dans le secteur agricole : alors que l'INSEE prévoit une augmentation sensible de la population d'ici 2050, il semble difficile, même en faisant

évoluer très sensiblement les productions et les pratiques agricoles, d'atteindre un facteur de réduction sensiblement supérieur à 2.

C'est le résultat obtenu par le scénario Afterres2050 précédemment cité, dont l'évaluation des émissions de GES conclut à un facteur de réduction de « seulement » 2 entre 2010 et 2050, malgré des changements structurels dans les pratiques agricoles observées et dans les modes alimentaires les plus répandus.

Dans le secteur industriel, de fortes réductions des émissions ont déjà été observées entre 1990 et 2011 (facteur 1,7). Cette baisse a porté surtout sur la réduction du N₂O et du CH₄ dans les process, alors que les émissions de CO₂ diminuaient et que celles des gaz fluorés augmentaient considérablement (+ 66 %).

Une très forte baisse supplémentaire des émissions de CO₂ paraît difficile : la majeure partie de ces émissions sont en effet dues à la décarbonatation pour la fabrication de la chaux et du ciment. À l'inverse, une élimination progressive des gaz fluorés peut être envisagée dans les prochaines décennies.

Ainsi, le facteur global de réduction des GES dans le secteur industriel pourrait atteindre 3,5, soit légèrement moins que l'objectif facteur 4.

Au global, ces différents éléments montrent qu'un facteur 6 ou 7 sur les émissions de CO₂ liées à l'énergie est un minimum à atteindre pour parvenir au facteur 4 tous GES en 2050. Avec un facteur 15 sur les émissions de CO₂ énergétiques, le scénario négaWatt parvient à un facteur global de réduction d'environ 6. Ce « bon résultat » est néanmoins à relativiser au regard des éléments suivants, qui incitent à ne pas se contenter du seul respect du facteur 4 :

- les effets à court et moyen termes du méthane mesurés en Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) sont plus importants que ne l'indique les conventions actuelles⁴¹ ;
- les émissions des transports maritimes internationaux ne sont pas comptabilisées dans cette analyse alors qu'elles sont en forte croissance ;
- les émissions des DOM-COM et des PTOM ne sont non plus comptabilisées. Elles aussi se sont très fortement accrues : + 92 % entre 1990 et 2011 ;

Ces biais de calcul sont par ailleurs renforcés dans le cas d'autres exercices prospectifs, leurs auteurs omettant d'une part de comptabiliser les émissions de GES du secteur aérien hors domestique, d'autre part de prendre en considération les émissions induites par l'ensemble des biens manufacturés que nous importons. Loin d'être négligeables, ces émissions externalisées représenteraient en 2010, à l'échelle de l'Union Européenne, une hausse de 20% des émissions recensées⁴². De par ses choix méthodologiques, le scénario négaWatt permet d'éviter ces écueils.

⁴¹ Le PRG du CH₄ à 100 ans a été pris par convention à 21, et c'est cette valeur qui est pris en compte dans les inventaires CITEPA. Elle aujourd'hui estimée à 25.

⁴² « Les émissions incorporées dans les importations des pays industrialisés sont en augmentation constante. En Europe, elles se sont accrues de 37% entre 1990 et 2008. Leur part dans le total des émissions européennes a augmenté de 6% sur cette même période, atteignant 21% des émissions de l'UE » - *Les émissions importées, le passager clandestin du commerce mondial*, Réseau Action Climat - France, novembre 2012.

Rendre possible ce qui est souhaitable

La transition énergétique proposée par le scénario négaWatt n'est pas, loin s'en faut, un saut dans l'inconnu, elle en est même l'inverse. C'est tout autant un chemin de non-regret qu'une voie du moindre risque.

Un chemin de non-regret car si demain d'autres pistes s'offrent à nous, il sera inutile de revenir en arrière : le parcours déjà effectué, jalonné de sobriété et d'efficacité, ne sera plus à faire.

Une voie du moindre risque, à commencer par celui de l'implosion de notre modèle social sous le triple coup de boutoir de la fin des fossiles trop faciles, des effets des bouleversements climatiques et de l'épée de Damoclès d'un accident nucléaire. Mais moindre risque ne veut pas dire frilosité, repli sur soi dans une stratégie purement défensive. Cette voie est aussi celle de la responsabilité de notre génération qui consiste à « *agir pour que les effets de notre action soient compatibles avec la permanence d'une vie authentiquement humaine* » (Hans Jonas). Agir pour léguer aux générations futures des bienfaits et des rentes et non des fardeaux et des dettes.

Ce scénario négaWatt, aussi ambitieux soit-il, n'est fondé que sur des hypothèses technologiquement mûres et économiquement réalistes. Aucune science-fiction ni fausses illusions, mais un chemin de transition balisé, nécessaire pour répondre aux grands enjeux liés à l'énergie. Un chemin résumé en 10 points-clés :

- Une politique très volontariste de sobriété et d'efficacité énergétique, aboutissant à une diminution en 2050 de la demande en énergie primaire de 66 % par rapport à la situation en 2010 : l'exploitation du « gisement de négaWatts » permet de faire les 2/3 du chemin !
- Malgré cette politique, le maintien d'un haut niveau de services énergétiques pour les besoins de chaleur, de mobilité et d'électricité spécifique.
- Un recours prioritaire aux énergies renouvelables qui représentent à terme, en 2050, 90 % de nos ressources énergétiques.
- Une gestion coordonnée des réseaux de gaz, d'électricité et de chaleur permettant de répondre à tout moment aux besoins et d'assurer l'équilibre en puissance.
- Une anticipation de la fin des « fossiles faciles » à l'approche des pics pétrolier et gazier, par la limitation de leur utilisation à la pétrochimie et aux matières premières industrielles, ainsi qu'à quelques usages très spécifiques tels que l'industrie ou l'aviation.
- Par rapport à 2010, des émissions de CO₂ du système énergétique divisées par 2 en 2030 et par 15 en 2050.
- Un système énergétique français presque totalement décarboné malgré un arrêt maîtrisé et cohérent de toute production d'électricité nucléaire en 2033, c'est-à-dire en 22 ans.
- Un cumul des émissions de CO₂ sur la période 2011-2050 conforme, dans une logique d'équité mondiale par rapport au poids démographique de la France, à l'objectif de limiter la hausse moyenne de la température sur Terre en dessous de 2°C d'ici 2100.
- Sur l'usage des sols et l'agriculture, un scénario énergétique équilibré malgré une relocalisation des productions et un recours très important à la biomasse pour la production de matériaux et d'énergie en cohérence avec le scénario Afterres2050 du bureau d'études associatif Solagro.
- Une France avançant vers l'autonomie et la démocratie énergétiques, créant des centaines de milliers d'emplois durables, et redonnant aux territoires et à leurs acteurs une place centrale dans notre paysage énergétique.

Considérer la transition énergétique comme « un fardeau de plus » serait une erreur ; s’y lancer à reculons sans comprendre la chance qu’elle représente, sans percevoir les formidables opportunités qu’elle nous offre serait passer à côté de l’essentiel.

En desserrant l’étau des contraintes, le modèle de transition énergétique proposé par le scénario négaWatt permet de nous désaccoutumer de notre addiction pétrolière et de réduire les effets des graves crises de l’énergie et du climat qui sont devant nous. Il nous invite à progresser, à tous niveaux, vers une autonomie énergétique permettant d’envisager l’avenir avec moins d’incertitudes et plus de capacité de résilience.

Tables des figures et des tableaux

1. Table des figures

Figure 1 : Priorités de la démarche négaWatt	7
Figure 2 : Démarche de modélisation du scénario négaWatt 2011	11
Figure 3 : Diagramme de Sankey - Bilan énergétique de la France pour 2010	12
Figure 4 : Évolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négaWatt).....	13
Figure 5 : Évolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négaWatt).....	19
Figure 6 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la surface totale de logements	20
Figure 7 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la surface totale des bâtiments tertiaires	22
Figure 8 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation liée à l'éclairage dans le secteur résidentiel	27
Figure 9 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel	29
Figure 10 : Consommation moyenne d'électricité spécifique d'un ménage en 2010 et 2050	30
Figure 11 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la proportion des différents types d'éclairages dans les bâtiments du secteur tertiaire	32
Figure 12 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire	34
Figure 13 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'énergie finale pour la cuisson	37
Figure 14 : Scénario négaWatt 2011 : consommation d'électricité spécifique en 2010 et 2050 dans le résidentiel et le tertiaire	37
Figure 15 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'énergie finale pour l'électricité spécifique et la cuisson dans les secteurs résidentiel et tertiaire	38
Figure 16 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie pour le confort thermique dans les logements (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation)	41
Figure 17 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : mise en œuvre de la rénovation thermique des maisons individuelles.....	43
Figure 18 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : mise en œuvre de la rénovation thermique des logements collectifs.....	43
Figure 19 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles.....	46
Figure 20 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans les logements collectifs	47
Figure 21 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la consommation d'énergie finale pour le chauffage dans le secteur résidentiel.....	49
Figure 22 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les maisons individuelles	50
Figure 23 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les logements collectifs	51

Figure 24 : Évolution des rendements moyens sur l'ensemble du parc de logements collectifs des différents systèmes de préparation d'eau chaude sanitaire.....	52
Figure 25 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées au confort thermique dans le secteur tertiaire	54
Figure 26 : Évolution de la structure du parc dans le secteur tertiaire	55
Figure 27 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans les bâtiments tertiaires (en % des surfaces chauffées).....	56
Figure 28 : Scénario négaWatt 2011 et scénario tendanciel : évolution de la répartition des systèmes de production d'eau chaude dans les bâtiments tertiaires.....	57
Figure 29 : Évolution des surfaces climatisées dans le secteur tertiaire	58
Figure 30 : Évolution de la consommation d'énergie finale nécessaire pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation dans le secteur du bâtiment.....	59
Figure 31 : Évolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment	60
Figure 32 : Évolution des vecteurs secondaires dans le secteur du bâtiment.....	61
Figure 33 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de personnes	66
Figure 34 : Mobilité des personnes : évolution des kilomètres parcourus par habitant et par an	70
Figure 35 : Mobilité des personnes : évolution de la consommation d'énergie finale.....	74
Figure 36 : Mobilité des personnes : répartition et évolution des consommations d'énergie finale.....	74
Figure 37 : Transport de marchandises : évolution des parts modales depuis 1985	75
Figure 38 : Transport de marchandises : évolution des Gt.km transportées par mode de transport	76
Figure 39 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de marchandises.....	77
Figure 40 : Évolution des consommations d'énergie dans le secteur du transport des marchandises.....	79
Figure 41 : Évolution des consommations d'énergie par mode de transport	80
Figure 42 : Projections tendanciennes sur la consommation d'énergie, la production industrielle et l'intensité énergétique	81
Figure 43 : Bilan production, consommation et solde des importations / exportations de l'industrie.....	82
Figure 44 : Application de la démarche négaWatt à la demande énergétique dans l'industrie.....	82
Figure 45 : Méthodologie de détermination des consommations d'énergie dans l'industrie.....	83
Figure 46 : Matrice de consommation de biens en France en 2010.....	84
Figure 47 : Déterminants pris en compte pour le calcul des consommations additionnelles liées aux constructions et au programme de rénovations thermiques.....	86
Figure 48 : Gain énergétique rendu possible grâce au recyclage	87
Figure 49 : Répartition des coûts d'utilisation d'un moteur électrique	90
Figure 50 : Substituabilité des sources	93
Figure 51 : Récupération d'énergie et cogénération	95
Figure 52 : Impact de la relocalisation sur la consommation d'énergie de l'industrie par rapport à un scénario tendanciel	96
Figure 53 : Bilan en 2050 de la sobriété et de la relocalisation sur la consommation énergétique de l'industrie	97
Figure 54 : Impact de la sobriété, du recyclage et de l'efficacité par rapport à une consommation d'énergie tendancielle de l'industrie majorée de la relocalisation.....	97
Figure 55 : Évolution du régime alimentaire moyen entre 2010 et 2050.....	100

Figure 56 : Impact du prix moyen du bois bord de route sur la disponibilité supplémentaire de bois industrie/bois énergie (BIBE) ET de menus bois (MB)	105
Figure 57 : Développement des énergies renouvelables électriques	111
Figure 58 : Eolien terrestre : évolution de la production.....	112
Figure 59 : Eolien terrestre : évolution de la puissance installée	113
Figure 60 : Eolienne « flottante », ou « ancrée ».....	115
Figure 61 : Eolien : évolution de la puissance installée et de la production.....	116
Figure 62 : Liste des zones présentant un faible potentiel de conflit d'usage pour l'installation de parcs photovoltaïques au sol	119
Figure 63 : Surfaces artificialisées en 2010 et surfaces occupées par le photovoltaïque en 2050, en hectares	120
Figure 64 : Photovoltaïque : évolution de la puissance installée et de la production	121
Figure 65 : Évolution des surfaces de capteurs solaires thermiques installés pour les différents usages envisagés. ...	125
Figure 66 : Développement des différentes filières renouvelables dans le scénario négaWatt (en TWh)	127
Figure 67 : Optimisation des contraintes sur le rythme de fermeture du parc de réacteurs nucléaires	129
Figure 68 : Le parc nucléaire dans le scénario négaWatt (en TWh)	130
Figure 69 : Évolution des consommations de pétrole, de gaz naturel fossile et de charbon	131
Figure 70 : Liste des usages de l'électricité recensés	133
Figure 71 : Exemple de courbe de charge d'un usage : l'audio-visuel	133
Figure 72 : Exemple de courbe de charge d'un usage : l'éclairage résidentiel au mois de mars	134
Figure 73 : Pour chaque usage, méthode de reconstitution de la puissance électrique appelée	134
Figure 74 : Reconstitution de la production horaire des filières non-dispatchables	135
Figure 75 : Capacité et temps de décharge des différents moyens de stockage de l'électricité (source Etogas)	138
Figure 76 : Ordre de mérite des moyens conventionnels appelés	139
Figure 77 : Ordre de mérite des mécanismes d'ajustement entre l'offre et la demande d'électricité dans le scénario négaWatt	140
Figure 78 : Complémentarité des réseaux et rôle de la méthanation	142
Figure 79 : Évolution des besoins en énergie finale, de la sobriété, de l'efficacité et de la part d'énergies fossiles et fissile et d'énergies renouvelables par grand usage (en TWh)	144
Figure 80 : Évolution comparée des productions en énergies primaires par source entre le scénario tendanciel (à gauche) et le scénario négaWatt 2011 (en TWh)	145
Figure 81 : Évolution de la répartition de la consommation d'énergie primaire en fonction des usages, dans le scénario tendanciel (à gauche) et dans le scénario négaWatt 2011 (à droite)	145
Figure 82 : Évolution des différents vecteurs d'énergie	146
Figure 83 : Diagramme de Sankey pour la France, en 2010	147
Figure 84 : Diagramme de Sankey pour la France, en 2050	148
Figure 85 : Évolution comparée des émissions de CO ₂ liées à l'énergie dans les scénarios tendanciel et négaWatt	149
Figure 86 : Cumul des émissions de CO ₂ sur la période 2010-2050, dans le scénario négaWatt et dans le scénario tendanciel	150

2. Table des tableaux

Tableau 1 : Détail des services désagrégés pour la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel .	24
Tableau 2 : Détail des services désagrégés pour la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire	31
Tableau 3 : Rythme de rénovation du parc résidentiel dans le scénario négaWatt	42
Tableau 4 : Rythme de rénovation annuel dans le secteur tertiaire	54
Tableau 5 : Détail des paramètres d'analyse de la mobilité des personnes	64
Tableau 6 : Mobilité régulière et locale - méthodologie	65
Tableau 7 : Taux de relocalisation de la production de biens en France	85
Tableau 8 : Taux de collecte et taux de recyclage en France.....	87
Tableau 9 : Efficacité énergétique envisagée dans le secteur industriel	88
Tableau 10 : Gisement d'économie d'électricité dans le secteur industriel	89
Tableau 11 : Gisement d'économie de combustibles dans le secteur industriel	91
Tableau 12 : Industrie : exemples d'économies spécifiques	92
Tableau 13 : Méthanation : Puissance installée et production annuelle.....	139
Tableau 14 : Évolution du secteur résidentiel	160
Tableau 15 : Évolution du secteur tertiaire	160
Tableau 16 : Par rapport à 2010, évolution de l'efficacité transverse dans l'électricité spécifique dans le secteur résidentiel	161
Tableau 17 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux lave-linges et sèche-linges dans le secteur résidentiel	161
Tableau 18 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux lave-vaisselles dans le secteur résidentiel	162
Tableau 19 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la production de froid dans le secteur résidentiel	162
Tableau 20 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'éclairage dans le secteur résidentiel	163
Tableau 21 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'audio-visuel, l'information et la communication dans le secteur résidentiel.....	163
Tableau 22 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée au nettoyage, à l'hygiène et au bricolage dans le secteur résidentiel	165
Tableau 23 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la gestion des locaux dans le secteur résidentiel	166
Tableau 24 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel	167
Tableau 25 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'éclairage dans le secteur tertiaire	167
Tableau 26 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'informatique dans le secteur tertiaire.....	168
Tableau 27 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux services hors éclairage et informatique dans les bâtiments tertiaires	168
Tableau 28 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à différents secteurs spécifiques dans le secteur tertiaire	169
Tableau 29 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire	170
Tableau 30 : Scénario négaWatt et scénario tendanciel : évolution du nombre et de la répartition des repas	170

Tableau 31 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à la cuisson dans le secteur résidentiel	170
Tableau 32 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à la cuisson dans le secteur tertiaire	171
Tableau 33 : Évolution de la consommation d'énergie finale pour la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire	172
Tableau 34 : Évolution de la consommation d'énergie finale pour l'électricité spécifique et la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire	172
Tableau 35 : Évolution de la performance thermique des maisons individuelles sous l'effet des constructions neuves et de la rénovation.....	173
Tableau 36 : Évolution de la performance thermique des logements collectifs sous l'effet des constructions neuves et de la rénovation.....	174
Tableau 37 : Évolution du rendement des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles et les logements collectifs.....	175
Tableau 38 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans les maisons individuelles	176
Tableau 39 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans les logements collectifs	177
Tableau 40 : Évolution des consommations d'énergies utile et finale pour le chauffage dans le résidentiel	178
Tableau 41 : Évolution de la consommation d'eau chaude dans le résidentiel.....	178
Tableau 42 : Évolution du rendement des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les maisons individuelles et les logements collectifs	179
Tableau 43 : Hypothèses formulées pour la climatisation dans le résidentiel	179
Tableau 44 : Besoins moyens de chauffage par m ² de surface dans le tertiaire	180
Tableau 45 : Évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans le secteur tertiaire (en % des surfaces chauffées)	180
Tableau 46 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans le secteur tertiaire	181
Tableau 47 : Consommation d'eau moyenne quotidienne par m ² de surface dans le tertiaire.....	181
Tableau 48 : Évolution de la répartition des systèmes de production d'eau chaude dans le secteur tertiaire.....	182
Tableau 49 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à l'ECS dans le secteur tertiaire	182
Tableau 50 : Besoins en climatisation et consommations correspondantes par secteur	182
Tableau 51 : Évolution de la consommation d'énergie finale nécessaire pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation dans le secteur du bâtiment.....	183
Tableau 52 : Évolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment.....	183
Tableau 53 : Évolution des vecteurs secondaires dans le secteur du bâtiment	184
Tableau 54 : Évolution des voyageurs.km/hab parcourus entre 2008 et 2050 pour la mobilité longue distance (hors "Autre mobilité")	185
Tableau 55 : Évolution des voyageurs.km parcourus par mode de transport et par habitant	186
Tableau 56 : Mobilité régulière et locale : évolutions des parts modales en fonction du type d'urbanisme.....	187
Tableau 57 : MRL : Évolution des voyageurs.km/hab (hors marche à pied)	189
Tableau 58 : Mobilité longue distance - Évolution des parts modales en fonction de la longueur du déplacement et de son motif.....	190
Tableau 59 : Évolution des parts modales par mode de transport, en % des voyageurs.km	193
Tableau 60 : Évolution des voyageurs.km/hab par mode de transport	193
Tableau 61 : Répartition par vecteur pour chaque mode de déplacement (en % du nombre de voyageurs.km parcourus pour chaque mode)	194

Tableau 62 : Evolution de la consommation unitaire des voitures individuelles	195
Tableau 63 : Évolution des Gt.km transportées et des parts modales, par mode de transport.....	195
Tableau 64 : Évolution des types de carburants pour le transport des marchandises (en % des Gt.km transportées) .	196
Tableau 65 : Évolution des consommations unitaires par mode de transport et par motorisation	197
Tableau 66 : Principales hypothèses sur les réductions de consommation liées à la sobriété	198
Tableau 67 : Hypothèses de réduction et de réutilisation des emballages	198
Tableau 68 : Impact sur la production de la réutilisation et de la réduction des emballages	198
Tableau 69 : Évolution de la répartition des surfaces en constructions neuves et rénovations	199
Tableau 70 : Évolution de la répartition des matériaux utilisés dans les constructions neuves	200
Tableau 71 : Évolution de la répartition des isolants utilisés dans les constructions neuves et les rénovations	201
Tableau 72 : Évolution de la répartition des châssis utilisés dans les menuiseries dans les constructions neuves et les rénovations.....	201
Tableau 73 : Tonnages de matières consommées par la production industrielle	201
Tableau 74 : Taux de recyclage des matières dans la production industrielle	202
Tableau 75 : Estimation CEREN du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 - Industrie française	202
Tableau 76 : Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour la Compression Mécanique de Vapeur (CMV) et les Pompes A Chaleur (PAC)	202
Tableau 77 : Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour les fours par passage à l'induction	202
Tableau 78 : Évolution du mix énergétique pour les process industriels	203
Tableau 79 : Part des combustibles plastiques (déchets) venant en substitution des combustibles fossiles	203
Tableau 80 : Part de biomasse dans le combustible des hauts-fourneaux.....	203
Tableau 81 : Performance des cogénérateurs	203
Tableau 82 : Potentiel net de cogénération	203
Tableau 83 : Évolution du mix énergétique pour la cogénération	204
Tableau 84 : Consommation d'énergie dans l'agriculture	204
Tableau 85 : Biomasse : ressources brutes (TWh PCI)	205
Tableau 86 : Origine du bois énergie	205
Tableau 87 : Biomasse : production de bois et prélèvements.....	205
Tableau 88 : Biomasse : vecteurs énergétiques et énergies finales	206
Tableau 89 : Évolution des sources de production d'électricité	207
Tableau 90 : Évolution de la consommation d'énergie primaire	208
Tableau 91 : Évolution des vecteurs primaires	208
Tableau 92 : Vecteur gaz - Ressources et usages.....	209
Tableau 93 : Évolution de la consommation d'énergie finale, par secteur et par usage	209
Tableau 94 : Mobilité - évolution des consommations d'énergie finale.....	210
Tableau 95 : Chaleur - évolution des consommations d'énergie finale.....	210

Annexe 1 - hypothèses et résultats du secteur du bâtiment

Tableau 14 : Évolution du secteur résidentiel

		2010	2020	2030	2040	2050
Population totale	x 1 000	62 881	65 962	68 532	70 734	72 275
Part de population hors ménage	%	2,37%	2,61%	2,83%	3,06%	3,28%
Nombre de personnes par ménage	pers.	2,25	2,17	2,15	2,18	2,20
Nombre de ménages	x 1 000	27 254	29 585	30 933	31 406	31 784
Nombre de maisons individuelles (total)	x 1 000	15 374	16 606	17 163	17 256	17 239
Nombre de logements collectifs (total)	x 1 000	11 880	12 979	13 770	14 149	14 544
Maisons individuelles (MI) neuves	x 1 000/an	175	113	48	20	18
Logements collectifs (LC) neufs	x 1 000/an	138	120	75	48	71
Surface moyenne MI neuves	m2	130,5	131	131	131	131
Surface moyenne LC neufs	m2	73	73	73	73	73
Surface moyenne logements neufs	m2	105	101	95	90	85
Surface totale / ensemble des MI	millions m2	1 689	1 859	1 942	1 964	1 971
Surface totale / ensemble des LC	millions m2	786	867	926	955	985
Surface moyenne des logements	m2	90,8	92,2	92,7	92,9	93,0
Surface moyenne par habitant	m2/pers.	39,4	41,3	41,8	41,3	40,9

Tableau 15 : Évolution du secteur tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050
Population totale	x 1 000	62 881	65 962	68 532	70 734	72 275
Surface tertiaire par habitant	m2/pers.	14,836140 67	16,117396 93	16,622227 13	16,65544 46	16,680035 28
Surface tertiaire totale	millions m2	932,9	1 063,1	1 139,2	1 178,1	1 205,5
Cafés, hôtels	millions m2	64,2	74,4	80,3	82,9	84,7
Habitat communautaire	millions m2	64,7	76,5	87,8	95,4	100,1
Santé, action sociale	millions m2	108,0	124,8	141,8	154,0	161,6
Enseignement, recherche	millions m2	184,3	204,0	209,8	211,0	214,5
Sport, loisirs	millions m2	73,4	86,8	94,2	97,4	99,5
Bureaux, administrations	millions m2	205,3	237,8	250,4	253,5	255,0
Commerces	millions m2	207,7	231,8	246,6	254,6	260,2
Transport	millions m2	25,3	27,0	28,3	29,2	29,9

Tableau 16 : Par rapport à 2010, évolution de l'efficacité transverse dans l'électricité spécifique dans le secteur résidentiel

	2020	2030	2040	2050
Efficacité des veilles	14%	61%	88%	91%
Efficacité de l'électronique	3%	61%	88%	91%
Efficacité des fonctions chauffage (lave-linge, lave-vaisselle, ...)	1%	61%	88%	91%
Efficacité des petits moteurs (< 20 W)	1%	61%	88%	91%
Efficacité des gros moteurs (> 20 W - lave-linge, sèche-linge, ...)	4%	61%	88%	91%
Efficacité des appareils de froid	3%	20%	37%	40%

Tableau 17 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux lave-linges et sèche-linges dans le secteur résidentiel

			2010	2020	2030	2040	2050
Lave-linge	Consommation annuelle	GWh/an	4 714	4 783	3 497	2 502	2 382
	Conso. veille totale	GWh/an	113	105	51	16	12
	Veille	W	10	8	4	1	1
	% d'appareils en veille	%	5%	5%	5%	5%	5%
	Taux d'équipement	%	96%	96%	96%	96%	96%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	176	165	116	82	78
	Nombre total de cycles	unité/an	242	233	194	166	161
	Taux de remplissage	%	40%	42%	50%	58%	60%
	Part de cycles 30/40°C	%	70%	71%	80%	88%	89%
	Part de cycles 50/60°C	%	24%	23%	17%	10%	9%
	Part de cycles 70/90°C	%	6%	6%	4%	2%	2%
	Conso. cycle - moteur	Wh/cycle	123	118	92	66	61
	Conso. 30°C - chauff.	Wh/cycle	436	431	403	375	370
	Conso. 50°C - chauff.	Wh/cycle	2236	2206	2044	1883	1854
	Conso. 90°C - chauff.	Wh/cycle	2 113	2 088	1 953	1 817	1 793
Sèche-linge	Consommation annuelle	GWh/an	5 616	6 301	4 598	2 710	2 457
	Conso. veille totale	GWh/an	40	41	19	4	3
	Veille	W	10	8	4	1	1
	% d'appareils en veille	%	5%	5%	5%	5%	5%
	Taux d'équipement	%	34%	37%	35%	27%	25%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	604	570	424	321	306
	Nombre total de cycles	unité/an	242	233	194	166	161
	Consommation par cycle	Wh/cycle	2 495	2 447	2 188	1 940	1 897
	Durée des cycles	h	1,68	1,67	1,63	1,58	1,57
	Conso. / heure - moteur	Wh/h	149	143	111	79	74
	Conso. / heure - chauff.	Wh/h	1 337	1 321	1 235	1 150	1 134

Tableau 18 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux lave-vaisselles dans le secteur résidentiel

			2010	2020	2030	2040	2050
Lave-vaisselle	Consommation annuelle	GWh/an	6 052	6 749	5 930	4 655	4 516
	Conso. veille totale	GWh/an	60	64	37	12	9
	Veille	W	10	8	4	1	1
	% d'appareils en veille	%	5%	5%	5%	5%	5%
	Taux d'équipement	%	51%	58%	69%	71%	71%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	431	387	275	208	200
	Nombre total de cycles	unité/an	310	282	220	184	180
	Nombre couverts / cycle	unité/cycle	6	6	8	10	10
	Conso. / cycle - moteur	Wh/h	198	190	148	106	98
	Conso. / cycle - chauff.	Wh/h	1 193	1 179	1 103	1 026	1 013

Tableau 19 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la production de froid dans le secteur résidentiel

			2010	2020	2030	2040	2050
Réfrigérateur	Consommation annuelle	GWh/an	4 626	2 850	1 193	857	815
	Conso. veille totale	GWh/an	277	139	25	5	3
	Veille	W	5,4	4,6	2,1	0,6	0,5
	% d'appareils en veille	%	32%	29%	21%	13%	11%
	Taux d'équipement	%	40%	26%	15%	15%	15%
	Taux de 2ème équipement	%	28%	15%	6%	5%	5%
	Taux d'utilisation du 2ème	%	80%	80%	80%	80%	80%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	255	245	191	141	133
	Volume moyen	l	253	250	237	223	221
	Conso. / volume	Wh/l	1010	979	806	633	603
Combiné	Consommation annuelle	GWh/an	7762	9235	8103	6052	5762
	Conso. veille totale	GWh/an	253	269	141	44	34
	Veille	W	5,4	4,6	2,1	0,6	0,5
	% d'appareils en veille	%	33%	33%	33%	33%	33%
	Taux d'équipement	%	60%	68%	74%	74%	74%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	463	444	346	257	242
	Volume moyen	l	320	317	300	283	280
	Conso. / volume	Wh/l	1447	1402	1155	907	864
Congélateur	Consommation annuelle	GWh/an	9210	8444	4806	2958	2775
	Conso. veille totale	GWh/an	31	26	9	2	2
	Veille	W	1	1	0	0	0
	% d'appareils en veille	%	22%	22%	22%	22%	22%
	Taux d'équipement	%	60%	52%	37%	30%	30%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	566	543	423	314	296
	Volume moyen	l	255	253	239	226	223
	Conso. / volume	Wh/l	2220	2151	1771	1391	1325

Tableau 20 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'éclairage dans le secteur résidentiel

		2010	2020	2030	2040	2050
Consommation annuelle	GWh/an	9 169	5 411	3 921	3 008	2 603
Conso. annuelle / logt	kWh	336	183	127	96	82
Durée fonctionnement	h	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Lumière fournie	lumen	8 628	8 755	8 807	8 829	8 838
Surface moyenne	m2	90,8	92,2	92,7	92,9	93,0
Intensité de l'éclairage	Lux/m2	95	95	95	95	95
Efficacité moyenne	lm/W	18,0	33,5	48,6	64,5	75,5
Part incandescent	%	61%	24%	0%	0%	0%
Part halogène HT	%	11%	11%	13%	10%	7%
Part halogène BT	%	15%	15%	13%	5%	2%
Part LFC & fluorescent	%	13%	44%	40%	18%	13%
Part LED	%	0%	4%	25%	46%	50%
Part OLED	%	0%	2%	9%	21%	28%
Efficacité incandescent	lm/W	11	11,6	14,0	14,6	14,6
Efficacité halogène BT	lm/W	23,2	23,5	24,9	25,2	25,2
Efficacité halogène HT	lm/W	15	15,3	16,7	17,0	17,0
Efficacité LFC & fluo.	lm/W	50	50,7	52,5	54,3	54,9
Efficacité LED	lm/W	50	52,0	59,3	70,7	78,0
Efficacité OLED	lm/W	70	72,0	79,3	90,7	98,0

Tableau 21 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'audio-visuel, l'information et la communication dans le secteur résidentiel

			2010	2020	2030	2040	2050
Téléviseur	Consommation annuelle	GWh/an	8 078	8 243	4 391	1 063	545
	Conso. veille totale	GWh/an	595	524	160	15	6
	Veille	W	3,8	3,2	1,5	0,5	0,3
	% d'appareils en veille	%	50%	50%	50%	50%	50%
	Taux d'équipement	%	100%	94%	60%	19%	10%
	Taux de 2ème équipement	%	32%	30%	19%	6%	3%
	Taux d'utilisation du 2ème	%	17%	17%	17%	17%	17%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	261	262	217	171	163
	Nb d'heures d'utilisation	h	2112	2186	2200	2200	2200
	Puissance moyenne	W	124	120	99	78	74
Ordinateur	Puissance / diagonale	W/cm	2	2	1	1	1
	Taille écran (diagonale)	cm	72	72	72	72	72
	Consommation annuelle	GWh/an	5457	7360	3727	852	434
	Conso. veille totale	GWh/an	1157	1478	461	44	18
	Veille	W	10,0	8,5	3,9	1,2	0,9
	% d'appareils en veille	%	50%	50%	50%	50%	50%
	Taux d'équipement	%	72%	88%	57%	18%	9%
	Taux de 2ème équipement	%	26%	45%	30%	9%	5%

	Taux d'utilisation du 2ème	%	40%	40%	40%	40%	40%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	193	187	154	121	115
	Nb d'heures d'utilisation	h	1825	1825	1825	1825	1825
	Puissance moyenne	W	106	103	84	66	63
Chaîne hi-fi	Consommation annuelle	GWh/an	1086	1159	544	111	55
	Conso. veille totale	GWh/an	491	491	159	15	6
	Veille	W	5,0	4,3	2,0	0,6	0,5
	% d'appareils en veille	%	50%	50%	50%	50%	50%
	Taux d'équipement	%	67%	71%	48%	15%	8%
	Taux de 2ème équipement	%	16%	18%	12%	4%	2%
	Taux d'utilisation du 2ème	%	0%	0%	0%	0%	0%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	33	32	26	21	20
	Nb d'heures d'utilisation	h	1095	1095	1095	1095	1095
	Puissance moyenne	W	30	29	24	19	18
DVD, box...	Consommation annuelle	GWh/an	4895	5952	2640	575	293
	Conso. veille totale	GWh/an	1692	1824	357	11	2
	Veille	W	7,0	6,0	2,8	0,8	0,6
	% d'appareils en veille	%	90%	85%	54%	17%	9%
	Taux d'équipement	%	54%	64%	41%	13%	7%
	Taux de 2ème équipement	%	59%	75%	48%	15%	8%
	Taux d'utilisation du 2ème	%	100%	100%	100%	100%	100%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	104	101	83	65	62
	Nb d'heures d'utilisation	h	4750	4750	4750	4750	4750
	Puissance moyenne	W	22	21	18	14	13
Téléphonie	Consommation annuelle	GWh/an	617	503	143	13	5
	Conso. veille totale	GWh/an	608	495	139	12	4
	Veille	W	3,0	2,6	1,2	0,4	0,3
	% d'appareils en veille	%	100%	100%	100%	100%	100%
	Taux d'équipement	%	85%	75%	43%	12%	6%
	Taux de 2ème équipement	%	0%	0%	0%	0%	0%
	Taux d'utilisation du 2ème	%	0%	0%	0%	0%	0%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
	Nb d'heures d'utilisation	h	51,0	51,0	51,0	51,0	51,0
	Puissance moyenne	W	7,0	6,8	5,6	4,4	4,2
Système AVU	Consommation annuelle	GWh/an	1,0	507,4	3089,5	4713,6	4937,5
	Conso. veille totale	GWh/an	0,1	59,0	216,8	135,6	116,0
	Veille	W	5,1	4,3	2,0	0,6	0,5
	% d'appareils en veille	%	100%	100%	100%	100%	100%
	Taux d'équipement	%	0%	5%	40%	81%	90%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	308	290	233	180	169
	Nb terminaux mobiles	unités	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0
	Conso. / terminal mobile	kWh	1,6	1,5	1,3	1,0	1,0
	Nb terminaux fixes	unités	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0
	Conso. / terminal fixe	kWh	79,8	77,4	63,7	50,1	47,7
	Conso. fonction centrale	kWh	39,9	38,7	31,9	25,0	23,8

Tableau 22 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée au nettoyage, à l'hygiène et au bricolage dans le secteur résidentiel

			2010	2020	2030	2040	2050
Aspirateur	Consommation annuelle	GWh/an	1 680	1 767	1 521	1 213	1 169
	% d'appareils en veille	%	0%	0%	0%	0%	0%
	Taux d'équipement	%	95%	95%	95%	95%	95%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	65	63	52	41	39
	Nb d'heures d'utilisation	h	52	52	52	52	52
	Puissance moyenne	W	1248	1209	995	782	745
Fer à repasser	Consommation annuelle	GWh/an	2 054	2 357	2 220	2 005	1 985
	Conso. veille totale	GWh/an	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Veille	W	3	3	1	0	0
	% d'appareils en veille	%	0%	0%	0%	0%	0%
	Taux d'équipement	%	98%	98%	98%	98%	98%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	77	82	74	65	64
	Nb d'heures d'utilisation	h	52	51	46	41	40
	Puissance moyenne	W	1487	1600	1600	1600	1600
Divers	Consommation annuelle	GWh/an	313	375	998	2404	3022
	Conso. veille totale	GWh/an	63	59	28	9	7
	Veille	W	3,0	2,6	1,2	0,4	0,3
	% d'appareils en veille	%	10%	10%	10%	10%	10%
	Taux d'équipement	%	88%	88%	88%	88%	88%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	10	12	36	86	107
	Nb d'heures d'utilisation	h	52	62	193	503	634
	Puissance moyenne	W	200	197	184	172	169

Tableau 23 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à la gestion des locaux dans le secteur résidentiel

			2010	2020	2030	2040	2050
Circulateurs et pompes	Consommation annuelle	GWh/an	2 001	2 421	1 576	1 005	997
	Conso. veille totale	GWh/an	293	349	220	82	68
	Veille	W	5,1	4,3	2,0	0,6	0,5
	% d'appareils en veille	%	100%	100%	100%	100%	100%
	Taux d'équipement	%	24%	31%	41%	49%	52%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	260	226	108	60	56
	Nb d'heures d'utilisation	h	4335	3896	2263	1591	1564
	% asservissement	%	11%	24%	74%	94%	95%
	Puissance moyenne	W	59,9	58,0	47,8	37,5	35,7
Ventilation	Consommation annuelle	GWh/an	2090	2829	3577	4398	4926
	Conso. veille totale	GWh/an	58	69	43	16	13
	Veille	W	1,0	0,9	0,4	0,1	0,1
	% d'appareils en veille	%	100%	100%	100%	100%	100%
	Taux d'équipement	%	24%	31%	41%	49%	52%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	309	301	282	284	295
	% autoréglable	%	60%	59%	46%	19%	6%
	% hygro	%	40%	40%	36%	24%	20%
	% double flux	%	0%	1%	18%	57%	74%
	Puiss. moy. autoréglable	W	59,4	57,1	44,4	31,7	29,5
	Puiss. moy. hygro	W	59,4	57,1	44,4	31,7	29,5
	Puiss. moy. double flux	W	118,8	114,2	88,8	63,4	58,9
	Durée fonct autoréglable	h	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
	Durée fonct hygro	h	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
	Durée fonct double flux	h	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
Communs	Consommation annuelle	GWh/an	2 165	3 051	3 574	3 700	4 017
	% d'appareils en veille	%	100%	100%	100%	100%	100%
	Taux d'équipement	%	14%	21%	31%	40%	44%
	Conso. annuelle / équipt	kWh	555	490	373	296	287
	dont éclairage	kWh	207	122	89	68	59
	dont ascenseur	kWh	99	95	74	53	49
	dont ventilation	kWh	121	118	110	111	115
	dont circuits	kWh	128	155	101	64	64

Tableau 24 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel

		2010	2020	2030	2040	2050	Variation
Lavage	TWh/an	16,38	17,83	14,02	9,87	9,36	-42,9%
Froid domestique	TWh/an	21,60	20,53	14,10	9,87	9,35	-56,7%
Éclairage	TWh/an	9,17	5,41	3,92	3,01	2,60	-71,6%
Audio, vidéo, comm'	TWh/an	20,13	23,72	14,53	7,33	6,27	-68,9%
Nettoyage, bricolage	TWh/an	4,05	4,50	4,74	5,62	6,18	52,6%
Gestion des locaux	TWh/an	6,25	8,30	8,73	9,10	9,94	58,9%
Consommation totale	TWh/an	77,58	80,30	60,05	44,79	43,70	-43,7%

Tableau 25 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'éclairage dans le secteur tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050
Consommation annuelle	GWh/an	24 253	23 393	13 265	8 929	7 981
Conso. surfacique tert.	kWh/m2	26,0	22,0	11,6	7,6	6,6
Durée fonctionnement	h	3 500	3 437	3 162	2 848	2 757
Intensité de l'éclairage	Lux/m2	285	281	262	242	235
Efficacité moyenne	lm/W	38,4	43,9	71,3	90,7	98,0
Part incandescent	%	5%	5%	4%	2%	1%
Part halogène HT	%	10%	9%	7%	3%	1%
Part halogène BT	%	20%	19%	15%	10%	6%
Part LFC & fluorescent	%	65%	66%	62%	57%	52%
Part LED	%	0%	0%	9%	21%	28%
Part OLED	%	0%	1%	3%	8%	12%
Efficacité incandescent	lm/W	11,0	11,5	13,8	14,6	14,6
Efficacité halogène BT	lm/W	23,2	23,5	24,7	25,2	25,2
Efficacité halogène HT	lm/W	15,0	15,3	16,5	17,0	17,0
Efficacité LFC & fluo.	lm/W	50,0	56,9	88,3	99,7	100,0
Efficacité LED	lm/W	50,0	58,3	96,0	109,7	110,0
Efficacité OLED	lm/W	70,0	76,2	104,5	114,8	115,0

Tableau 26 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à l'informatique dans le secteur tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050
Consommation annuelle	GWh/an	21 070	19 322	9 519	7 180	6 947
Conso. surfacique tert.	kWh/m2	22,6	18,2	8,4	6,1	5,8
Conso. veille surfacique	kWh/m2	1,0	0,9	0,3	0,1	0,1
Veille	W	5,5	5,1	2,7	1,5	1,5
% appareils en veille	%	50%	50%	50%	50%	50%
Taux d'équipt poste fixe	nb/mil.m2	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
Taux d'équipt portable	nb/mil.m2	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
Taux d'équipt auxiliaires*	nb/mil.m2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Conso. poste fixe	kWh	500	500	500	500	500
Puiss. moy. poste fixe	W	125	125	125	125	125
Durée fonct poste fixe	h	4000	3966	3621	2879	2534
Conso. portable	kWh	140	133	100	77	71
Puiss. moy. portable	W	40	38	31	28	28
Durée fonct poste fixe	h	3500	3477	3248	2752	2523
Conso. auxiliaire	kWh	2100	1974	1440	1264	1260
Puiss. moy. auxiliaires	W	300	288	231	210	210
Durée fonct auxiliaires	h	7000	6862	6234	6005	6000

* Les auxiliaires informatiques comprennent les serveurs, imprimantes, copieurs...

Tableau 27 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée aux services hors éclairage et informatique dans les bâtiments tertiaires

		2 010	2 020	2 030	2 040	2 050
Consommation annuelle	GWh/an	8 558	9 650	9 928	9 841	9 960
Indice d'évolution	%/m2	100%	100%	100%	100%	100%
Consommation unitaire	kWh/m2	9,2	9,1	8,7	8,4	8,3
Indice d'efficacité	%	100%	99%	95%	91%	90%

Tableau 28 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique liée à différents secteurs spécifiques dans le secteur tertiaire

			2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Éclair. public	Consommation annuelle	GWh/an	7 315	5 605	2 500	2 241	2 196
	Consommation unitaire	kWh/mén.	268	189	81	71	69
	Durée d'éclairage moy.	h	4 160	4 069	3 942	3 938	3 938
	Utilisation moy. luminaire	%	31%	33%	39%	40%	40%
	Efficacité moyenne	lm/W	50	60	100	110	114
	Puissance d'éclairage	lm	1 000	918	804	800	800
	Taux de charge*	%	100%	92%	80%	80%	80%
Gérance	Consommation annuelle	GWh/an	2 216	2 325	1 567	1 401	1 432
	Indice d'évolution	%/m2	100%	100%	100%	100%	100%
	Consommation unitaire	kWh/m2	2,4	2,2	1,4	1,2	1,2
	Indice d'efficacité	%	100%	92%	58%	50%	50%
Télécom.	Consommation annuelle	GWh/an	2 813	2 919	2 912	2 881	2 912
	Indice d'évolution	%/pop.	100%	100%	100%	100%	100%
	Consommation unitaire	kWh/pop.	45	44	42	41	40
	Indice d'efficacité	%	100%	99%	95%	91%	90%
Frigorifique	Consommation annuelle	GWh/an	1 069	1 110	1 107	1 095	1 107
	Indice d'évolution	%/pop.	100%	100%	100%	100%	100%
	Consommation unitaire	kWh/pop.	17	17	16	15	15
	Indice d'efficacité	%	100%	99%	95%	91%	90%
BGC	Consommation annuelle	GWh/an	1 835	1 905	1 900	1 880	1 900
	Indice d'évolution	%/pop.	100%	100%	100%	100%	100%
	Consommation unitaire	kWh/pop.	29	29	28	27	26
	Indice d'efficacité	%	100%	99%	95%	91%	90%
Eau	Consommation annuelle	GWh/an	4 843	5 027	5 015	4 961	5 014
	Indice d'évolution	%/pop.	100%	100%	100%	100%	100%
	Consommation unitaire	kWh/pop.	77	76	73	70	69
	Indice d'efficacité	%	100%	99%	95%	91%	90%
Recherche	Consommation annuelle	GWh/an	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Armées	Consommation annuelle	GWh/an	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500

* Le taux de charge décrit la variation de puissance qui peut être introduite dans le fonctionnement d'éclairages publics.

Tableau 29 : Évolution de la consommation d'électricité spécifique dans le secteur tertiaire

		2010	2 020	2 030	2 040	2050	Variation
Éclairage tertiaire	TWh/an	24,3	23,4	13,3	8,9	8,0	-67,1%
Informatique tertiaire	TWh/an	21,1	19,3	9,5	7,2	6,9	-67,0%
Autres services tertiaires	TWh/an	8,6	9,6	9,9	9,8	10,0	16,4%
Éclairage public	TWh/an	7,3	5,6	2,5	2,2	2,2	-70,0%
Gérance immeubles	TWh/an	2,2	2,3	1,6	1,4	1,4	-35,4%
Secteurs supports*	TWh/an	10,6	11,0	10,9	10,8	10,9	3,5%
Autres**	TWh/an	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	0,0%
Consommation totale	TWh/an	77,5	74,8	51,2	43,9	42,9	-44,6%

* Les secteurs supports incluent les télécommunications, les bâtiments frigorifiques, le bâtiment et génie civil, et l'eau.

** La catégorie « autres » regroupent les secteurs traités forfaitairement, recherche et activités militaires.

Tableau 30 : Scénario négaWatt et scénario tendanciel : évolution du nombre et de la répartition des repas

		2010	2 020	2 030	2 040	2050
Nombre de repas	millions/an	57 379	60 190	62 535	64 545	65 951
Taux de repas pris à l'extérieur	%	11,20%	11,70%	12,20%	12,70%	13,20%
Couverts / ménage - négaWatt 2011	unités/an	1 870	1 796	1 775	1 794	1 801
Couverts / ménage - tendanciel	unités/an	1 870	1 783	1 718	1 675	1 646

Tableau 31 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à la cuisson dans le secteur résidentiel

		2010	2 020	2 030	2 040	2050
Consommation totale cuisson résidentiel	GWh	29 772	28 247	24 995	23 102	22 887
dont - consommation électrique	GWh	11 163	13 156	14 035	14 280	14 345
- consommation GPL	GWh	6 316	3 071	815	46	0
- consommation gaz	GWh	12 293	12 019	10 145	8 776	8 541
Part cuisson plaque	%	18%	18%	18%	18%	18%
Part cuisson four	%	32%	32%	32%	32%	32%
Part cuisson autres	%	50%	50%	50%	50%	50%
Consommation totale plaque résidentiel	GWh	11 194	10 255	9 620	8 994	8 796
dont - consommation électrique	GWh	2 490	3 852	3 974	3 912	3 836
- consommation GPL	GWh	2 206	50	0	0	0
- consommation gaz	GWh	6 498	6 353	5 646	5 082	4 960
Conso. unitaire plaque électrique	kWh	274	257	237	220	212
Conso. unitaire plaque GPL	kWh	486	447	405	378	368
Conso. unitaire plaque gaz	kWh	477	439	398	372	363
Part plaque électrique	%	33%	51%	54%	57%	57%
Part plaque GPL	%	17%	0%	0%	0%	0%

Part plaque gaz	%	50%	49%	46%	43%	43%
Besoin unitaire (chaleur utile)	Wh/repas	520	520	520	520	520
Conso. plaque électrique par repas	Wh/repas	815	794	742	682	653
Rendement moyen électrique	%	64%	66%	70%	76%	80%
Part plaque fonte	%	10%	9%	7%	3%	1%
Part plaque radiante	%	43%	42%	36%	26%	20%
Part plaque à induction	%	47%	49%	57%	71%	79%
Rendement plaque fonte	%	50%	51%	53%	54%	55%
Rendement radiant	%	55%	56%	58%	59%	60%
Rendement induction	%	75%	77%	80%	83%	85%
Conso. plaque GPL par repas	Wh/repas	1 417	1 358	1 247	1 153	1 119
Rendement plaque GPL	%	37%	38%	42%	45%	46%
Conso plaque gaz par repas	Wh/repas	1 443	1 382	1 267	1 170	1 135
Rendement plaque gaz	%	36%	38%	41%	44%	46%
Consommation totale four résidentiel	GWh	11 566	10 794	8 272	7 077	6 998
dont - consommation électrique	GWh	1 661	2 106	2 958	3 337	3 417
- consommation GPL	GWh	4 110	3 021	815	46	0
- consommation gaz	GWh	5 795	5 667	4 499	3 694	3 580
Conso. unitaire four électrique	kWh	221	209	198	193	192
Conso. unitaire four GPL	kWh	815	771	728	709	707
Conso. unitaire four gaz	kWh	830	785	741	722	720
Part four électrique	%	28%	34%	48%	55%	56%
Part four GPL	%	19%	13%	4%	0%	0%
Part four gaz	%	26%	24%	20%	16%	16%
Part foyers sans fours	%	28%	28%	28%	28%	28%
Conso. four électrique par repas	Wh/repas	370	364	348	335	333
Conso. four GPL par repas	Wh/repas	1 363	1 341	1 281	1 235	1 227
Conso. four gaz par repas	Wh/repas	1 388	1 365	1 304	1 258	1 249
Consommation électrique autres usages	GWh	7 012	7 198	7 104	7 031	7 092
Consommation spécifique électrique	kWh/an	257	243	230	224	223
Conso. élec. autres usages par repas	Wh/repas	275	271	259	250	248

Tableau 32 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à la cuisson dans le secteur tertiaire

		2010	2 020	2 030	2 040	2050
Consommation totale cuisson tertiaire	GWh	9 289	9 762	9 297	9 149	9 611
dont - consommation électrique	GWh	4 964	5 904	6 586	6 722	7 078
- consommation GPL	GWh	919	491	13	0	0
- consommation gaz	GWh	3 406	3 367	2 699	2 428	2 533
Part cuisson électrique	%	59%	66%	76%	78%	78%
Part cuisson GPL	%	9%	4%	0%	0%	0%
Part cuisson gaz	%	32%	29%	24%	22%	22%
Consommation électrique par repas	Wh/repas	1 300	1 267	1 141	1 051	1 040
Consommation GPL par repas	Wh/repas	1 635	1 594	1 435	1 322	1 308
Consommation gaz par repas	Wh/repas	1 665	1 623	1 461	1 346	1 332

Tableau 33 : Évolution de la consommation d'énergie finale pour la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire

		2010	2 020	2 030	2 040	2050	Variation
Consommation totale	TWh/an	39,1	38,0	34,3	32,3	32,5	-16,8%
Consommation annuelle							
Dont électricité	TWh/an	16,1	19,1	20,6	21,0	21,4	32,8%
- résidentiel	TWh/an	11,2	13,2	14,0	14,3	14,3	28,5%
- tertiaire	TWh/an	5,0	5,9	6,6	6,7	7,1	42,6%
Dont GPL	TWh/an	7,2	3,6	0,8	0,0	0,0	-100,0%
- résidentiel	TWh/an	6,3	3,1	0,8	0,0	0,0	-100,0%
- tertiaire	TWh/an	0,9	0,5	0,0	0,0	0,0	-100,0%
Dont gaz	TWh/an	15,7	15,4	12,8	11,2	11,1	-29,5%
- résidentiel	TWh/an	12,3	12,0	10,1	8,8	8,5	-30,5%
- tertiaire	TWh/an	3,4	3,4	2,7	2,4	2,5	-25,6%

Tableau 34 : Évolution de la consommation d'énergie finale pour l'électricité spécifique et la cuisson dans le résidentiel et le tertiaire

		2010	2 020	2 030	2 040	2050	Variation
Consommation totale	TWh/an	194,1	193,1	145,6	121,0	119,1	-38,6%
Consommation annuelle							
Électricité spéc. - Résidentiel	TWh/an	77,6	80,3	60,0	44,8	43,7	-44%
Électricité spéc. - Tertiaire	TWh/an	77,5	74,8	51,2	43,9	42,9	-44,6%
Électricité cuisson	TWh/an	16,1	19,1	20,6	21,0	21,4	32,8%
GPL cuisson	TWh/an	7,2	3,6	0,8	0,0	0,0	-100,0%
Gaz cuisson	TWh/an	15,7	15,4	12,8	11,2	11,1	-29,5%

Tableau 35 : Évolution de la performance thermique des maisons individuelles sous l'effet des constructions neuves et de la rénovation

			2010	2020	2030	2040	2050
Total MI	Surface totale	Mm2	1 689	1 859	1 942	1 964	1 971
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	118	363	401	241
	Part rénovée (cumul)	%	0%	6%	28%	55%	77%
	Performance moy.	kWh/m2.an	108	90	67	46	43
MI > 2011	Surface totale	Mm2	0	184	282	320	343
	Nb constructions*	x 1000/an	0	252	134	52	32
	Performance neuf	kWh/m2.an	—	15	15	15	15
	Performance moy.	kWh/m2.an	—	15	15	15	15
MI 1989-2010	Surface totale	Mm2	649	649	649	649	649
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	0	0	35	140
	Part rénovée (cumul)	%	0%	0%	0%	7%	37%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	45	45	45	45
	Performance moy.	kWh/m2.an	44	44	44	44	44
MI 1982-1988	Surface totale	Mm2	175	175	175	175	175
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	0	4	104	0
	Part rénovée (cumul)	%	0%	0%	4%	100%	100%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	45	45	45	45
	Performance moy.	kWh/m2.an	65	65	64	45	45
MI 1975-1981	Surface totale	Mm2	161	161	161	161	161
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	1	97	0	0
	Part rénovée (cumul)	%	0%	1%	100%	100%	100%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	45	45	45	45
	Performance moy.	kWh/m2.an	75	75	45	45	45
MIR < 1975**	Surface totale	Mm2	84	82	80	79	79
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	0	0	0	0
	Part rénovée (cumul)	%	0%	0%	0%	0%	99%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	45	45	45	45
	Performance moy.	kWh/m2.an	80	80	80	80	45
MI < 1975	Surface totale	Mm2	621	608	594	580	565
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	117	262	262	101
	Part rénovée (cumul)	%	0%	15%	51%	89%	91%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	45	45	45	45
	Performance moy.	kWh/m2.an	200	176	121	63	58

* Nombre moyen de constructions ou de rénovations par an sur la décennie écoulée.

** On distingue parmi les logements construits avant 1975 ceux qui ont déjà fait l'objet d'une rénovation avant 2010.

Tableau 36 : Évolution de la performance thermique des logements collectifs sous l'effet des constructions neuves et de la rénovation

			2010	2020	2030	2040	2050
Total LC	Surface totale	Mm2	786	867	926	955	985
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	107	322	349	201
	Part rénovée (cumul)	%	0%	9%	37%	68%	95%
	Performance moy.	kWh/m2.an	105	87	62	42	37
LC > 2011	Surface totale	Mm2	0	92	163	203	245
	Nb constructions*	x 1000/an	0	126	96	56	58
	Performance neuf	kWh/m2.an	—	15	15	15	15
	Performance moy.	kWh/m2.an	—	15	15	15	15
LC 1989-2010	Surface totale	Mm2	155	155	155	155	155
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	0	0	27	110
	Part rénovée (cumul)	%	0%	0%	0%	13%	63%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	40	40	40	40
	Performance moy.	kWh/m2.an	38	38	38	39	39
LC 1982-1988	Surface totale	Mm2	53	53	53	53	53
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	0	3	84	0
	Part rénovée (cumul)	%	0%	0%	4%	100%	100%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	40	40	40	40
	Performance moy.	kWh/m2.an	60	60	59	40	40
LC 1975-1981	Surface totale	Mm2	54	54	54	54	54
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	1	81	0	0
	Part rénovée (cumul)	%	0%	1%	100%	100%	100%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	40	40	40	40
	Performance moy.	kWh/m2.an	70	70	40	40	40
LCR < 1975**	Surface totale	Mm2	62	61	60	58	58
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	0	0	0	0
	Part rénovée (cumul)	%	0%	0%	0%	0%	99%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	40	40	40	40
	Performance moy.	kWh/m2.an	80	80	80	80	40
LC < 1975	Surface totale	Mm2	461	452	442	431	419
	Nb rénovations*	x 1000/an	0	106	238	238	91
	Part rénovée (cumul)	%	0%	15%	51%	89%	91%
	Performance rénov.	kWh/m2.an	—	40	40	40	40
	Performance moy.	kWh/m2.an	140	125	89	51	49

* Nombre moyen de constructions ou de rénovations par an sur la décennie écoulée.

** On distingue parmi les logements construits avant 1975 ceux qui ont déjà fait l'objet d'une rénovation avant 2010.

Tableau 37 : Évolution du rendement des systèmes de chauffage dans les maisons individuelles et les logements collectifs

			2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Charbon	MI < 1975	%	52%	56%	61%	65%	70%
	MI > 1975	%	53%	57%	61%	66%	70%
	Tous LC	%	56%	59%	63%	66%	70%
Biomasse solide	MI < 1975	%	39%	47%	54%	62%	70%
	MI > 1975	%	27%	38%	49%	59%	70%
	LC < 1975	%	45%	51%	57%	64%	70%
	LC > 1975	%	36%	44%	53%	61%	70%
Bois - Cogénération*	Tous logements	%	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %
Fioul / comb. liquide	Toutes MI	%	72%	72%	73%	74%	75%
	Tous LC	%	66%	68%	71%	73%	75%
Fioul - Cogénération*	Tous logements	%	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %
GPL	Tous logements	%	75%	75%	75%	75%	75%
Gaz réseau	Toutes MI	%	73%	74%	74%	75%	75%
	LC < 1975	%	70%	71%	72%	74%	75%
	LC > 1975	%	71%	72%	73%	74%	75%
Gaz - Cogénération*	Tous logements	%	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %	50 - 60 %
Électricité effet Joule	Tous logements	%	97%	97%	98%	99%	99%
Électricité PAC	Tous logements	COP	2,50	2,88	3,25	3,63	4,00
Réseaux de chaleur	Toutes MI	%	-	77%	84%	91%	98%
	Tous LC	%	70%	73%	75%	78%	80%

* Pour les installations en cogénération, deux rendements sont indiqués correspondant respectivement à deux types de cogénération, clim et suivi clim.

Tableau 38 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans les maisons individuelles

			2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Toutes MI	Consommation totale	GWh	284 366	252 972	182 669	104 979	99 953
MI < 1975	Consommation totale	GWh	201 883	167 801	109 089	43 667	40 423
	Charbon	%	1,1%	0,8%	0,5%	0,1%	0,0%
		GWh	2 319	1 385	580	40	0
	Bois / biomasse solide	%	23,0%	29,4%	34,8%	38,1%	39,0%
		GWh	46 350	49 360	37 995	16 631	15 753
	Fioul / comb. liquide	%	26,4%	20,4%	14,1%	2,7%	0,0%
		GWh	53 370	34 260	15 336	1 166	0
	GPL	%	3,4%	2,7%	1,9%	0,4%	0,0%
		GWh	6 913	4 492	2 035	158	0
	Comb. gaz (réseau)	%	32,8%	32,7%	32,8%	29,8%	29,3%
		GWh	66 146	54 928	35 803	12 994	11 850
	Électricité / effet Joule	%	13,0%	10,4%	7,7%	2,6%	1,4%
		GWh	26 158	17 458	8 389	1 144	580
	Électricité / pompe à chaleur	%	0,3%	2,0%	3,5%	5,0%	5,4%
		GWh	508	3395	3851	2204	2176
	Réseau de chaleur	%	0,0%	1,2%	2,2%	3,4%	3,7%
		GWh	0	1 934	2 409	1 481	1 481
	Solaire thermique*	%	0,1%	0,4%	2,5%	18,0%	21,2%
		GWh	120	589	2 691	7 850	8 583
MI > 1975	Consommation totale	GWh	82 483	85 171	73 580	61 312	59 531
	Charbon	%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		GWh	49	38	22	4	0
	Bois / biomasse solide	%	34,1%	37,1%	40,5%	47,4%	49,5%
		GWh	28 142	31 563	29 777	29 049	29 453
	Fioul / comb. liquide	%	11,5%	9,1%	6,5%	1,5%	0,0%
		GWh	9 462	7 766	4 794	912	0
	GPL	%	2,6%	2,1%	1,5%	0,4%	0,0%
		GWh	2 181	1 812	1 132	220	0
	Comb. gaz (réseau)	%	22,7%	25,2%	28,4%	35,1%	37,2%
		GWh	18 705	21 496	20 909	21 541	22 155
	Électricité / effet Joule	%	28,8%	23,3%	17,2%	5,4%	1,8%
		GWh	23 748	19 857	12 672	3 284	1 085
	Électricité / pompe à chaleur	%	0,2%	2,0%	3,6%	6,1%	6,8%
		GWh	197	1682	2630	3770	4069
	Réseau de chaleur	%	0,0%	1,1%	2,2%	4,1%	4,7%
		GWh	0	958	1 645	2 532	2 768

* Le solaire thermique est installé en système combiné avec les systèmes de chauffage présents dans une partie des maisons individuelles anciennes rénovées.

Tableau 39 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans les logements collectifs

			2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Tous LC	Consommation totale	GWh	112 987	103 892	77 742	48 208	47 321
LC < 1975	Consommation totale	GWh	96 491	83 475	58 264	28 832	27 451
	Charbon	%	0,3%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%
		GWh	243	150	68	7	0
	Bois / biomasse solide	%	0,5%	8,0%	14,6%	24,2%	26,5%
		GWh	448	6 692	8 482	6 966	7 280
	Fioul / comb. liquide	%	11,0%	8,1%	5,4%	1,1%	0,0%
		GWh	10 583	6 734	3 120	313	0
	GPL	%	0,4%	0,3%	0,2%	0,0%	0,0%
		GWh	359	236	113	12	0
	Comb. gaz (réseau)	%	61,2%	53,5%	46,7%	36,6%	34,1%
		GWh	59 040	44 627	27 184	10 553	9 373
	Électricité / effet Joule	%	16,9%	13,2%	9,5%	3,4%	1,7%
		GWh	16 295	11 001	5 551	969	468
	Électricité / pompe à chaleur	%	0,0%	1,3%	2,4%	3,8%	4,2%
		GWh	0	1088	1381	1106	1148
	Réseau de chaleur	%	9,9%	15,5%	21,2%	30,9%	33,4%
		GWh	9 523	12 947	12 366	8 905	9 182
LC > 1975	Consommation totale	GWh	16 496	20 417	19 478	19 375	19 870
	Charbon	%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		GWh	10	8	5	1	0
	Bois / biomasse solide	%	0,4%	9,4%	15,9%	24,5%	26,5%
		GWh	68	1 919	3 105	4 749	5 269
	Fioul / comb. liquide	%	4,6%	3,3%	2,1%	0,4%	0,0%
		GWh	761	668	413	82	0
	GPL	%	0,5%	0,3%	0,2%	0,0%	0,0%
		GWh	74	67	43	9	0
	Comb. gaz (réseau)	%	49,7%	44,0%	40,0%	35,2%	34,1%
		GWh	8 203	8 993	7 794	6 815	6 785
	Électricité / effet Joule	%	37,7%	27,9%	19,2%	5,3%	1,7%
		GWh	6 218	5 700	3 738	1 033	339
	Électricité / pompe à chaleur	%	0,0%	1,4%	2,4%	3,9%	4,2%
		GWh	0	279	473	746	831
	Réseau de chaleur	%	7,0%	13,6%	20,1%	30,7%	33,4%
		GWh	1 162	2 784	3 907	5 941	6 646

Tableau 40 : Évolution des consommations d'énergies utile et finale pour le chauffage dans le résidentiel

		2010	2 020	2 030	2 040	2050	Variation
Énergie utile							
Besoin total	TWh/an	269	252	195	140	129	-51,8%
MI < 1975	TWh/an	134,2	117,0	81,5	45,9	36,5	-72,8%
MI > 1975	TWh/an	51,9	57,7	54,3	51,8	53,7	3,4%
LC < 1975	TWh/an	69,5	61,2	44,1	26,9	22,7	-67,3%
LC > 1975	TWh/an	12,9	15,7	15,1	14,9	16,5	27,3%
Consommation d'énergie finale							
Consommation totale	TWh/an	397,4	356,9	260,4	173,1	147,3	-62,9%
Rendement utile/finale	%	67,6%	70,5%	74,9%	80,6%	87,8%	—
MI < 1975	TWh/an	201,9	167,8	109,1	56,4	40,4	-80,0%
Rendement utile/finale	%	66,5%	69,7%	74,7%	81,5%	90,2%	—
MI > 1975	TWh/an	82,5	85,2	73,6	63,9	59,5	-27,8%
Rendement utile/finale	%	63,0%	67,8%	73,8%	81,2%	90,2%	—
LC < 1975	TWh/an	96,5	83,5	58,3	34,1	27,5	-71,6%
Rendement utile/finale	%	72,1%	73,3%	75,6%	78,8%	82,8%	—
LC > 1975	TWh/an	16,5	20,4	19,5	18,7	19,9	20,5%
Rendement utile/finale	%	78,3%	76,8%	77,5%	79,6%	82,8%	—
Charbon	GWh/an	2 621	1 581	675	170	0	-100,0%
Bois / biomasse solide	GWh/an	75 008	89 533	79 358	60 695	57 756	-23,0%
Fioul / combustible liquide	GWh/an	74 176	49 427	23 663	7 258	0	-100,0%
GPL	GWh/an	9 527	6 608	3 324	1 116	0	-100,0%
Combustible gaz (réseau)	GWh/an	152 093	130 044	91 690	58 934	50 162	-67,0%
Électricité / effet Joule	GWh/an	72 418	60 459	38 683	20 657	10 697	-85,2%
Électricité / pompe à chaleur	GWh/an	704	18 623	20 327	18 119	20 077	2750,2%
Réseau de chaleur	GWh/an	10 685	18 623	20 327	18 119	20 077	87,9%
Solaire thermique	GWh/an	120	589	2 691	6 122	8 583	7050,7%

Tableau 41 : Évolution de la consommation d'eau chaude dans le résidentiel

		2010	2 020	2 030	2 040	2050
Température de l'eau chaude	°C	50°C	50°C	50°C	50°C	50°C
Besoin moyen en maison individuelle	l/pers.j	32,0	28,9	26,2	23,7	21,4
	kWh/pers.an	522	472	427	386	349
Besoin moyen en logement collectif	l/pers.j	21,3	20,3	19,3	18,4	17,5
	kWh/pers.an	348	331	315	299	285

Tableau 42 : Évolution du rendement des systèmes d'eau chaude sanitaire dans les maisons individuelles et les logements collectifs

			2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Charbon	Toutes MI	%	30%	40%	50%	60%	70%
	Tous LC	%	25%	34%	42%	51%	60%
Bois / biomasse solide	Toutes MI	%	18%	31%	44%	57%	70%
	Tous LC	%	22%	32%	41%	51%	60%
Fioul / comb. liquide	MI < 1975	%	52%	56%	61%	65%	70%
	MI > 1975	%	55%	59%	63%	66%	70%
	LC < 1975	%	37%	45%	54%	62%	70%
	LC > 1975	%	40%	47%	55%	62%	70%
GPL	MI < 1975	%	52%	59%	66%	73%	80%
	MI > 1975	%	55%	61%	68%	74%	80%
	LC < 1975	%	37%	45%	54%	62%	70%
	LC > 1975	%	40%	47%	55%	62%	70%
Gaz réseau	MI < 1975	%	52%	59%	66%	73%	80%
	MI > 1975	%	55%	61%	68%	74%	80%
	LC < 1975	%	37%	45%	54%	62%	70%
	LC > 1975	%	40%	47%	55%	62%	70%
Réseau de chaleur	Toutes MI	%	65%	71%	77%	84%	90%
	Tous LC	%	42%	49%	56%	63%	70%
GPL (syst. indépendant)	MI et LC < 1975	%	52%	59%	66%	73%	80%
	MI et LC > 1975	%	55%	61%	68%	74%	80%
Gaz (syst. indépendant)	MI et LC < 1975	%	52%	59%	66%	73%	80%
	MI et LC > 1975	%	55%	61%	68%	74%	80%
Électricité (syst. indép.)	MI < 1975	%	68%	88%	109%	129%	150%
	LC < 1975	%	63%	85%	106%	128%	150%
	MI et LC > 1975	%	69%	90%	110%	130%	150%

Tableau 43 : Hypothèses formulées pour la climatisation dans le résidentiel

		2010	2020	2030	2040	2050
Besoin de climatisation	kWh/m2.an	12	11	11	11	10
Taux d'équipement	%	5%	10%	13%	17%	20%
Coefficient de performance (COP) froid	—	2,2	2,4	2,6	2,8	3
Consommation totale - énergie finale	TWh/an	0,7	1,3	1,6	1,9	2,1

Tableau 44 : Besoins moyens de chauffage par m² de surface dans le tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050
Cafés, hôtels	kWh/m2.an	160	139	100	71	45
Habitat communautaire	kWh/m2.an	98	85	61	44	32
Santé, action sociale	kWh/m2.an	102	91	66	46	34
Enseignement, recherche	kWh/m2.an	83	77	63	49	36
Sport, loisirs	kWh/m2.an	131	113	79	59	42
Bureaux, administrations	kWh/m2.an	133	116	83	59	36
Commerce	kWh/m2.an	100	91	69	48	36
Transport	kWh/m2.an	134	125	84	59	37

Tableau 45 : Évolution de la répartition des systèmes de chauffage dans le secteur tertiaire (en % des surfaces chauffées)

	2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Charbon	2%	2%	1%	1%	0%
Biomasse solide	4%	5%	7%	8%	10%
Biomasse solide / cogénération	0%	2%	4%	6%	8%
Combustible liquide (fuel)	20%	15%	10%	5%	0%
Butane, propane	4%	3%	2%	1%	0%
Comb. gaz	45%	36%	28%	19%	10%
Comb. gaz / cogénération	0%	5%	10%	15%	20%
Électricité (effet Joule)	19%	14%	10%	6%	2%
Électricité (PAC)	0%	5%	10%	15%	20%
Réseaux de chaleur	6%	12%	18%	24%	30%
Solaire thermique	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 46 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée au chauffage dans le secteur tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050	Variation
ENSEMBLE	GWh/an	132 439	134 213	105 774	78 035	54 648	-58,7%
Cafés, Hôtels, Restaurants	GWh/an	12 302	12 654	9 969	7 334	4 718	-61,6%
CHR < 1975	GWh/an	4 958	4 842	1 224	516	512	-89,7%
CHR > 1975	GWh/an	7 344	7 812	8 745	6 818	4 206	-42,7%
Habitat communautaire	GWh/an	8 521	8 595	6 915	5 318	3 901	-54,2%
HC < 1975	GWh/an	4 291	4 058	1 411	403	394	-90,8%
HC > 1975	GWh/an	4 231	4 537	5 504	4 915	3 507	-17,1%
Santé, Action sociale	GWh/an	15 169	15 091	12 173	8 970	6 880	-54,6%
SA < 1975	GWh/an	12 333	11 742	7 216	2 440	1 110	-91,0%
SA > 1975	GWh/an	2 837	3 349	4 957	6 530	5 770	103,4%
Enseignement, Recherche	GWh/an	21 747	21 345	17 316	13 206	9 621	-55,8%
ER < 1975	GWh/an	12 588	11 775	5 635	1 133	1 097	-91,3%
ER > 1975	GWh/an	9 159	9 570	11 680	12 073	8 524	-6,9%
Sports, Loisirs	GWh/an	12 127	12 340	9 373	7 181	5 163	-57,4%
SL < 1975	GWh/an	5 294	5 070	1 161	526	518	-90,2%
SL > 1975	GWh/an	6 833	7 270	8 212	6 655	4 644	-32,0%
Bureaux, Administrations	GWh/an	32 584	33 659	25 774	18 522	11 311	-65,3%
BA < 1975	GWh/an	13 874	13 553	2 704	1 443	1 432	-89,7%
BA > 1975	GWh/an	18 710	20 106	23 069	17 080	9 879	-47,2%
Commerce	GWh/an	25 627	26 217	21 231	15 345	11 701	-54,3%
C < 1975	GWh/an	19 799	19 509	11 687	2 846	1 985	-90,0%
C > 1975	GWh/an	5 828	6 708	9 544	12 499	9 715	66,7%
Transport	GWh/an	4 363	4 312	3 023	2 158	1 354	-69,0%
T < 1975	GWh/an	2 043	1 935	305	200	196	-90,4%
T > 1975	GWh/an	2 320	2 377	2 718	1 959	1 158	-50,1%

Tableau 47 : Consommation d'eau moyenne quotidienne par m² de surface dans le tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050
Cafés, hôtels	litres/m2/jour	1,53	1,38	1,25	1,13	1,02
Habitat communautaire	litres/m2/jour	1,2	1,09	0,98	0,89	0,80
Santé, action sociale	litres/m2/jour	2,12	1,92	1,73	1,57	1,42
Enseignement, recherche	litres/m2/jour	1,3	1,18	1,06	0,96	0,87
Sport, loisirs	litres/m2/jour	2,55	2,31	2,09	1,89	1,71
Bureaux, administrations	litres/m2/jour	0,81	0,73	0,66	0,60	0,54
Commerce	litres/m2/jour	1,78	1,61	1,46	1,32	1,19
Transport	litres/m2/jour	0,27	0,24	0,22	0,20	0,18

Tableau 48 : Évolution de la répartition des systèmes de production d'eau chaude dans le secteur tertiaire

	2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Charbon	2%	1%	1%	0%	0%
Biomasse solide	3%	5%	6%	8%	10%
Combustible liquide (fuel)	16%	12%	8%	4%	0%
Butane, propane	3%	2%	2%	1%	0%
Comb. gaz	35%	34%	33%	31%	30%
Electricité	37%	35%	33%	32%	30%
Réseaux de chaleur	5%	11%	17%	24%	30%

Tableau 49 : Évolution de la consommation d'énergie finale liée à l'ECS dans le secteur tertiaire

		2010	2020	2030	2040	2050	Variation
ENSEMBLE	GWh/an	27 179	22 347	17 993	14 415	11 674	-57,0%
Cafés, Hôtels, Restaurants	GWh/an	3 580	2 949	2 377	1 906	1 545	-56,8%
Habitat communautaire	GWh/an	3 027	2 459	1 946	1 529	1 212	-60,0%
Santé, Action sociale	GWh/an	5 287	4 285	3 401	2 684	2 141	-59,5%
Enseignement, Recherche	GWh/an	3 104	2 544	2 040	1 628	1 313	-57,7%
Sports, Loisirs	GWh/an	6 260	5 077	4 045	3 209	2 575	-58,9%
Bureaux, Administrations	GWh/an	1 743	1 462	1 203	987	818	-53,1%
Commerce	GWh/an	3 534	3 041	2 555	2 133	1 798	-49,1%
Transport	GWh/an	646	530	425	339	273	-57,8%

Tableau 50 : Besoins en climatisation et consommations correspondantes par secteur

		2010	2020	2030	2040	2050
Besoin						
Cafés, hôtels	kWh/m2.an	128	114	102	92	82
Habitat communautaire	kWh/m2.an	106	95	85	76	68
Santé, action sociale	kWh/m2.an	119	106	95	85	76
Enseignement, recherche	kWh/m2.an	95	85	76	68	61
Sport, loisirs	kWh/m2.an	108	97	86	77	69
Bureaux, administrations	kWh/m2.an	169	152	136	122	109
Commerce	kWh/m2.an	147	132	118	106	95
Transport	kWh/m2.an	103	93	83	74	66
Consommation d'électricité finale						
Cafés, hôtels	kWh/m2.an	58	48	39	33	27
Habitat communautaire	kWh/m2.an	48	39	33	27	23
Santé, action sociale	kWh/m2.an	54	44	37	30	25
Enseignement, recherche	kWh/m2.an	43	35	29	24	20
Sport, loisirs	kWh/m2.an	49	40	33	28	23
Bureaux, administrations	kWh/m2.an	77	63	52	43	36
Commerce	kWh/m2.an	67	55	45	38	32
Transport	kWh/m2.an	47	39	32	27	22

Tableau 51 : Évolution de la consommation d'énergie finale nécessaire pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation dans le secteur du bâtiment

		2010	2020	2030	2040	2050
Résidentiel						
Chauffage	TWh/an	397	357	260	173	147
Eau chaude sanitaire	TWh/an	54	43	35	28	23
Climatisation	TWh/an	0,7	1,3	1,6	1,9	2,1
Total Résidentiel	TWh/an	452	401	297	203	173
Tertiaire						
Chauffage	TWh/an	132	134	106	78	55
Eau chaude sanitaire	TWh/an	27	22	18	14	12
Climatisation	TWh/an	16	17	16	15	14
Total Tertiaire	TWh/an	176	173	140	108	80
Résidentiel + Tertiaire						
Chauffage	TWh/an	530	491	366	251	202
Eau chaude sanitaire	TWh/an	81	65	53	43	35
Climatisation	TWh/an	17	18	18	17	16
Total Résidentiel + Tertiaire	TWh/an	628	574	437	311	253

Tableau 52 : Évolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment

		2010	2020	2030	2040	2050
Résidentiel						
Électricité spécifique	TWh/an	78	80	60	45	44
Cuisson	TWh/an	30	28	25	23	23
Confort thermique	TWh/an	452	401	297	203	173
Total Résidentiel	TWh/an	559	509	382	271	239
Tertiaire						
Électricité spécifique	TWh/an	77	75	51	44	43
Cuisson	TWh/an	9	10	9	9	10
Confort thermique	TWh/an	176	173	140	108	80
Total Tertiaire	TWh/an	263	258	201	161	133
Résidentiel + Tertiaire						
Électricité spécifique	TWh/an	155	155	111	89	87
Cuisson	TWh/an	39	38	34	32	32
Confort thermique	TWh/an	628	574	437	311	253
Total Résidentiel + Tertiaire	TWh/an	822	767	582	432	372

Tableau 53 : Évolution des vecteurs secondaires dans le secteur du bâtiment

		2010	2020	2030	2040	2050
Combustibles solides (charbon)	TWh/an	7	5	2	1	0
Biomasse solide (usage domestique)	TWh/an	83	105	97	78	73
Combustibles liquides (fuel, biomasse)	TWh/an	115	78	38	13	0
GPL	TWh/an	26	16	7	2	0
Combustible gazeux (réseau)	TWh/an	267	233	169	115	92
Electricité	TWh/an	300	286	212	163	144
Réseaux de chaleur	TWh/an	24	42	47	44	43
Solaire thermique	TWh/an	1	2	8	16	20
TOTAL		823	768	583	432	372

Annexe 2 - hypothèses et résultats du secteur des transports

Tableau 54 : Évolution des voyageurs.km/hab parcourus entre 2008 et 2050 pour la mobilité longue distance (hors "Autre mobilité")

	Distance	2010	2020	2030	2040	2050
Personnel	Moins de 100 km	32	32	32	32	32
	De 100 à 199 km	477	475	475	475	475
	De 200 à 399 km	736	706	680	659	644
	De 400 à 599 km	571	548	527	511	500
	De 600 à 799 km	578	555	534	517	506
	De 800 à 1 499 km	749	712	607	493	470
	Plus de 1 500 km	1 344	1 271	1 009	719	669
	Ensemble	4 485	4 299	3 864	3 406	3 297
Professionnel	Moins de 100 km	7	8	8	8	8
	De 100 à 199 km	116	121	121	121	121
	De 200 à 399 km	142	143	137	133	130
	De 400 à 599 km	130	130	125	122	119
	De 600 à 799 km	77	77	74	71	70
	De 800 à 1 499 km	123	124	119	115	113
	Plus de 1 500 km	198	195	155	110	103
	Ensemble	794	797	739	680	663

Tableau 55 : Évolution des voyageurs.km parcourus par mode de transport et par habitant

		2008	2020	2 030	2 040	2 050
Marche	Mds de voy.km	8	10	11	12	12
	voy.km/hab	136	149	161	166	167
Vélo	Mds de voy.km	6	8	13	16	16
	voy.km/hab	88	117	196	227	225
Deux roues motorisés	Mds de voy.km	13	20	38	51	54
	voy.km/hab	215	305	555	726	748
Voiture individuelle hors urbain*	Mds de voy.km	717	715	578	424	401
	voy.km/hab	11 533	10 843	8 497	5 993	5 547
Voiture électrique citadine**	Mds de voy.km	0	4	57	121	129
	voy.km/hab	0	68	843	1 713	1 791
Taxi Collectif***	Mds de voy.km	0	1	18	37	40
	voy.km/hab	0	21	257	527	552
Bus ou car	Mds de voy.km	48	56	78	98	101
	voy.km/hab	774	854	1 142	1 382	1 402
Tram, métro et RER	Mds de voy.km	15	18	22	26	27
	voy.km/hab	239	276	328	373	377
TER, TET, Transilien	Mds de voy.km	34	38	49	59	60
	voy.km/hab	553	577	721	828	829
TGV	Mds de voy.km	52	66	90	109	117
	voy.km/hab	840	998	1 317	1 542	1 618
Avion - vol < 800 km	Mds de voy.km	13	13	8	1	0
	voy.km/hab	211	197	112	13	0
Avion - vol > 800 km	Mds de voy.km	260	267	205	138	129
	voy.km/hab	4 183	4 049	3 007	1 951	1 786
Autres modes	Mds de voy.km	8	6	4	2	0
	voy.km/hab	123	85	53	23	0
TOTAL	Mds de voy.km	1 175	1 223	1 170	1 094	1 087
	voy.km/hab	18 895	18 539	17 190	15 463	15 043

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 56 : Mobilité régulière et locale : évolutions des parts modales en fonction du type d'urbanisme

		2008	2 020	2 030	2 040	2050
Espace à dominante rurale	Bus/Car	3%	3%	4%	5%	5%
	Tram/Métro/RER	0%	0%	0%	0%	0%
	TER/TET/Transilien	1%	2%	2%	2%	3%
	Voit. ind. hors urbain*	93%	92%	85%	77%	77%
	Voiture citadine**	0%	0%	2%	5%	5%
	Taxi collectif***	0%	0%	2%	5%	5%
	Deux roues	1%	2%	4%	5%	5%
	Bicyclette	1%	1%	1%	1%	1%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Commune polarisée d'une aire urbaine jusqu'à 99 999 habitants	Bus/Car	3%	3%	6%	10%	10%
	Tram/Métro/RER	0%	0%	0%	0%	0%
	TER/TET/Transilien	2%	1%	2%	3%	3%
	Voit. ind. hors urbain*	93%	92%	81%	70%	68%
	Voiture citadine**	0%	0%	3%	7%	8%
	Taxi collectif***	0%	0%	2%	5%	5%
	Deux roues	2%	3%	4%	5%	5%
	Bicyclette	1%	1%	1%	1%	1%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Pôle urbain d'une aire urbaine jusqu'à 99 999 habitants	Bus/Car	3%	4%	6%	10%	10%
	Tram/Métro/RER	0%	0%	0%	0%	0%
	TER/TET/Transilien	2%	2%	2%	2%	3%
	Voit. ind. hors urbain*	92%	89%	58%	20%	15%
	Voiture citadine**	0%	2%	22%	47%	50%
	Taxi collectif***	0%	0%	3%	7%	8%
	Deux roues	1%	1%	5%	9%	10%
	Bicyclette	1%	2%	3%	5%	5%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Commune multipolarisée	Bus/Car	2%	1%	4%	7%	8%
	Tram/Métro/RER	0%	0%	0%	0%	0%
	TER/TET/Transilien	1%	1%	2%	3%	4%
	Voit. ind. hors urbain*	95%	96%	87%	75%	73%
	Voiture citadine**	0%	0%	2%	5%	5%
	Taxi collectif***	0%	0%	2%	5%	5%
	Deux roues	1%	1%	2%	5%	5%
	Bicyclette	1%	1%	1%	1%	1%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Commune polarisée d'une aire urbaine de 100 000 à 10 M d'habitants	Bus/Car	4%	4%	6%	9%	9%
	Tram/Métro/RER	0%	0%	0%	1%	1%
	TER/TET/Transilien	2%	2%	5%	9%	9%
	Voit. ind. hors urbain*	92%	92%	79%	64%	62%
	Voiture citadine**	0%	0%	3%	7%	8%
	Taxi collectif***	0%	0%	2%	5%	5%
	Deux roues	1%	1%	3%	5%	5%
	Bicyclette	1%	1%	1%	1%	2%

	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Banlieue du pôle urbain d'une aire urbaine de 100 000 à 10 M d'habitants	Bus/Car	3%	3%	8%	13%	14%
	Tram/Métro/RER	2%	2%	3%	4%	4%
	TER/TET/Transilien	2%	2%	3%	5%	5%
	Voit. ind. hors urbain*	89%	85%	53%	16%	11%
	Voiture citadine**	0%	2%	20%	42%	45%
	Taxi collectif***	0%	0%	3%	7%	8%
	Deux roues	3%	5%	9%	10%	10%
	Bicyclette	1%	1%	2%	3%	3%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Centre du pôle urbain d'une aire urbaine de 100 000 à 10 M d'habitants	Bus/Car	5%	6%	10%	15%	16%
	Tram/Métro/RER	2%	2%	5%	9%	10%
	TER/TET/Transilien	4%	4%	4%	4%	5%
	Voit. ind. hors urbain*	85%	79%	45%	8%	2%
	Voiture citadine**	0%	1%	13%	28%	30%
	Taxi collectif***	0%	0%	2%	5%	5%
	Deux roues	2%	4%	10%	18%	20%
	Bicyclette	2%	5%	10%	12%	12%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Commune polarisée aire urbaine de Paris	Bus/Car	7%	7%	10%	14%	14%
	Tram/Métro/RER	3%	2%	3%	5%	5%
	TER/TET/Transilien	5%	4%	6%	7%	7%
	Voit. ind. hors urbain*	83%	83%	70%	53%	51%
	Voiture citadine**	0%	0%	4%	9%	10%
	Taxi collectif***	0%	0%	2%	5%	5%
	Deux roues	2%	2%	4%	7%	7%
	Bicyclette	1%	0%	1%	1%	1%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Banlieue de Paris	Bus/Car	10%	13%	18%	20%	20%
	Tram/Métro/RER	10%	10%	9%	9%	9%
	TER/TET/Transilien	10%	11%	13%	13%	13%
	Voit. ind. hors urbain*	68%	60%	36%	18%	15%
	Voiture citadine**	0%	1%	7%	14%	15%
	Taxi collectif***	0%	0%	3%	7%	8%
	Deux roues	2%	4%	9%	14%	15%
	Bicyclette	1%	2%	4%	5%	5%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Paris	Bus/Car	15%	23%	28%	30%	30%
	Tram/Métro/RER	21%	18%	15%	14%	14%
	TER/TET/Transilien	17%	19%	18%	18%	18%
	Voit. ind. hors urbain*	38%	25%	12%	1%	0%
	Voiture citadine**	0%	1%	7%	14%	15%
	Taxi collectif***	0%	0%	1%	3%	3%
	Deux roues	6%	9%	10%	10%	10%
	Bicyclette	3%	6%	9%	10%	10%
	Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%
Ensemble	Bus/Car	5%	5%	8%	11%	11%

Tram/Métro/RER	2%	2%	2%	3%	3%
TER/TET/Transilien	3%	3%	4%	6%	6%
Voit. ind. hors urbain*	87%	85%	65%	44%	42%
Voiture citadine**	0%	1%	9%	19%	20%
Taxi collectif***	0%	0%	3%	6%	6%
Deux roues	2%	3%	6%	8%	9%
Bicyclette	1%	2%	3%	3%	3%
Autres modes	0%	0%	0%	0%	0%

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 57 : MRL : Évolution des voyageurs.km/hab (hors marche à pied)

	2008	2020	2030	2040	2050
Bus/Car	356	365	565	755	765
Tram/Métro/RER	161	145	170	202	203
TER/TET/Transilien	252	252	315	383	385
Voiture individuelle	6 850	6 463	5 355	4 371	4 167
Taxi Collectif	0	15	190	390	408
Deux roues motorisés	130	198	418	576	594
Bicyclette	87	116	194	226	224
TOTAL	7 843	7 560	7 209	6 903	6 745

Tableau 58 : Mobilité longue distance - Évolution des parts modales en fonction de la longueur du déplacement et de son motif

		2008	2 020	2 030	2 040	2050
Motif personnel						
Moins de 100 Km	Voit. ind. hors urbain*	93%	93%	83%	71%	69%
	Voiture citadine**	0%	0%	4%	9%	10%
	Taxi collectif***	0%	0%	1%	3%	3%
	Train	2%	2%	5%	9%	10%
	Autocar	1%	1%	4%	7%	8%
	Avion	1%	1%	0%	0%	0%
	Autre mode	3%	2%	2%	1%	0%
De 100 à 199 Km	Voit. ind. hors urbain*	89%	90%	86%	80%	79%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	5%	6%	9%	13%	15%
	Autocar	2%	1%	3%	6%	6%
	Avion	0%	0%	0%	0%	0%
	Autre mode	4%	3%	2%	1%	0%
De 200 à 399 Km	Voit. ind. hors urbain*	83%	82%	78%	72%	70%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	11%	14%	18%	23%	25%
	Autocar	3%	2%	3%	5%	5%
	Avion	0%	0%	0%	0%	0%
	Autre mode	2%	2%	1%	1%	0%
De 400 à 599 Km	Voit. ind. hors urbain*	79%	79%	73%	65%	62%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	16%	18%	25%	32%	35%
	Autocar	3%	2%	2%	3%	3%
	Avion	1%	0%	0%	0%	0%
	Autre mode	1%	1%	1%	0%	0%
De 600 à 799 Km	Voit. ind. hors urbain*	74%	75%	66%	55%	52%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	16%	18%	29%	41%	45%
	Autocar	3%	3%	3%	3%	3%
	Avion	4%	4%	2%	0%	0%
	Autre mode	2%	1%	1%	0%	0%
De 800 à 1499 Km	Voit. ind. hors urbain*	52%	50%	40%	29%	25%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	21%	25%	39%	55%	60%
	Autocar	5%	4%	4%	5%	5%
	Avion	20%	20%	16%	11%	10%
	Autre mode	2%	2%	1%	1%	0%

1500 Km ou plus	Voit. ind. hors urbain*	13%	17%	21%	20%	18%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	2%	4%	15%	26%	30%
	Autocar	2%	2%	2%	2%	2%
	Avion	83%	77%	63%	52%	50%
	Autre mode	1%	1%	0%	0%	0%
Ensemble	Voit. ind. hors urbain*	56%	57%	56%	52%	50%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	11%	13%	22%	31%	34%
	Autocar	3%	2%	3%	4%	4%
	Avion	29%	27%	19%	13%	12%
	Autre mode	2%	1%	1%	0%	0%
Motif professionnel						
Moins de 100 Km	Voit. ind. hors urbain*	98%	96%	87%	75%	74%
	Voiture citadine**	0%	1%	9%	19%	20%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	1%	1%	1%	2%	2%
	Autocar	1%	2%	3%	4%	4%
	Avion	0%	0%	0%	0%	0%
	Autre mode	0%	0%	0%	0%	0%
De 100 à 199 Km	Voit. ind. hors urbain*	71%	77%	75%	70%	73%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	14%	12%	17%	24%	25%
	Autocar	0%	0%	1%	2%	2%
	Avion	0%	0%	0%	0%	0%
	Autre mode	15%	11%	7%	4%	0%
De 200 à 399 Km	Voit. ind. hors urbain*	44%	32%	28%	29%	30%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	52%	65%	70%	70%	70%
	Autocar	0%	0%	0%	0%	0%
	Avion	2%	2%	1%	0%	0%
	Autre mode	2%	1%	1%	0%	0%
De 400 à 599 Km	Voit. ind. hors urbain*	29%	20%	23%	28%	30%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	58%	69%	70%	70%	70%
	Autocar	0%	0%	0%	0%	0%
	Avion	9%	7%	4%	1%	0%
	Autre mode	5%	3%	2%	1%	0%
De 600 à 799 Km	Voit. ind. hors urbain*	32%	26%	21%	24%	24%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	30%	40%	58%	72%	75%

	Autocar	1%	0%	0%	1%	1%
	Avion	33%	31%	18%	2%	0%
	Autre mode	4%	3%	2%	1%	0%
De 800 à 1499 Km	Voit. ind. hors urbain*	14%	5%	4%	4%	5%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	45%	63%	74%	79%	80%
	Autocar	5%	5%	5%	5%	5%
	Avion	36%	26%	17%	11%	10%
	Autre mode	1%	0%	0%	0%	0%
1500 Km ou plus	Voit. ind. hors urbain*	0%	0%	0%	0%	0%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	0%	1%	9%	19%	20%
	Autocar	0%	0%	0%	0%	0%
	Avion	100%	99%	91%	81%	80%
	Autre mode	0%	0%	0%	0%	0%
Ensemble	Voit. ind. hors urbain*	29%	25%	25%	27%	29%
	Voiture citadine**	0%	0%	0%	0%	0%
	Taxi collectif***	0%	0%	0%	0%	0%
	Train	31%	38%	47%	55%	56%
	Autocar	1%	1%	1%	1%	1%
	Avion	35%	33%	25%	16%	14%
	Autre mode	4%	3%	2%	1%	0%

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 59 : Évolution des parts modales par mode de transport, en % des voyageurs.km

	2008	2 020	2 030	2 040	2050
Marche à pied	1%	1%	1%	1%	1%
Vélo	0%	1%	1%	1%	1%
2 roues motorisés	1%	2%	3%	5%	5%
Voiture individuelle hors urbain*	61%	58%	49%	39%	37%
Voiture citadine**	0%	0%	5%	11%	12%
Taxi collectif***	0%	0%	1%	3%	4%
Bus/Car	4%	5%	7%	9%	9%
Tram/Métro/RER	1%	1%	2%	2%	3%
TET/Corail/Transilien	3%	3%	4%	5%	6%
TGV	4%	5%	8%	10%	11%
Avion	23%	23%	18%	13%	12%
Autres	1%	0%	0%	0%	0%

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 60 : Évolution des voyageurs.km/hab par mode de transport

	2008	2 020	2 030	2 040	2050
Marche à pied	136	149	160	166	167
Vélo (y compris VAE)	88	117	195	227	225
2 roues motorisés	215	305	551	726	748
Voiture individuelle hors urbain*	11 533	10 843	8 436	5 993	5 547
Voiture citadine**	0	68	837	1 713	1 791
Taxi collectif***	0	21	256	527	552
Bus/Car	774	854	1 133	1 382	1 402
Tram/Métro/RER	239	276	325	373	377
TET/Corail/Transilien	553	577	716	828	829
TGV	840	998	1 308	1 542	1 618
Avion	4 393	4 247	3 097	1 964	1 786
TOTAL	18 895	18 539	17 066	15 463	15 043

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 61 : Répartition par vecteur pour chaque mode de déplacement (en % du nombre de voyageurs.km parcourus pour chaque mode)

		2008	2 020	2 030	2 040	2050
Vélo	Électricité	0%	0%	4%	9%	10%
Deux roues motorisé	Combustibles liquides	100%	98%	78%	53%	50%
	Électricité	0%	2%	22%	47%	50%
Voiture ind. hors urbain*	Combustibles liquides	100%	96%	61%	16%	10%
	GNV / GRV	0%	3%	38%	81%	87%
	Hybride recharg. (élec / GNV)	0%	0%	1%	3%	3%
Voiture citadine**	Combustibles liquides	0%	44%	26%	4%	1%
	GNV / GRV	0%	0%	0%	1%	1%
	Électricité	0%	50%	50%	49%	49%
	Hybride recharg. (élec / GNV)	0%	6%	24%	46%	49%
Taxi collectif***	Combustibles liquides	0%	96%	61%	16%	10%
	GNV / GRV	0%	3%	38%	81%	87%
	Hybride recharg. (élec / GNV)	0%	0%	1%	3%	3%
Bus et car	Combustibles liquides	98%	94%	57%	11%	5%
	GNV / GRV	2%	5%	34%	70%	75%
	Électricité	0%	1%	9%	19%	20%
Tramway et métro	Électricité	100%	100%	100%	100%	100%
TER, TET et Transilien	Combustibles liquides	10%	7%	6%	5%	5%
	Électricité	90%	93%	94%	95%	95%
TGV	Électricité	100%	100%	100%	100%	100%
Avion court courrier	Combustibles liquides	100%	100%	100%	100%	100%
Avion long courrier	Combustibles liquides	100%	100%	100%	100%	100%

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** Véhicule de type minibus

Tableau 62 : Evolution de la consommation unitaire des voitures individuelles

		2008	2 020	2 030	2 040	2050
Voiture individuelle hors urbain*						
Consommation moyenne des véhicules :						
- avec moteur thermique	l/100km	6,9	6,1	4,3	3,6	3,2
- avec moteur électrique	kWh/100km	-	34	26	21	18
Voiture citadine**						
Consommation moyenne des VE***	kWh/100km	-	14	12	10	8

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît pour être progressivement remplacé par la voiture citadine

** Voiture dimensionnée pour une utilisation majoritairement en milieu urbain

*** VE = véhicules électriques

Tableau 63 : Évolution des Gt.km transportées et des parts modales, par mode de transport

	2008	2020	2030	2040	2050
GT.km transportées					
Véhicules utilitaires légers (VUL)	22	22	21	19	19
Poids lourds < 32 T (PL)	60	61	55	48	47
Tracteurs routiers > 32 T (TR)	249	251	203	143	134
Train	40	38	82	138	145
Fluvial	7,5	8,2	13	18	19
Ensemble	379	380	374	365	364
Parts modales					
Véhicules utilitaires légers (VUL)	5,8%	5,9%	5,6%	5,2%	5,2%
Poids lourds < 32 T (PL)	16%	16%	15%	13%	13%
Tracteurs routiers > 32 T (TR)	66%	66%	54%	39%	37%
Train	11%	10%	22%	38%	40%
Fluvial	2,0%	2,2%	3,4%	4,9%	5,2%

Tableau 64 : Évolution des types de carburants pour le transport des marchandises (en % des Gt.km transportées)

		2010	2020	2030	2040	2050
VUL	Thermique gazole	100%	97%	61%	16%	10%
	Thermique GNV	0%	1%	7%	14%	15%
	Thermique DualFuel	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride non rechargeable gazole	0%	0%	2%	5%	5%
	Hybride non rechargeable GNV	0%	2%	22%	47%	50%
	Hybride non rechargeable DualFuel	0%	0%	0%	0%	0%
	Électrique	0%	0%	4%	9%	10%
	Hybride rechargeable gazole	0%	0%	2%	5%	5%
	Hybride rechargeable GNV	0%	0%	2%	5%	5%
PL < 32 T	Thermique gazole	100%	97%	57%	7%	0%
	Thermique GNV	0%	0%	4%	9%	10%
	Thermique DualFuel	0%	0%	4%	9%	10%
	Hybride non rechargeable gazole	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride non rechargeable GNV	0%	1%	17%	37%	40%
	Hybride non rechargeable DualFuel	0%	1%	17%	37%	40%
	Électrique	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride rechargeable gazole	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride rechargeable GNV	0%	0%	0%	0%	0%
TR > 32 T	Thermique gazole	100%	97%	57%	7%	0%
	Thermique GNV	0%	0%	4%	9%	10%
	Thermique DualFuel	0%	0%	4%	9%	10%
	Hybride non rechargeable gazole	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride non rechargeable GNV	0%	1%	17%	37%	40%
	Hybride non rechargeable DualFuel	0%	1%	17%	37%	40%
	Électrique	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride rechargeable gazole	0%	0%	0%	0%	0%
	Hybride rechargeable GNV	0%	0%	0%	0%	0%
Train	Thermique	10%	10%	8%	5%	5%
	Électrique	90%	90%	92%	95%	95%
Fluvial	Thermique	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Tableau 65 : Évolution des consommations unitaires par mode de transport et par motorisation

			2008	2020	2030	2040	2050
VUL	Conso. thermique gazole	l/100 km	9,7	9,4	8,0	6,4	5,9
	Conso. thermique GNV	l/100 km	10,6	10,3	8,6	6,8	6,2
	Gain dû à l'hybride-non rechargeable	%	20%				
	Conso. électrique	kWh/km	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
	Conso. hybride rechargeable / gazole	l/100 km	5,8	5,6	4,8	3,8	3,5
	Conso. hybride rechargeable / GNV	l/100 km	6,4	6,2	5,2	4,1	3,7
	Conso. hybride rechargeable / élec.	kWh/km	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
PL < 32 T	Conso. thermique gazole	l/100 km	30,0	29,7	26,1	21,6	21,0
	Conso. thermique GNV	l/100 km	33,0	32,6	28,2	22,8	22,1
	Conso. thermique DualFuel gazole	l/100 km	9,0	8,9	7,8	6,5	6,3
	Conso. thermique DualFuel GNV	l/100 km	23,1	22,8	19,8	15,9	15,4
	Gain dû à l'hybride-non rechargeable	%	12%				
TR > 32 T	Conso. thermique gazole	l/100 km	40,0	39,7	35,8	31,0	30,4
	Conso. thermique GNV	l/100 km	44,0	43,6	38,8	32,7	31,9
	Conso. thermique DualFuel gazole	l/100 km	12,0	11,9	10,8	9,3	9,1
	Conso. thermique DualFuel GNV	l/100 km	30,8	30,5	27,1	22,9	22,3
	Gain dû à l'hybride-non rechargeable	%	10%				
Ferroviaire	Conso. train gazole	l/kt.km	10,5	10,5	9,9	9,1	9,0
	Conso. train électrique	kWh/kt.km	36,2	36,0	33,8	31,1	30,7
Fluvial	Conso. par tonne.km	Gep/t.km	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5

Annexe 3 - hypothèses et résultats du secteur de l'industrie et de l'agriculture

Tableau 66 : Principales hypothèses sur les réductions de consommation liées à la sobriété

	2010	2020	2030	2040	2050
Travaux publics	0%	0%	0%	0%	0%
Voirie	0%	-30%	-36%	-38%	-40%
Transports terrestres	0%	-8%	-15%	-23%	-30%
Caoutchouc	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Construction navale, aéronautique, armement (NAA)	0%	0%	0%	0%	0%
Alimentation	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Engrais	0%	-11%	-22%	-32%	-43%
Mécanique	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Électricité	0%	-3%	-5%	-8%	-10%
Textile	0%	-1%	-3%	-4%	-5%
Papier graphique	0%	-20%	-25%	-30%	-35%
Papier sanitaire	0%	0%	0%	0%	0%
Divers	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 67 : Hypothèses de réduction et de réutilisation des emballages

		2010	2020	2030	2040	2050
Réduction des emballages	Plastique	0 %	5 %	10 %	17 %	25 %
	Papier	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
Part de réutilisation des emballages	Verre	1 %	10 %	35 %	50 %	80 %
	Plastique	0 %	2 %	5 %	10 %	12 %
Part de substitution d'emballages plastique par du verre		0 %	2 %	5 %	10 %	12 %

Tableau 68 : Impact sur la production de la réutilisation et de la réduction des emballages

		2010	2020	2050
Réutilisation	Verre creux	0 %	- 5 %	- 75 %
	Plastique emballage	0 %	-5 %	- 25 %
Évitement d'emballage	Plastique emballage	0 %	- 5 %	- 25 %
	Papier carton	0 %	- 5 %	- 20 %
Bilan emballage	Verre creux	0 %	- 5 %	- 75 %
	Plastique emballage	0 %	- 10 %	- 50 %
	Papier carton	0 %	- 5 %	- 20 %

Tableau 69 : Évolution de la répartition des surfaces en constructions neuves et rénovations

			2010	2020	2030	2040	2050
Neuf	Nombre (x 1000)	MI	175	113	48	20	18
		LC	138	120	75	48	71
		Tertiaire	nd	nd	nd	nd	nd
	Surf. moyenne m2	MI	130,5	130,5	130,5	130,5	130,5
		LC	73	73	73	73	73
		Tertiaire	nd	nd	nd	nd	nd
	Surf. totale Mm2	MI	22,9	14,7	6,2	2,6	2,3
		LC	10,1	8,7	5,4	3,5	5,2
		Tertiaire	16,8	11,6	4,8	3,2	2,4
Rénovation	Nombre (x 1000)	MI	0	265	399	402	140
		LC	0	240	351	348	110
		Tertiaire	nd	nd	nd	nd	nd
	Surf. moyenne m2	MI	nd	83,0	108,8	100,6	138,5
		LC	nd	65,6	65,2	67,6	72,0
		Tertiaire	nd	nd	nd	nd	nd
	Surf. totale Mm2	MI	0,0	22,0	43,4	40,5	19,4
		LC	0,0	15,7	22,9	23,5	7,9
		Tertiaire	0,0	8,6	29,0	29,0	28,7

MI = Maison Individuelle

LC = Logement Collectif

Tableau 70 : Évolution de la répartition des matériaux utilisés dans les constructions neuves

			2010	2020	2030	2040	2050
Maisons individuelles	Toit	Charpente	80%	85%	85%	85%	85%
		Hourdis	100%	100%	100%	100%	100%
		Dalle béton	0%	0%	0%	0%	0%
	Planchers	Hourdis	100%	90%	80%	70%	60%
		Dalle béton	0%	0%	0%	0%	0%
		Plancher bois	0%	10%	20%	30%	40%
		Parquet	10%	20%	30%	40%	40%
	Murs ext.	Parpaings	100%	90%	80%	70%	70%
		Voile béton	0%	0%	0%	0%	0%
		Bois	0%	10%	20%	30%	30%
	Murs int.	Cloison plâtre	100%	90%	80%	70%	70%
		Bois	0%	10%	20%	30%	30%
Logements collectifs	Toit	Charpente	10%	10%	15%	15%	20%
		Hourdis	95%	95%	95%	95%	95%
		Dalle béton	5%	5%	5%	5%	5%
	Planchers	Hourdis	0%	0%	0%	0%	0%
		Dalle béton	100%	100%	95%	95%	90%
		Plancher bois	0%	0%	5%	5%	10%
		Parquet	10%	10%	15%	15%	20%
	Murs ext.	Parpaings	60%	60%	55%	55%	50%
		Voile béton	40%	40%	40%	40%	40%
		Bois	0%	0%	5%	5%	10%
	Murs int.	Cloison plâtre	100%	100%	95%	95%	95%
		Bois	0%	0%	5%	5%	5%
Bâtiments tertiaires	Toit	Charpente	0%	0%	5%	5%	10%
		Hourdis	95%	95%	95%	95%	95%
		Dalle béton	5%	5%	5%	5%	5%
	Planchers	Hourdis	0%	0%	0%	0%	0%
		Dalle béton	100%	100%	95%	95%	90%
		Plancher bois	0%	0%	5%	5%	10%
		Parquet	10%	10%	15%	15%	20%
	Murs ext.	Parpaings	60%	60%	55%	55%	50%
		Voile béton	40%	40%	40%	40%	40%
		Bois	0%	0%	5%	5%	10%
	Murs int.	Cloison plâtre	100%	100%	95%	95%	95%
		Bois	0%	0%	5%	5%	5%

Pour les toitures, la ligne « Charpente » indique la proportion de toiture avec charpente classique. Le reste est considéré comme toiture terrasse.

Les plafonds de bâtiments sont soit en hourdis, soit en dalle béton.

Les planchers sont soit en hourdis, soit en dalle béton, et une partie peut être accompagnée d'un plancher bois ou d'un parquet.

Les murs extérieurs sont soit en parpaings, soit en voile béton, soit en ossature bois.

Les murs intérieurs sont soit en cloison plâtre, soit en bois.

Tableau 71 : Évolution de la répartition des isolants utilisés dans les constructions neuves et les rénovations

			2 010	2 020	2 030	2040	2 050
Neuf	Toiture	Laines minérales	90%	45%	40%	40%	40%
		Polystyrène	10%	40%	30%	15%	0%
		Autres*	0%	15%	30%	45%	60%
	Plancher	Laines minérales	0%	40%	30%	20%	25%
		Polystyrène	100%	35%	20%	10%	0%
		Autres*	0%	25%	50%	70%	75%
Rénovation	Mur extérieur	Laines minérales	50%	40%	30%	25%	25%
		Polystyrène	50%	35%	20%	0%	0%
		Autres*	0%	25%	50%	75%	75%
	Toiture	Laines minérales	50%	45%	40%	40%	40%
		Polystyrène	50%	40%	30%	15%	0%
		Autres*	0%	15%	30%	45%	60%
	Plancher	Laines minérales	50%	40%	30%	20%	25%
		Polystyrène	50%	35%	20%	10%	0%
		Autres*	0%	25%	50%	70%	75%
	Mur extérieur	Laines minérales	50%	40%	30%	25%	25%
		Polystyrène	50%	35%	20%	0%	0%
		Autres*	0%	25%	50%	75%	75%

* Principalement issus de la biomasse (laine de bois, ouate de cellulose, ...).

Tableau 72 : Évolution de la répartition des châssis utilisés dans les menuiseries dans les constructions neuves et les rénovations

	2010	2020	2 030	2 040	2 050
Châssis aluminium	21%	23%	25%	27%	30%
Châssis PVC	63%	45%	30%	15%	0%
Châssis bois	16%	32%	45%	58%	70%

Tableau 73 : Tonnages de matières consommées par la production industrielle

		2010	2020	2030	2040	2050
Bois	Mt	9,0	10,6	10,1	10,2	10,9
Acier	Mt	18,8	17,8	16,3	16,3	17,0
Aluminium	Mt	1,62	1,65	1,65	1,66	1,62
Autres métaux	Mt	1,86	1,85	1,75	1,81	1,91
Verre	Mt	5,6	10,8	12,0	10,6	5,7
Ciment	Mt	26,8	22,4	17,6	16,1	16,5
Plastiques	Mt	6,49	10,30	10,28	7,17	4,59
Chimie minérale	Mt	9,7	11,0	11,1	11,0	10,8
Chimie organique	Mt	7,1	9,3	8,7	6,4	4,7
Papiers et cartons	Mt	10,7	9,9	9,8	9,5	9,2

Tableau 74 : Taux de recyclage des matières dans la production industrielle

	Taux de collecte 2010	Taux de recyclage 2010	2020	2030	2040	2050
Acier	74 %	52%	60%	70%	80%	90%
Aluminium	44 %	37%	48%	61%	73%	86%
Verre	35 %	35%	49%	63%	77%	90%
Plastiques	15 %	5%	12%	18%	24%	30%
Papier carton	70 %	60%	65%	70%	75%	80%

Tableau 75 : Estimation CEREN du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007
- Industrie française

		Combustibles	Électricité	Total
Consommation totale industrie	TWh	358	135	493
Opérations transverses : consommation	%	12 %	78 %	30 %
	TWh	43	105	148
Opérations transverses : gisement	%	53 %	39 %	43 %
	TWh	23	41	64

Source : « Synthèse du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie » - CEREN - 2010

Tableau 76 : Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour la Compression Mécanique de Vapeur (CMV) et les Pompes A Chaleur (PAC)

		2010	2 020	2 030	2 040	2050
E12-14	Agro-alimentaire	0%	15%	20%	25%	30%
E24	Chimie minérale	0%	10%	13%	17%	20%
E26	Chimie organique	0%	5%	13%	22%	30%
E28	Parachimie	0%	3%	6%	9%	12%
E35	Papier carton	0%	0%	17%	35%	52%
	Machine à papier	0%	0%	20%	40%	60%

Tableau 77 : Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour les fours par passage à l'induction

		2010	2020	2030	2040	2050
E12-14	Agro-alimentaire	0%	2%	3%	4%	5%
E28	Parachimie	0%	2%	4%	5%	7%
E29	Fonderie	0%	15%	20%	25%	30%
E30	Mécanique	0%	20%	30%	40%	50%
E32	Automobile et transports	0%	20%	30%	40%	50%
E37	Trans plastique	0%	10%	13%	17%	20%

Tableau 78 : Évolution du mix énergétique pour les process industriels

	2010	2020	2030	2040	2050
Vapeur	6%	5%	3%	2%	0%
Charbon	24%	18%	12%	6%	0%
Gaz	44%	43%	42%	41%	40%
Fioul	14%	11%	7%	4%	0%
GPL (gaz de pétrole liquéfié)	7%	5%	4%	2%	0%
Biomasse	3%	12%	22%	31%	40%
DIB (déchets industriels banals)	2%	1%	1%	0%	0%
Réseau de chaleur	0%	5%	10%	15%	20%

Tableau 79 : Part des combustibles plastiques (déchets) venant en substitution des combustibles fossiles

	2010	2020	2 030	2 040	2 050
Combustibles plastiques	0%	8%	15%	23%	30%

Tableau 80 : Part de biomasse dans le combustible des hauts-fourneaux

	2010	2020	2030	2040	2050
Part du bois dans les hauts-fourneaux	0%	5%	10%	20%	30%

Tableau 81 : Performance des cogénérateurs

		2010	2020	2030	2040	2050
TAC / MAC	Pertes	21%	17%	15%	15%	15%
	Électricité	35%	38%	40%	40%	40%
	Chaleur	44%	45%	45%	45%	45%
TAV	Pertes	15%	14%	13%	13%	13%
	Électricité	15%	15%	15%	15%	15%
	Chaleur	70%	71%	72%	72%	72%

Tableau 82 : Potentiel net de cogénération

		2008	2020	2050
Consommation de combustible	TWh	127	92	68
Production d'électricité	TWh	31	25	21
Production de chaleur	TWh	74	54	39
Rendement	%	83%	86%	88%

Tableau 83 : Évolution du mix énergétique pour la cogénération

	2010	2020	2030	2040	2050
Vapeur	17%	13%	9%	4%	0%
Charbon	3%	3%	2%	1%	0%
Gaz	44%	45%	47%	48%	50%
Fioul	9%	7%	4%	2%	0%
GPL (gaz de pétrole liquéfié)	0%	0%	0%	0%	0%
Biomasse	27%	33%	38%	44%	50%
DIB (déchets industriels banals)	0%	0%	0%	0%	0%
Réseau de chaleur	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 84 : Consommation d'énergie dans l'agriculture

TWh PCS	2010	2050
Energie directe	43	29
- dont carburants	28	19
- dont électricité	4	2
- dont combustibles	12	8
Energie indirecte	59	30
- dont azote	39	12
- dont autres intrants	11	8
- dont matériel	10	10
TOTAL	102	59

Annexe 4 - production d'énergie - hypothèses et résultats

Tableau 85 : Biomasse : ressources brutes (TWh PCI)

		2010	2030	2050
Bois énergie issu de la forêt	TWh	48	106	132
Connexes de scierie	TWh	45	20	22
Déchets issus du bois	TWh		38	40
Bois énergie espaces arborés hors forêt	TWh	17	29	40
Biogaz issu de déchets	TWh	6	10	8
Biogaz issu de déjections d'élevage	TWh	0	19	22
Biogaz issu de résidus de cultures	TWh	0	23	38
Biogaz issu de cultures intermédiaires	TWh	0	26	47
Biogaz ex-prairies	TWh	0	5	28
Résidus de culture utilisés en combustion	TWh	0	1	2
Agrocarburants 1ère génération	TWh	28	15	13
Agrocarburants 2nde génération	TWh	0	0	16
TOTAL	TWh	145	292	408

Note : les rubriques utilisées ci-dessus ne sont pas entièrement comparables aux autres sources statistiques provenant des ministères en charge de l'énergie d'une part, de la forêt d'autre part.

Tableau 86 : Origine du bois énergie

		Mm3 bois rond ou équ.	TWh PCI (E primaire)
Ressources primaires	Forêt	18,5	48
	Hors forêt	6,6	17
Ressources dérivées	Déchets industrie du bois	11,6	30
	Liqueurs noires	3,6	9
	Déchets de récupération	2,2	6
	Total	42,5	110

Source : SSP - Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère de l'Agriculture

Tableau 87 : Biomasse : production de bois et prélèvements

		2012	2030	2050
Bois d'œuvre	Mm3	22	29	30-32
Bois d'industrie	Mm3	12	16	17-18
Bois énergie	Mm3	22	41	44-50
Pertes d'exploitation	Mm3	6	9	9-10
TOTAL	Mm3	62	94	108-110
Production biologique :				
- bois fort tige	Mm3	86	102	96-105
- bois total	Mm3	129	153	143-158
Taux de prélèvement		49%	61%	70%

Tableau 88 : Biomasse : vecteurs énergétiques et énergies finales

Données en TWh PCS	2010	2030	2050
Combustibles	117	132	109
- dont résidentiel	88	81	59
- dont tertiaire	8	16	14
- dont industrie	20	34	36
Vecteur électricité	2	11	6
Vecteur chaleur	12	37	28
Vecteur gaz	-	67	233
- dont biométhane	-	39	137
- dont syngas		29	96
Carburants liquides	25	15	27
Energie finale	157	262	403
Pertes non récupérées	13	41	51
Energie primaire utilisée	170	304	453
Consommations	4	24	46

Tableau 89 : Évolution des sources de production d'électricité

		2010	2020	2030	2040	2050
Nucléaire	MW	63 120	39 630	13 870	0	0
	TWh	409,3	254,2	86,0	0,0	0,0
Charbon	MW	6 828	0	0	0	0
	TWh	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Pétrole	MW	7 249	4 749	4 756	4 735	4 697
	TWh	5,8	5,5	1,3	0,7	0,2
Gaz réseau	MW	8 119	18 389	20 064	18 213	12 568
	TWh	34,4	92,6	75,4	36,0	24,1
Biomasse	MW	696	2 517	3 795	4 040	3 393
	TWh	3,5	10,2	14,5	14,6	10,2
- dont biomasse solide	MW	533	1 084	955	1 717	2 386
	TWh	2,6	4,8	4,0	6,3	6,8
- dont biogaz	MW	163	1 433	2 841	2 322	1 008
	TWh	0,8	5,4	10,4	8,3	3,5
Hydraulique	MW	24 919	25 700	26 335	27 270	28 505
	TWh	66,2	71,3	75,9	79,9	85,2
Eolien	MW	5 660	19 969	48 379	69 709	78 259
	TWh	9,7	40,6	115,5	179,3	209,0
- dont terrestre	MW	5 660	19 099	35 549	46 049	48 299
	TWh	9,7	39,0	76,3	102,1	108,4
- dont maritime	MW	0	870	12 830	23 660	29 960
	TWh	0,0	1,6	39,2	77,2	100,6
Photovoltaïque	MW	1 049	22 799	50 749	71 319	81 109
	TWh	0,6	20,9	51,0	75,7	90,3
Energies marines	MW	250	296	489	921	1 640
	TWh	0,5	0,7	1,6	3,5	6,5
Géothermie	MW	0	64	419	818	818
	TWh	0,0	0,4	2,9	5,7	5,7
Déchets	MW	414	338	276	226	185
	TWh	1,9	1,6	1,3	0,8	0,4
TOTAL	MW	118 304	134 451	169 132	197 250	211 174
	TWh	554,3	498,0	425,4	396,2	431,7
- dont renouvelables électriques	MW	31 878	68 764	125 952	169 219	189 513
	TWh	77,0	133,6	244,0	338,4	391,0
- dont renouvelables	MW	33 006	72 022	133 594	183 892	205 078
	TWh	82,5	147,5	274,5	378,5	428,8

Tableau 90 : Évolution de la consommation d'énergie primaire

		2010	2020	2030	2040	2050
Charbon	TWh	151	82	50	28	13
Pétrole	TWh	859	698	337	110	48
Gaz fossile	TWh	501	543	432	197	42
Uranium	TWh	1240	770	261	0	0
Hydraulique	TWh	61	65	68	72	77
Eolien	TWh	10	41	115	179	209
Energies marines	TWh	1	1	2	3	7
Solaire photovoltaïque	TWh	1	21	51	76	90
Solaire thermique	TWh	1	3	13	28	39
Géothermie	TWh	2	8	21	33	29
Biomasse solide	TWh	136	165	212	259	263
Biomasse liquide	TWh	31	25	19	18	33
Déchets	TWh	13	11	9	7	5
Biogaz	TWh	4	27	73	123	157
Total	TWh	3009	2460	1662	1133	1010

Tableau 91 : Évolution des vecteurs primaires

		2010	2020	2030	2040	2050
Electricité	TWh	550	390	403	371	403
Gaz	TWh	414	269	372	318	242
Chaleur	TWh	48	89	75	84	92
Combustibles	TWh	363	142	241	168	129
Carburants	TWh	647	70	269	91	63
Total	TWh	2022	960	1360	1032	929

Tableau 92 : Vecteur gaz - Ressources et usages

		2010	2020	2030	2040	2050
Ressources						
Gaz fossile	TWh	413	357	314	157	32
Biogaz	TWh	1	7	29	73	112
Biomasse gazéifiée	TWh	0	0	29	88	98
Méthanation d'hydrogène	TWh	0	0	2	16	47
TOTAL	TWh	414	363	373	334	289
Usages						
Chaleur - résidentiel	TWh	188	160	114	76	64
Chaleur - tertiaire	TWh	79	74	55	40	28
Chaleur - industrie	TWh	132	101	92	70	56
Chaleur - agriculture	TWh	9	9	8	7	6
Mobilité des personnes	TWh	1	8	58	78	69
Transport de marchandises	TWh	0	5	41	49	48
Mobilité dans l'agriculture	TWh	0	3	7	10	13
Matières premières	TWh	3	3	3	3	3
Pertes transport et distribution	TWh	2	1	1	1	1
TOTAL	TWh	414	363	379	334	289

Tableau 93 : Évolution de la consommation d'énergie finale, par secteur et par usage

		2010	2020	2030	2040	2050
Consommation d'énergie finale, par secteur						
Résidentiel	TWh	560	510	382	271	239
Tertiaire	TWh	263	258	201	161	133
Mobilité des personnes	TWh	401	330	234	161	139
Transport des marchandises	TWh	196	191	126	73	66
Industrie	TWh	444	398	341	288	243
Agriculture	TWh	43	40	36	32	28
Consommation d'énergie finale, par usage						
Chaleur	TWh	937	840	665	508	428
Mobilité	TWh	625	547	383	256	225
Electricité spécifique	TWh	286	292	239	202	184
Matières premières	TWh	60	48	32	21	13
TOTAL	TWh	1908	1727	1319	986	849

Tableau 94 : Mobilité - évolution des consommations d'énergie finale

		2010	2020	2030	2040	2050
Mobilité des personnes						
GPL	TWh	1	1	0	0	0
Essence / gasoil / agrocarburants	TWh	390	310	157	47	44
GNV/bioGNV	TWh	1	8	58	74	69
Electricité	TWh	9	11	19	26	26
TOTAL	TWh	401	330	234	146	139
Transport de marchandises						
GPL	TWh	0	0	0	0	0
Essence / gasoil / agrocarburants	TWh	195	185	81	13	12
GNV/bioGNV	TWh	0	5	41	48	48
Electricité	TWh	1	1	4	6	6
TOTAL	TWh	196	191	126	67	66
Agriculture						
GPL	TWh	0	0	0	0	0
Essence / gasoil / agrocarburants	TWh	28	22	17	11	6
GNV/bioGNV	TWh	0	3	7	10	13
Electricité	TWh	0	0	0	0	0
TOTAL	TWh	28	25	23	21	19
Mobilité - total						
GPL	TWh	1	1	0	0	0
Essence / gasoil / agrocarburants	TWh	613	517	255	71	62
GNV/bioGNV	TWh	1	16	106	132	130
Electricité	TWh	10	13	23	32	32
TOTAL	TWh	625	547	383	235	225

Tableau 95 : Chaleur - évolution des consommations d'énergie finale

		2010	2020	2030	2040	2050
Résidentiel						
Charbon	TWh	3	2	1	0	0
Biomasse solide	TWh	76	91	81	62	59
Combustible liquide (fuel, biomasse)	TWh	81	54	26	8	0
GPL	TWh	18	11	5	1	0
Gaz	TWh	188	160	114	76	64
Electricité	TWh	104	90	65	45	33
Réseaux de chaleur	TWh	12	21	23	21	23
Solaire thermique	TWh	1	2	7	13	17
TOTAL	TWh	482	430	322	227	196
Tertiaire						
Charbon	TWh	4	3	2	1	0
Biomasse solide	TWh	8	14	16	16	14
Combustible liquide (fuel, biomasse)	TWh	33	24	12	4	0

GPL	TWh	8	5	3	1	0
Gaz	TWh	79	74	55	40	28
Electricité	TWh	41	41	36	30	25
Réseaux de chaleur	TWh	12	21	24	23	20
Solaire thermique	TWh	0,0	0,2	1,3	2,6	3,2
TOTAL	TWh	185	183	149	117	90
Industrie						
Charbon	TWh	20	33	21	12	6
Biomasse solide	TWh	33	27	31	33	33
Combustible liquide (fuel, biomasse)	TWh	47	33	22	13	7
GPL	TWh	5	8	5	2	0
Gaz	TWh	132	101	86	70	56
Electricité	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Réseaux de chaleur	TWh	19	13	14	14	14
Solaire thermique	TWh	0,0	0,8	4,6	11,8	18,6
TOTAL	TWh	257	216	184	156	135
Agriculture						
Charbon	TWh	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Biomasse solide	TWh	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Combustible liquide (fuel, biomasse)	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GPL	TWh	2,0	1,7	1,4	1,1	0,8
Gaz	TWh	9,4	8,6	7,8	7,0	6,2
Electricité	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Réseaux de chaleur	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Solaire thermique	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	TWh	12	11	9	8	7
Usages chaleur - total						
Charbon	TWh	28	38	23	13	6
Biomasse solide	TWh	117	132	128	111	106
Combustible liquide (fuel, biomasse)	TWh	161	111	60	26	7
GPL	TWh	33	27	14	5	1
Gaz	TWh	408	343	263	192	154
Electricité	TWh	145	131	101	74	57
Réseaux de chaleur	TWh	43	55	62	58	57
Solaire thermique	TWh	1	3	13	28	39
TOTAL	TWh	936	840	665	507	428