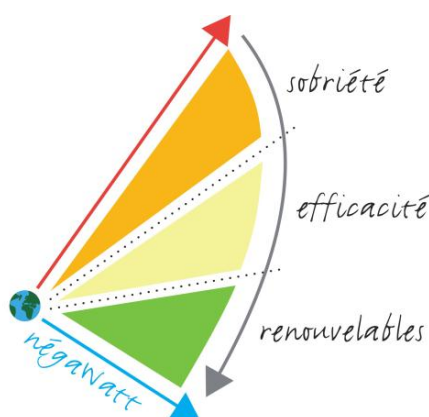


VERS UN SYSTEME ENERGETIQUE « 100% RENOUVELABLE »

Scénario et plans d'actions pour réussir la transition énergétique
en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Rapport méthodologique du scénario négaWatt régionalisé



Partie 2 – Hypothèses du scénario négaWatt pour Provence-Alpes-Côte d'Azur - version finale

Principaux membres de l'équipe :

Vincent LEGRAND, Institut négaWatt (mandataire)

Olivier SIDLER, Enertech

Thomas LETZ, Enertech

Christian COUTURIER, Solagro

Anne RIALHE, AERE

Pascal STEPHANO, AERE

Antoine BONDUELLE, E&E

Simon METIVIER, E&E

Yves MARIGNAC, WISE-Paris

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	9
I- CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT GENERAL DE L'OUTIL SCENARIO (NATIONAL ET REGIONAL)	10
1- Les fondamentaux du scénario	10
2- Modèle et structure de l'outil de scénarisation	11
3- Hypothèses générales de population	13
3-1 Les hypothèses du scénario national	13
3-2 Les hypothèses du scénario régional	14
II- LES SECTEURS DE CONSOMMATION	15
1- Bâtiments résidentiels et tertiaires	15
1-1 Les hypothèses du scénario national	15
1-1-1 Confort thermique résidentiel	15
1-1-2 Confort thermique tertiaire	23
1-1-3 Electricité spécifique pour le résidentiel	28
1-1-4 Electricité spécifique pour le tertiaire	35
1-1-5 Cuisson résidentielle et tertiaire	38
1-2 Les hypothèses de la régionalisation	39
1-2-1 Résidentiel	39
1-2-2 Tertiaire	41
2- « Transports » : mobilité des personnes et déplacement de marchandises	44
2-1 Les hypothèses du scénario national	44
2-1-1 Mobilité des personnes	45
2-1-2 Transports de marchandises	51
2-2 Les hypothèses de la régionalisation	57
2-2-1 Mobilité des personnes	57
2-2-2 Transports de marchandises	58
3- Production industrielle	59
3-1 Les hypothèses du scénario national	60
3-2 Les hypothèses de la régionalisation	75
3-2-1 – Le principe de la modélisation	75
3-2-2 – Le « point zéro »	76
3-2-3 – Evolution des productions	77
3-2-4 – Efficacité sur les productions	79
4- Agriculture	80
III- LES SECTEURS DE PRODUCTION D'ENERGIE	81
1- Energies renouvelables hors biomasse	81
1-1 Hydroélectricité	81
1-2 Eolien	82
1-3 Photovoltaïque	83
1-4 Solaire thermique	83
1-5 Récupération de chaleur en géothermie de surface ou sur eaux usées	85

2- Production issue de la biomasse-énergie	87
2-1 Le bois.....	87
Le bois énergie issu de la forêt	87
Les produits connexes de scierie	88
Les espaces arborés non forestiers.....	88
Les déchets de bois	88
2-2 Le biogaz.....	88
Les déjections d'élevage	89
Les résidus de culture.....	89
Les cultures intermédiaires.....	89
Le biogaz ex-prairie	89
Les déchets alimentaires et agro-alimentaires	89
2-3 Autres ressources biomasse	89
3- Production d'énergie d'origine fossile et fissile	89
3-1 La production d'électricité d'origine nucléaire	89
3-2 La production d'énergie d'origine fossile	92
 IV- LES RESEAUX ET L'EQUILIBRE OFFRE-DEMANDE EN ELECTRICITE.....	93
1- Enjeux de l'équilibre offre-demande et modes de gestion	93
2- Outil de modélisation de l'équilibre offre-demande en électricité	95
2-1 Modélisation de la demande en puissance	95
2-2 Modélisation de l'offre en puissance	95
 Annexe 1 : Reconstitution des consommations de chauffage, ECS et climatisation pour le résidentiel dans le scénario national (« point zéro »).....	96
Annexe 2 : Reconstitution des consommations de chauffage, ECS et climatisation pour le tertiaire dans le scénario national (« point zéro »)	100
Annexe 3 - Complément du point zéro pour l'industrie	102
Annexe 4 : Sidérurgie – Analyse du potentiel d'économie d'énergie	106

TABLE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Récapitulatif des hypothèses démographiques nationales et régionales	14
Tableau II-1: Hypothèses formulées pour la climatisation dans le résidentiel	23
Tableau II-2: Consommation d'eau moyenne quotidienne par m ² de surface dans le tertiaire	27
Tableau II-3: Besoins en climatisation et consommations correspondantes par secteur	27
Tableau II-4: Détail des 19 services pris en compte pour la consommation d'électricité spécifique dans le résidentiel. 29	
Tableau II-5: Principaux déterminants du secteur électricité spécifique résidentiel (les indicateurs de résultats sont en gras)	30
Tableau II-6: Détail des 10 services pris en compte pour la consommation d'électricité spécifique dans le tertiaire.....	36
Tableau II-7: Principaux déterminants du secteur électricité spécifique tertiaire (les indicateurs de résultats sont en gras)	36
Tableau II-8: Déterminants liés à la cuisson dans le scénario négaWatt.....	38
Tableau II-9: Synthèse des déplacements de personnes en milliards de km.voyageurs parcourus, par mode de transport.....	49
Tableau II-10: Nombre de km.voyageurs par habitant.....	49
Tableau II-11: Evolutions des km.voyageurs parcourus entre 2008 et 2050 pour motifs personnels et professionnels, hors mobilité régulière et locale et autre mobilité.....	50
Tableau II-12: Répartition par combustible pour chaque mode de déplacement (part du nombre de km.voyageurs parcourus pour chaque mode)	51
Tableau II-13: Evolutions des Gt.km transportées par mode de transport	54
Tableau II-14: Evolution des Gt.km transportées par mode de transport et par type de marchandises	54
Tableau II-15: Evolution des chargements moyens des véhicules de transports de marchandises (t)	55
Tableau II-16: Evolution des parts modales pour le transport des marchandises (en% des Gt.km transportées).....	56
Tableau II-17: Evolution des consommations unitaires par mode et par motorisation	57
Tableau II-18: Matrice de consommation de biens en France en 2010.....	60
Tableau II-19: Taux de relocalisation de la production de biens en France dans le scénario négaWatt national	62
Tableau II-20 – Hypothèses de réduction et de réutilisation des emballages.....	63
Tableau II-21 – Impact sur la production de la réutilisation et de la réduction des emballages.....	63
Tableau II-22 – Principales hypothèses sur les réductions de consommation liées à la sobriété	63
Tableau II-23: Evolution de la répartition des surfaces en constructions neuves et rénovations	66
Tableau II-24: Evolution de la répartition des matériaux utilisés dans les constructions neuves (%)	66
Tableau II-25: Evolution de la répartition des isolants utilisés dans les constructions neuves et rénovations (%).....	67
Tableau II-26: Evolution de la répartition des châssis utilisés dans les menuiseries, en constructions neuves et rénovations (%).....	67
Tableau II-27 – Gain énergétique actuel du recyclage.....	67
Tableau II-28 – Taux ultimes de recyclage.....	68
Tableau II-29 – Taux de recyclage nationaux modélisés.....	68
Tableau II-30 – Estimation CEREN du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 – Industrie française	71

Tableau II-31 – Détail du potentiel d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 – Industrie française	71
Tableau II-32: Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour la Compression Mécanique de Vapeur (CMV) et les Pompes A Chaleur (PAC), pour les process de la catégorie (%)	72
Tableau II-33: Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour les fours par passage à l'induction, pour les process de la catégorie (%).....	72
Tableau II-34 – Performance des cogénérateurs.....	73
Tableau II-35 – Potentiel net de cogénération (net signifiant ici « en plus de la cogénération actuelle »).....	73
Tableau II-36 : Evolution du mix énergétique pour la cogénération (%)	74
Tableau II-37 : Evolution du mix énergétique retenue pour les process industriels (%)	75
Tableau II-38 : Part des combustibles plastiques (déchets) venant en substitution des combustibles fossiles	75
Tableau II-39 : Part de biomasse dans le combustible des hauts-fourneaux	75
Tableau II-40 – Consommation d'énergie dans l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur	77
Tableau II-41 – Evolution de la sidérurgie nationale	78
Tableau II-42 – Indice de production des secteurs industriels	79
Tableau II-43 – Estimation du potentiel d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 – Industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur	79
Tableau III-1 : Différences entre valeurs régionales et valeurs moyennes pour la France en termes de productivité	84
Tableau III-2: Différences entre valeurs régionales et valeurs moyennes pour la France en surfaces unitaires.....	85
Tableau A1-2 : Coefficients de besoins de chauffage obtenus par identification	97
Tableau A1-3 : Rendements moyens des chauffages du parc de logements existants	97
Tableau A1-4 : Rendements moyens des productions d'eau chaude sanitaire du parc de logements existants (valeurs du DPE)	98
Tableau A3-5: Synthèse des principales différences dans les données statistiques pour les principales sources	102
Tableau A3-6 – Corrections des statistiques.....	103
Tableau A3-7 - Combustibles et vapeur, 2007 (ktep)	104
Tableau A3-8 – Electricité, 2007 (ktep).....	105
 Tableau A4-1 – Chiffres clés 2008 – Acier.....	 106
Tableau A4-2 – Consommation d'énergie – Sidérurgie	107
Tableau A4-3 – Bilan Sidérurgie	109

TABLE DES FIGURES

Figure I-1 : Hiérarchiser ses besoins, pour identifier les besoins superflus (sobriété)	10
Figure I-2: Démarche de modélisation du scénario négaWatt 2011	12
Figure I-3: Evolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négaWatt)	13
Figure I-4: Graphique des hypothèses d'évolution de la population régionale (2010-2050)	14
Figure II-1: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie pour le confort thermique dans les logements (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation) dans le scénario négaWatt 2011 national	17
Figure II-2 : Evolution de la taille des logements (tendanciel et négaWatt)	18
Figure II-3 : Evolution de la structure du parc de logements (tendanciel)	19
Figure II-4 : Evolution de la structure du parc de logements (négaWatt)	19
Figure II-5 : Evolution des parts des différents systèmes de chauffage	20
Figure II-6: Evolution des parts des différents systèmes de production d'eau chaude sanitaire	21
Figure II-7 : Evolution des rendements des différents systèmes de chauffage en logement collectif	22
Figure II-8 : Evolution des rendements des différents systèmes de préparation d'eau chaude sanitaire en logement collectif	22
Figure II-9: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie pour le confort thermique dans les bâtiments tertiaires (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation) dans le scénario négaWatt 2011 national	24
Figure II-10 : Evolution des surfaces du secteur tertiaire	25
Figure II-11 : Evolution de la structure du parc dans le secteur tertiaire	26
Figure II-12 : Proportion de locaux climatisés	28
Figure II-13 : Comparaison des évolutions de consommation d'électricité spécifique en résidentiel	35
Figure II-14 : Coefficients climatique chauffage	39
Figure II-15: Corrélation entre les données Energ'Air et les données régionalisées issues du scénario négaWatt 2011 pour le secteur résidentiel.....	40
Figure II-16: Répartition des différentes énergies pour le chauffage et l'ECS en France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, en 2010 et 2050, pour le secteur résidentiel	41
Figure II-17: Evolution des consommations de chauffage et d'ECS en résidentiel, par source, en énergie finale	41
Figure II-18: Corrélation entre les données Energ'Air et les données régionalisées issues du scénario négaWatt 2011 pour le secteur tertiaire.....	42
Figure II-19: Répartition des différentes énergies pour le chauffage et l'ECS en France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, en 2010 et 2050, pour le secteur tertiaire	43
Figure II-20: Evolution des consommations de chauffage et d'ECS dans le tertiaire, par source, en énergie finale	43
Figure II-21: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de personnes dans le scénario négaWatt 2011 national.....	46
Figure II-22: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de marchandises dans le scénario négaWatt 2011 national	52
Figure II-23: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie dans l'industrie dans le scénario négaWatt 2011 national	61
Figure II-24: Déterminants pris en compte pour le calcul des consommations additionnelles liées aux constructions et au programme de rénovations thermiques dans le scénario négaWatt 2011	65
Figure II-25 - Répartitions des coûts d'utilisation d'un moteur électrique	70
Figure II-26 – Récupération d'énergie et cogénération	74

Figure II-27 – Méthodologie pour l'industrie.....	76
Figure II-28 - Consommation d'énergie dans l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	77
Figure III-1: Production régionale d'énergie renouvelable (hors biomasse) en 2007.....	81
Figure III-2: Evolution de la disponibilité de la ressource en bois pour le Bois d'industrie / Bois d'œuvre (BIBE) et le Menu bois (MB)	88
Figure III-3: Optimisation des contraintes sur le rythme de fermeture du parc de réacteurs nucléaires	91
Figure III-4: Evolution du parc nucléaire de production électrique dans le scénario négaWatt 2011 (en TWh) – un rectangle est un réacteur, la hauteur représente la production annuelle d'électricité.	91
Figure IV-1: Complémentarité des réseaux : exemple de la « méthanation »	94
Figure IV-2: Hiérarchie des solutions pour la gestion de l'équilibre offre-demande du réseau électrique.....	94
Figure IV-3: Exemple de répartition des sources d'électricité pour trois journées hivernales aux conditions météorologiques identiques en 2010 et 2050 (en MW).	95
Figure A1-1: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour le chauffage des maisons individuelles (en haut) et des logements collectifs (en bas).....	96
Figure A1-2: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour l'eau chaude sanitaire.....	99
Figure A1-3: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour la climatisation... ..	99
Figure A2-1: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour le chauffage du secteur tertiaire.....	100
Figure A2-2: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour l'eau chaude sanitaire du secteur tertiaire.....	100
Figure A2-3 : Proportions de surfaces climatisées dans les différents secteurs du tertiaire.....	101
Figure A2-4 : Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour la climatisation du secteur tertiaire.....	191
Figure A3-1 – Consommation d'énergie de l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur, selon sources – 2007.....	104
Figure A3-2 – Consommation d'énergie de l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur, selon sources, après correction des périmètres – 2007.....	104
Figure A4-1 – Répartition des consommations d'énergie par usage – Sidérurgie (national).....	106
Figure A4-2 – Répartition des consommations d'énergie par type d'énergie – Sidérurgie (national).....	106

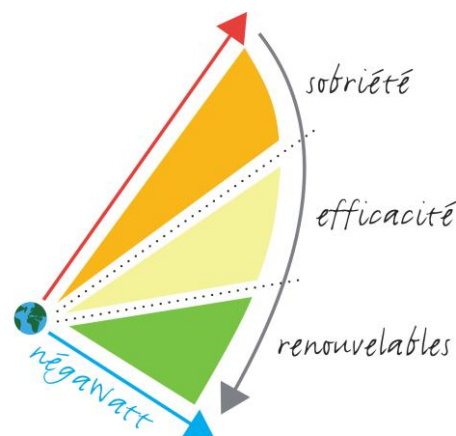
Introduction

La mission qui nous a été confiée par le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur consiste à explorer la transition énergétique régionale et à décrire jusqu'à 2050 une trajectoire énergétique ambitieuse, proche d'un scénario « 100% renouvelable ».

L'objectif du présent document est de décrire le fonctionnement de l'outil scénario utilisé pour la présente mission, ainsi que les hypothèses et données qui ont été retenues pour réaliser le scénario régional. Les résultats et les plans d'actions associés font l'objet de rapports séparés.

L'exercice prospectif réalisé, d'un genre nouveau, a consisté à régionaliser une trajectoire énergétique nationale en fonction des caractéristiques et des potentiels régionaux.

La trajectoire nationale prise en compte est le scénario négaWatt 2011, sorti le 29 septembre 2011 et détaillé dans le Manifeste négaWatt (Editions Actes Sud)¹.



Ce scénario national est donc l'enveloppe dans lequel s'intègre le scénario régionalisé décrit dans ce document.

L'intérêt du scénario national est de décrire une trajectoire intégrant les réductions de consommation d'énergie par secteur (bâtiments résidentiels et tertiaires, industrie et transports) et les productions d'énergie renouvelable correspondantes, pour aboutir à une couverture des besoins avec plus de 90% d'énergie renouvelable, et proche de 100% pour l'électricité et la chaleur.

Pour être crédible, ce taux de couverture exige, pour l'électricité, une analyse entre l'offre et la demande qui n'aurait que peu de sens au niveau régional : **l'équilibre électrique offre-demande** exige un territoire suffisamment étendu pour disposer d'un foisonnement de sources de production et de sources de consommation d'énergie. Pour la France, l'échelle nationale est une échelle pertinente pour simuler et piloter cet équilibre. Le scénario négaWatt national a donc intégré cet équilibre offre-demande, sur un pas de temps horaire, jusqu'à 2050.

Un second intérêt de cet exercice de régionalisation est de pouvoir prendre en compte, pour les **réductions de consommations d'énergie**, non seulement les réductions qui relèvent des actions régionales, mais également celles qui relèvent d'échelles plus élevées (Etat, Europe), et ce pour les trois secteurs de consommations d'énergie considérés. Cette démarche suppose une action volontariste d'autres acteurs que la Région en faveur de la transition énergétique, ce qui constitue sans aucun doute une donnée fondamentale pour mettre en œuvre cette transition ambitieuse.

Pour comprendre le fonctionnement de cette régionalisation, il est donc nécessaire de décrire les hypothèses retenues au niveau national, qui sont supposées s'appliquer dans le déroulement du scénario négaWatt régionalisé. La régionalisation a ensuite été effectuée sur la base des caractéristiques régionales qui sont également explicitées, tant pour la consommation que pour la production.

Ce document présente donc :

- La méthodologie globale qui a été adoptée
- Les hypothèses du scénario négaWatt national qui ont été les plus utiles pour la construction du scénario régionalisé (hypothèses sur postes de consommation d'énergie)²
- Les méthodes et hypothèses qui ont permis la régionalisation des postes de consommations
- Les hypothèses qui ont permis de connaître les postes de production.

¹ Une synthèse présentant le scénario est disponible en ligne sur le site de l'association négaWatt : www.negawatt.org

² Les hypothèses présentées dans ce document sont celles qui ont le plus d'intérêt pour la régionalisation. Pour être plus complet, notons qu'un document technique décrivant l'ensemble des hypothèses du scénario négaWatt national sera disponible à l'été 2012.

I- Construction et fonctionnement général de l'outil scénario (national et régional)

La présente partie détaille la méthodologie globale du scénario et les principales hypothèses structurantes effectuées.

1- Les fondamentaux du scénario

Le travail de scénarisation effectué s'est basé sur la démarche négaWatt : sobriété, efficacité énergétique et énergie renouvelables.

La sobriété énergétique consiste à hiérarchiser nos besoins (Figure I-1) et à supprimer les besoins jugés superflus. Ce travail relève autant d'actions individuelles (comportement) que collectives :

- le choix d'un appareil adapté à l'usage (taille de la voiture, du réfrigérateur, de la maison, extinction des appareils qui fonctionnent sans utilité, ...) relève de comportements individuels
- l'extinction de l'éclairage public nocturne (extinction totale, partielle, la baisse de l'intensité lumineuse ou des points lumineux, ...), la limitation de la vitesse des véhicules font partie des choix de sobriété collective.

L'efficacité énergétique consiste à répondre aux besoins définis en consommant le moins d'énergie possible : une maison isolée consommera moins pour délivrer une température donnée, elle sera donc plus efficace. L'efficacité intervient dans la consommation des moteurs, des appareils électroménagers (étiquette énergie), le rendement des chaudières, ...

Une fois réduits les besoins d'énergie grâce à la sobriété et à l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables constituent une réponse intelligente au besoin d'énergie.

Ce triptyque « sobriété, efficacité et renouvelable », illustré en page précédente, a été appliqué systématiquement à tous les domaines de l'énergie, dans le scénario négaWatt.

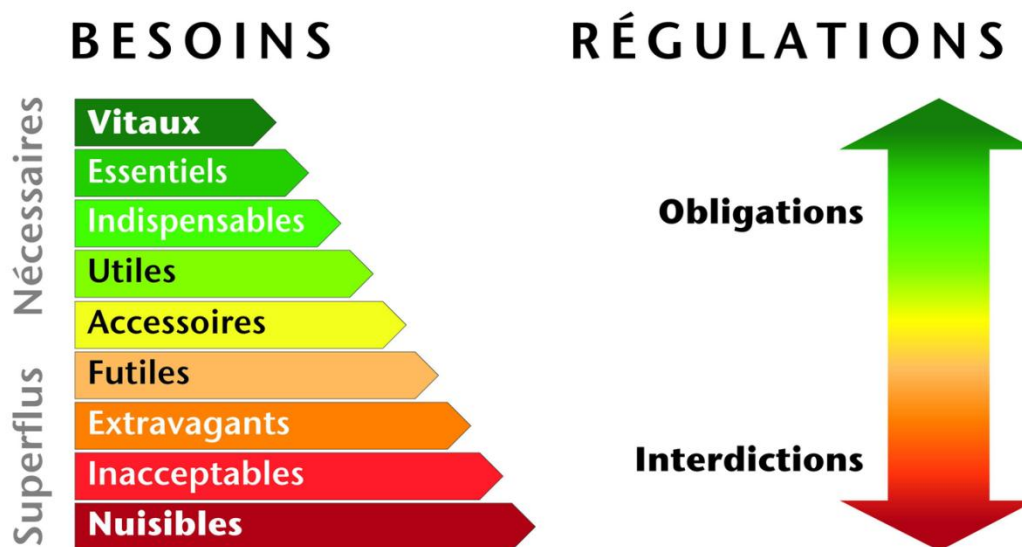


Figure I-1 : Hiérarchiser ses besoins, pour identifier les besoins superflus (sobriété)

Trois principes directeurs sont par ailleurs à la base de la construction du scénario négaWatt national comme du régional :

- **Un scénario physique**, avant d'être économique : le scénario proposé ne travaille pas sur optimum « technico-économique » du système énergétique, il intègre des critères sociaux et environnementaux dans la hiérarchie 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. Puis il fait de même concernant les potentiels des énergies de flux, qu'il privilégie par rapport aux énergies de stock. Il remet donc les analyses dans l'ordre, en partant des réalités physiques, d'où découlent les contraintes économiques.

- **Pas de rupture technologique** : le scénario ne repose sur aucun pari technologique. Des « ruptures » ou « bonnes surprises » ne sont pas à exclure d'ici à 2050, telles que peut être la maturité des biocarburants liquides ou gazeux de 3^e génération, 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 ouverte aux évolutions futures. Le critère pour retenir ou non une technologie est donc l'existence ou non d'un prototype industriel suffisamment crédible.

- **Un scénario multicritère** : l'objectif du scénario ne se limite pas à la lutte contre le changement climatique. Il ne suffit pas de « décarboner » l'énergie pour faire une transition énergétique, mais il faut réduire l'ensemble des risques et des impacts liés à notre modèle énergétique. Les contraintes sur l'eau, les matières premières, les problématiques de pollutions ou d'usage des sols doivent également être prises en compte. La définition du développement soutenable qui a permis de hiérarchiser les choix du scénario est la suivante : « léguer aux générations futures des bienfaits et des rentes plutôt que des fardeaux et des dettes ». Cette définition conduit très logiquement à écarter la construction de nouveaux réacteurs nucléaires ainsi que le recours aux technologies de « capture et séquestration de carbone » ou l'exploitation des gaz de schistes.

Notons enfin que 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. Afterres2050 est donc « l'équivalent agricole » du scénario négaWatt, les deux scénarios étant complémentaires et totalement compatibles. Afterres2050 permet d'identifier notamment les usages des sols qui relèvent des hypothèses retenus par Solagro et négaWatt (AFTERRES2050 et sa déclinaison régionale sont présentés dans un rapport spécifique, partie 4).

2- Modèle et structure de l'outil de scénarisation

La démarche de prospective du scénario négaWatt est centrée sur les services énergétiques, et remonte aux productions d'énergie. Ce choix 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.

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 par la version 2011 du scénario négaWatt ne permet pas de relier directement choix énergétiques et mesure du PIB : ceci nécessiterait de lui adjoindre un module spécifique qui pourra éventuellement être réalisé plus tard.

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 donc sur une analyse remontante, à partir des services énergétiques, répartis en trois grands usages :

- la chaleur, qui regroupe le chauffage des bâtiments du résidentiel et du tertiaire, l'eau chaude sanitaire, la cuisson des aliments, la chaleur utilisée dans les processus industriels, ainsi que la climatisation ;
- 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 (ascenseurs par exemple).

Le choix du « vecteur énergétique » le plus approprié (combustible solide, liquide ou gazeux, carburant, chaleur, électricité...) pour répondre à chaque besoin est ensuite effectué de façon à pouvoir remonter aux consommations en énergie finale, celle qui est délivrée aux consommateurs pour chacun de leurs usages. De même, on remonte ensuite des consommations finales aux consommations de ressources primaires (pétrole, gaz fossile, uranium, énergies renouvelables...) produites en France ou importées. Ces consommations sont mises 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, pour le scénario national, assurer l'équilibre entre offre et demande.

Pour l'électricité, cet équilibre ne doit pas seulement être assuré en volume de production annuelle, mais à tout instant : l'outil développé dans le scénario négaWatt national permet d'assurer un équilibre entre l'offre et la demande d'électricité heure par heure pour chaque année jusqu'en 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, ...

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.

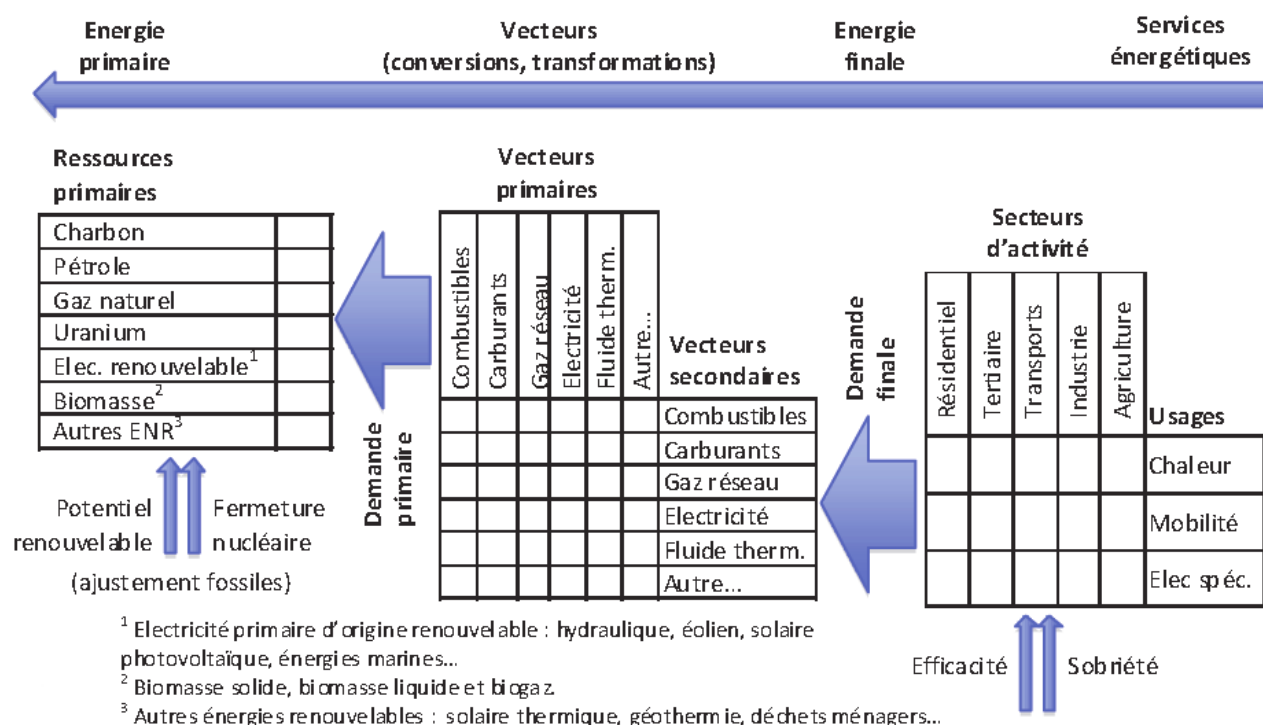


Figure I-2: Démarche de modélisation du scénario négaWatt 2011

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 + chaleur latente de l'eau) pour plusieurs vecteurs :

- pour la biomasse solide, augmentation de 1,09
- pour les combustibles liquides, augmentation de 1,08
- pour le GPL, augmentation de 1,09
- pour le combustible gazeux, augmentation de 1,11

3- Hypothèses générales de population

Le scénario négaWatt s'appuie, pour les hypothèses démographiques, sur les statistiques INSEE jusqu'à 2007, puis sur les projections INSEE³ jusqu'à 2040, ensuite sur une extrapolation jusqu'à 2050.

3-1 Les hypothèses du scénario national

Dans le scénario national, l'hypothèse médiane de l'INSEE a été retenue. La population augmente donc jusqu'à 72,3 millions d'habitants vers 2050, une prévision largement supérieure à la précédente (2003⁴), où la population se stabilisait entre 2035 et 2045 aux alentours de 64,5 millions d'habitants, avant de diminuer légèrement vers 2050.

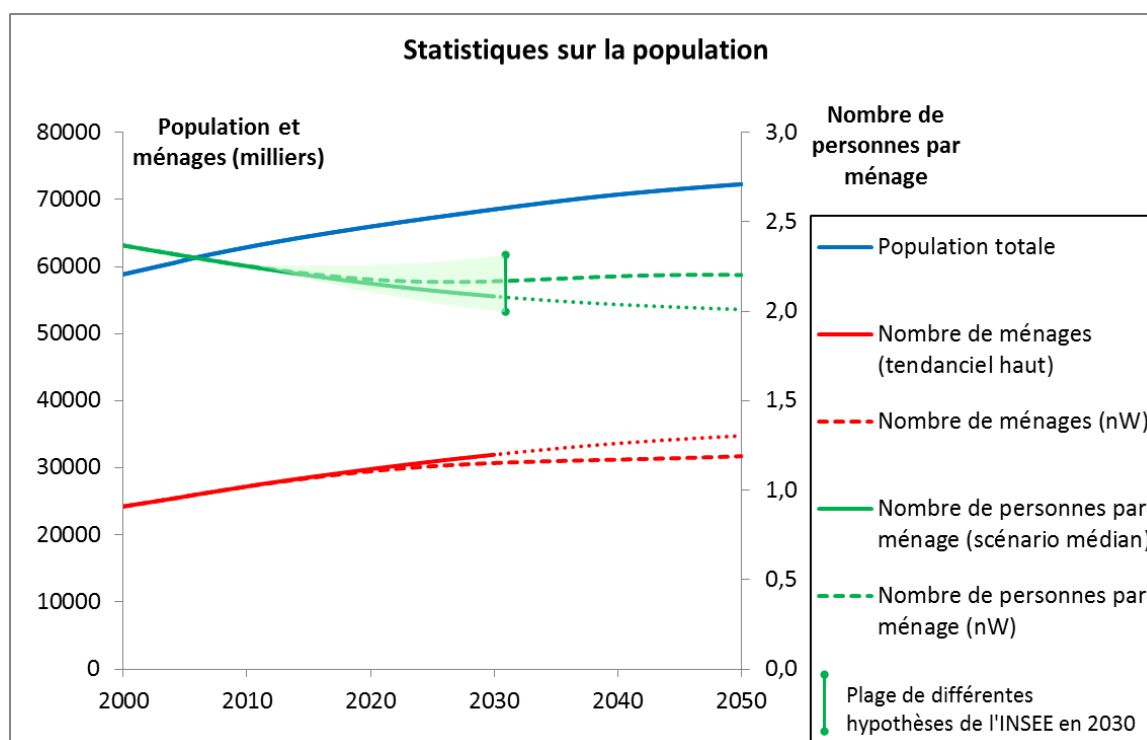


Figure I-3: Evolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négaWatt)

L'évolution du nombre de personnes par logement est traitée dans la partie bâtiment.

³ Projections de population à l'horizon 2060, octobre 2010, Nathalie Blanpain, Olivier Chardon, division Enquêtes et études démographiques, INSEE, n° 1320, 4 p.

⁴ Projection démographique pour la France, ses régions et ses départements, Chantal Brutel, Laure Omalek, résultats 2003, INSEE.

3-2 Les hypothèses du scénario régional

Conformément aux analyses du service Prospectives de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, deux hypothèses distinctes pour la scénarisation régionale ont été prises en compte.

La projection régionale initialement considérée comme « médiane » par l'INSEE constitue pour la Région comme le scénario bas, alors que la projection régionale considérée comme « haute » par l'INSEE constitue pour la Région comme un scénario médian. Ce choix se justifie par le fait que l'INSEE, dans ses recensements, a un nombre non négligeable de personnes non localisées géographiquement, dont une partie significative serait située en Provence-Alpes-Côte d'Azur (personnes en cours de déménagement, ...). Cela a donc conduit l'INSEE à sous-évaluer la population régionale, les flux migratoires inter-régionaux en direction de la Région et, par cumul, les projections démographiques.

Les deux projections démographiques régionales retenues sont représentées ci-dessous :

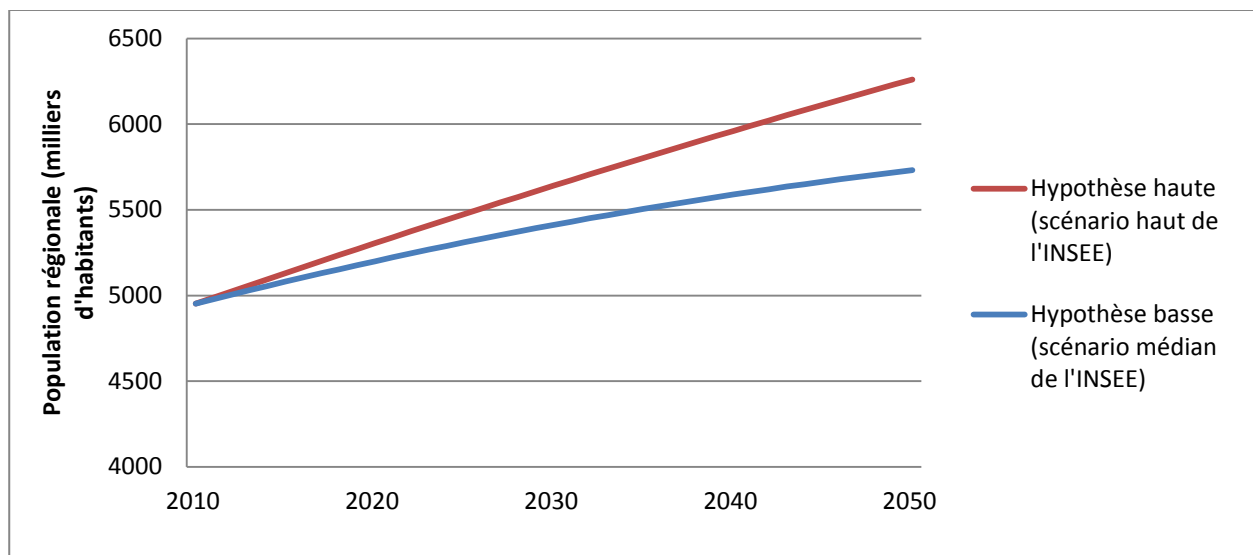


Figure I-4: Graphique des hypothèses d'évolution de la population régionale (2010-2050)

En termes de modélisation, les conséquences de ces différentes évolutions, à population nationale fixée, sont une modification du « poids démographique » de la Région en France, et donc une proportion plus ou moins élevée de consommations d'énergie correspondante (de logements et de bureaux construits, de déplacements, ...). On considère par contre que l'impact sur la production industrielle est mineur ; il sera donc négligé par la suite.

Tableau I-1: Récapitulatif des hypothèses démographiques nationales et régionales

Par millier d'habitants	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Population régionale						
Hypothèse Basse	4540	4952	5200	5412	5589	5731
Hypothèse Haute	4540	4952	5305	5641	5960	6261
Population nationale	58858	62881	65962	68532	70734	72275

II- Les secteurs de consommation

Les secteurs de consommation d'énergie pris en compte dans le scénario sont :

- Les bâtiments résidentiels et tertiaires
- La mobilité des personnes et le transport des marchandises
- La production industrielle
- Dans une moindre mesure, les consommations du secteur agricole.

Pour ces secteurs de consommation d'énergie, le choix effectué est novateur dans le cadre de scénarios énergétiques : une analyse très fine a été menée au niveau national sur les potentiels de réduction de consommation d'énergie, et ces trajectoires de consommations nationales ont ensuite été régionalisées en se basant sur les caractéristiques de la Région.

Cette approche conduit à ce que les évolutions de consommation d'énergie au niveau régional s'inscrivent dans une dynamique nationale, tout en étant adaptées aux spécificités régionales.

Pour bien comprendre les choix qui ont été effectués pour aboutir aux trajectoires de consommation d'énergie par secteur, deux étapes sont donc nécessaires :

- dans un premier temps, il nous faut d'explicitier les choix, déterminants, hypothèses et méthodes qui ont été retenus au niveau national pour dessiner ces trajectoires de consommation ;
- dans un second temps, il nous faut expliciter quelles caractéristiques régionales ont été retenues, par secteur, pour régionaliser les trajectoires nationales.

Pour chacun des secteurs, cette partie détaille les hypothèses nationales et régionales qui ont été utilisées pour construire le scénario régionalisé.

1- Bâtiments résidentiels et tertiaires

Le secteur des bâtiments traité ici présente :

- Les hypothèses du scénario national pour les bâtiments résidentiels et tertiaires ;
- Les hypothèses de la régionalisation pour les bâtiments résidentiels et tertiaires.

1-1 Les hypothèses du scénario national

Trois usages sont détaillés dans cette partie : le confort thermique, l'électricité spécifique et la cuisson.

1-1-1 Confort thermique résidentiel

Le bâtiment représente aujourd'hui plus de 40 % de notre consommation d'énergie, essentiellement d'un point de vue quantitatif pour des usages liés à la chaleur : chauffage, climatisation, et eau chaude sanitaire, plus cuisson. Les niveaux de consommation, très liés aux choix de construction et d'équipement des bâtiments, ont une très forte inertie, et le renouvellement du parc est extrêmement lent avec à peine 1 % de nouvelles constructions chaque année : même en appliquant strictement des normes élevées d'isolation, agir uniquement sur le neuf ne saurait être suffisant.

Le scénario négaWatt introduit différents facteurs de sobriété. Il suppose notamment une relative stabilisation du nombre d'habitants par foyer à 2,2 en moyenne, au lieu d'une poursuite du phénomène de décohérence mesuré par l'INSEE : la différence représente rien moins que 3 millions de logements en 2050. Il prévoit également une stabilisation de la surface moyenne des nouveaux logements, ainsi qu'un développement de l'habitat en petit collectif, et dans le tertiaire un ralentissement sensible de la croissance des surfaces, passant de 930 millions de m² aujourd'hui à 1,1 milliard de m² en 2050, contre 1,4 milliard dans le scénario tendanciel.

Les actions d'efficacité se concentrent sur l'amélioration massive des performances énergétiques des bâtiments, à la fois par l'isolation (parois et toiture), et par l'optimisation des systèmes de chauffage. Cette combinaison représente

des gisements d'économies d'énergie considérables qu'il est indispensable de mobiliser non seulement dans le neuf, mais surtout dans l'existant.

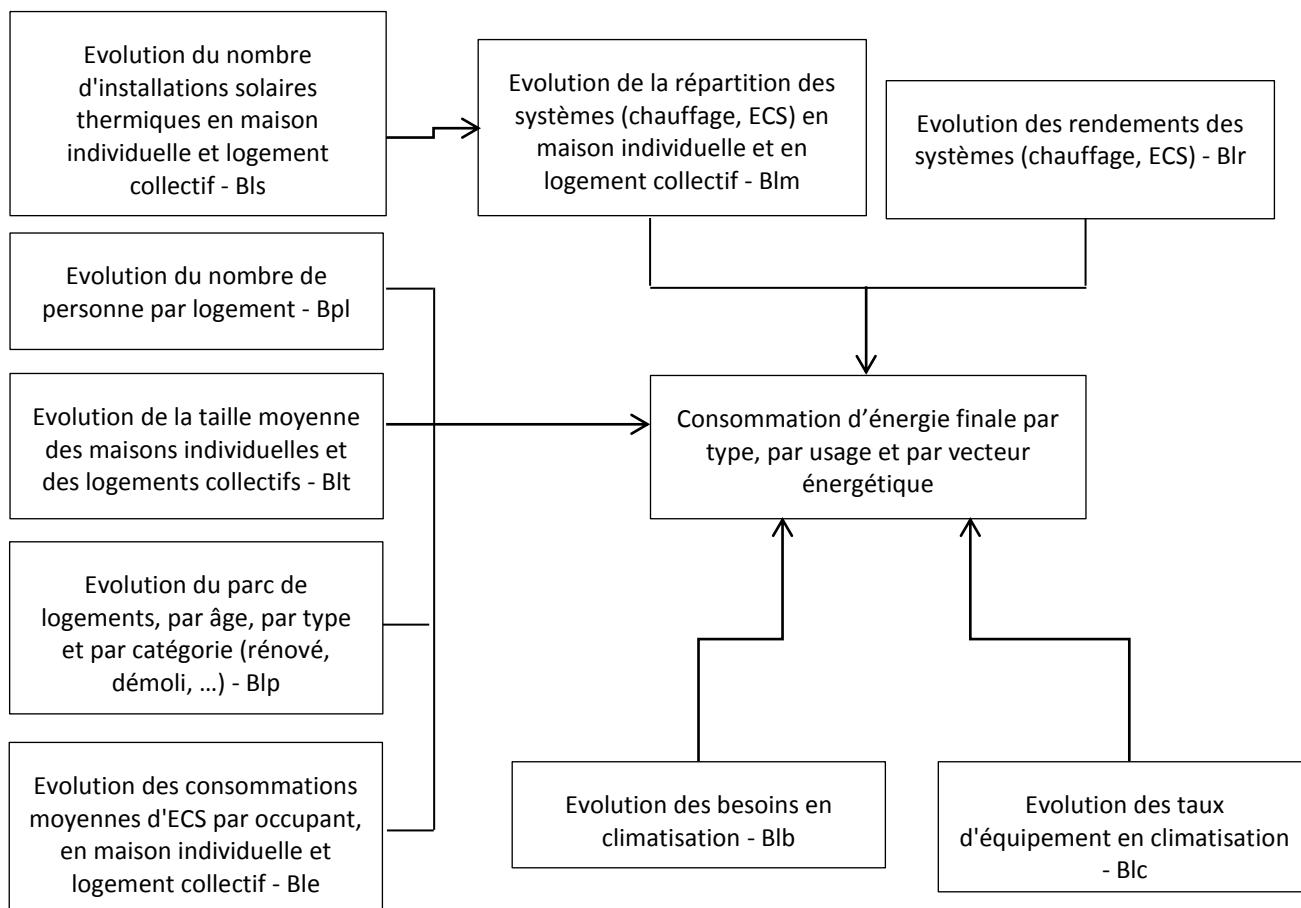
Ce chantier incontournable de la rénovation énergétique est l'une des clés du scénario. Il commence par le parc ancien de logements, construits avant 1975 puis s'étend aux logements plus récents et au tertiaire. Après une période nécessaire à la montée en puissance de ce programme, ce sont à terme 750 000 logements et 3,5 % des surfaces du tertiaire qui sont concernés chaque année.

Ces rénovations sont systématiquement menées en visant un degré élevé de performance pour atteindre une moyenne de 40 kWh par m² par an pour les besoins de chauffage. La même exigence s'applique aux bâtiments neufs, construits au niveau « passif » avec une moyenne de 15 et 35 kWh par m² et par an pour le résidentiel et le tertiaire.

Cet effort s'accompagne de l'introduction progressive de systèmes de chauffage, de production d'eau chaude et de climatisation les plus performants, basés en priorité sur les énergies renouvelables. À terme, le chauffage électrique direct par convecteurs, le fioul et le gaz butane ou propane, actuellement dominants, sont quasiment abandonnés au profit du bois (25 % des besoins de chaleur), du chauffage au gaz sur réseau (25 %), des pompes à chaleur électriques (20 %), des réseaux de chaleur (20 %) et du solaire thermique (10 %). Le gaz naturel importé est progressivement remplacé par du biogaz ou du gaz de synthèse produit par des énergies renouvelables.

La méthodologie suivie pour le confort thermique en résidentiel est présentée sous forme de schéma méthodologique ci-dessous. Chaque hypothèse nécessitant une explicitation est détaillée par la suite.

Figure II-1: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie pour le confort thermique dans les logements (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation) dans le scénario négaWatt 2011 national



Déterminants du bâtiment (lettre « B »), confort thermique dans le résidentiel :

Bpl (pour « personnes par logement ») : Hypothèses sur le nombre de personnes par logement

Blt (pour « logements - taille ») : Hypothèses sur la taille moyenne des logements, en maison individuelle et logement collectif

Blp (pour « logements - parc ») : Hypothèses d'évolution du parc de logements, par âge, type et catégorie

Ble (pour « logements - eau chaude ») : Hypothèses sur la consommation d'ECS en maison individuelle et logement collectif

Blm (pour « logements – mix des systèmes ») : Hypothèses sur la répartition des systèmes de chauffage et ECS

Blr (pour « logements - rendements des systèmes ») : Hypothèses sur les rendements des systèmes (chauffage et ECS)

Blb (pour « logements – besoins de climatisation ») : Hypothèses sur les besoins en climatisation

Blc (pour « logements – climatisation, taux d'équipement ») : Hypothèses sur les taux d'équipement en climatisation

Bls (pour « logements - solaire thermique ») : Hypothèses sur le nombre d'installations solaires thermiques

Remarque : Nous n'avons pas fait apparaître les hypothèses sur les températures intérieures de consigne chauffage, alors qu'elles ont une influence d'autant plus importante sur les consommations que les bâtiments sont bien isolés. Ainsi, dans le scénario négaWatt, en 2050, une variation de 1 °C de la température de consigne fait varier les besoins de chauffage d'environ 13 %. Ce paramètre n'a cependant pas été modifié dans le scénario négaWatt, car nous considérons que, si une bonne partie des logements est actuellement surchauffée en hiver, notamment dans le collectif où les réseaux de chauffage sont souvent mal équilibrés, une fraction non moins importante est sous-chauffée, du fait du prix de certaines énergies (électricité notamment) et de la situation de précarité énergétique de nombreux ménages. Les deux phénomènes sont supposés se compenser en première approche, et devraient logiquement disparaître à l'horizon 2050.

Bpl (pour « personnes par logement ») : Hypothèses sur le nombre de personnes par logement

Selon le scénario médian de l'INSEE, la décohabitation se poursuit : plus de personnes seules, âgées ou non, plus de familles monoparentales. Si l'on prolonge les projections de l'INSEE (qui s'arrêtent en 2030), le nombre moyen de personnes par ménage en 2050 est à peine supérieur à 2.

Dans le scénario négaWatt national, l'hypothèse retenue est une stabilisation de ce nombre à environ 2,2, soit un peu moins que la valeur actuelle de 2,25 (voir Figure I-3). Cette hypothèse est cohérente avec différents scénarios produits par l'INSEE pour 2030 et dont la plage de valeurs est indiquée sur la Figure I-3.

Cette trajectoire peut être obtenue en encourageant la cohabitation par exemple entre personnes âgées et étudiants, la mutualisation d'espaces, l'accès facilité à l'achat collectif de logements, la modularité des logements, ou encore une adaptation de l'urbanisme. Notons aussi que le scénario d'évolution INSEE intègre un flux annuel migratoire de 100 000 personnes, et qu'il est légitime de supposer que ce flux sera essentiellement composé de familles, pour lesquelles le nombre moyen d'occupants par logement est nettement supérieur à 2. Ce paramètre est très impactant quant au nombre de logements nécessaires, puisqu'il décroît ainsi de 34,7 (scénario tendanciel) à 31,7 millions (scénario négaWatt).

Blt (pour « logements - taille ») : Hypothèses sur la taille moyenne des logements, en maison individuelle et logement collectif

Dans les scénarios tendanciel et négaWatt, la surface moyenne des logements neufs est maintenue identique aux valeurs de 2010 : respectivement 131 m² et 73 m² pour les maisons individuelles et les logements collectifs.

Dans le scénario négaWatt, l'application des principes de sobriété conduit à une proportion de maisons individuelles dans le neuf passant de 56% à 20% contre 60% pour l'évolution tendancielle.

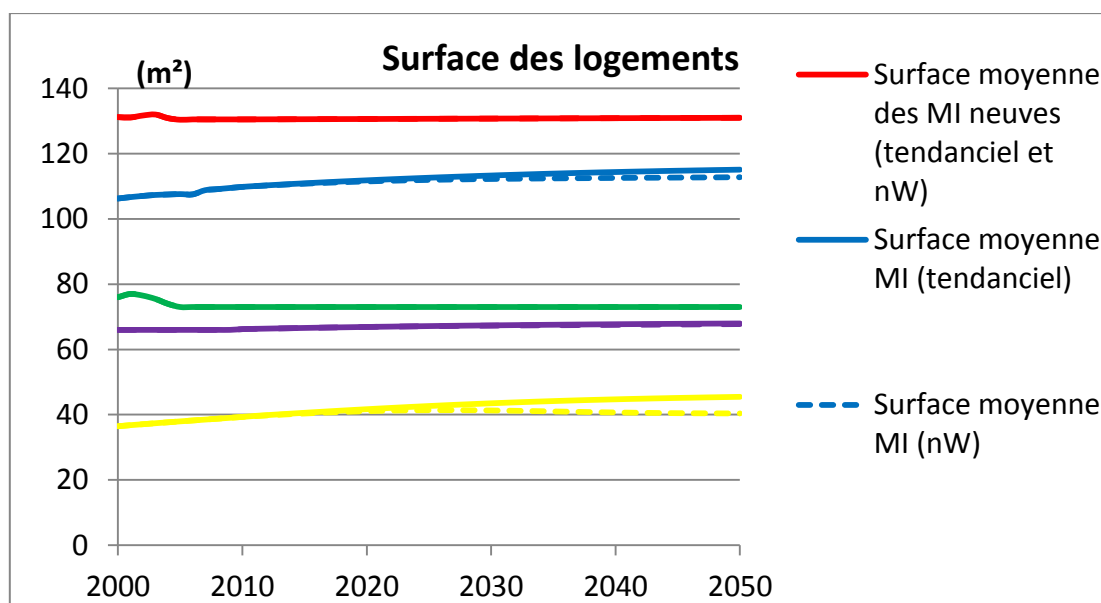


Figure II-2 : Evolution de la taille des logements (tendanciel et négaWatt)

La surface moyenne de logement par personne passe ainsi de 36,5 m²/pers en 2000 à 45,5 en 2050 pour le tendanciel alors qu'il se stabilise à 40 m²/pers dans le scénario négaWatt.

Blp (pour « logements - parc ») : Hypothèses d'évolution du parc de logements, par âge, type et catégorie

Le graphique suivant illustre l'évolution du nombre cumulé de logements, compte tenu des logements construits annuellement et des démolitions de logements vétustes. On considère 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.

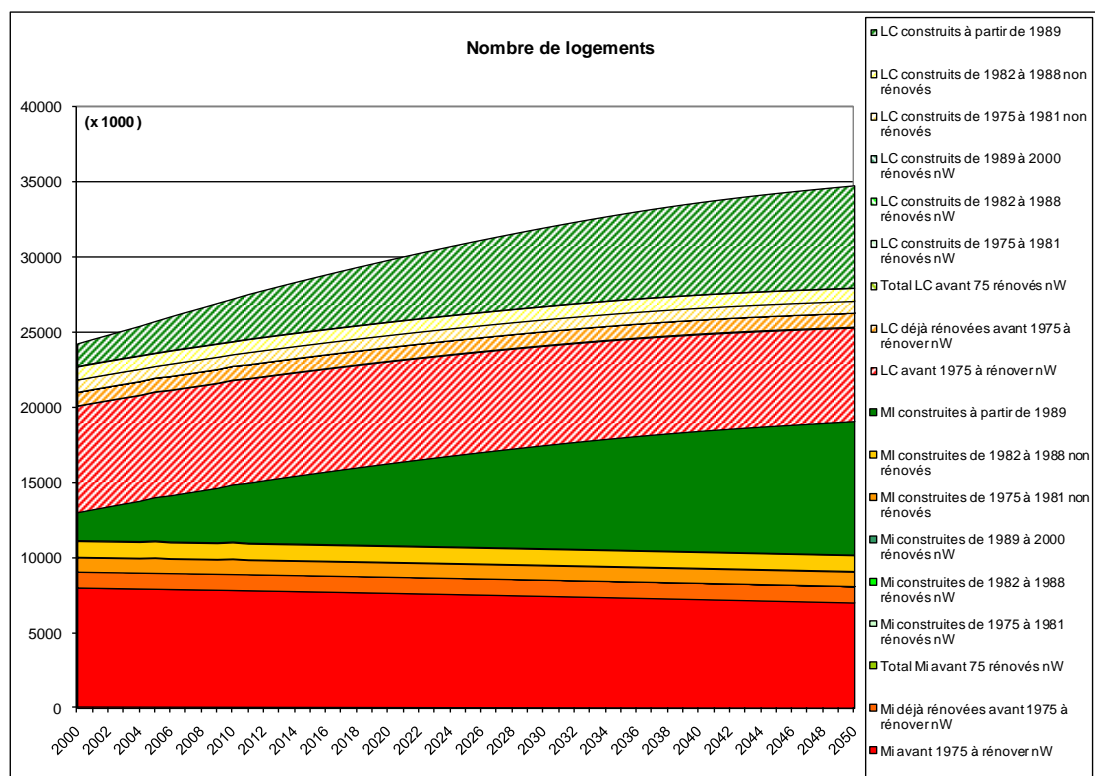


Figure II-3 : Evolution de la structure du parc de logements (tendanciel)

Dans le scénario nW, la rénovation des logements se fait à partir de 2011, avec une montée en puissance progressive, pour laisser à la profession et aux industriels du bâtiment le temps nécessaire à sa préparation.

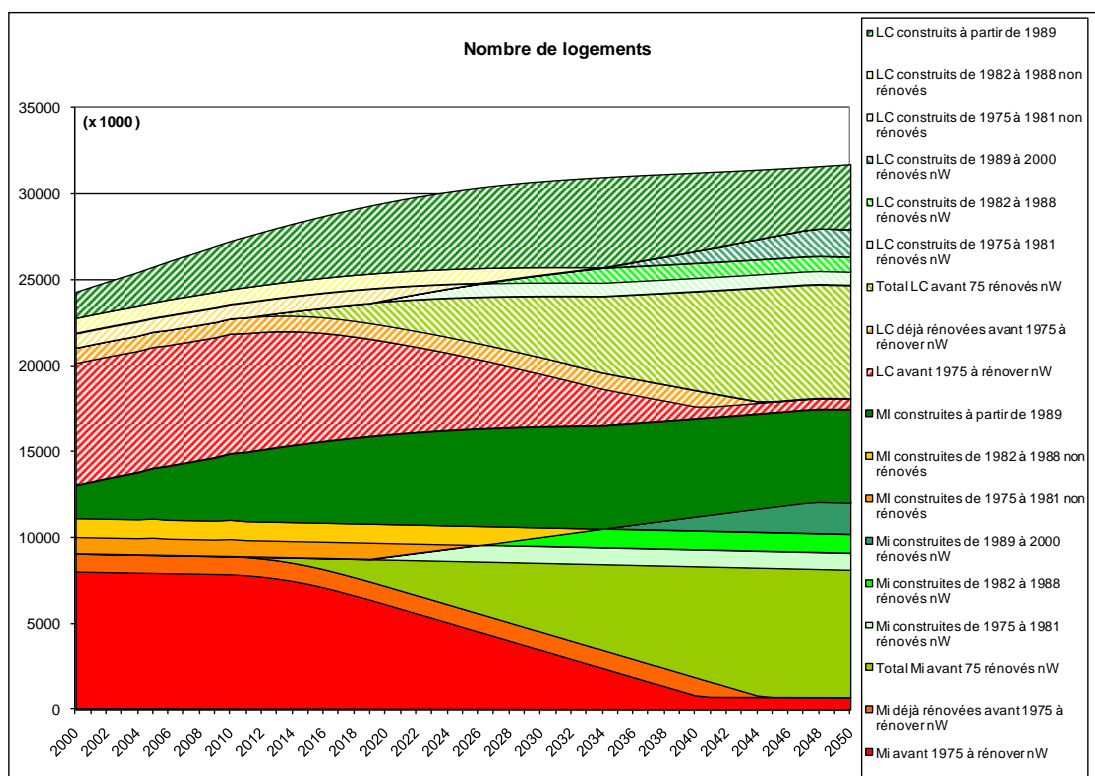


Figure II-4 : Evolution de la structure du parc de logements (négaWatt)

Pour le parc ancien (avant 1975), la rénovation porte d'abord sur les bâtiments d'avant 1975 non isolés, puis sur les 2 millions qui ont déjà fait l'objet de travaux d'amélioration thermique. **500 000** logements sont rénovés tous les ans. A partir de 2020, un deuxième programme de rénovation est mis en place pour les logements construits de 1975 à 2000. **250 000** logements sont rénovés tous les ans. Pour tenir compte du fait que tous les logements ne pourront pas nécessairement être rénovés, en raison de difficultés techniques, on conserve un pourcentage du parc d'avant 1975 non rénovés (estimé à **10%**).

Ble (pour « logements - eau chaude ») : Hypothèses sur la consommation d'ECS en maison individuelle et logement collectif

Les consommations moyennes d'eau chaude sanitaire diminuent régulièrement : de 32 litres par jour et par personne en maison individuelle en 2010 (respectivement 21,3 litres par jour et par personne en logement collectif), elles baissent de 1% par an (respectivement 0,5% par an) jusqu'à 21,5 litres par jour et par personne (respectivement 17,5 litres) en 2050. Cette diminution est obtenue par une sensibilisation des citoyens à la rarefaction progressive de la ressource en eau, qui se traduit notamment par un comportement plus économe, mais aussi par l'utilisation de dispositifs limiteurs de débit sur les points de soutirage.

Blm (pour « logements – mix des systèmes ») : Hypothèses sur la répartition des systèmes de chauffage et ECS

Pour le chauffage, on introduit les modifications suivantes :

- Développement du bois énergie : poêles ou chaudières à granulés dans la maison individuelle, chaudières à plaquettes ou granulés dans le logement collectif et le tertiaire
- Disparition progressive du fioul et du GPL (butane propane)
- Diminution de la part relative du gaz et introduction de micro-cogénération gaz
- Diminution et quasi-disparition du chauffage électrique direct (effet Joule) au profit du développement de pompes à chaleur performantes
- Pénétration accrue des réseaux de chaleur, particulièrement dans le logement collectif et le tertiaire
- Introduction du chauffage solaire dans une partie des maisons individuelles, après rénovation thermique

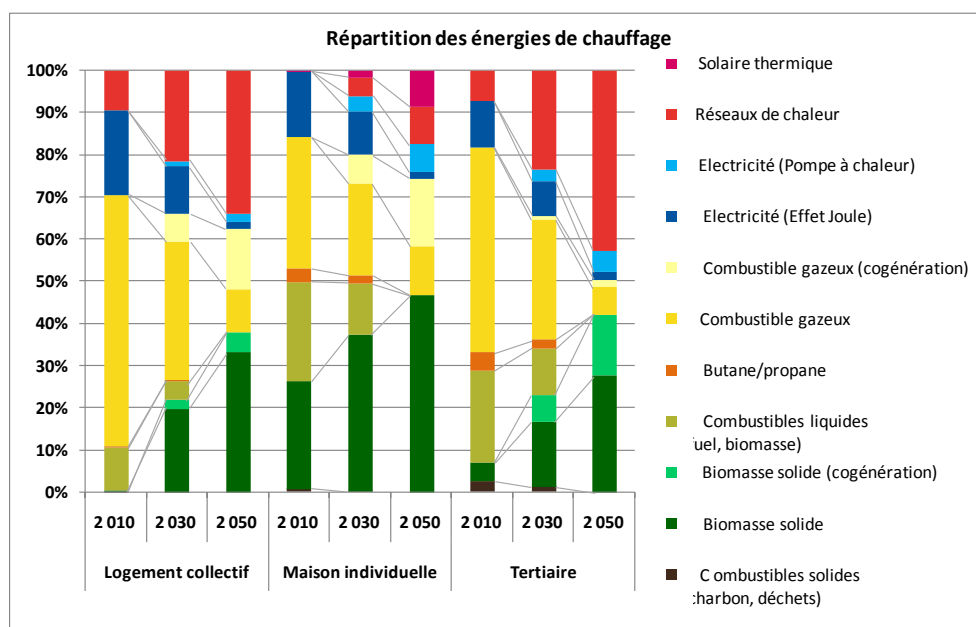


Figure II-5 : Evolution des parts des différents systèmes de chauffage

Pour l'eau chaude sanitaire, on introduit les modifications suivantes :

- Développement du bois énergie : chaudières à plaquettes ou granulés dans le logement collectif et le tertiaire, utilisées essentiellement pendant la saison de chauffage
- Disparition progressive du fioul et du GPL (butane propane)
- Diminution de la part relative du gaz
- Diminution et quasi-disparition des chauffe-eau électriques à effet Joule au profit du développement de chauffe-eau thermodynamiques performants, notamment dans la maison individuelle
- Pénétration accrue des réseaux de chaleur, particulièrement dans le logement collectif et le tertiaire
- Pénétration volontariste du solaire thermique

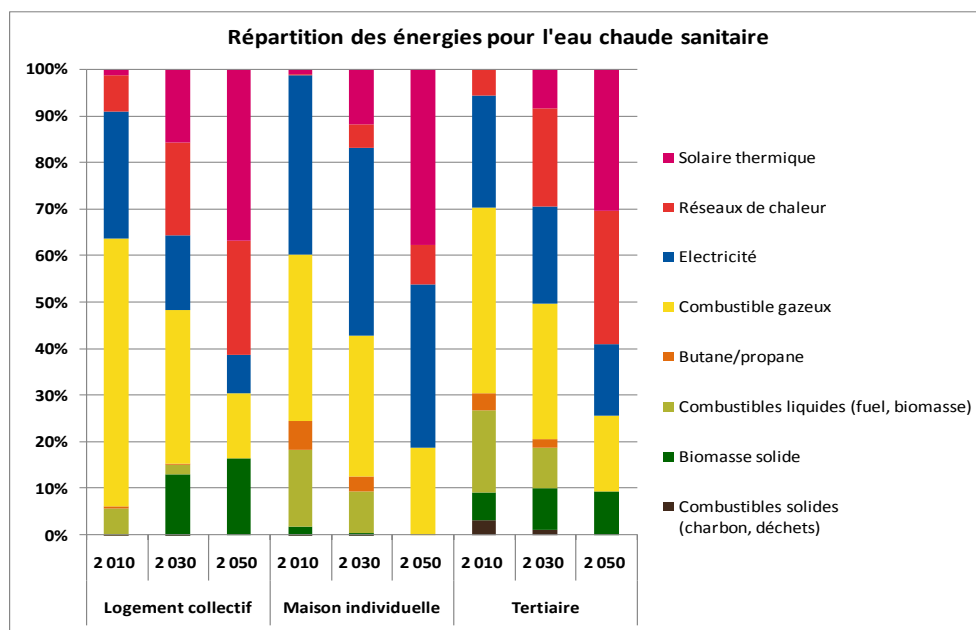


Figure II-6: Evolution des parts des différents systèmes de production d'eau chaude sanitaire

Blr (pour « logements - rendements des systèmes ») : Hypothèses sur les rendements des systèmes (chauffage et ECS)

Pour le chauffage, les rendements pris en compte sont des rendements globaux, incluant génération, distribution, régulation et émission. Les hypothèses suivantes sont faites (Figure II-7) :

- Amélioration du coefficient de performance (« COP ») moyen annuel des pompes à chaleur du fait de l'utilisation préférentielle de pompes à chaleur sur eau de nappe, pieu ou échangeur horizontal enterré, ainsi que d'une émission de chaleur assurée par des émetteurs basse température (planchers chauffants, radiateurs basse température)
- Renouvellement progressif des générateurs à combustion existants par des appareils à haute efficacité (chaudières à condensation)
- Elimination des appareils anciens vétustes (essentiellement pour les appareils utilisant du bois ou du charbon : biomasse solide et combustibles solides)
- Isolation renforcée des réseaux de distribution
- Utilisation préférentielle d'émetteurs basse température (planchers chauffants, radiateurs basse température) qui procurent une meilleure homogénéité des températures intérieures
- Utilisation de régulations à faible hystérésis : pour les radiateurs, vannes deux voies commandées par des moteurs électrothermiques pilotés par un thermostat d'ambiance placé dans chaque pièce, qui permettent une meilleure récupération des apports gratuits que des robinets thermostatiques classiques.

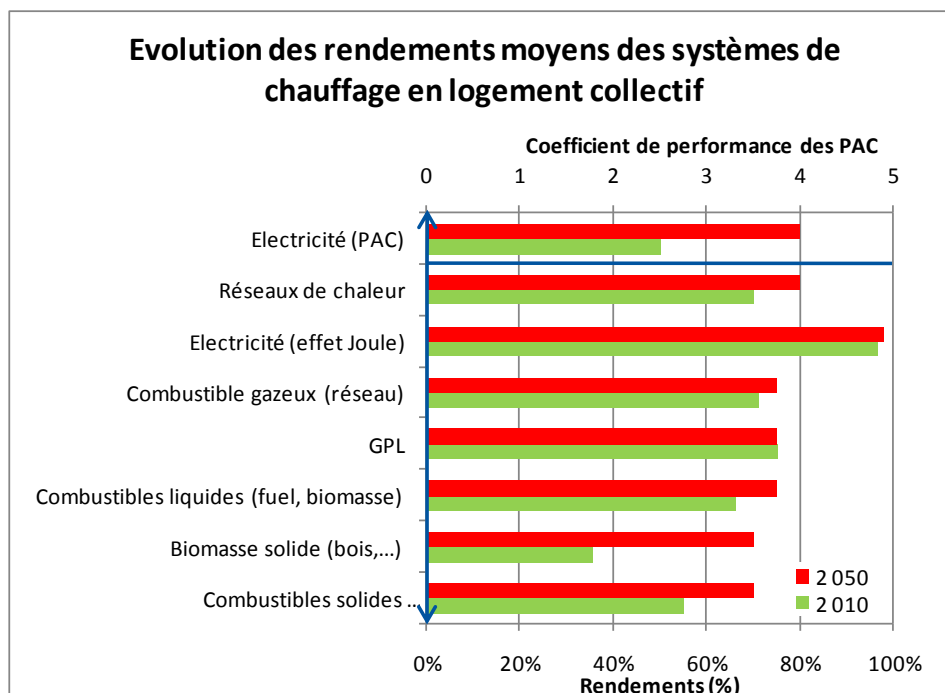


Figure II-7 : Evolution des rendements des différents systèmes de chauffage en logement collectif

Pour la production d'eau chaude sanitaire, les rendements pris en compte sont des rendements globaux, incluant génération, stockage et distribution. Les hypothèses suivantes sont faites (Figure II-8) :

- Introduction progressive de pompes à chaleur pour les systèmes indépendants utilisant l'électricité. Nous avons retenu un coefficient de performance (« COP ») moyen de 1,5 qui est certainement pessimiste, laissant ainsi une marge de progression
- Gains induits sur les rendements de génération pour les systèmes de production d'eau chaude couplés avec le système de chauffage (voir plus haut)
- Isolation renforcée des réseaux de distribution, notamment les circuits bouclés
- Isolation renforcée des dispositifs de stockage

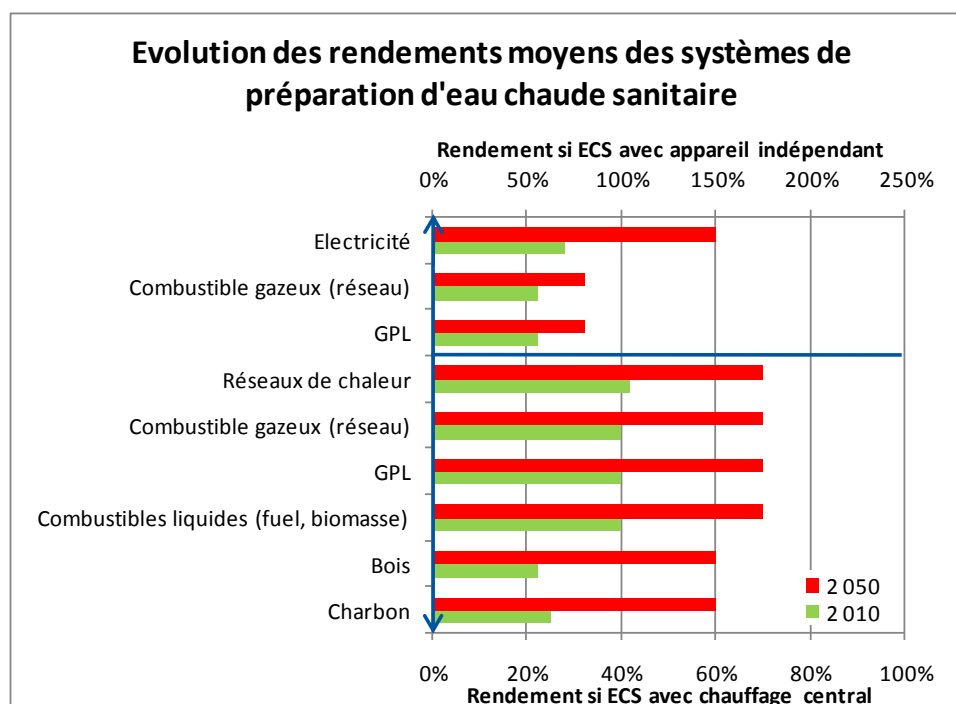


Figure II-8 : Evolution des rendements des différents systèmes de préparation d'eau chaude sanitaire en logement collectif

B1b (pour « logements – besoins de climatisation ») : Hypothèses sur les besoins en climatisation

L'hypothèse retenue est une légère diminution du besoin surfacique moyen de climatisation, de 11,8 (tendanciel) à 10 kWh/m².an, du fait d'une meilleure protection des logements contre les apports solaires et une maîtrise des apports internes liée à une baisse des consommations d'électricité spécifique.

Au niveau des rendements, l'hypothèse est à une augmentation progressive de l'efficacité énergétique moyenne des climatiseurs (coefficient de performance, ou « COP »), de 2,2 en 2010 à 3 en 2050.

Tableau II-1: Hypothèses formulées pour la climatisation dans le résidentiel

Climatisation	Unité	2010	2020	2030	2040	2050
Besoin de climatisation	kWh/m ² .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	3,0

B1c (pour « logements – climatisation, taux d'équipement ») : Hypothèses sur les taux d'équipement en climatisation

L'hypothèse est à une augmentation du taux d'équipement de climatisation, qui passe de 3,6% en 2007 à 20% en 2050 : il est vraisemblable que l'isolation renforcée des logements lors de leur rénovation, ainsi que le développement de logements neufs passifs, conduira à des difficultés de maintien d'une ambiance confortable sans climatisation sur un nombre plus important de logements, d'où l'évolution envisagée.

B1s (pour « logements - solaire thermique ») : Hypothèses sur le nombre d'installations solaires thermiques

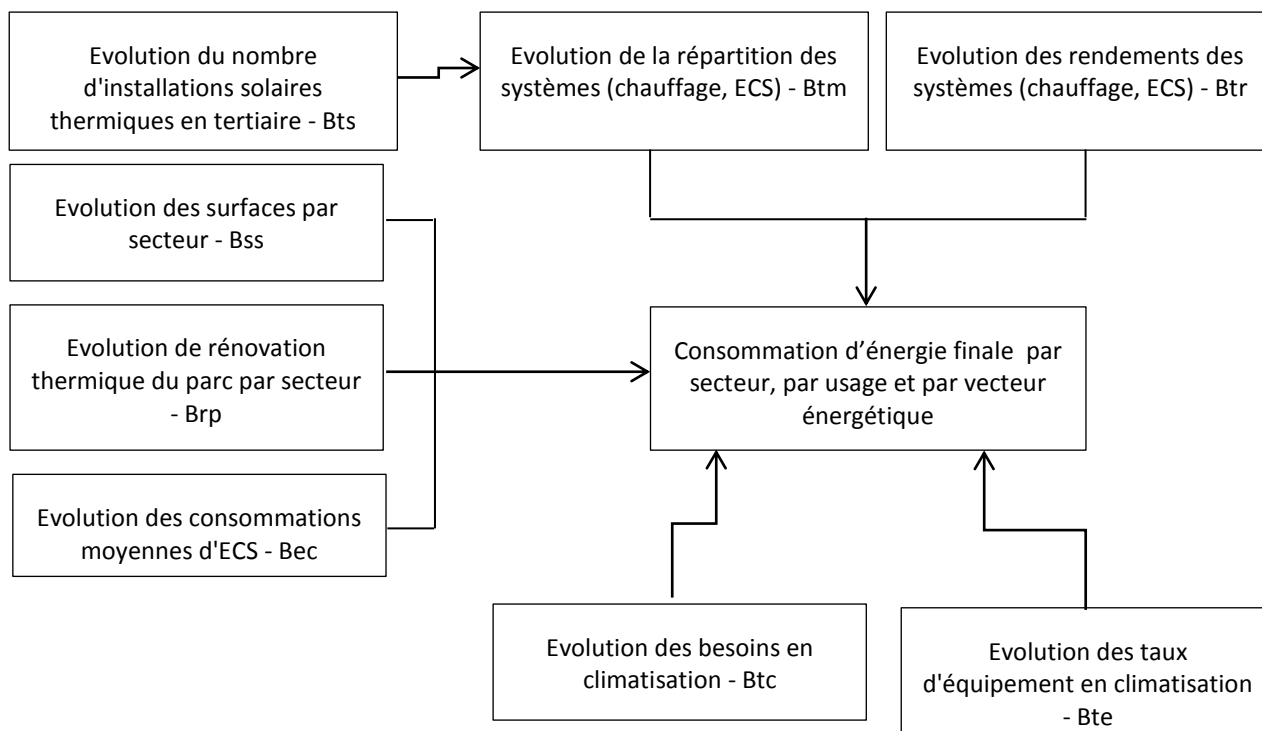
Pour la prise en compte du solaire thermique dans la couverture des besoins, beaucoup d'exercices de scénarisation se contentent de multiplier des estimations de surface de capteur par des productivités théoriques. Cette approche ne permet pas de comprendre correctement comment ces productivités évoluent quand les besoins diminuent. Dans notre approche, le solaire thermique vient diminuer les besoins, ce qui conduit à croiser les besoins thermiques et les potentiels du solaire thermique.

Nous indiquons cette hypothèse ici pour mémoire, et la détaillons dans la partie « Production d'énergie renouvelable ».

1-1-2 Confort thermique tertiaire

La méthodologie suivie pour le confort thermique dans le tertiaire est présentée sous forme de schéma méthodologique ci-dessous. Chaque hypothèse nécessitant une explicitation est détaillée par la suite.

Figure II-9: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie pour le confort thermique dans les bâtiments tertiaires (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation) dans le scénario négaWatt 2011 national



Déterminants du bâtiment (lettre « B »), confort thermique dans le tertiaire :

Bss (pour « surface par secteur ») : Hypothèses sur l'évolution de la surface construite par secteur d'activité

Brp (pour « rénovation du parc ») : Hypothèses d'évolution du parc tertiaire

Bec (pour « eau chaude ») : Hypothèses sur la consommation d'ECS dans le tertiaire

Btm (pour « tertiaire - mix des systèmes ») : Hypothèses sur la répartition des systèmes (chauffage et ECS)

Btr (pour « tertiaire - rendements des systèmes ») : Hypothèses sur les rendements des systèmes (chauffage et ECS)

Btc (pour « tertiaire - climatisation ») : Hypothèses sur les besoins en climatisation du tertiaire

Bte (pour « tertiaire – taux d'équipement climatisation ») : Hypothèses sur les taux d'équipement en climatisation (proportion de surfaces climatisées) par secteur

Bts (pour « tertiaire - solaire thermique ») : Hypothèses sur le nombre d'installations solaires thermiques

Revue des hypothèses pour le confort thermique dans le tertiaire

La méthodologie suivie pour la scénarisation du secteur tertiaire est identique à celle suivie pour le secteur du logement, avec une sectorisation plus fine par activité.

Les secteurs pris en compte pour le tertiaire sont les huit habituellement retenus dans les statistiques : Cafés, Hôtels, Restaurants (CHR) ; Habitat Communautaire (HC) ; Santé, Action sociale (SA) ; Enseignement, Recherche (ER) ; Sport, Loisirs (SL) ; Bureaux, Administrations (BA) ; Commerce (C) ; Transport (T).

Bss (pour « surface par secteur ») : Hypothèses sur l'évolution de la surface construite par secteur d'activité

Les évolutions des surfaces construites dans les différents secteurs sont différentes selon les 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 (Figure II-10) :

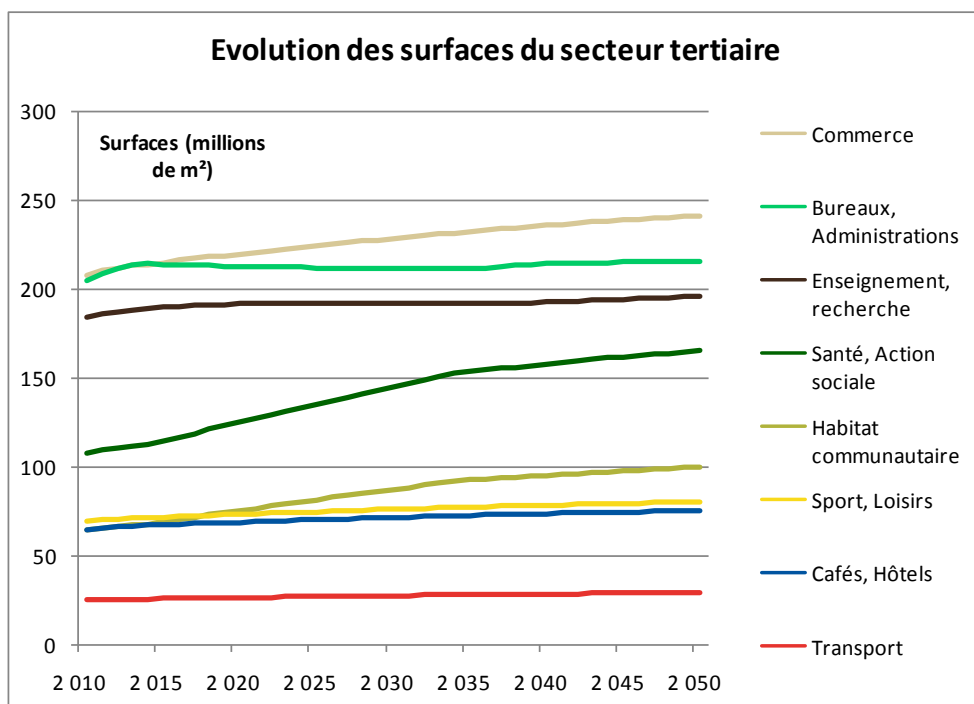


Figure II-10 : Evolution des surfaces du secteur tertiaire

Brp (pour « rénovation du parc ») : Hypothèses d'évolution 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 (Figure II-11) :

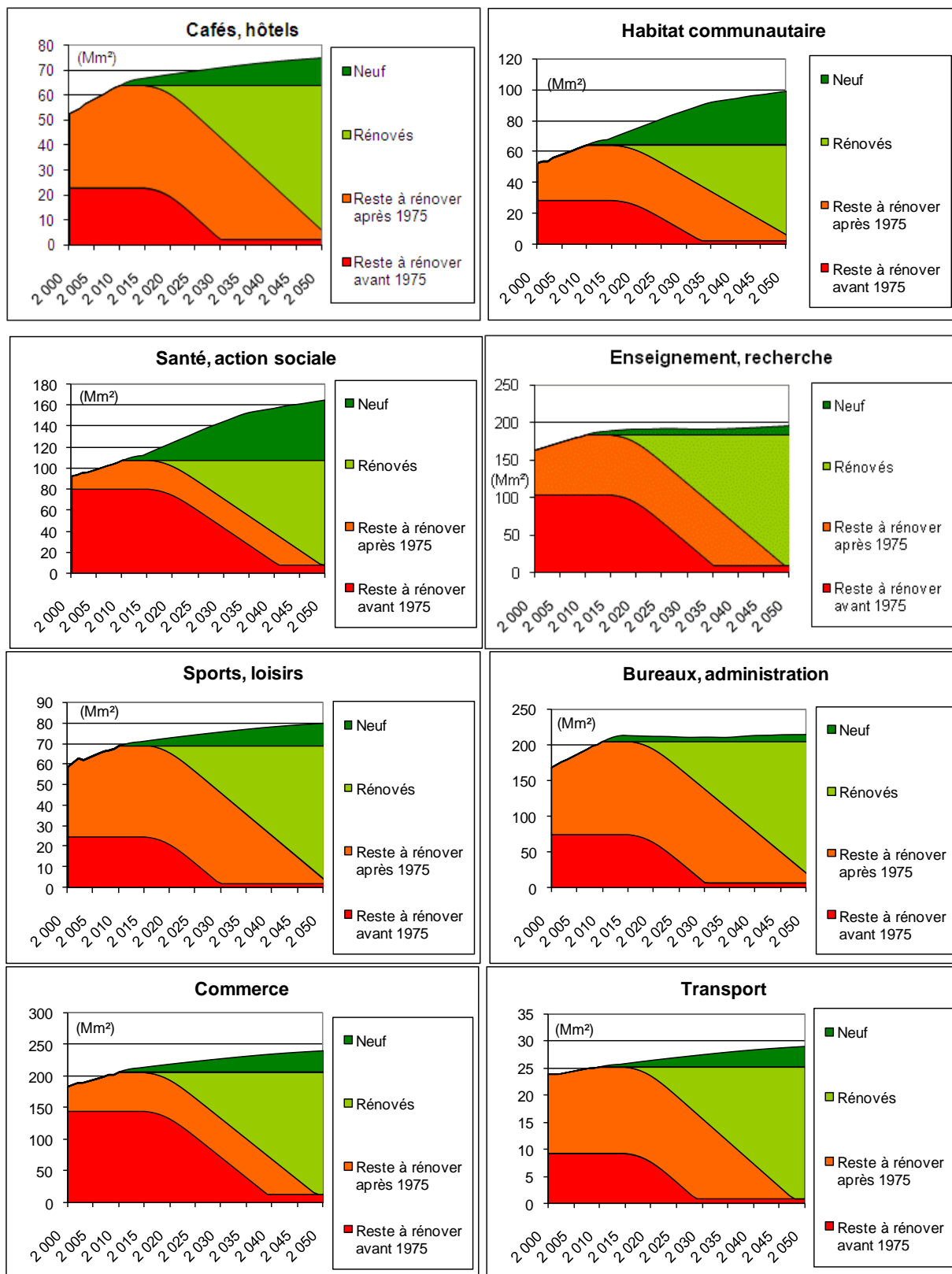


Figure II-11 : Evolution de la structure du parc dans le secteur tertiaire

Bec (pour « eau chaude ») : Hypothèses sur la consommation d'ECS dans le tertiaire

Les consommations d'eau chaude sanitaire des différents secteurs sont données pour 2010 dans le tableau suivant (valeurs obtenues en fonction des consommations énergétiques pour cet usage dans les statistiques, des surfaces et des rendements moyens actuels des différents systèmes de production d'eau chaude sanitaire) :

Tableau II-2: Consommation d'eau moyenne quotidienne par m² de surface dans le tertiaire

	Besoin (litres/m ² /jour)
Cafés, Hôtels	1,53
Habitat communautaire	1,20
Santé, Action sociale	2,12
Enseignement, recherche	1,30
Sport, Loisirs	2,55
Bureaux, Administrations	0,81
Commerce	1,78
Transport	0,27

Les consommations moyennes d'eau chaude sanitaire diminuent ensuite régulièrement de 1% par an jusqu'en 2050, avec les mêmes actions de sensibilisation et d'économie d'eau que dans le résidentiel.

Btm (pour « tertiaire - mix des systèmes ») : Hypothèses sur la répartition des systèmes (chauffage et ECS)

La répartition des énergies de chauffage est donnée sur la Figure II-6 (utilisée aussi pour les logements).

Btr (pour « tertiaire - rendements des systèmes ») : Hypothèses sur les rendements des systèmes (chauffage et ECS)

Pour les rendements, les valeurs retenues en 2050 sont identiques à celles du secteur logement collectif (Figure II-7).

Btc (pour « tertiaire - climatisation ») : Hypothèses sur les besoins en climatisation du tertiaire

Les besoins en climatisation par secteur et les consommations correspondantes sont détaillés dans le Tableau II-3 ci-dessous. Ils sont estimés à partir des consommations énergétiques pour cet usage dans les statistiques, des surfaces et des coefficients de performance moyens actuels des différents systèmes de climatisation.

Tableau II-3: Besoins en climatisation et consommations correspondantes par secteur

	Besoin (kWh/m ² .an)	Consommation (kWh/m ² en électricité finale)
Cafés, Hôtels	128	58
Habitat communautaire	106	48
Santé, Action sociale	119	54
Enseignement, recherche	95	43
Sport, Loisirs	108	49
Bureaux, Administrations	169	77
Commerce	147	67
Transport	103	47

Les coefficients de performance (« COP ») suivent la même évolution que pour le résidentiel (COP de 3,0 en 2050).

Bte (pour « tertiaire – taux d'équipement climatisation ») : Hypothèses sur les taux d'équipement en climatisation (proportion de surfaces climatisées) par secteur

En 2050, une augmentation sensible des surfaces climatisées est envisagée (figure ii-12). Mais en même temps, 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.

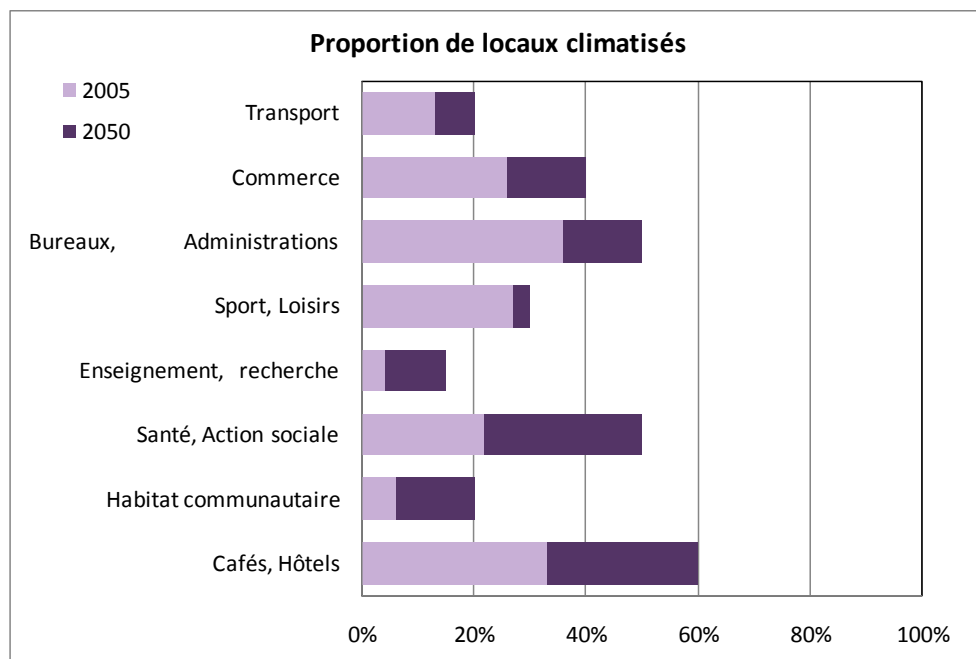


Figure II-12 : Proportion de locaux climatisés ⁵

La consommation totale finale pour la climatisation passe ainsi de 14,2 à 11,6 TWh de 2007 à 2050.

Bts (pour « tertiaire - solaire thermique ») : Hypothèses sur le nombre d'installations solaires thermiques

Comme pour le logement, dans notre approche, le solaire thermique vient diminuer les besoins, ce qui conduit à croiser les besoins thermiques et les potentiels du solaire thermique.

Nous indiquons cette hypothèse ici pour mémoire, et la détaillons dans la partie « Production d'énergie renouvelable ».

1-1-3 Electricité spécifique pour le résidentiel

Les bâtiments résidentiels et tertiaires sont aussi le siège d'importantes consommations d'électricité spécifique. Ce poste ne représente que 8 % de notre consommation finale d'énergie, mais il recouvre des usages indispensables à notre confort moderne. Le scénario négaWatt en distingue une trentaine auxquels il applique la même méthode : après une analyse sociologique et démographique des usages, il cherche les facteurs de sobriété et d'efficacité et fixe comme objectif, pour chaque usage, d'atteindre en moyenne les meilleurs niveaux de performance actuels.

Cette évolution prend en compte une part réservée à de nouveaux usages encore inconnus mais que les évolutions techniques et sociales laissent entrevoir. Au total, la consommation moyenne en électricité spécifique d'un ménage diminue de 2 900 kWh par an en 2010 à environ 1 500 kWh par an en 2050 tout en permettant une meilleure satisfaction des besoins. Dans le tertiaire, le scénario aboutit à une baisse de 30 % de la consommation d'électricité spécifique par rapport à 2010.

Dans le domaine de l'électricité spécifique comme pour les autres domaines, aucune rupture technologique n'est mise en œuvre dans le scénario négaWatt. L'ensemble des actions se base sur l'observation des pratiques actuelles, avec une généralisation des meilleures pratiques et des meilleures techniques disponibles actuellement.

Par ailleurs, des consommations « diverses » sont prévues, pour anticiper sur de nouveaux usages qui ne manqueront pas d'apparaître.

La plupart des hypothèses formulées pour l'électricité spécifique résidentielle et tertiaire se basent sur l'expérience et les nombreuses campagnes de mesures du bureau d'études Enertech, qui met en ligne sur Internet l'essentiel de son travail sur son site Internet ⁶.

⁵ Armines, Energies Demain : Etat actuel des connaissances sur les impacts de la climatisation, 2010, 134 p.

⁶ Voir Boîte à Outils sur le site www.enertech.fr.

19 services sont analysés pour le résidentiel ; ils sont détaillés dans le tableau suivant :

Tableau II-4: Détail des 19 services pris en compte pour la consommation d'électricité spécifique dans le résidentiel

« Produits blancs »	Lave-linge
	Sèche-linge
	Lave-vaisselle
Production de froid	Réfrigérateurs
	Combinés réfrigérateurs-congérateurs
	Congélateur
Eclairage	Eclairage domestique
Audio-visuel	Téléviseurs
	Ordinateurs
	Chaînes hi-fi
	DVD, décodeur, box ADSL, console, ...
	Téléphonie et usage mobile
	Système audio-visuel unique
Gestion, hygiène et autres usages	Circulateurs et pompes de chauffage/climatisations individuelles
	Ventilations individuelles
	Communs immeubles collectifs
	Aspirateurs
	Fers à repasser
	Hygiène, bricolage et nouveaux usages

Comme pour les autres secteurs, le travail sur l'électricité spécifique croise une action sur la sobriété avec une action sur l'efficacité énergétique.

Plusieurs déterminants globaux ont été nécessaires pour définir les consommations d'électricité spécifique. Ils sont pour la plupart reliés au reste du scénario : nombre de ménages, surfaces construites ou rénovées, nombre de repas annuels pris chez soi, ...

Au niveau de la méthodologie de détermination des consommations d'électricité par service, de nombreux déterminants spécifiques ont été pris en compte et sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Les évolutions touchant simultanément l'ensemble des usages ont été définies en amont : taux d'appareil laissés en veille, puissance des veilles, efficacité des moteurs, efficacité des cycles de chauffage et de froid (premières lignes « efficacité transverse »). Les déterminants retenus par service ont été listés également.

Le choix a été fait de ne pas indiquer l'ensemble des valeurs retenues pour chaque déterminant, ce qui n'apporterait rien au niveau des analyses régionales.

Tableau II-5: Principaux déterminants du secteur électricité spécifique résidentiel (les indicateurs de résultats sont en gras)

Secteur	Service	Variable	Unité
Efficacité transverse	Veille	Evolution efficacité des veilles	%
	Electronique	Evolution efficacité de l'électronique	%
	Chauffage	Evolution efficacité du chauffage	%
	Petit moteur (<20W)	Evolution efficacité des petits moteurs	%
	Gros moteur (>20W)	Evolution efficacité des gros moteurs	%
	Froid	Evolution efficacité du froid	%
Produits blancs	Lave-linge	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre total de cycle	unité/an
		Taux de remplissage	%
		% cycle à 30/40°C	%
		% cycle à 50/60°C	%
		% cycle à 70/90°C	%
		Nombre cycle à 30°	unité/an
		Nombre cycle à 50°	unité/an
		Nombre cycle à 90°	unité/an
		Consommation cycle à 30°	Wh/cycle
		Dont consommation moteur	Wh/cycle
		Dont consommation chauffage eau	Wh/cycle
		Consommation cycle à 50°	Wh/cycle
		Dont consommation moteur	Wh/cycle
		Dont consommation chauffage eau	Wh/cycle
		Consommation cycle à 90°	Wh/cycle
		Dont consommation moteur	Wh/cycle
		Dont consommation chauffage eau	Wh/cycle
	Sèche-linge	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Conso annuelle par équipement	kWh
		Nombre de cycles	unité/an
		Consommation par cycle	Wh/cycle
		Durée des cycles	heure
		Consommation par heure	Wh/h
		Dont moteur	Wh/h
		Dont chauffage	Wh/h
	Lave-vaisselle	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%

		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre de cycles par an	unité/an
		Nombre de couverts par cycle	unité/cycle
		Consommation par cycle	Wh/cycle
		Dont moteur	Wh/cycle
		Dont chauffage	Wh/cycle
Production de froid	Réfrigérateurs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Volume moyen	L
		Consommation par volume	Wh/L
	Combinés réfrigérateurs-congérateurs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Volume moyen	L
		Consommation par volume	Wh/L
	Congélateurs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Volume moyen	L
		Consommation par volume	Wh/L
Eclairage	Eclairage domestique	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par logement	kWh
		Durée de fonctionnement	h
		Lumen	lumen
		Surface moyenne	m²
		Intensité de l'éclairage	Lux/m²
		Efficacité moyenne	lm/W
		% incandescent	%
		% halogène BT	%
		% halogène HT	%
		% LFC & fluorescent	%

Audio-visuel		% LED	%
		% OLED	%
		Efficacité incandescent	lm/W
		Efficacité halogène BT	lm/W
		Efficacité halogène HT	lm/W
		Efficacité LFC & fluorescent	lm/W
		Efficacité LED	lm/W
		Efficacité OLED	lm/W
	Téléviseurs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
		Puissance par cm de diagonale	W/cm
		Taille de l'écran (diagonale)	cm
	Ordinateurs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
	Chaînes hi-fi	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
	DVD, décodeur, box ADSL, console...	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
	Téléphonie et usage mobile	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%

		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
Système audio-visuel unique		Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre de terminaux mobiles	
		Consommation par terminal mobile	kWh
		Nombre de terminaux fixes	
		Consommation par terminaux fixes	kWh
		Consommation fonctions centrales	kWh
Gestion et hygiène	Circulateurs et pompes de chauffage/climatisations individuelles	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		% asservissement	%
		Puissance moyenne horaire	W
	Ventilations individuelles	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		% autoréglable	%
		% hygro	%
		% double flux	%
		Puissance moyenne autoréglable	W
		Puissance moyenne hygro	W
		Puissance moyenne DF	W
		Durée fonctionnement auto	h
		Durée fonctionnement hygro	h
		Durée de fonctionnement DF	h
	Communs immeubles collectifs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%

		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Dont Eclairage	kWh
		Dont Ascenseur	kWh
		Dont Ventilation	kWh
		Dont pompes et circulateurs	kWh
	Aspirateurs	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
	Fers à repasser	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W
	Hygiène, bricolage et nouveaux usages	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation veille totale	GWh/an
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement	%
		Taux de 2e équipement	%
		Taux d'utilisation du 2e équipement	%
		Consommation annuelle par équipement	kWh
		Nombre d'heure d'utilisation	h
		Puissance moyenne horaire	W

Les principales hypothèses structurantes sont les suivantes, formulées par service :

Lave-linge

L'hypothèse est une saturation du taux d'équipement (pas de second lave-linge par famille). Le nombre de cycles est relié au taux de remplissage, et les cycles sont définis en fonction de la température (avec un transfert de cycle de lavage à 90°C à des cycles à 30 et 40°C). Les consommations par cycle sont décomposées entre moteur et chauffage de l'eau.

Sèche-linge

L'hypothèse est une hausse très modéré du taux d'équipement. Le nombre de cycles est relié à celui des lave-linge. La durée des cycles baisse, compte tenu de l'amélioration du séchage par cycle. Les consommations par cycle sont décomposées entre moteur et chauffage de l'eau. Les combinés lave-linge/sèche-linge sont comptés séparément dans les taux d'équipement côté lave-linge et côté sèche-linge

Lave-vaisselle

L'hypothèse est une hausse du taux d'équipement, en raison du caractère économe de la vaisselle en machine par rapport aux pratiques courantes de vaisselle à la main. Le nombre de cycles est relié au nombre de repas à domicile et au taux de remplissage (nombre de couverts par cycle). Les consommations par cycle sont décomposées entre moteur et chauffage de l'eau.

Froid

Un remplacement des réfrigérateurs et congélateurs par des réfrigérateurs combinés est modélisé, calé sur l'évolution historique. L'hypothèse prise en compte est une baisse conséquente du second réfrigérateur par foyer, et d'une baisse des volumes moyens.

Eclairage

La modélisation relie les besoins (lux/m²) aux lumens et aux durées d'éclairage, mais avec une hypothèse de stabilité dans la durée d'éclairage. Les nouvelles technologies d'éclairage sont en forte augmentation : Lampes Fluo-Compactes (LFC), Diode Electroluminescente classiques (LED) et dans une moindre mesure organiques (OLED).

Audio-visuel

L'idée générale qui justifie les évolutions retenues est un remplacement de tous les appareils diffus par un système centralisé de domotique regroupant en particulier ordinateur, TV et téléphonie.

Gestion des logements et des d'immeubles

Les taux d'équipement (circulateurs, ventilations, communs, ...) sont reliés au reste du scénario bâtiment. Les pompes de circulation sont systématiquement asservies, et leur efficacité améliorée.

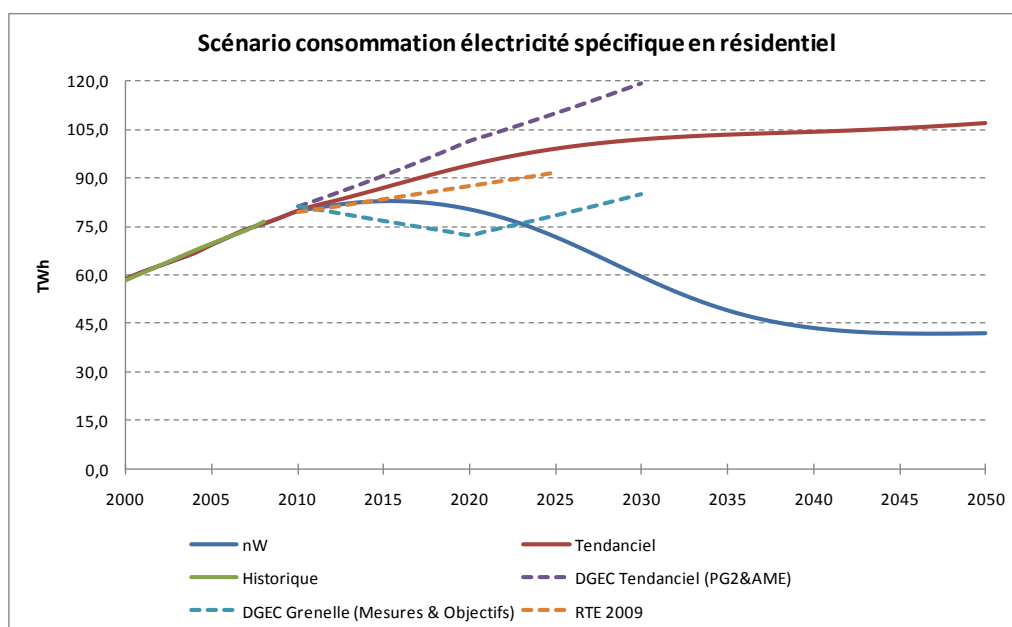


Figure II-13 : Comparaison des évolutions de consommation d'électricité spécifique en résidentiel

Les hypothèses retenues au niveau national conduisent à une courbe s'infléchissant progressivement, et marquant une stabilisation à partir de 2040 dans la mesure où la sobriété et l'efficacité sont compensées par les nouveaux usages de l'électricité spécifique.

1-1-4 Electricité spécifique pour le tertiaire

La même méthode est appliquée au secteur tertiaire, pour lequel 10 services sont pris en compte, listés ci-dessous :

Tableau II-6: Détail des 10 services pris en compte pour la consommation d'électricité spécifique dans le tertiaire

Secteur	Service
Services dans les bâtiments tertiaires	Eclairage tertiaire
	Informatique
	Autres dont process tertiaire (imagerie médicale, ...)
Agriculture	Agriculture
Secteurs spécifiques	Eclairage public
	Telecom
	Entrepôts frigorifiques
	Gérants immeubles tertiaire
	BGC (bâtiment, génie civil)
	Eau

Les déterminants qui ont été retenus pour définir la consommation annuelle par service sont listés dans le tableau suivant :

Tableau II-7: Principaux déterminants du secteur électricité spécifique tertiaire (les indicateurs de résultats sont en gras)

Secteur	Service	Variable	Unité
Services dans les bâtiments tertiaires	Eclairage tertiaire	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Conso surfacique tertiaire	kWh/m ²
		Durée de fonctionnement	h
		Intensité de l'éclairage	Lux/m ²
		Efficacité moyenne	lm/W
		% incandescent	%
		% halogène BT	%
		% halogène HT	%
		% LFC & fluorescent	%
		% LED	%
		% OLED	%
		Efficacité incandescent	lm/W
		Efficacité halogène BT	lm/W
		Efficacité halogène HT	lm/W
		Efficacité LFC & fluorescent	lm/W
		Efficacité LED	lm/W
		Efficacité OLED	lm/W
	Informatique	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Consommation informatique surfacique	kWh/m ²
		Consommation veille surfacique	kWh/m ²
		Veille	W
		% d'appareil en veille	%
		Taux d'équipement ordinateur fixe	nb/milliers m ²
		Taux d'équipement ordinateur portable	nb/milliers m ²
		Taux d'équipement serveur / imprimante / copieur	nb/milliers m ²
		Consommation annuelle fixe	kWh
		Puissance moyenne	W
		Durée de fonctionnement	h
		Consommation annuelle portable	kWh
		Puissance moyenne	W
		Durée de fonctionnement	h
		Consommation annuelle serveur / imprimante /	kWh

		copieur	
		Puissance moyenne	W
		Durée de fonctionnement	h
	Autres dont process tertiaire (imagerie médicale...)	Consommation annuelle totale	GWh/an
		Indice d'évolution	%/m ²
		Consommation surfacique tertiaire	kWh/m ²
		Indice d'efficacité	%
Agriculture	Agriculture	Consommation annuelle totale	GWh
		Indice d'évolution	%/pop
		Consommation unitaire	kWh/pop
		Indice d'efficacité	%
Secteurs spécifiques	Eclairage public	Consommation annuelle totale	GWh
		Consommation unitaire	kWh/ménage
		Durée d'éclairage moyenne	h
		Facteur d'utilisation moyen luminaire	%
		Efficacité moyenne	lm/W
		Puissance éclairage	lm
		Taux de charge (variation de puissance)	%
	Telecom	Consommation annuelle totale	GWh
		Indice d'évolution	%/pop
		Consommation unitaire	kWh/pop
		Indice d'efficacité	%
	Entrepôts frigorifiques	Consommation annuelle totale	GWh
		Indice d'évolution	%/pop
		Consommation unitaire	kWh/pop
		Indice d'efficacité	%
	Gérants immeubles tertiaires	Consommation annuelle totale	GWh
		Indice d'évolution	%/m ²
		Consommation unitaire	kWh/m ²
		Indice d'efficacité	%
	Recherche	Consommation annuelle totale	GWh
	Armées	Consommation annuelle totale	GWh
	BGC (bâtiment, génie civil)	Consommation annuelle totale	GWh
		Indice d'évolution	%/pop
		Consommation unitaire	kWh/pop
		Indice d'efficacité	%
	Eau	Consommation annuelle totale	GWh
		Indice d'évolution	%/pop
		Consommation unitaire	kWh/pop
		Indice d'efficacité	%

Les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

Ordinateurs

Les ordinateurs portables sont généralisés dans le secteur tertiaire. Les durées de fonctionnement des ordinateurs sont mises davantage en cohérence avec les heures ouvrées.

Eclairage

L'hypothèse est à une réduction de la durée et de l'intensité de l'éclairage, largement surévalué actuellement, et à une forte pénétration de nouvelles technologies d'éclairage (LED et OLED).

Secteurs spécifiques

- Eclairage : réduction de la puissance, de la durée (calculateur astronomique), variation de puissance (réduit 3h-6h),...

- Telecom, entrepôts frigorifiques, recherche, armées, BGC, eau : en raison du manque d'informations sur ces secteurs et de la très grande hétérogénéité des équipements consommateurs, hypothèse prudente d'une baisse de seulement 10% des consommations unitaires
- Gérants immeubles tertiaire : réduction de 50% des consommations unitaires (ce qui correspond au niveau de réduction constatée par les mesures du cabinet Enertech, avec des potentiels considérables atteignables sans investissement le simple réglage correct des installations et l'arrêt des consommations inutiles, en particulier en dehors des heures d'activité).

1-1-5 Cuisson résidentielle et tertiaire

La modélisation effectuée pour la cuisson est indépendante des différents postes de la chaîne d'alimentation (agriculture, agroalimentaire, réfrigération/congélation, ...). Nous prenons le même taux d'évolution du nombre de repas pris à l'extérieur dans le scénario tendanciel et dans le scénario négaWatt.

Il n'y a pas, dans le scénario négaWatt, de modification des habitudes de cuisson. Un faible progrès technologique est pris en compte dans le scénario négaWatt, et encore plus réduit dans le tendanciel.

Au niveau des énergies, on note une disparition du GPL dans le scénario négaWatt (produit pétrolier), une limitation de la hausse de la pointe électrique, en particulier dans la transition 2010-2025, et moins de gaz.

L'hypothèse pour la consommation d'énergie liée à la cuisson est une baisse de 1% par an et par logement.

Les hypothèses sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II-8: Déterminants liés à la cuisson dans le scénario négaWatt

Variable	Nom variable	Unité
Taux de repas pris à l'extérieur		%
Répartition usage cuisson	% plaque	%
	% four	%
	% autres	%
Parc plaque de cuisson	% électrique	%
	% GPL	%
	% gaz	%
Parc électrique	% fonte	%
	% radiant	%
	% induction	%
	Rendement plaque fonte	%
	Rendement radiant	%
	Rendement induction	%
	Rendement gaz	%
	Rendement GPL	%
	Besoin unitaire	kWh/repas
Parc four	% électrique	%
	% GPL	%
	% gaz	%
	% sans four	%
Consommation four	Conso four électrique	Wh/repas
	Conso four GPL	Wh/repas
	Conso four gaz	Wh/repas
Consommation électrique par repas autre usage	Conso élec par repas autre usage	Wh/repas
Parc tertiaire	% électrique	%
	% GPL	%
	% gaz	%
Consommation unitaire tertiaire	Conso élec	kWh/repas
	Conso GPL	kWh/repas
	Conso gaz	kWh/repas

1-2 Les hypothèses de la régionalisation

1-2-1 Résidentiel

Calcul des données régionales

Les données de base utilisées sont issues d'Energ'Air : valeurs des consommations finales d'énergie (combustibles solides (charbon, déchets), biomasse solide, fioul, GPL, combustible gazeux (réseau), électricité, réseaux de chaleur, solaire thermique) décomposées pour les usages chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, cuisson, électricité spécifique.

Ces valeurs sont comparées pour l'année de référence 2007 avec les valeurs issues du scénario national, avec application de plusieurs coefficients correcteurs permettant d'ajuster aux conditions régionales :

- Coefficient de population : rapport entre la population de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et la population nationale (scénarisé jusqu'en 2050)
- Coefficient climatique chauffage : rapport entre les besoins moyens de chauffage d'un logement en Provence-Alpes-Côte d'Azur et les besoins du même logement en moyenne nationale. Ce rapport dépend de la qualité thermique du logement. Plus celui-ci est performant, plus la réduction de besoins de chauffage dans un climat favorable comme en Provence-Alpes-Côte d'Azur est importante par rapport aux besoins dans le climat moyen français. Pour établir une loi de variation, nous avons utilisé les résultats de nombreuses simulations dynamiques effectuées sur des maisons individuelles et des bâtiments collectifs, avec des climats variés, de manière à calculer le coefficient permettant de passer des besoins moyens pour la France aux besoins moyens pour Provence-Alpes-Côte d'Azur.

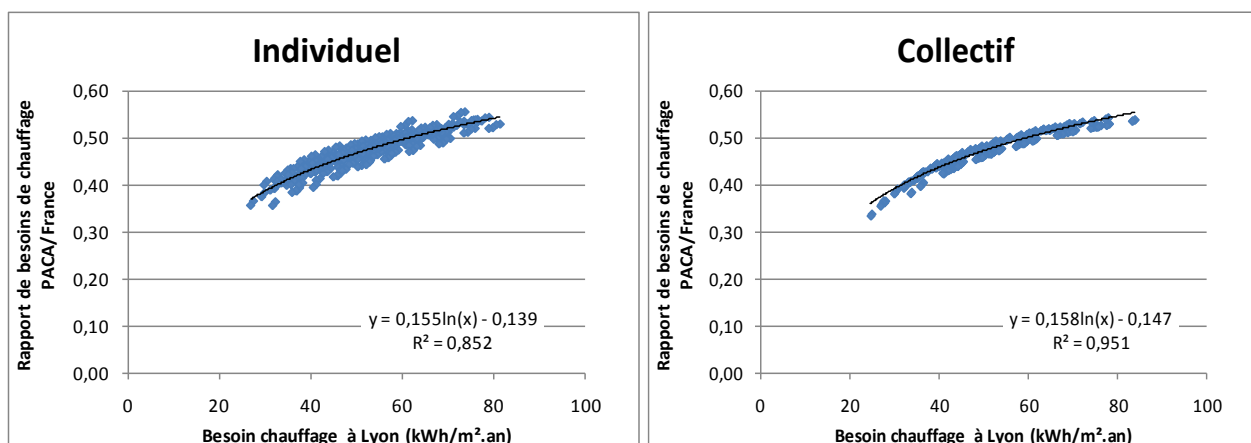


Figure II-14 : Coefficients climatique chauffage

Les deux graphiques de la Figure II-14 sont suffisamment proches pour qu'une courbe moyenne puisse être retenue pour le coefficient climatique, avec l'équation $y = 0,156 \ln(x) - 0,143$. Ce coefficient a ensuite été appliqué aux besoins moyens de chauffage, issus du scénario national.

- Coefficient enveloppe : rapport entre le coefficient de déperditions moyen du parc régional résidentiel et le coefficient moyen national (pris égal à 1,24). Ce coefficient signifie qu'en moyenne, les enveloppes et ventilations des bâtiments du secteur résidentiel sont moins performantes de 24% par rapport à la moyenne nationale
- Coefficient climatique ECS (eau chaude sanitaire) : rapport des écarts moyens régional et national entre la température d'eau froide et la température de référence de 50 °C (pris égal à 0,94)
- Coefficient résidences secondaires : rapport des pourcentages de résidences secondaires régional et national rapportés au parc de résidences principales (pris égal à 4%)
- Proportion de maisons individuelles dans le parc de logement régional comparé à la proportion nationale (pris égal à 41%, contre 56% en moyenne nationale)
- Coefficient électricité spécifique : correction de la consommation régionale moyenne par logement par rapport à la consommation moyenne nationale (pris égal à 1,25)
- Coefficient climatique climatisation : rapport (pris égal à 3,02) entre les degrés-jours de climatisation à Nice et les degrés-jours nationaux de climatisation, pris à Trappes

- Coefficient de taux d'équipement en climatisation : rapport (pris égal à 5,68) entre les taux d'équipement : 3,6% des logements climatisés en 2007 pour la France, 20% en 2007 pour la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Ces différents coefficients d'ajustement permettent d'obtenir une bonne corrélation entre les données Energ'Air et les données régionalisées issues du scénario national, pour l'année 2007 :

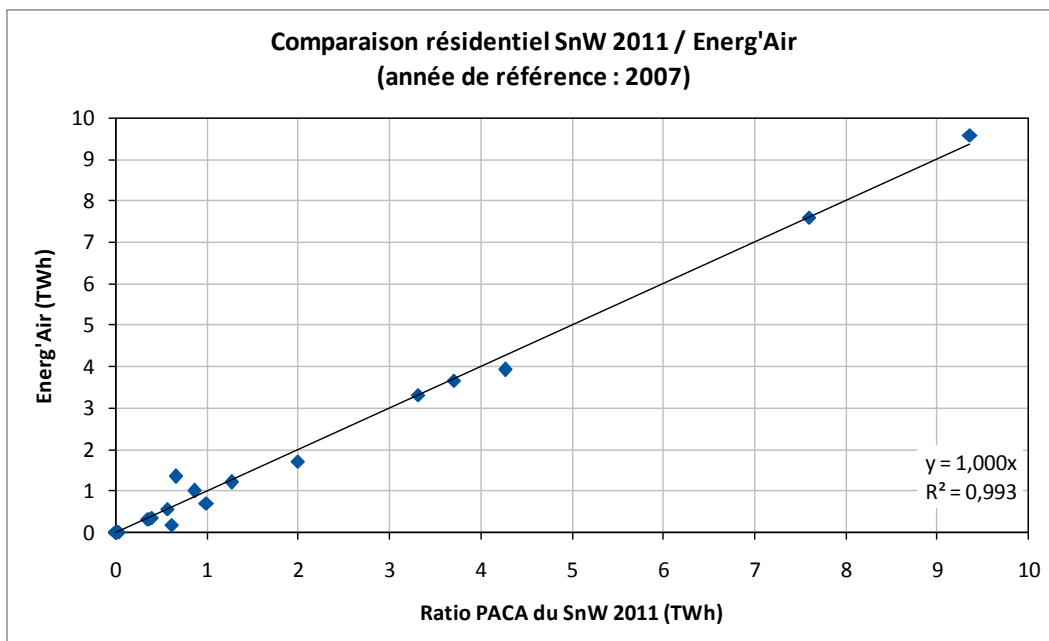


Figure II-15: Corrélation entre les données Energ'Air et les données régionalisées issues du scénario négaWatt 2011 pour le secteur résidentiel

Scénarisation

Ce calage étant effectué, les coefficients correcteurs sont utilisés ensuite pour « régionaliser » les trajectoires du scénario national. Dans ce calcul, les seuls coefficients qui ont été modulés sont le coefficient de population, le coefficient climatique chauffage modulé comme indiqué ci-dessus, et le coefficient de taux d'équipement en climatisation qui est progressivement réduit à 2 en 2050 (20% des logements climatisés pour la France, 40% pour la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur).

Même si les énergies utilisées pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sont réparties un peu différemment en Provence-Alpes-Côte d'Azur et en France en 2010, notamment pour l'eau chaude sanitaire où l'électricité est plus présente, nous faisons l'hypothèse que l'évolution des répartitions en Provence-Alpes-Côte d'Azur suit les trajectoires définies dans le scénario négaWatt national, avec quelques modulations :

- Développement du solaire thermique plus important que la moyenne nationale, du fait du meilleur ensoleillement, poursuivant ainsi la dynamique régionale.
- Moindre développement de l'utilisation du bois énergie pour le chauffage, du fait de la plus grande rareté de la ressource locale correspondante.
- En compensation, usage un peu plus important de l'électricité à travers des pompes à chaleur (voir paragraphe 1-5).

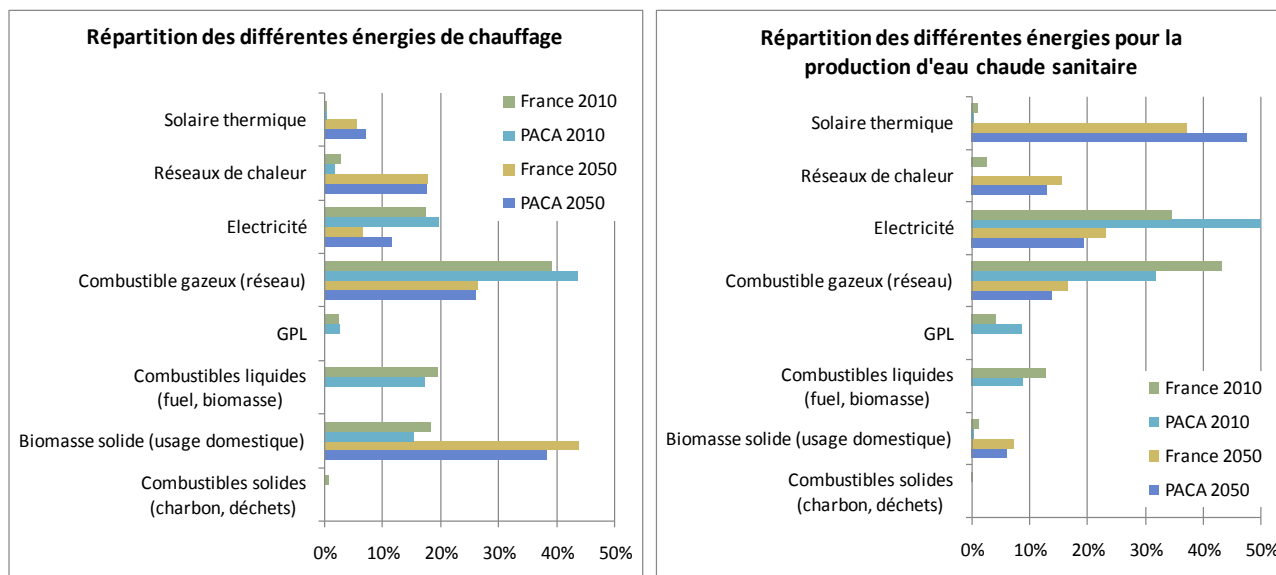


Figure II-16: Répartition des différentes énergies pour le chauffage et l'ECS en France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, en 2010 et 2050, pour le secteur résidentiel

Ces hypothèses conduisent aux consommations finales suivantes (chauffage et ECS) :

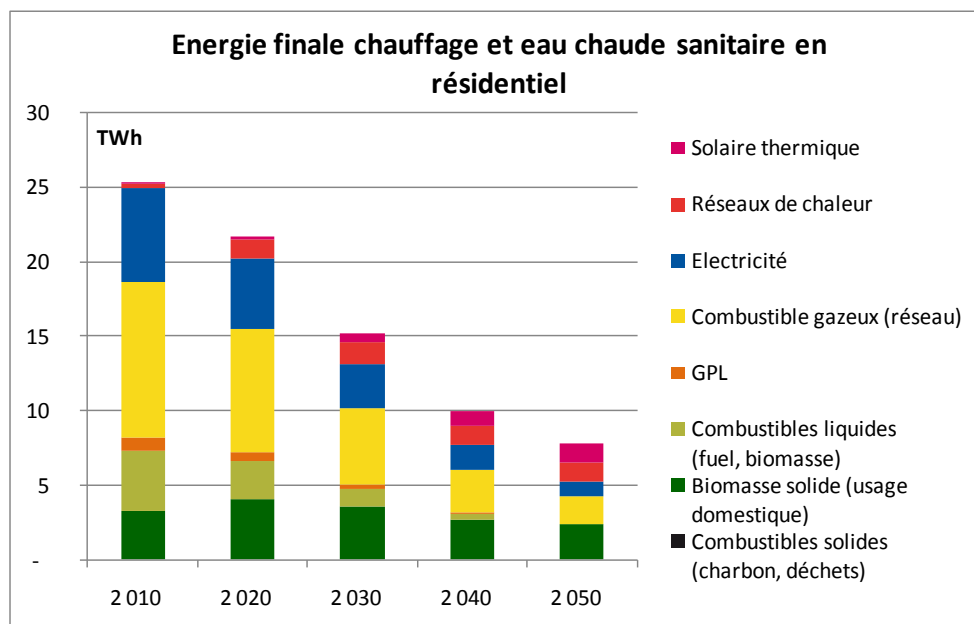


Figure II-17: Evolution des consommations de chauffage et d'ECS en résidentiel, par source, en énergie finale

1-2-2 Tertiaire

Calcul des données régionales

Une méthode analogue à celle du secteur résidentiel est utilisée pour le tertiaire. Les données de base utilisées sont issues d'Energ'Air : valeurs des consommations finales d'énergie (combustibles solides (charbon, déchets), biomasse solide, fioul, GPL, combustible gazeux (réseau), électricité, réseaux de chaleur, solaire thermique) décomposées pour les usages chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, cuisson, électricité spécifique.

Ces valeurs sont comparées pour l'année de référence 2007 avec les valeurs issues du scénario national, avec application de plusieurs coefficients correcteurs permettant d'ajuster aux conditions régionales. Les secteurs pris en compte sont les huit habituellement retenus dans les statistiques : Cafés, Hôtels, Restaurants (CHR) ; Habitat

Communautaire (HC) ; Santé, Action sociale (SA) ; Enseignement, Recherche (ER) ; Sport, Loisirs (SL) ; Bureaux, Administrations (BA) ; Commerce (C) ; Transport (T).

- Coefficient de surfaces : rapport entre la surface totale des bâtiments tertiaires en Provence-Alpes-Côte d'Azur et la surface totale des bâtiments tertiaires nationaux (pris égal à 0,07)
- Coefficient climatique chauffage : une méthodologie analogue à celle utilisée pour le résidentiel a été suivie, avec la courbe correspondant à l'équation $y=0,156 \ln(x) - 0,143$.
- Coefficient enveloppe : rapport entre le coefficient de déperditions moyen du parc régional de tertiaire et le coefficient moyen national (pris égal à 1,30). Ce coefficient signifie qu'en moyenne, les enveloppes et ventilations des bâtiments du secteur tertiaire sont moins performants de 30% par rapport à la moyenne nationale.
- Coefficient climatique ECS : rapport des écarts moyens régional et national entre la température d'eau froide et la température de référence de 50 °C (pris égal à 0,94)
- Coefficient de consommation ECS : rapport entre les consommations moyennes ECS du tertiaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur et au niveau national (pris égal à 1,06)
- Coefficient électricité spécifique : correction de la consommation régionale moyenne du tertiaire par rapport à la consommation moyenne nationale (pris égal à 1,20)
- Coefficient climatique climatisation : rapport (pris égal à 3,02) entre les degrés-jours de climatisation à Nice et les degrés-jours nationaux de climatisation, pris à Trappes
- Correction de taux d'équipement en climatisation : rapport (pris égal à 1,59) entre les taux d'équipement : 22,6% du tertiaire climatisé en 2007 pour la France, 36% en 2007 pour Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- Correction d'ajustement en climatisation : rapport pris égal à 0,25 pour retomber sur des consommations cohérentes en 2007. La valeur pour la France est vraisemblablement trop élevée parce qu'elle englobe aussi la ventilation des locaux et des consommations annexes.

Ces différents coefficients d'ajustement permettent d'obtenir une bonne corrélation entre les données Energ'Air et les données régionalisées issues du scénario national, pour l'année 2007 :

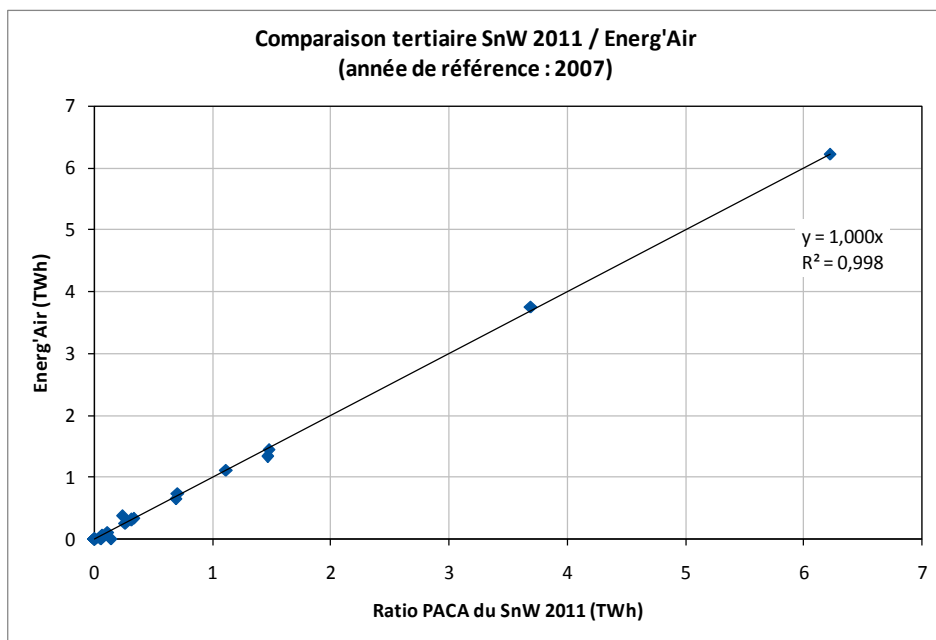


Figure II-18: Corrélation entre les données Energ'Air et les données régionalisées issues du scénario négaWatt 2011 pour le secteur tertiaire

Scénarisation

Ce calage étant effectué, les coefficients correcteurs sont utilisés ensuite pour « régionaliser » les trajectoires du scénario national. Dans ce calcul, le seul coefficient qui a été modulé est le coefficient de population et le coefficient climatique chauffage modulé comme indiqué ci-dessus.

Les trajectoires pour les proportions des différents modes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire sont calées sur le scénario national, avec cependant des adaptations pour tenir compte des particularités locales :

- Développement du solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire plus important que la moyenne nationale, du fait du meilleur ensoleillement, poursuivant ainsi la dynamique régionale.
- Moindre développement des réseaux de chaleur.
- En compensation, usage un peu plus important du gaz et de l'électricité à travers des pompes à chaleur (voir paragraphe 1-5). Notons qu'au fil des années, ces deux vecteurs énergétiques intègrent une proportion de plus en plus grande d'énergies renouvelables.

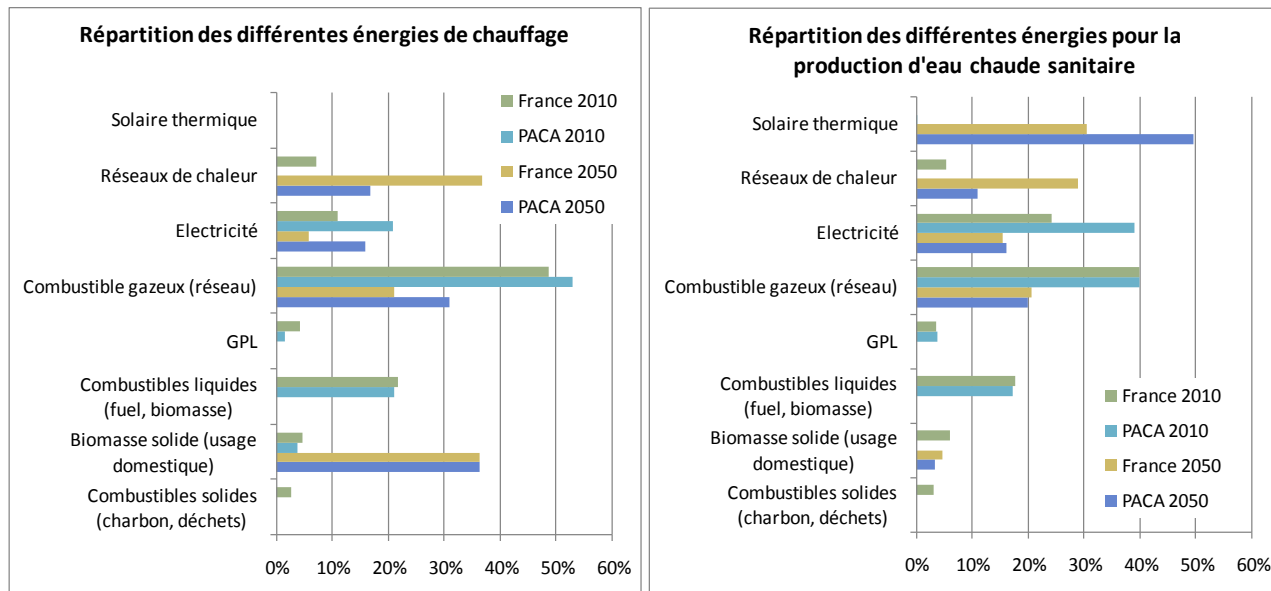


Figure II-19: Répartition des différentes énergies pour le chauffage et l'ECS en France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, en 2010 et 2050, pour le secteur tertiaire

Ceci conduit aux consommations finales suivantes (chauffage et ECS) :

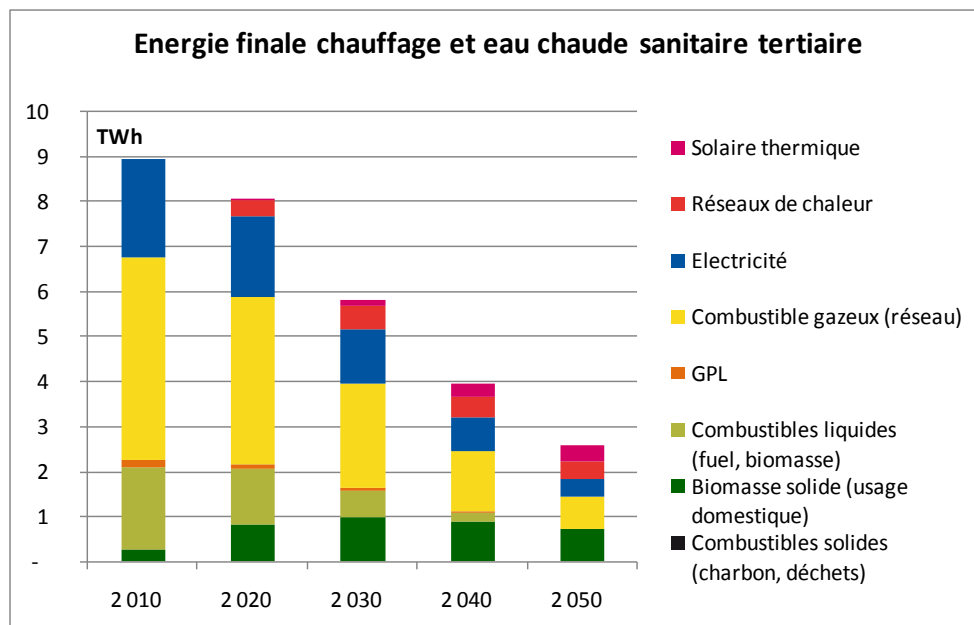


Figure II-20: Evolution des consommations de chauffage et d'ECS dans le tertiaire, par source, en énergie finale

2- « Transports » : mobilité des personnes et déplacement de marchandises

Le besoin de mobilité a été scindé en deux parties : besoin de mobilité pour les personnes, et besoin de déplacement des marchandises. Les hypothèses du scénario national sont exposées pour chacun des deux types de besoins, puis les adaptations régionales sont décrites.

2-1 Les hypothèses du scénario national

Une ligne directrice est indispensable pour sortir de la situation actuelle, dans le secteur des transports. Ils représentent 30 % de notre consommation d'énergie finale, répartis en un peu moins de deux tiers pour les déplacements de voyageurs et un tiers pour les marchandises, mais ils dépendent à plus de 90 % du pétrole. Il nous faut conserver une liberté de déplacement tout en sortant de notre dépendance presque totale au transport automobile, du moins sous sa forme actuelle.

Le scénario négaWatt envisage une évolution différenciée, selon les solutions les plus adaptées en fonction des motifs de déplacement, des distances à parcourir et de la densité d'infrastructures de transport sur le parcours, de l'espace rural 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 alternative à l'étalement urbain de densification des espaces urbains et de revitalisation des espaces ruraux, le développement du commerce en ligne ou celui de centres partagés de « télétravail » doivent permettre de réduire, pour les mêmes services, le nombre de kilomètres parcourus. Le scénario prévoit ainsi, globalement, un gain de 25 % environ sur le total des kilomètres parcourus par personne en une année.

La place laissée à la voiture individuelle diminue d'autant plus qu'on se place dans un espace dense et pour des distances courtes. Au total, elle ne représente plus que 42 % du nombre total de kilomètres.voyageurs parcourus, contre 63 % actuellement.

Le transfert bénéficie en priorité aux modes de déplacement doux (marche à pied, vélo...) 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 des réseaux de trains régionaux ou d'autocars. Au centre des espaces urbains, des systèmes très flexibles tels que des petits véhicules électriques en auto-partage ou des 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 régulation plus stricte avec par exemple la limitation des vitesses, mais surtout grâce à une meilleure efficacité des moteurs : la consommation unitaire des véhicules diminue de 55 % entre 2012 et 2050.

Le principal gain réside toutefois dans un changement de motorisation autour de deux filières complémentaires. La première est le véhicule électrique, dont la généralisation poserait d'importants problèmes de réseau et de matières premières mais qui se révèle très adapté aux trajets courts en milieux urbains : il assure au final 20 % des kilomètres parcourus en véhicule automobile.

La seconde est le véhicule au « gaz naturel véhicule » (GNV) 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 carburant, déjà largement développée dans certains pays, par exemple l'Italie, et adaptable sur les véhicules actuels, à essence ou Diesel, est fiable et performante. Le réseau gaz permet d'alimenter un réseau de stations services – sauf dans les territoires les plus isolés ou une part de véhicules à essence est conservée – et de passer progressivement à une alimentation en biogaz et en gaz de synthèse au lieu du gaz naturel. Les véhicules GNV représentent à terme plus de 60 % des déplacements automobiles. Par ailleurs, les véhicules essence comme GNV sont très majoritairement équipés de systèmes hybrides rechargeables ou non, ce qui en augmente fortement l'efficacité.

La même logique s'applique bien sûr au transport de marchandises. Ainsi le GNV représente 87 % des transports par camion en 2050, et le véhicule électrique, développé en milieu urbain, représente près de 60 % des transports par petits véhicules utilitaires. Le scénario intègre également une progression du taux de remplissage des véhicules, et un transfert modal vers le transport ferroviaire, qui atteint 41 % des tonnes-kilomètres en 2050, et le transport fluvial qui atteint 5 %.

Le scénario prévoit surtout, comme pour les voyageurs, une inversion de tendance sur les volumes transportés, qui repose sur une évolution sensible de l'industrie. Ainsi, le nombre de tonnes-kilomètres, au lieu d'augmenter proportionnellement à la population voire plus vite encore, connaît une baisse de 3,5 % entre 2010 et 2050.

2-1-1 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 au motif personnel ou professionnel.

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

Pour la mobilité des personnes, la méthode a donc été de découpler le secteur suivant ces trois axes d'analyse :

- Le mode de transport
- Le type de mobilité
- L'urbanisme et la densité de la zone considérée (pour la mobilité régulière et locale)

Mode de transport : dix modes de déplacement ont également été pris en compte, de la marche à l'avion, en passant par la bicyclette, les véhicules individuels motorisés (2 à 4 roues) et les transports collectifs.

Avion, à l'international (les km.passagers sont attribués aux passagers en partance de France) et en métropole

Bus/car

Tram/Métro et RER

TER/Corail et Transilien

Voiture routière

Voiture citadine

Taxico

Deux roues motorisées

Bicyclette

Marche

Typologie de mobilité :

Mobilité régulière et locale

Mobilité au-delà de 80 km à usage personnel

Mobilité au-delà de 80 km à usage professionnel

Autre mobilité

Urbanisme et densité de la zone : pour la mobilité régulière et locale, l'espace français a été sérié en 10 zones de densités différentes, du centre de Paris à l'espace à dominante rurale :

Paris

Banlieue parisienne

Commune polarisée d'une agglomération urbaine de Paris

Centre du pôle urbain d'une agglomération urbaine de 100 000 à 10 millions d'habitants

Banlieue du pôle urbain d'une agglomération urbaine de 100 000 à 10 millions d'habitants

Commune polarisée d'une agglomération urbaine de 100 000 à 10 millions d'habitants

Commune multipolarisée

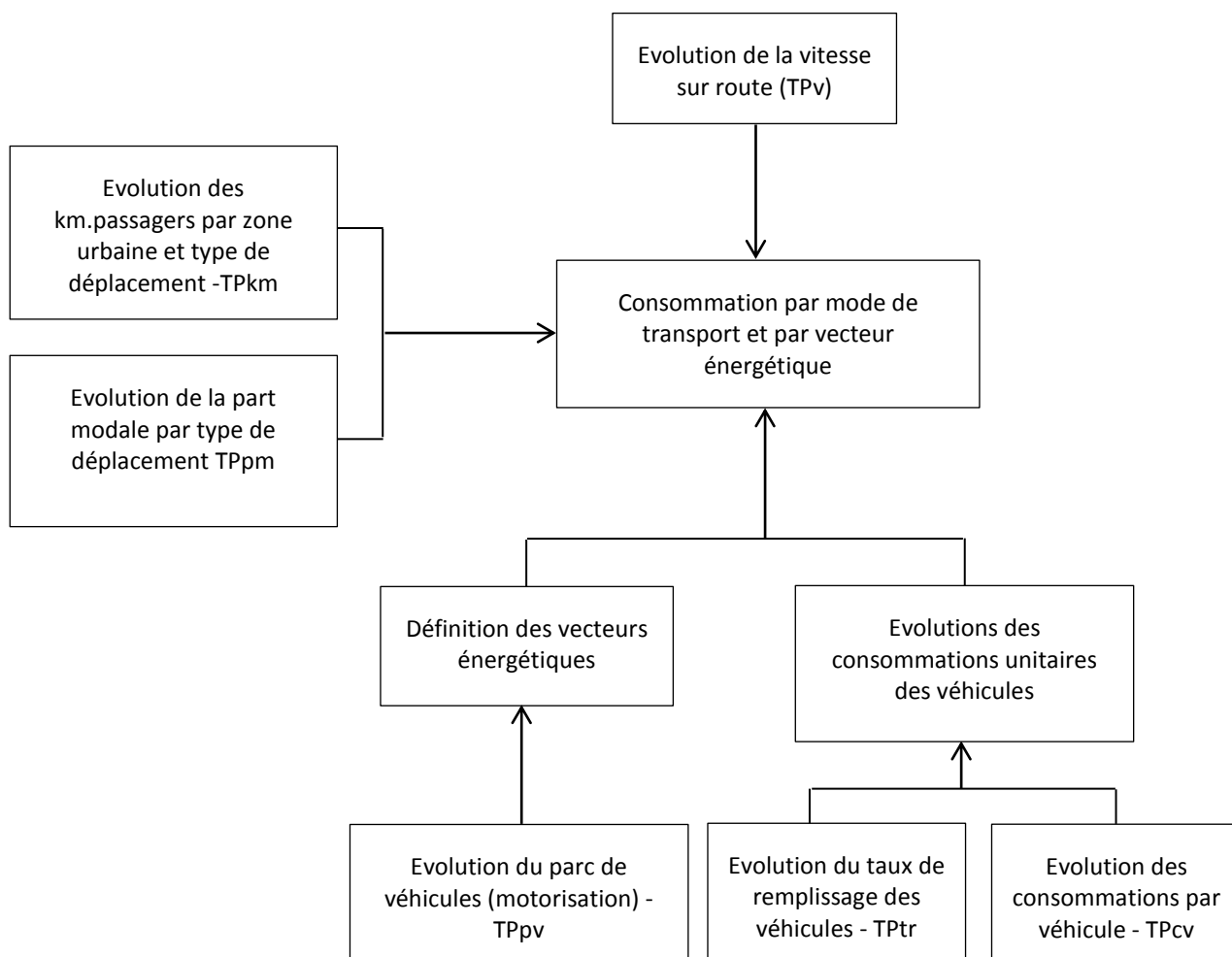
Pôle urbain d'une agglomération urbaine jusqu'à 99 999 habitants

Commune polarisée d'une agglomération urbaine jusqu'à 99 999 habitants

Espace à dominante rurale

Une fois ces axes définis, la structuration permettant de remonter aux consommations d'énergie pour les transports de personnes dans le scénario est la suivante :

Figure II-21: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de personnes dans le scénario négaWatt 2011 national



Les déterminants à expliciter pour le transport de personnes (TP) sont donc les suivants :

TPkm (pour km.passagers) : Evolution des km.passagers par zone urbaine et type de déplacement

TPpm (pour « part modale ») : Evolution de la part modale par type de déplacement

TPpv (pour « parc de véhicule ») : Evolution du parc de véhicules (motorisation)

TPtr (pour « taux de remplissage ») : Evolution du taux de remplissage des véhicules

TPcv (pour « consommation par véhicule ») : Evolution des consommations par mode

TPv (pour « vitesse ») : Evolution de la vitesse sur route

Revue des hypothèses nationales pour la mobilité des personnes

Evolution des km.passagers par zone urbaine et type de déplacement (TPkm) :

Ces évolutions sont synthétisées par mode de transport au Tableau II-9. La baisse de la mobilité totale est d'environ 9% entre 2008 et 2050. La mobilité est le seul usage pour lequel une baisse du *service énergétique* est prévue, par son remplacement par d'autres moyens techniques (comme le télétravail, les conférences via internet), la réorganisation de l'espace (et donc la diminution du besoin de mobilité), la rationalisation des déplacements et le développement des modes doux.

La baisse du nombre de km.voyageurs ramenée par habitant est donc de 22%, ce qui nous ramène à une mobilité similaire à celle du début des années 1990 (Tableau II-10)

Pour autant, cette baisse se fait sélectivement, avec un type de mobilité et des modes de déplacements différents. Au niveau des typologies de déplacements :

Mobilité régulière et locale :

L'hypothèse est à une stabilisation des km.voyageurs parcourus (les km.voyageurs en 2050 sont les mêmes qu'en 2008).

En prenant en compte les autres mobilités locales (par ordre d'importance, développement du véhicule électrique en ville, Tram/Métro/RER, marche et vélo), nous avons donc une légère augmentation du nombre de km.voyageurs parcourus (plus de 3% en 2030, près de 6% en 2050).

Mobilité de plus de 80 km, trajets personnels et professionnels (voir Tableau II-11) :

- Pour les trajets de moins de 200 km, l'hypothèse est à une augmentation du nombre de km.voyageurs parcourus, à un rythme similaire à l'augmentation de la population.
- Pour les déplacements de 200 à 800 km, l'hypothèse est une stabilisation des km.voyageurs parcourus entre 2008 et 2050 (donc baisse des km/habitant à hauteur de l'augmentation de population)
- Pour les déplacements de plus de 800 km :
 - o Pour les déplacements personnels, l'hypothèse est une forte baisse des km.voyageurs parcourus (retour à la mobilité de 1994, soit une baisse de 29%, pour les trajets de 800 à 1500 km, et baisse de l'ordre de 40% pour les trajets de plus de 1500 km).
 - o Pour les déplacements professionnels, l'hypothèse est à la stabilisation des km.voyageurs parcourus pour des trajets de 800 à 1500 km, et à une forte baisse (de l'ordre de 40%) pour les déplacements de plus de 1500 km.

Références : les données sont issues des enquêtes nationales « Transport et déplacements » de l'INSEE (1994 et 2008). Ces données sont ensuite recoupées avec les données nationales propres à chaque mode de transport.

Evolution de la part modale type de déplacement (TPpm)

Entre 2008 et 2050, les hypothèses sont les suivantes (synthétisées dans le Tableau II-12) :

- Doublement du nombre de km.parcourus en TGV
- Division par 2 du nombre de km.voyageurs en avion pour l'international en 2050 (retour aux valeurs de 1994)
- Augmentation de 65% des km.voyageurs en TER-Corail et Transilien, de 83% pour les bus et car
- Augmentation de 67% pour les Tram, métro et RER
- Multiplication par plus de 5 des déplacements en 2 roues motorisées, par près de 3 des déplacements en vélo
- Hausse de la marche à pied à hauteur de l'augmentation de population

En 2050 :

- Arrêt des déplacements intérieurs à la métropole en avion en 2050 (hors déplacements de nécessité), baisse de 45% entre 2010 et 2030, au profit notamment du TGV
- Déplacements internationaux en avion : les km des voyageurs en partance de France sont pris en compte. Retour en 2050 aux valeurs de 1994
- L'avion représente 10% des km.voyageurs pour les trajets personnels ou professionnels entre 800 et 1500 km, 50% pour les trajets personnels de plus de 1500 km, 80% pour les trajets professionnels de plus de 1500 km
- Le transport fluvial reste marginal en déplacement de personnes
- Les déplacements en voiture représentent encore 50% des km.voyageurs parcourus (3/4 en voiture individuelle « classique » avec motorisation thermique – voir plus bas – et ¼ avec voiture électrique, principalement en centre urbain)

- Baisse de 40% des déplacements en voiture individuelle "classique", mais seulement de 17% si l'on tient compte des déplacements en véhicules électriques et taxi

Evolution du parc de véhicules (TPpv)

Les hypothèses sont synthétisées dans le Tableau II-12. En 2050, les km.voyageurs parcourus par les voitures individuelles se répartissent de la façon suivante :

- 8% : voitures à essence ou gazole (avec 95% du parc en hybrides non rechargeables)
- 66% : voitures aux GNV (dont 95% en hybrides non rechargeables)
- 12% : voitures électriques
- 14% : hybrides rechargeables

Il n'y a pas de voitures à hydrogène.

En 2050, les bus et cars sont à 75% au GNV, à 20% à l'électrique et le reste à l'essence-gazole. 50% des bus sont en hybrides non rechargeables, ainsi que 30% des cars.

Les TER sont à 95% à l'électrique, à 5% au thermique.

Les véhicules deux roues motorisés sont pour moitié électriques, et pour moitié à motorisation classique essence/gazole.

Les vélos sont, pour 10% des km.voyageurs parcourus, des vélos électriques.

Evolution des consommations par mode (TPcv)

En 2050 :

- Les voitures individuelles routières consomment 3,24 L/100 km en moyenne, et les citadines 1,14 L/100 km (rappelons que 95% du parc GNV/essence/gazole sont en hybride non rechargeable).
- Les avions, en court, moyen et long courrier, consomment 25% de moins qu'en 2008.
- Pour les trains, le TGV reste sur les mêmes consommations énergétiques. Pour les TER, corail et Transilien, une baisse de 17% de consommation énergétique est prévue, mais qui peut être due soit au remplissage, soit à l'efficacité énergétique des moteurs.
- Les bus consomment 41 L/100 km, les cars 32, contre respectivement 45 et 37 en 2008.

Evolution du taux de remplissage des véhicules (TPtr)

Les voitures individuelles :

- Pour la mobilité régulière et locale, passage d'un taux de remplissage de 1,4 en 2008 à 1,7 en 2050
- Pour la mobilité à motif personnel de plus de 80 km, passage d'un taux de remplissage de 2,8 en 2008 à 3 en 2050
- Pour la mobilité à motif professionnel de plus de 80 km, stabilisation du taux de remplissage à 1,8 en 2008 comme en 2050

Le remplissage des cars et des bus passe de 33% en moyenne en 2008 à 50% en 2050 (avec stabilité des capacités : 37 pour un bus, 55 pour un car).

Evolution de la vitesse sur route (TPv)

Dans le scénario tendanciel, les vitesses maximales autorisées restent inchangées par rapport à 2010 :

- 90 km/h sur routes
- 130 km/h sur autoroutes
- 110 km/h sur voies rapides

Dans le scénario négaWatt, la vitesse maximale autorisée est ramenée à 80km/h sur les routes, 110km/h sur les autoroutes, et 100km/h sur les voies rapides. La généralisation de cette baisse de vitesse au niveau national conduit à

une baisse progressive des consommations d'énergie jusqu'à 2018 ; la baisse de consommation est alors de 8% par rapport à l'évolution tendancielle, et elle n'est plus modifiée ensuite jusqu'à 2050.

Référence : « Impact des limitations de vitesse sur les émissions de gaz à effet de serre », communiqué de presse de l'ADEME du 16/10/2033 suite à simulations.

Ces simulations indiquent que :

- le respect des vitesses autorisées permettrait une réduction des consommations de 6,5%
- le passage de la vitesse sur autoroutes de 130 à 120 km/h permettrait une baisse de 14% de la consommation
- le passage de la vitesse sur voies rapides de 110 à 100 km/h permettrait une baisse de 14% de la consommation
- le passage de la vitesse sur route de 90 à 80 km/h permettrait une baisse de 4% de la consommation.

Tableau II-9: Synthèse des déplacements de personnes en milliards de km.voyageurs parcourus, par mode de transport

Milliards de km.voyageurs	1994	2008	2020	2030	2050	2008-2050
Marche	8	8	9	9	10	17%
Vélo	4	6	8	13	16	196%
2 roues	6	8	13	29	43	440%
Voiture individuelle hors urbain*	559	720	753	607	424	-41%
Voiture électrique citadine**	0	0	5	60	134	
Taxico***	0	0	1	18	40	
Bus/Car	37	48	55	71	89	83%
Tram/Métro/RER	12	15	16	19	24	68%
TER/Corail/Transilien	14	23	27	32	38	65%
TGV	33	52	65	88	107	104%
Avion - intérieur	15	13	12	7	0	-100%
Avion international	171	260	257	199	132	-49%
Transport fluvial	0	0	0	0	0	
Autres modes	8	8	6	4	0	-100%
Ensemble	868	1 161	1 224	1 155	1 056	-9%

* Voiture individuelle dont l'usage se rapproche des usages actuels, à l'exception de l'utilisation urbaine qui décroît jusqu'à être nulle en 2050.

** Voiture électrique dont l'usage est quasi exclusivement réservé aux centres urbains.

*** « Taxi collectif », véhicule du type minibus.

Tableau II-10: Nombre de km.voyageurs par habitant

	1994	2008	2020	2030	2050	2008-2050
Population (x1000)	57 565	62 159	65 962	68 532	72 275	16%
Milliers de km.voyageurs/habitant	15,1	18,7	18,6	16,8	14,6	-22%

Tableau II-11: Evolutions des km.voyageurs parcourus entre 2008 et 2050 pour motifs personnels et professionnels, hors mobilité régulière et locale et autre mobilité

Part des km.voyageurs en%		Evolutions (%) 2008-2050
Motif personnel	Moins de 100 Km	32
	De 100 à 199 Km	18
	De 200 à 399 Km	0
	De 400 à 599 Km	0
	De 600 à 799 Km	0
	De 800 à 1499 Km	-28
	1500 Km ou plus	-39
	Ensemble	-14
Motif professionnel	Moins de 100 Km	40
	De 100 à 199 Km	16
	De 200 à 399 Km	0
	De 400 à 599 Km	0
	De 600 à 799 Km	0
	De 800 à 1499 Km	0
	1500 Km ou plus	-41
	Ensemble	-7

Tableau II-12: Répartition par combustible pour chaque mode de déplacement (part du nombre de km.voyageurs parcourus pour chaque mode)

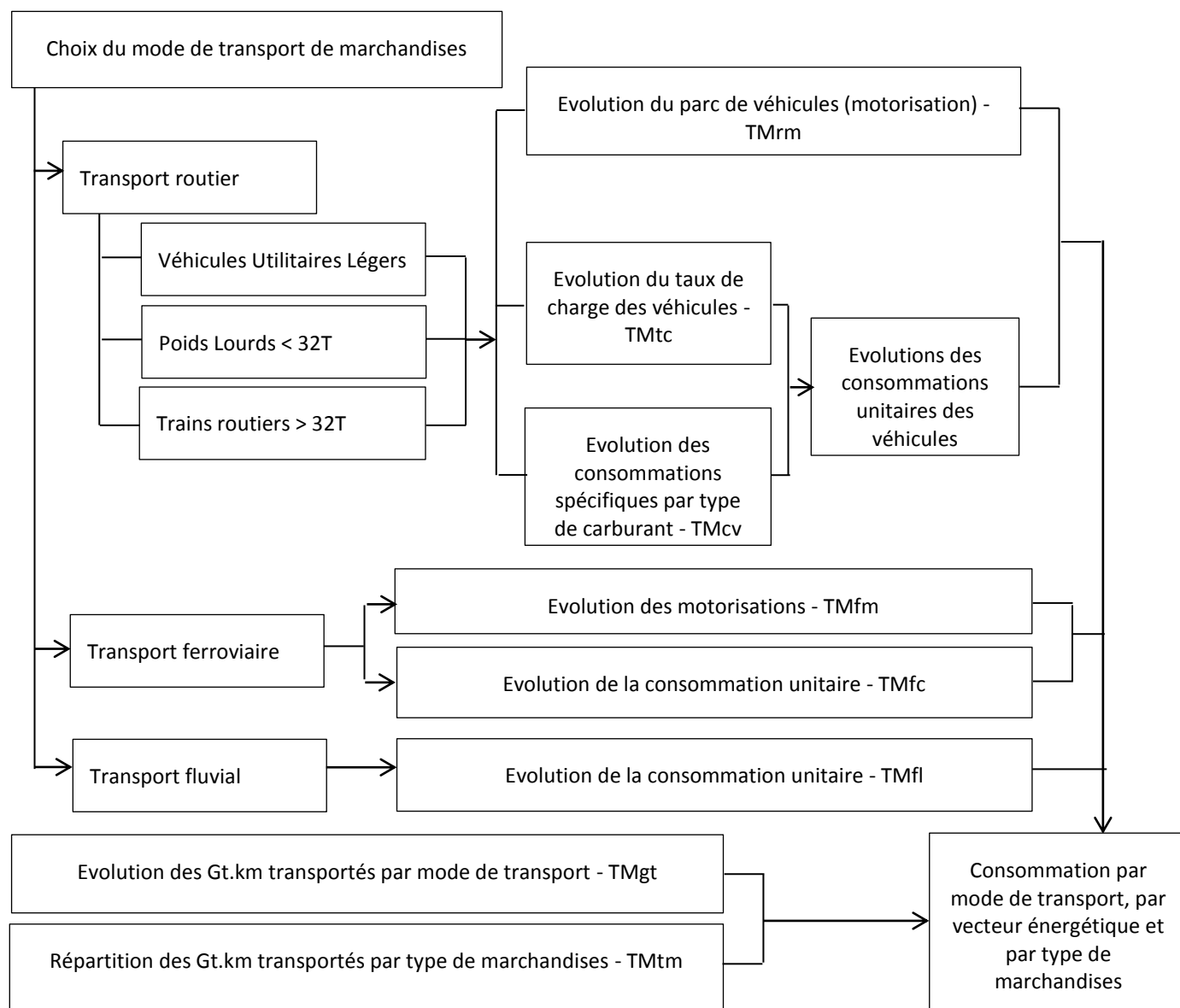
Part des combustibles par mode de déplacement (%)		1994	2008	2020	2030	2050
Vélo	Électricité	0	0	0	4	10
Deux roues	Essence/Gazole	100	100	98	78	50
	Électricité	0	0	2	22	50
Voiture individuelle hors urbain	Essence/Gazole	100	100	96	61	10
	GNV		0	3	38	87
	Hybride rechargeable			0	1	3
Voiture électrique citadine	Essence/Gazole			97	57	1
	GNV			0	0	1
	Électricité			2	21	49
	Hybride rechargeable			2	21	49
Taxico	Essence/Gazole			96	61	10
	GNV			3	38	87
	Hybride rechargeable			0	1	3
Bus/Car	Essence/Gazole	100	98	94	57	5
	GNV		2	5	34	75
	Électricité			1	9	20
Tramway/Métro	Électricité	100	100	100	100	100
TER/Corail/Transilien	Essence/Gazole	20	10	7	6	5
	Électricité	80	90	93	94	95
TGV	Électricité	100	100	100	100	100
Avion court courrier	Essence/Gazole	100	100	100	100	100
Avion long courrier	Essence/Gazole	100	100	100	100	100
Transport fluvial	Essence/Gazole	100	100	100	100	100

2-1-2 Transports de marchandises

Le périmètre retenu au niveau du scénario national intègre l'ensemble des transports de marchandises à l'exception des transports maritimes et aériens.

Le schéma ci-dessous synthétise la méthodologie retenue, dont les hypothèses sont explicitées ensuite.

Figure II-22: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie liées aux transports de marchandises dans le scénario négaWatt 2011 national



Les déterminants à expliciter pour le transport de marchandises (TM) sont donc les suivants :

TMgt (pour « Gt.km transportées ») : Evolution des Gt.km (gigatonnes, ou milliards de tonnes kilomètres) transportées par mode de transport

TMtm (pour « type de marchandises ») : Evolution des Gt.km transportées par type de marchandises

TMrm (pour « routier – motorisation ») : Evolution de la flotte de véhicules pour le transport routier

TMtc (pour « taux de charge ») : Evolution du taux de charge des véhicules

TMcv (pour « consommation des véhicules ») : Evolution des consommations par véhicule et par carburant

TMfm (pour « ferroviaire – motorisation ») : Evolution des motorisations pour le ferroviaire (répartition entre thermique et électrique)

TMfc (pour « ferroviaire - consommation ») : Evolution des consommations unitaires par carburant pour le ferroviaire

TMfl (pour « fluvial ») : Evolution des consommations unitaires par carburant pour le fluvial

Revue des hypothèses nationales pour le transport de marchandises

TMgt (pour « Gt.km transportées ») : Evolution des Gt.km transportés par mode de transport

En 2050 dans le scénario négaWatt, les Gt.km transportés se stabilisent (-2% entre 2008 et 2050), soit 370 Gt.km transportés.

La baisse est significative pour l'ensemble des transports sur route : les Véhicules Utilitaires Légers (VUL ; -14% entre 2008 et 2050), les Poids Lourds (PL) de moins de 32 t (-22%) et les Trains Routiers (TR), poids lourds de plus de 32 t (-46%).

Le transfert se fait vers le fret ferroviaire (+275% entre 2008 et 2050) et le fluvial (+141%).

Les hypothèses sont récapitulées dans le Tableau II-13.

TMrm (pour « routier – motorisation ») : Evolution de la flotte de véhicules pour le transport routier

9 types de motorisations sont mis en œuvre dans le scénario négaWatt pour les transports de marchandises sur route (VUL, PL et TR) : motorisation Diesel, électrique, GNV, DualFuel, hybride non rechargeable Diesel, GNV et DualFuel, hybride rechargeable Diesel et GNV.

Pour les VUL, l'hybride non rechargeable au GNV représente 50% des t.km transportés en 2050, suivi de la motorisation GNV (15%). La motorisation électrique couvre 10% des Gt.km transportés (principalement en centres urbains).

Pour les PL et TR, les hybrides non rechargeables GNV et DualFuel couvrent chacun 40% des Gt.km transportées, le reste se répartissant entre motorisation GNV et DualFuel non hybrides.

Les parts modales sont récapitulées dans le Tableau II-14.

TMtc (pour « taux de charge ») : Evolution du taux de charge des véhicules

Entre 2008 et 2050, le chargement moyen des véhicules augmente de 45% pour les VUL, de 40% pour les PL<32t et de 30% pour les TR>32t. Les hypothèses sont récapitulées dans le Tableau II-15.

TMcv (pour « consommation des véhicules ») : Evolution des consommations par véhicule et par carburant

Les consommations unitaires des véhicules routiers (VUL, PL et TR) baissent entre 16 et 33% entre 2008 et 2050, en intégrant l'efficacité énergétique des moteurs et le passage à l'hybride. Les évolutions sont récapitulées dans le Tableau II-17.

Pour l'hybride rechargeable, il a été considéré que 25% de la consommation était électrique, le reste en combustible.

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

TMfm (pour « ferroviaire – motorisation ») : Evolution des motorisations pour le ferroviaire (répartition entre thermique et électrique)

Les motorisations électriques représentent 95% des Gt.km transportées en 2050 (contre 90 en 2008), et les motorisations thermiques (Diesel) représentent 5% en 2050 (contre 10% en 2008).

TMfc (pour « ferroviaire - consommation ») : Evolution des consommations unitaires par carburant pour le ferroviaire

Pour les motorisations électriques comme Diesel, les consommations unitaires baissent de 15% entre 2008 et 2050.

TMfl (pour « fluvial ») : Evolution des consommations unitaires par carburant pour le fluvial

La motorisation pour le transport fluvial reste à 100% en Diesel. La consommation unitaire de gazole reste stable à 5,5 gep (gramme d'équivalent pétrole)/t.km.

TMtm (pour « type de marchandises ») : Evolution des Gt.km transportées par type de marchandises

L'évolution des Gt.km transportées par mode et type de marchandises est synthétisée dans le Tableau II-14.

Tableau II-13: Evolutions des Gt.km transportées par mode de transport

	2000	2008	2020	2030	2050	Evolutions 2008-2050
VUL*	18,8	21,8	22,1	20,7	18,8	-14%
PL** < 32t	58,8	60,0	60,8	55,1	47,0	-22%
TR*** > 32t	244,5	249,3	250,9	202,7	134,5	-46%
Train	57,7	40,5	44,2	88,8	151,8	275%
Fluvial	7,3	7,5	7,9	12,1	18,1	141%
Total	387,1	379,0	386,0	379,4	370,1	-2%

*Véhicules Utilitaires Légers

**Poids Lourds de moins de 32 tonnes

***« Trains routiers », poids lourds de plus de 32 tonnes

Tableau II-14: Evolution des Gt.km transportées par mode de transport et par type de marchandises

Modes	Véhicules	Domaines	Unités	2008	2020	2030	2050	Evolution 2008-2050
Routier	VUL	Agroalimentaire	GT.km/an					
		Construction	GT.km/an					
		Produits manufacturés	GT.km/an					
		Divers	GT.km/an	21,8	22,1	20,7	18,8	-14%
	PL < 32 T	Agroalimentaire	GT.km/an	18,2	18,5	16,8	14,3	-22%
		Construction	GT.km/an	11,2	11,3	10,3	8,7	-22%
		Produits manufacturés	GT.km/an	19,6	19,9	18,0	15,4	-22%
		Divers	GT.km/an	11,0	11,1	10,1	8,6	-22%
	TR > 32 T	Agroalimentaire	GT.km/an	75,8	76,3	61,6	40,9	-46%
		Construction	GT.km/an	46,4	46,7	37,7	25,0	-46%
		Produits manufacturés	GT.km/an	81,5	82,0	66,3	44,0	-46%
		Divers	GT.km/an	45,6	45,9	37,1	24,6	-46%
Ferroviaire		Agroalimentaire	GT.km/an	7,7	8,8	22,3	41,3	437%
		Construction	GT.km/an	4,5	5,1	12,9	24,0	433%
		Produits manufacturés	GT.km/an	10,8	12,1	27,7	49,7	358%
		Divers	GT.km/an	17,5	18,1	25,9	36,8	111%
Fluvial (hors transit)		Agroalimentaire	GT.km/an	2,2	2,6	3,9	5,9	163%
		Construction	GT.km/an	2,4	2,4	3,7	5,4	128%
		Produits manufacturés	GT.km/an	0,6	0,8	1,2	1,7	210%
		Divers	GT.km/an	2,3	2,2	3,4	5,0	115%
Total				379,0	386,0	379,4	370,1	-2%

Tableau II-15: Evolution des chargements moyens des véhicules de transports de marchandises (t)

	2008	2020	2030	2050	Evolution 2008-2050
VUL	0,26	0,26	0,31	0,38	45%
PL<32t	6,5	6,5	7,6	9,0	40%
TR>32t	13,7	13,8	15,5	17,8	30%

Tableau II-16: Evolution des parts modales pour le transport des marchandises (en% des Gt.km transportées)

Mode	Nom variable	2008	2010	2020	2030	2040	2050
VUL	% VUL Th Gazole	100	100	97	61	16	10
	% VUL Th GNV	0	0	1	7	14	15
	% VUL Th DualFuel	0	0	0	0	0	0
	% VUL Hyb-nR Gazole	0	0	0	2	5	5
	% VUL Hyb-nR GNV	0	0	2	22	47	50
	% VUL Hyb-nR DualFuel	0	0	0	0	0	0
	% VUL Elec	0	0	0	4	9	10
	% VUL Hybr-R Gazole	0	0	0	2	5	5
	% VUL Hybr-R GNV	0	0	0	2	5	5
PL<32t	% PL Th Gazole	100	100	97	57	7	0
	% PL Th GNV	0	0	0	4	9	10
	% PL Th DualFuel	0	0	0	4	9	10
	% PL Hyb-nR Gazole	0	0	0	0	0	0
	% PL Hyb-nR GNV	0	0	1	17	37	40
	% PL Hyb-nR DualFuel	0	0	1	17	37	40
	% PL Elec	0	0	0	0	0	0
	% PL Hybr-R Gazole	0	0	0	0	0	0
	% PL Hybr-R GNV	0	0	0	0	0	0
TR>32t	% TR Th Gazole	100	100	97	57	7	0
	% TR Th GNV	0	0	0	4	9	10
	% TR Th DualFuel	0	0	0	4	9	10
	% TR Hyb-nR Gazole	0	0	0	0	0	0
	% TR Hyb-nR GNV	0	0	1	17	37	40
	% TR Hyb-nR DualFuel	0	0	1	17	37	40
	% TR Elec	0	0	0	0	0	0
	% TR Hybr-R Gazole	0	0	0	0	0	0
	% TR Hybr-R GNV	0	0	0	0	0	0
Ferroviaire	% Train Th	10	10	10	8	5	5
	% Train Elec	90	90	90	92	95	95
Fluvial	% Fluvial Th	100	100	100	100	100	100

Abréviations: VUL: Véhicule Utilitaire Léger

PL<32t: Poids Lourd de moins de 32t

TR>32t: Train Routier de plus de 32t

Th: Motorisation Thermique

Hybr-R: Hybride Rechargeable

Hybr-nR: Hybride Non Rechargeable

GNV: Gaz Naturel Véhicule

Elec: Motorisation Electrique

Tableau II-17: Evolution des consommations unitaires par mode et par motorisation

Mode	Nom variable	Unité	2008	2020	2030	2050	Evolution 2008-2050
VUL	Conso VUL Th Gazole	l/100km	9,67	9,58	8,50	6,96	-28%
	Conso VUL Th GNV	l/100km	10,64	10,53	9,19	7,31	-31%
	Gain sur l'efficacité dû à l'Hyb-nR	%	20%	20%	20%	20%	
	Conso VUL Elec	kWh/km	0,50	0,50	0,47	0,42	-16%
	Conso Gazole VUL Hybr-R Gazole	l/100km	5,80	5,75	5,10	4,18	-28%
	Conso GNV VUL Hybr-R GNV	l/100km	6,38	6,32	5,52	4,39	-31%
	Conso électricité VUL Hybr-R	kWh/km	0,13	0,12	0,12	0,11	-16%
PL<32t	Conso PL Th Gazole	l/100km	30,00	29,70	26,10	21,00	-30%
	Conso PL Th GNV	l/100km	33,00	32,63	28,25	22,05	-33%
	Conso PL Th DualFuel Gazole	l/100km	9,00	8,91	7,83	6,30	-30%
	Conso PL Th DualFuel GNV	l/100km	23,10	22,84	19,77	15,44	-33%
	Gain sur l'efficacité dû à l'Hyb-nR	%	12%	12%	12%	12%	
TR>32t	Conso TR Th GNV	l/100km	44,00	43,60	38,76	31,92	-27%
	Conso TR Th Gazole	l/100km	40,00	39,68	35,84	30,40	-24%
	Conso TR Th DualFuel Gazole	l/100km	12,00	11,90	10,75	9,12	-24%
	Conso TR Th DualFuel GNV	l/100km	30,80	30,52	27,13	22,34	-27%
	Gain sur l'efficacité dû à l'Hyb-nR	%	10%	10%	10%	10%	
Ferroviaire	Conso gazole Train Th	l/1000t.km	10,54	10,49	9,85	8,96	-15%
	Conso élec Train Elec	kWh/1000t.km	36,17	35,99	33,82	30,74	-15%
Fluvial	Conso par tonne.km	Gep/t.km	5,50	5,50	5,50	5,50	0%

Abréviations: VUL: Véhicule Utilitaire Léger
 PL<32t: Poids Lourd de moins de 32t
 TR>32t: Train Routier de plus de 32t
 Th: Motorisation Thermique
 Hybr-R: Hybride Rechargeable
 Hybr-nR: Hybride Non Rechargeable
 GNV: Gaz Naturel Véhicule
 Elec: Motorisation Electrique

2-2 Les hypothèses de la régionalisation

2-2-1 Mobilité des personnes

Pour la régionalisation de la trajectoire nationale de la mobilité des personnes, le périmètre d'étude choisi est confondu avec celui de la base d'Energ'Air. Les données utilisées pour l'état initial (2007) proviennent de cette base (extraction communale) ainsi que des données de trafic à la commune fournies par Atmo Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Pour la mobilité routière, il s'agit donc de consommations par commune estimées à partir des données de comptage routier et de la méthodologie COPERT IV basée sur une modélisation du maillage de la voirie régionale (outil Circul'Air).

Pour les autres types de mobilité, ce sont des estimations ou données de consommation par mode de transport et par combustible, issues de la base Energ'Air.

Ces données de mobilité, exprimées en km.voyageurs par mode de transport, ont été traitées à l'échelle de la commune, par le biais d'une typologie semblable à celle utilisée dans le scénario national (influence des aires urbaines

et des pôles urbains). Ce traitement prend donc en compte les particularités de la répartition démographique très polarisée sur le territoire régional.

L'évolution des besoins et des modes de transport utilisés a donc été adaptée aux particularités du territoire régional, mais sur la base des mêmes hypothèses qu'au niveau national en termes de sobriété, d'évolution des parts modales, d'évolution du parc de véhicules et d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Les corrections locales effectuées sont les suivantes :

- Détermination plus précise du gain lié aux différentes réductions de vitesse (particularité du parc ayant davantage de véhicules essence, part exacte des km réalisés sur autoroute et en inter-urbain, et méthode COPERT IV permettant de déterminer un gain précis pour le parc et pour chaque réduction de vitesse)
- Correction de l'évolution des besoins de mobilité en fonction de l'évolution de la population (différente de la moyenne nationale) selon les deux hypothèses retenues pour cette étude (hypothèse basse et variante haute)
- Correction de la part de la mobilité locale légèrement inférieure à la moyenne nationale (étude domicile-travail de l'Observatoire Régional de l'Energie Provence-Alpes-Côte d'Azur)
- Adaptation des hypothèses sur le train et l'avion (état initial très différent du bilan national : davantage de train, beaucoup moins d'avion, lié à la méthodologie de calcul) : évolution similaire, maintien de la particularité au cours du temps (puisque c'est un choix méthodologique)
- Mix énergétique et efficacité des modes de transport adaptés pour les premières années, puis tend vers le scénario national

2-2-2 Transports de marchandises

Pour la régionalisation de la trajectoire nationale pour les transports de marchandises, le périmètre d'étude choisi est confondu avec celui de la base d'Energ'Air. Il s'agit donc du territoire régional ainsi que d'une zone maritime et aérienne définie autour du territoire régional. Les données utilisées proviennent de cette base ainsi que des études de l'ORE, l'ORT et quelques éléments du rapport du SRCAE. Ces éléments permettent de constituer l'état initial (2007).

L'évolution des besoins (quantités transportées), des modes de transport et de l'efficacité énergétique appliquée à cet état initial est la même que dans le scénario national pour de nombreux modes de transport et catégories de marchandises qui sont en transit sur le territoire ou dont l'activité dépend d'une évolution nationale et non régionale.

Des particularités locales ont conduit à modifier certaines hypothèses nationales :

- Le transport maritime a été traité ici en supposant que les orientations stratégiques du port de Marseille/Fos se réalisent à court terme (projet Fos2XL déjà en cours), mais que les autres projets à plus long terme qui ne sont pas compatibles avec le scénario national n'auront donc pas lieu (Fos4XL et 3XL, et objectifs de développement des navires rouliers notamment).
- L'évolution des tonnages échangés dans les ports a été traitée par type de marchandises, en fonction des évolutions liées au scénario national et au scénario régional : importation de produits pétroliers, d'engrais, de minerais en fonction de l'évolution de l'activité agricole et industrielle. Une correction a été apportée avant 2020 pour prendre en compte le projet Fos2XL et son amortissement.
- Le facteur de consommation du transport maritime sur le périmètre étudié est déterminé expérimentalement à partir du tonnage total 2010 et de la consommation de cette filière cette même année d'après Energ'Air. Il prend donc en compte la surconsommation des navires sur le périmètre pendant leurs manœuvres à l'approche des ports. Un gain d'efficacité énergétique est appliqué d'après les engagements de l'OMI à ce sujet sur les bateaux neufs.
- Le mix énergétique du transport ferroviaire, adapté les premières années, tend vers la moyenne nationale du scénario négaWatt national. L'augmentation de sa part modale est similaire avec le scénario national, ce qui s'avère compatible avec les différents projets et objectifs régionaux (ceci étant vérifié au pas annuel).

3- Production industrielle

Comme pour les autres secteurs de consommation, nous présenterons pour l'industrie les principales hypothèses nationales qui concernent le scénario régionalisé, puis nous décrirons la méthodologie retenue pour effectuer cette régionalisation.

L'industrie représente 23 % de notre consommation finale d'énergie. Contrairement aux autres secteurs, l'industrie voit aujourd'hui sa consommation relativement stabilisée par les efforts de la part des industriels pour améliorer l'« intensité énergétique » (la quantité d'énergie nécessaire par unité de production), mais aussi par l'effet des délocalisations qui permettent de masquer les consommations intermédiaires d'énergie en les exportant.

Une étude récente du SOeS sur la contribution de la France aux émissions de gaz à effet de serre a mis en évidence que la production industrielle nationale en 2005 a émis 280 Mt de CO₂, mais que 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.

Pour répondre à ces enjeux, la logique prise en compte dans le scénario négaWatt pour ce secteur est prioritairement basée, outre l'évolution de population, sur la prise en compte de la relocalisation de la production industrielle et de la baisse des consommations d'énergie.

La sobriété appliquée au secteur a porté sur :

- la réduction de gaspillage par la réduction de consommation de certains produits considérés comme non utiles (principalement tracts publicitaires, emballages, mais aussi moins de constructions neuves, moins d'autoroutes, ...),
- l'amélioration de certains produits, par l'écoconception par exemple permettant de réduire la consommation de produits intermédiaires ou finaux (par exemple diminution des tailles et poids des voitures, en particulier celles destinées à un usage urbain, ...),
- un travail sur la réutilisation d'emballages (en particulier avec une remise en place de la consigne sur le verre).

Notons que la transformation des autres secteurs a un impact sur le secteur industriel : la baisse de l'usage de la voiture a un impact, à la baisse, sur les productions du secteur automobile, mais aussi sur les secteurs amont (acier, caoutchouc, verre...).

L'efficacité est mise en place :

- dans le recyclage des matériaux (baisse des productions primaires et augmentation des productions de matières/matériaux recyclés),
- au niveau des process de production, en travaillant sur des actions « transverses » touchant la plupart des industries (efficacité des moteurs, de la production de chaleur basse à haute température, ...), et sur des process spécifiques de productions qui peuvent être améliorés,
- au niveau de la substitution entre vecteurs énergétiques, le passage à l'électricité, dans certains process, pouvant être source d'économie d'énergie.

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. Deux opérations allant dans ce sens peuvent être mises en œuvre. D'une part, il s'agit d'utiliser le gisement restant de chaleur récupérable (chaleur fatale), une fois les meilleures technologies disponibles appliquées. D'autre part, l'alimentation des industries en chaleur à basse et moyenne température permet d'envisager une substitution des moyens de production d'électricité classiques par de la cogénération.

Ces deux potentiels supplémentaires ont été identifiés puis quantifiés :

- Récupération d'énergie : bon nombre de procédés industriels, même optimisés, rejettent encore sous forme d'effluents (fumées, eau de refroidissement...), 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) ;

- Le développement de la cogénération : il s'agit de profiter des besoins de chaleur des procédés industriels pour produire en parallèle de l'électricité à un meilleur rendement. Cette production électrique permet ainsi de limiter l'énergie primaire utilisée dans la production électrique. Cette économie peut être portée au crédit du secteur énergétique. Une optimisation de ces productions dans le temps, fonction des autres productions fossiles ou des importations, de même qu'un recours aux énergies renouvelables, pourrait aussi amener un bilan carbone positif.

Un travail a enfin été mené pour substituer certains combustibles industriels par d'autres, moins impactants.

3-1 Les hypothèses du scénario national

Les évolutions industrielles du scénario national sont basées sur une matrice fondamentale quantifiant l'ensemble des biens consommés en France, et décomposant ces biens en tonnes de matières et matériaux.

Tableau II-18: Matrice de consommation de biens en France en 2010

2010	Prod	Conso	Bois	Biomasse	Terre et 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	26,3	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 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														

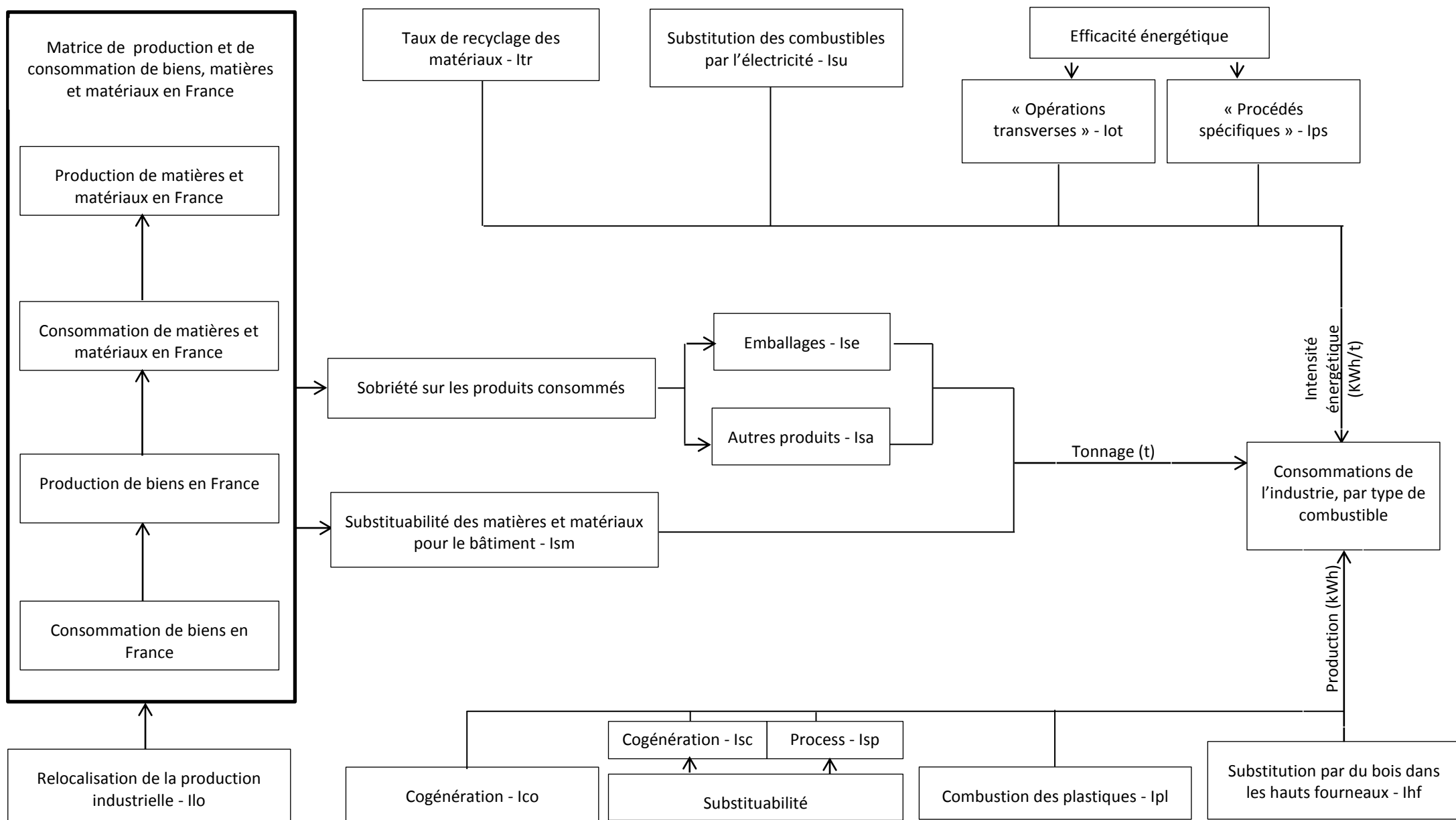
Besoins de matériaux :
Biomasse, bois,
Acier, métaux non ferreux,
Ciment, terre, pierre et sable,
Plastiques, chimie minérale et organique
Papiers et cartons

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

C'est sur cette matrice que s'appliquent les hypothèses de sobriété ou de substitution de matériaux.

L'ensemble de la méthodologie retenue au niveau du scénario national est présenté dans le schéma ci-dessous, puis les hypothèses sont détaillées.

Figure II-23: Méthodologie de détermination des consommations d'énergie dans l'industrie dans le scénario négaWatt 2011 national



Déterminants de l'industrie (lettre « I ») :

Ilo (pour « relocalisation ») : Hypothèses de relocalisation de la production industrielle

Ise (pour « sobriété sur les emballages ») : Hypothèses de sobriété sur les emballages

Isa (pour « sobriété sur les autres produits ») : Hypothèses de sobriété sur les autres produits (prospectus, ...)

Ism (pour « substituabilité matières et matériaux ») : Hypothèses de substitution des matières et matériaux dans les biens consommés pour le bâtiment

Itr (pour « taux de recyclage ») : Taux de recyclage des matériaux

lot (pour « opérations transverses ») : Efficacité énergétique dans les « opérations transverses »

Ips (pour « procédés spécifiques ») : Efficacité énergétique dans les « procédés spécifiques »

Isu (pour « substitution ») : Hypothèses de substitution des combustibles par de l'électricité

Ico (pour « cogénération ») : Hypothèses de mise en place de la cogénération

Isc (pour « substituabilité - cogénération ») : Hypothèses concernant la substituabilité liée à la cogénération

Isp (pour « substituabilité - process ») : Hypothèses concernant la substituabilité liée aux process

Ipl (pour « plastiques ») : Hypothèses concernant la combustion des plastiques

Ihf (pour « hauts fourneaux ») : Hypothèses concernant la substitution des combustibles par du bois dans les hauts fourneaux

Revue des hypothèses pour la production industrielle

Ilo (pour « relocalisation ») : Hypothèses de relocalisation de la production industrielle

L'analyse de la matrice de consommations de biens en France nous a permis de montrer que les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie affichée en France pour l'industrie étaient fortement sous-estimées par rapport aux émissions et consommations d'énergie réelles associées à nos consommations de biens. Pour le dire autrement, ce sont d'autres pays (Chine, Allemagne, ...) qui assument partiellement dans leur bilan les émissions de gaz à effet de serre et les consommations d'énergie nécessaires à produire les biens que nous consommons en France.

L'hypothèse formulée au niveau national est qu'une relocalisation progressive de la production a lieu, ce qui permet d'intégrer à la consommation d'énergie française les volumes nécessaires pour couvrir la production de biens consommés en France.

Cette hypothèse n'implique pas que la France est en autarcie, car des échanges sont toujours prévus (ne serait-ce que pour les produits dont nous ne disposons pas en France, sur le plan alimentaire ou des minerais par exemple). Cette hypothèse suppose qu'en 2050, l'intégralité des consommations d'énergie de l'outil industriel nécessaires à la consommation des Français est prise en compte dans le bilan.

Tableau II-19: Taux de relocalisation de la production de biens en France dans le scénario négaWatt national

	2010	2020	2030	2040	2050
Taux de relocalisation de la production (% des quantités consommées produites en France)	0%	20%	40%	70%	100%

Ise (pour « sobriété sur les emballages ») : Hypothèses de sobriété sur les emballages

La modélisation prend en compte la suppression des emballages superflus, mais aussi la réintroduction massive de la réutilisation des emballages : bouteilles de verre, quelques emballages plastiques, ... La réutilisation peut être mise en place par des mécanismes comme la consigne ; cette réutilisation est d'ailleurs toujours fortement présente chez nos voisins (Belgique, Allemagne, ...).

La mise en œuvre de la réutilisation est progressive et suit les hypothèses du Tableau II-20. En 2020, 10% des emballages verre sont réutilisés, 2% pour les emballages plastiques. Les emballages plastiques diminuent de 7%, 5%

provenant de la réduction des emballages superflus, les 2% supplémentaires sont substitués par des emballages en verre.

Tableau II-20 – 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 des emballages					
- Plastique par verre	0%	2%	5%	10%	12%

Source : E&E, sur la base du scénario négaWatt national

Les impacts en termes de production de verre creux, plastique d'emballage et papier-carton sont résumés dans le Tableau II-21.

Tableau II-21 – Impact sur la production de la réutilisation et de la réduction des emballages

Réutilisation	2010	2020	2050
Verre creux	0%	-5%	-75%
Plastique emballage	0%	-5%	-25%
Réduction production emballage	2010	2020	2050
Plastique emballage	0%	-5%	-25%
Papier carton	0%	-5%	-20%
Bilan emballage	2010	2020	2050
Verre creux	0%	-5%	-75%
Plastique emballage	0%	-10%	-50%
Papier carton	0%	-5%	-20%

Source : E&E, sur la base du scénario négaWatt national

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

Isa (pour « sobriété sur les autres produits ») : Hypothèses de sobriété sur les autres produits

Le Tableau II-22 présente les principales hypothèses prises en compte sur les réductions de consommation liées à la sobriété. Pour certains secteurs, aucune réduction de sobriété n'est appliquée (travaux publics, construction naval et aéronautique, armement, papier sanitaire, autres productions « diverses »). Les hypothèses de réduction sont explicitées dans le tableau.

La construction n'est pas intégrée dans le tableau, mais développée dans l'hypothèse Icr ci-dessous.

Tableau II-22 – Principales hypothèses sur les réductions de consommation liées à la sobriété

	2010	2020	2030	2040	2050	Explication
Travaux publics	0%	0%	0%	0%	0%	
Voirie	0%	-30%	-36%	-38%	-40%	Arrêt du développement des autoroutes
Transports terrestres	0%	-8%	-15%	-23%	-30%	Baisse de l'usage de la voiture compensant largement la hausse de production ferroviaire
Caoutchouc	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Réduction des km.véhicules
Construction NAA*	0%	0%	0%	0%	0%	
Alimentation	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Résultat du scénario Afterres (Solagro)
Engrais	0%	-11%	-22%	-32%	-43%	Résultat du scénario Afterres (Solagro)
Mécanique	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Baisse de 50% des appareils chaud/froid Amélioration de la durabilité (baisse générale de 5%)
Electricité	0%	-3%	-5%	-8%	-10%	Amélioration de la durabilité
Textile	0%	-1%	-3%	-4%	-5%	Amélioration de la durabilité
Papier graphique	0%	-20%	-25%	-30%	-35%	Fin des prospectus publicitaires en 2020 (-20%), réduction du gaspillage sur long terme (-35%)
Papier sanitaire	0%	0%	0%	0%	0%	
Divers	0%	0%	0%	0%	0%	

*Construction Naval et Aéronautique, Armement

Ism (pour « substituabilité matières et matériaux - bâtiment ») : Hypothèses de substitution des matières et matériaux dans les biens consommés dans le bâtiment

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 les différents types de bâtiments (maisons individuelles, logements collectifs et bâtiments tertiaires). Les déterminants de cette analyse sont présentés sur la Figure II-24.

Les surfaces prises en compte pour la détermination des quantités de matériaux sont présentées en Tableau II-23. Le Tableau II-24 détaille les principaux choix effectués sur les matériaux de construction, pour chacune des parties de bâtiment à considérer. Le Tableau II-25 précise les choix effectués pour les isolants, et le Tableau II-26 pour les châssis de menuiseries.

Figure II-24: Déterminants pris en compte pour le calcul des consommations additionnelles liées aux constructions et au programme de rénovations thermiques dans le scénario négaWatt 2011

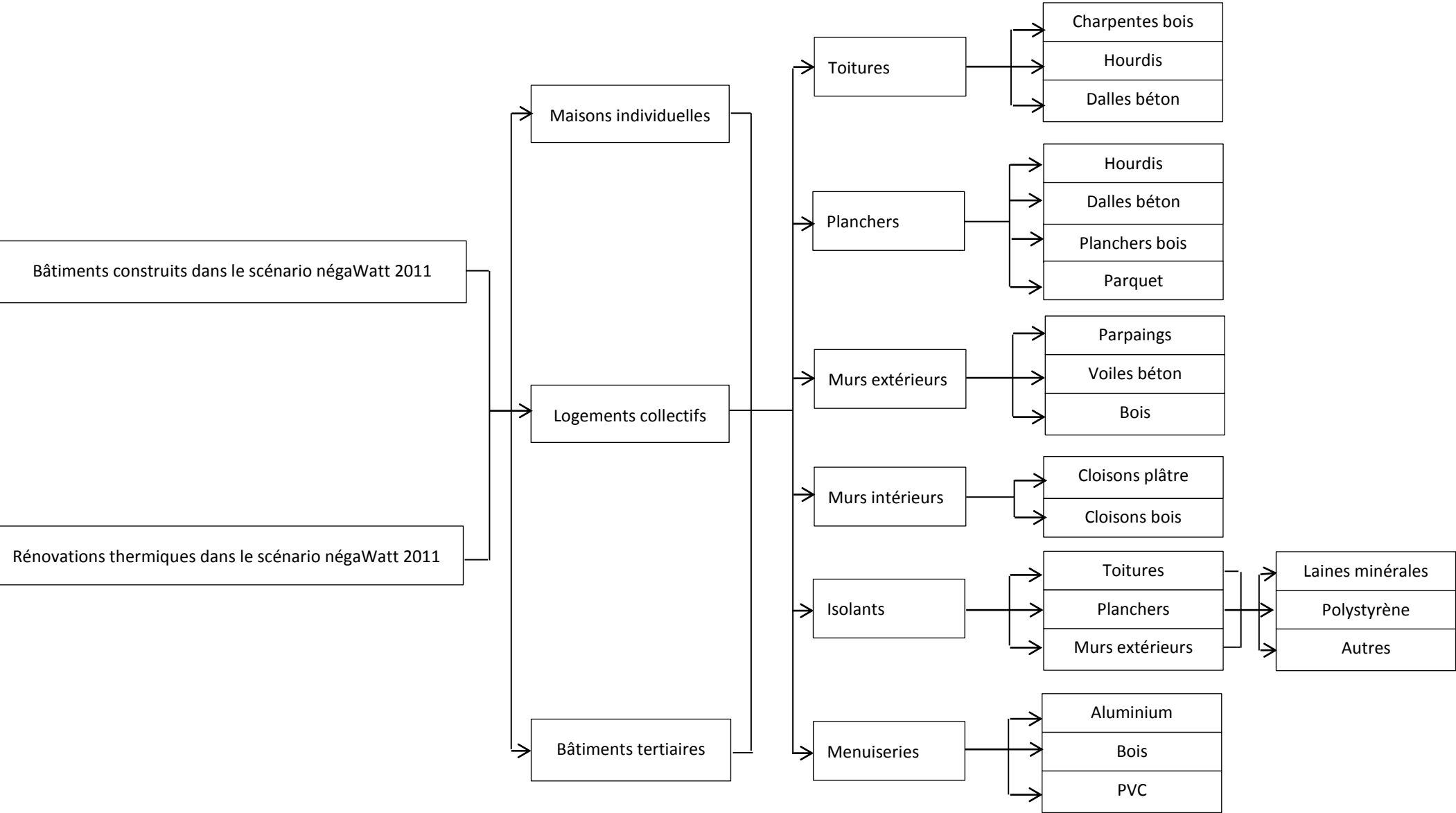


Tableau II-23: Evolution de la répartition des surfaces en constructions neuves et rénovations

SURFACES BATIMENT			2010			2020			2030			2040			2050		
			MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.
NEUF	Nombre	X1000	180,0	141,4		103,3	116,5		43,4	70,8		23,0	56,2		19,8	79,1	
	S moyenne	m²	130,5	73,0		130,5	73,0		130,5	73,0		130,5	73,0		130,5	73,0	
	Surface	Mm²	23,5	10,3	12,9	13,5	8,5	5,0	5,7	5,2	4,2	3,0	4,1	3,0	2,6	5,8	2,3
RENOVATION	Nombre	X1000	53,5	39,1		375,7	328,4		384,1	329,0		381,1	331,4		0,0	0,0	
	S moyenne	m²	109,8	66,0		111,5	66,9		112,2	67,3		112,6	67,5		112,8	67,8	
	Surface	Mm²	5,9	2,6	3,2	41,9	22,0	15,1	43,1	22,1	24,0	42,9	22,4	24,0	0,0	0,0	24,0

MI : Maisons Individuelles – LC : Logements Collectifs – Tert. : Tertiaire

Tableau II-24: Evolution de la répartition des matériaux utilisés dans les constructions neuves (%)

CONSTRUCTIONS NEUVES		2010			2020			2030			2040			2050		
		MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.	MI	LC	Tert.
Toiture	Charpente	80	10	0	85	10	0	85	15	5	85	15	5	85	20	10
	Hourdis	100	95	95	100	95	95	100	95	95	100	95	95	100	95	95
	Dalle béton	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5
Planchers	Hourdis	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	Dalle béton	0	100	100	0	100	100	0	100	100	0	100	100	0	100	100
	Plancher bois	0	0	0	10	0	0	20	5	5	30	5	5	0	0	0
	Parquet	10	10	10	20	10	10	30	15	15	40	15	15	40	20	20
Murs ext	Parpaings	100	60	60	90	60	60	80	55	55	70	55	55	70	50	50
	Voile béton	0	40	40	0	40	40	0	40	40	0	40	40	0	40	40
	Bois	0	0	0	10	0	0	20	5	5	30	5	5	30	10	10
Murs int	Cloison plâtre	100	100	100	90	100	100	80	95	95	70	95	95	70	95	95
	Bois	0	0	0	10	0	0	20	5	5	30	5	5	30	5	5

MI : Maisons Individuelles – LC : Logements Collectifs – Tert. : Tertiaire

Lecture : 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 en plancher bois, ou en 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 II-25: Evolution de la répartition des isolants utilisés dans les constructions neuves et rénovations (%)

ISOLANT	NEUF					RENOVATION				
	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050
Isolant toiture:										
Laines minérales	90	45	40	40	40	50	45	40	40	40
Polystyrène	10	40	30	15	0	50	40	30	15	0
Autres*	0	15	30	45	60	0	15	30	45	60
Isolant plancher:										
Laines minérales	0	40	30	20	25	50	40	30	20	25
Polystyrène	100	35	20	10	0	50	35	20	10	0
Autres*	0	25	50	70	75	0	25	50	70	75
Isolant mur ext :										
Laines minérales	50	40	30	25	25	50	40	30	25	25
Polystyrène	50	35	20	0	0	50	35	20	0	0
Autres*	0	25	50	75	75	0	25	50	75	75

* Principalement issus de la biomasse (laine de bois, ouate de cellulose, ...).

Tableau II-26: Evolution de la répartition des châssis utilisés dans les menuiseries, en constructions neuves et rénovations (%)

MENUISERIES (NEUF et RENOVATION)	2010	2020	2030	2040	2050
Châssis alu	21	23	25	27	30
Châssis PVC	63	45	30	15	0
Châssis bois	16	32	45	58	70

Itr (pour « taux de recyclage ») : Taux de recyclage des matériaux

Le recyclage permet souvent, en plus de préserver les ressources naturelles de matières premières, une importante économie d'énergie, comme le montre le tableau suivant :

Tableau II-27 – Gain énergétique actuel du recyclage

	Energie finale de la production primaire
	Energie finale de la production recyclée
Acier	5
Aluminium	12
Papier-Carton	2
Plastique	Selon configuration
Verre	1,3

Source E&E d'après BREF

Le recyclage ne permet pas toujours de retrouver une qualité identique à la matière d'origine, c'est particulièrement vrai pour les plastiques (ce défaut peut être fortement amélioré par des mesures d'écoconception). Les énergies à

mettre œuvre sont encore importantes, en particulier pour le verre. Pour ces deux raisons, il reste fondamental d'envisager avant tout une augmentation de durée de vie des produits, et leur réutilisation plutôt que le recyclage comme unique solution.

Le Tableau II-28 présente les taux ultimes de recyclage retenus.

Tableau II-28 – Taux ultimes de recyclage

Matière	Taux ultimes de recyclage
Acier	90%
Aluminium	86%
Papier-Carton	80%
Plastiques flux thermo-mécanique (NCE 37)	30%
Plastiques recyclage chimique (aciérie, matière première plastique, autres usage fioul lourd...). (NCE 15)	30%*

(*) Le recyclage « thermique » des plastiques n'a pas été pris en compte dans le bilan d'efficacité énergétique, mais seulement dans le calcul des émissions globales. En effet, du point de vue d'une branche industrielle (par exemple la sidérurgie, les ciments ou la production de carburants), la récupération de matières plastiques comme matériau de base en substitution du pétrole ou du charbon ne change pas le rendement énergétique. Par contre le bilan d'émissions (en tenant compte des utilisations alternatives comme les incinérateurs) est très favorable.

Source : E&E

En termes énergétiques, pour le verre, le recyclage apporte peu, au final, par rapport à la production primaire. L'évolution du recyclage n'a pas été modélisée précisément, même si les performances à long terme prennent en compte un fort taux de recyclage. Par contre, la filière réutilisation d'emballages a été développée, permettant une baisse de production du verre creux, et donc des gains bien plus importants.

Le Tableau II-29 montre les évolutions du taux de recyclage retenus :

Tableau II-29 – Taux de recyclage nationaux modélisés

Recyclage	2010	2020	2030	2040	2050
Acier	49%	60%	70%	80%	90%
Aluminium	35%	50%	70%	80%	86%
Plastique	6%	15%	25%	30%	30%
Papier	60%	75%	80%	80%	80%

Source : E&E

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).

Le taux de 30% de recyclage considéré pour les plastiques 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 dans l'industrie : plastiques, mais aussi pétrole pour les transports ou encore injection directe dans un haut-fourneau. 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. Cette substitution n'est pas comptabilisée comme économie d'énergie, puisqu'il s'agit d'une substitution, mais est prise en compte pour le calcul d'émissions.

lot (pour « opérations transverses ») : Efficacité énergétique dans les « opérations transverses »

Les potentiels d'économie d'énergie dépendent d'une part des niveaux de performance des installations actuelles (vétusté des installations, niveau de maintenance/rénovation, etc.), mais également des meilleures techniques aujourd'hui disponibles. Pour 2050, certaines technologies non encore disponibles au stade industriel mais existant au stade pilote ont été prises en compte (voir le cas de la sidérurgie en annexe 4). La description des techniques permettant des gains d'efficacité est découpée selon :

- Les opérations transverses, ce sont les utilisations énergétiques que l'on retrouve dans la majorité des secteurs industriels (moteur, éclairage, pompe, ventilateur...). Ce secteur est aussi qualifié d'« utilités » dans certaines sources ;
- Les procédés spécifiques : il s'agit ici particulièrement des procédés des Industries Grosses Consommatrices d'Energie (IGCE), traitées plus bas.

Pour les opérations transverses, les hypothèses retenues se basent principalement sur l'étude récente du CEREN⁷ et en reprennent donc le même découpage.

Une autre source d'économie importante est l'adoption de normes d'efficacité sur les équipements électriques, en particulier les moteurs. L'UE a entamé son passage à la norme IE2/IE3 sur une grande partie des moteurs concernés, et les Etats-Unis ont même adopté une norme plus contraignante encore pour 2016-2017 (IE4). C'est cette dernière que nous considérons comme accessible (CEREN ne considère que IE3), puisque les fabricants de moteurs diffusent déjà ces modèles.

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, déstratification 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.

Moteurs électriques

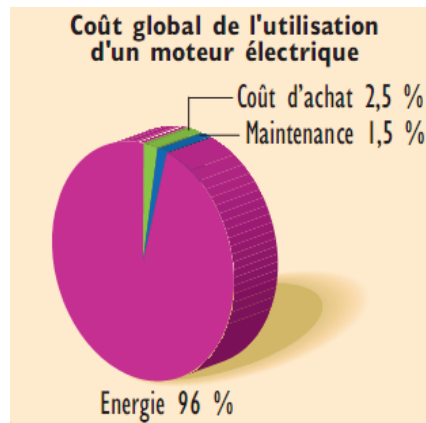
C'est un chantier très important, car comme le montre la Figure II-25, les moteurs représentent plus de 70% des usages de l'électricité dans l'industrie. Des gains très importants sont possibles, résultant de plusieurs actions :

- bon dimensionnement de la machine que l'on souhaite entraîner, les surdimensionnements entraînant généralement une surconsommation (fonctionnement du moteur en dehors de la zone optimale) ;
- 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 II-25) ;
- utilisation de variateurs de vitesse. L'usage des variateurs de fréquence dont le coût a largement diminué ces dernières années, permet d'adapter au mieux la vitesse du moteur au besoin. Sur une majorité d'usage les gains sont très importants ;

⁷ CEREN, *Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie* (Synthèse diffusable), 2010, 4p.

- bonne maintenance, du moteur en lui-même (graissage palier), et de la ligne de transmissions (alignement, tension courroie...).

Figure II-25 - Répartitions des coûts d'utilisation d'un moteur électrique



Source : Guide technique Motor Challenge

Fluide : 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 largement possibles. 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.

Production de froid

La production de froid se fait principalement par machine frigorifique avec compresseur. Les mesures permettant les gains regroupent celles des machines tournantes, et les usages thermiques :

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

Pertes transformateurs

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

Gisements retenus des opérations transverses – Chiffrage national

La méthodologie est calée au niveau national. Nous reviendrons ensuite sur les choix effectués au niveau régional, basés sur ces hypothèses nationales.

L'étude CEREN de 2010⁸ a estimé les potentiels de gisements « techniquement réalisables » dans l'industrie française (voir Tableau II-30). Le terme réalisable qualifie les actions qui ont déjà été mises en place industriellement.

⁸ CEREN, *Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie* (Synthèse diffusable), 2010, 4p.

Tableau II-30 – Estimation CEREN du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 – Industrie française

	Total industrie	Opérations transverses de l'industrie			
En 2007	Consommation	Consommation		Gisement	
	TWh	%	TWh	%	TWh
Combustibles	358,3	12%	43	53%	23
Electricité	134,6	78%	105	39%	41
Total	492,9	30%	148	43%	64,0

Source : « Synthèse du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie » - CEREN - 2010

Tableau II-31 – Détail du potentiel d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 – Industrie française

	Consommation actuelle		Potentiel d'économie			Potentiel d'économie		
			Total			Temps retour < 3 ans		
	TWh	Part	TWh	Part	% de réduction	TWh	Part	% de réduction
Chaufferies	10	7%	8	12%	77%	6,4	17%	64%
Réseaux	8	5%	5	8%	68%	3,8	10%	50%
Chauffage des locaux	25	17%	12	19%	50%	11,2	30%	46%
Moteurs	51	35%	19	29%	36%	5,6	15%	11%
Air comprimé	9	6%	3	5%	33%	1,7	5%	19%
Froid	9	6%	3	5%	36%	1,6	4%	18%
Ventilation	16	11%	6	9%	37%	2,9	8%	19%
Pompage	14	10%	4	6%	27%	1,8	5%	13%
Transformateur	2	1%	1	2%	71%	0,0	0%	0%
Eclairage	5	3%	3	5%	64%	1,8	5%	36%
Total	148	100%	64	100%	43%	36,8	100%	25%

Remarque : pour la catégorie "moteurs", qui correspond aux moteurs non comptabilisés dans les autres catégories, le CEREN n'a pas indiqué de potentiel avec temps de retour <3 ans. 36% du potentiel total est retenu.

Source : E&E, d'après CEREN 2010

Lecture Tableau II-31, exemple de la ligne « Ventilation » :

L'opération transverse « ventilation » consomme, en 2007, 16 TWh par an. Le gisement maximum d'économie d'énergie sur cette opération est de 6 TWh, et correspond donc à un gain de 37%. Le potentiel d'économie sur la « ventilation » représente 9% du potentiel d'économie d'énergie des opérations transverses. Parmi les 6TWh du potentiel d'économie d'énergie sur la ventilation, seuls 2,9 TWh ont un temps de retour sur investissement de moins de 3 ans.

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 compétence 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.

lpr (pour « procédés spécifiques ») : Efficacité énergétique dans les procédés spécifiques

Au-delà des opérations transverses, les procédés industriels énergivores peuvent aussi être modifiés pour améliorer leurs performances. Il s'agit en général de modifications plus lourdes, de changement de procédé, voire d'énergie. Les principaux procédés (en particulier, sidérurgie, production d'aluminium, cimenterie, papèterie, verre, ...) ont été passés en revue, les meilleures technologies actuellement disponibles, ainsi que les nouvelles technologies sur le point d'être industrialisées ont été prises en compte.

Pour éviter d'alourdir cette présentation des hypothèses, la seule industrie détaillée ici est l'industrie la plus importante pour la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur : la sidérurgie. Pour ce secteur, les données détaillées sont données en annexe 4.

Isu (pour « substitution ») : Hypothèses de substitution des combustibles par de l'électricité

Certains gains énergétiques nécessitent la substitution d'énergie. Certains usages de l'électricité peuvent ainsi permettre des économies d'énergie intéressantes en substitution à des usages de combustible. Par exemple en agroalimentaire ou chimie, le recours à la compression mécanique de vapeur (CMV) pour les opérations de concentration peut être qualifié d'électricité performante, de même que des fours à induction en remplacement de four au gaz dans certains secteurs. Les gains en énergie finale doivent cependant être très importants pour permettre un gain réel en énergie primaire (le ratio primaire/final réel actuel du système électrique européen se situe autour de 3).

Les hypothèses de substitution des combustibles par l'électricité sont présentées ci-dessous. Les tableaux suivants présentent les parts de combustibles substitués par de l'électricité dans les process. La substitution avec recours à la CMV ou PAC permet un gain de 80%, alors que pour le four à induction un gain de 50% est retenu en 2020 (60% en 2050).

Tableau II-32: Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour la Compression Mécanique de Vapeur (CMV) et les Pompes A Chaleur (PAC), pour les process de la catégorie (%)

CMV/PAC (%)		2010	2020	2030	2040	2050
E12-E14	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 II-33: Taux de substitution des combustibles par de l'électricité pour les fours par passage à l'induction, pour les process de la catégorie (%)

Passage aux fours à induction (%)		2010	2020	2030	2040	2050
E12-E14	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

Ico (pour « cogénération ») : Hypothèses de mise en place de la cogénération

Le potentiel identifié se base sur les besoins en chaleur basse et moyenne température de l'industrie. Ces potentiels ont été chiffrés par 2 études⁹, 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 sur Tableau II-34) :

- 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...). Pour des fonctions de séchage, l'utilisation des gaz d'échappement peut être faite directement.

Tableau II-34 – Performance des cogénérateurs

		2008	2020	long terme
TAV	Pertes	21%	18%	15%
	Electricité	35%	38%	40%
	Chaleur	44%	45%	45%
TAC/MAC	Pertes	18%	14%	10%
	Electricité	11%	15%	18%
	Chaleur	70%	71%	72%

Source : E&E, MEEDDM, CEREN

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. 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.

Tableau II-35 – Potentiel net de cogénération (net signifiant ici « en plus de la cogénération actuelle »)

		2008	2020	2050
Consommation combustible	TWh	101	75	47
Production électricité	TWh	24	20	10
Production chaleur	TWh	58	43	31
Rendement	%	81%	84%	87%

Source : E&E

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

⁹ CEREN, LE GISEMENT DE MAITRISE DE L'ENERGIE DANS L'INDUSTRIE EN 1999 - Opérations transversales, 2002.
MEEDDM, Analyse du potentiel national pour l'application de la cogénération à haut rendement, 2010.

fonctionnement, 6 en construction, 8 autorisés et 13 autres en projet soit un total de plus de 14,5 GW). 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.

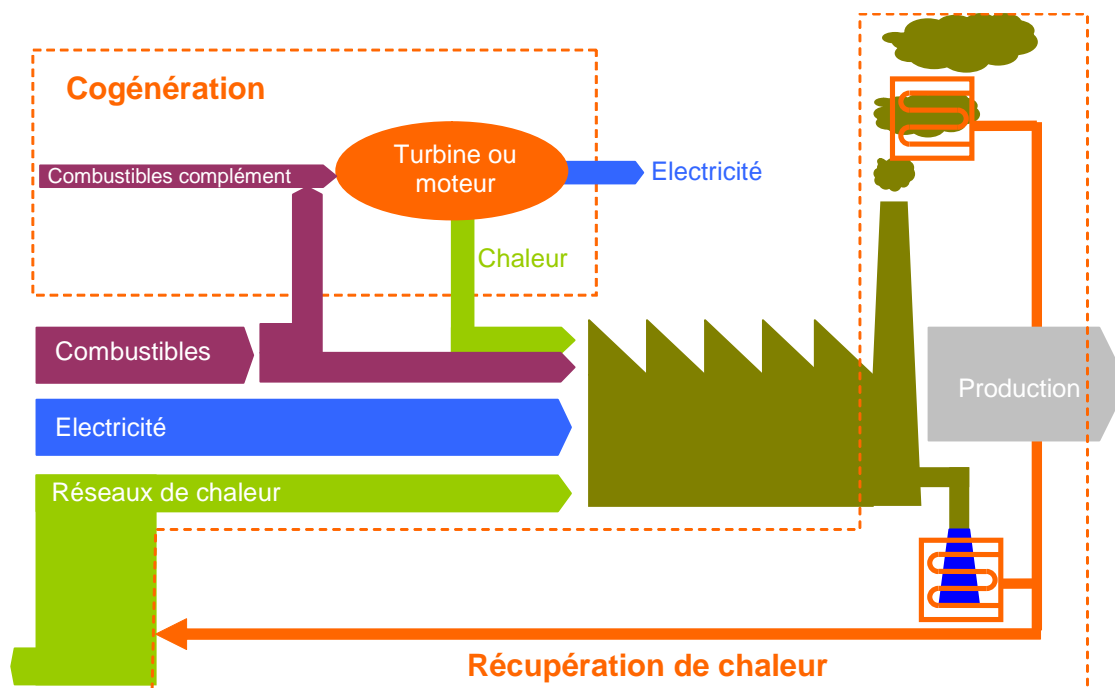


Figure II-26 – Récupération d'énergie et cogénération

Source : E&E

Isc (pour « substituabilité - cogénération ») : Hypothèses concernant la substituabilité liée à la cogénération

Pour la cogénération, le mix énergétique retenu est décrit dans le Tableau II-36 ci-dessous.

Tableau II-36 : Evolution 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	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

Isp (pour « substituabilité - process ») : Hypothèses concernant la substituabilité liée aux process

Pour les process, le mix énergétique évolue conformément au Tableau II-37 ci-dessous.

Tableau II-37 : Evolution du mix énergétique retenue 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	7	5	4	2	0
Biomasse	3	15	27	38	50
DIB (Déchets Industriels Banals)	2	1	1	0	0
Réseau de chaleur	0	3	5	8	10

lpl (pour « plastiques ») : Hypothèses concernant la combustion des plastiques

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 II-38 indique l'évolution de la part des combustibles fossiles substitués par de tels combustibles plastiques.

Tableau II-38 : Part des combustibles plastiques (déchets) venant en substitution des combustibles fossiles

	2010	2020	2030	2040	2050
Combustibles plastiques	0%	8%	15%	23%	30%

lhf (pour « hauts-fourneaux ») : Hypothèses concernant la substitution des combustibles par du bois dans les hauts fourneaux

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. La part de biomasse dans le combustible de ces hauts-fourneaux est indiquée dans le Tableau II-39.

Tableau II-39 : 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%

3-2 Les hypothèses de la régionalisation**3-2-1 – Le principe de la modélisation**

La modélisation sur la partie industrielle est résumée sur la Figure II-27. La première étape consiste à reconstituer, branche par branche, les consommations actuelles d'énergie par usage et par type d'énergie.

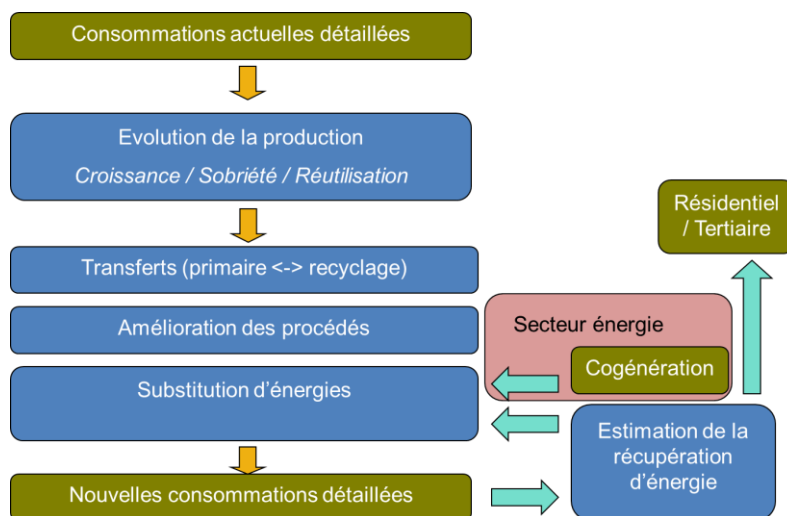
Les productions sont ensuite reconstituées, et leurs projections estimées en fonction de nos besoins futurs. La sobriété intervient particulièrement à ce niveau.

Une fois les besoins définis, les potentiels d'efficacité sont alors mis en œuvre. Ces gains proviennent tout d'abord d'un recours plus important au recyclage (métaux, papier...), nécessitant donc un transfert des filières de production de produit primaire, à des filières de production de produits recyclés moins énergivores. Parallèlement à ces transferts entre filières de production, les améliorations des procédés de chaque branche industrielle sont mises en œuvre.

On obtient ainsi les nouvelles consommations énergétiques des branches industrielles, sur lesquelles sont appliquées des substitutions d'énergie afin d'évoluer vers un mix énergétique basé principalement sur les énergies renouvelables.

Deux estimations sont également ajoutées. D'une part, les potentiels de récupération sur les énergies fatales¹⁰, ces énergies sont ensuite valorisées sur des réseaux de chaleur. D'autre part, les potentiels de cogénération, c'est-à-dire, l'estimation des consommations d'énergie sous forme de chaleur qui pourraient être produites par des cogénérateurs, et donc, moyennant une augmentation de consommation d'énergie, la production d'électricité à très haut rendement.

Figure II-27 – Méthodologie pour l'industrie



3-2-2 – Le « point zéro »

La description de l'industrie en vue d'une modélisation énergétique nécessite d'une part les consommations (par type et usage) d'énergie de chaque branche voire sous branche industrielle, mais aussi les quantités de productions (t_{acier} , t_{ciment} ...). **Sans les productions, il n'est pas possible de juger le niveau de performance énergétique** (consommations spécifiques, en $k\text{tep}/t_{\text{produit}}$) **des industries régionales par rapport aux meilleures technologies actuelles. Il n'a pas été possible de réunir les statistiques de productions (ces données pourraient être obtenues par enquêtes auprès des principaux industriels régionaux, par les administrations).**

Pour les consommations d'énergie, la reconstitution par branche, type d'énergie, usage est également problématique puisque que la principale source d'information (données de l'enquête EACEI) possède d'importantes valeurs sous secret statistique, et qu'aucun traitement régional de cette enquête n'a été établi. Les autres sources (ORE, Energ'Air ATMO) n'ont pas le détail complet par branche, et concernant l'électricité, ne donnent aucun découpage.

La reconstitution du point zéro de l'industrie se base donc sur les données de l'enquête EACEI, complétées d'une part par les données de ORE ou ATMO, et d'autre part des ratios nationaux.

Ce manque de précision ne permet donc pas une description suffisante pour présenter les divers secteurs industriels.

Les détails de la reconstitution des consommations actuelles sont en annexe 3.

Au final, la reconstitution selon les principaux secteurs industriels est présentée dans le Tableau II-40.

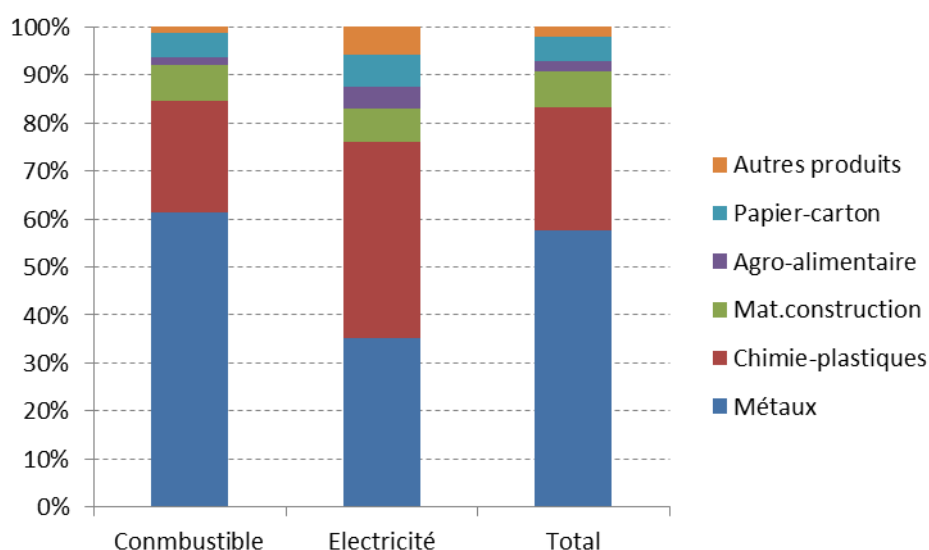
¹⁰ Energies contenues dans les effluents sortant des industries (chaleur contenue dans les fumées, les eaux de refroidissement...)

Tableau II-40 – Consommation d'énergie dans l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur

<i>TWh, énergie finale</i>	Combustible	Electricité	Total
Métaux	27,7	3,7	31,4
Chimie-plastiques	10,6	4,2	14,0
Mat.construction	3,4	0,7	4,1
Agro-alimentaire	0,7	0,5	1,1
Papier-carton	2,3	0,7	2,8
Autres produits	0,6	0,6	1,2
Total	45,3	10,4	54,6

Rq : Le total combustible + électricité (brute) est légèrement supérieur au total, la différence provient de l'autoconsommation d'électricité. L'électricité brute correspond à la consommation réelle du procédé, y compris autoconsommation.

Source : E&E d'après EACEI, ORE, Energ'Air



Rq : Le total combustible + électricité (brute) est légèrement supérieur au total, la différence provient de l'autoconsommation d'électricité. L'électricité brute correspond à la consommation réelle du procédé, y compris autoconsommation.

Figure II-28 - Consommation d'énergie dans l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur

Source : E&E d'après EACEI, ORE, Energ'Air

Pour l'industrie des métaux, le contributeur principal est le haut-fourneau de Fos-sur-Mer, qui représente près de 60% des consommations industrielles d'énergie finale, suivies par le secteur chimie-plastique (25%). La proportion est sensiblement identique sur la partie combustible seule, les hauts-fourneaux étant grands consommateurs de charbon et de coke. Pour l'électricité, le secteur chimie-plastique est prépondérant avec plus de 40% des consommations.

3-2-3 – Evolution des productions

Pour cette étude régionalisée, il n'a pas été décidé de projeter l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur dans une vision de satisfaire uniquement les besoins régionaux. En effet, d'un point de vue industriel, en particulier pour l'industrie lourde (prépondérante dans les consommations d'énergie), les productions sont à vocation nationale, voire plutôt européenne et mondiale. Il a donc été retenu que l'évolution de la production des branches industrielles régionales suivait celle au niveau national.

Ce choix est particulièrement pertinent pour les secteurs les plus consommateurs de la région (métaux dont sidérurgie et chimie) qui représentent à eux seuls 84% des consommations industrielles. Il est toutefois moins vrai pour les

matières et matériaux de construction qui ont une valorisation de leur production plus locale. Cette approximation reste cependant acceptable étant donné que ce secteur représente d'une part un poids faible dans les consommations énergétiques de l'industrie régionale, et d'autre part que son évolution régionale ne sera pas extrêmement différente du national.

Pour les filières de recyclage, on considère que les productions primaires présentes dans la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur diminuent, et que les filières de recyclage également présentes augmentent. Le cas de l'acier est majeur pour la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Au niveau national, l'évolution modélisée pour le scénario négaWatt est la suivante :

Tableau II-41 – Evolution de la sidérurgie nationale

rs		2010	2020	2030	2040	2050
Sidérurgie		1,00	0,92	0,87	0,87	0,90
% acier recyclé	%	49%	60%	70%	80%	90%
% recyclage dans HF	%	18%	18%	18%	18%	18%
acier primaire		1	0,72	0,51	0,34	0,18
acier recyclé		1	1,12	1,25	1,43	1,66
acier HF		1,00	0,72	0,51	0,34	0,18
acier électrique		1,00	1,24	1,47	1,75	2,10
Production acier	Mt	19,5	17,90	17,03	17,03	17,61
acier primaire	Mt	9,945	7,16	5,11	3,41	1,76
acier recyclé	Mt	9,555	10,74	11,92	13,63	15,85
acier HF	Mt	12,13	8,734	6,232	4,155	2,148
acier électrique	Mt	7,372	9,17	10,8	12,88	15,47

Source : E&E, négaWatt

Remarque : les hauts-fourneaux utilisent une partie de ferraille comme matière première (18% en moyenne nationale), ils participent donc en partie au recyclage.

En conséquence, la filière haut-fourneau (HF) passe de l'indice 1 à 0,18 (division par 5), et la filière aciérie électrique (AE) passe d'un indice 1 à 2,1 (soit un doublement). L'application régionale de ces indices projette donc la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur d'une production de HF 4,6 Mt + AE 0,4Mt = 5Mt en 2007 à HF 0,8 Mt + AE 0,8 Mt = 1,6 Mt/an en 2050. Il y a donc un recul de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur dans la part de production nationale d'acier de 25%, à environ 10% en 2050. Ce résultat est cohérent avec le développement des aciéries électriques (recyclage), de plus petites tailles, qui devraient se développer de façon plus répartie sur le territoire français de manière à être proches des gisements de récupération de ferraille.

Résumé des indices de productions retenus

Intégrant l'augmentation de population française, la relocalisation de l'économie, mais aussi les éléments de sobriété, les évolutions de production des secteurs industriels retenues dans l'étude sont résumées dans le Tableau II-42.

Tableau II-42 – Indice de production des secteurs industriels

	2010	2020	2030	2040	2050
Sidérurgie	1,00	0,92	0,87	0,87	0,90
Métallurgie non ferreux	1,00	1,14	1,29	1,59	1,91
Ciment et autres	1,00	0,82	0,71	0,70	0,74
Mat. Construction	1,00	0,78	0,67	0,64	0,68
Verre	1,00	0,96	0,77	0,64	0,32
Engrais	1,00	1,13	1,21	1,31	1,33
Chimie minérale	1,00	1,08	1,12	1,18	1,21
Plastiques	1,00	0,91	0,79	0,69	0,60
Autre chimie organique	1,00	0,92	0,83	0,77	0,72
Parachimie	1,00	1,03	1,06	1,07	1,07
Travail des métaux	1,00	1,14	1,27	1,46	1,64
Construction mécanique	1,00	1,04	1,06	1,09	1,11
Construction électrique/électronique	1,00	1,11	1,20	1,34	1,46
Construction de véhicules	1,00	0,96	0,90	0,83	0,75
Construction navale et aéronautique, armement	1,00	0,96	0,90	0,78	0,65
Textile	1,00	1,23	1,47	1,80	2,13
Papier	1,00	0,98	1,00	1,04	1,07
Caoutchouc	1,00	1,00	0,98	0,96	0,92
Transformation plastique	1,00	0,85	0,81	0,80	0,79
Divers	1,00	0,95	0,99	1,07	1,17
Agroalimentaire	1,00	1,02	1,03	1,05	1,05

Source : E&E

3-2-4 – Efficacité sur les productions

Pour les opérations transverses, les gains estimés sont appliqués régionalement aux filières présentes. Le manque de données régionales ne permet cependant pas un traitement spécifique à l'état de l'industrie régionale.

Tableau II-43 – Estimation du potentiel d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007 – Industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur

	Consommation actuelle		Potentiel d'économie			Potentiel d'économie		
	TWh	Part	Total			Temps de retour < 3 ans		
			TWh	Part	% de réduction	TWh	Part	% de réduction
Chaufferies	0,7	7%	0,5	1%	77%	0,4	1%	64%
Réseaux	0,7	7%	0,5	1%	68%	0,4	1%	50%
Chauffage des locaux	1,4	14%	0,7	1%	50%	0,6	2%	46%
Moteurs	4,1	40%	1,6	2%	38%	0,5	1%	11%
Air comprimé	0,5	5%	0,2	0%	35%	0,1	0%	21%
Froid	0,3	3%	0,1	0%	38%	0,1	0%	19%
Ventilation	0,9	9%	0,3	1%	39%	0,2	0%	20%
Pompage	1,2	11%	0,3	1%	29%	0,2	0%	14%
Transformateur	0,1	1%	0,1	0%	71%	0,0	0%	0%
Eclairage	0,3	3%	0,2	0%	64%	0,1	0%	36%
Total	10,2	7%	4,5	7%	45%	2,5	7%	25%

Remarque : pour la catégorie "moteurs", qui correspond aux moteurs non comptabilisés dans les autres catégories, le CEREN n'a pas indiqué de potentiel avec temps de retour <3 ans. 38% du potentiel total est retenu.

Source : E&E, d'après CEREN 2010

Au total, les opérations transverses couvrent 20% des consommations énergétiques du secteur industriel de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (mais près de 75% des consommations d'électricité). Sur ces opérations, le gisement d'économie techniquement réalisable est estimé à 45%, soit un gain net sur l'ensemble des consommations

industrielles de 9% (30% sur l'électricité), dont plus de la moitié ayant un temps de retour sur investissement inférieur à 3 ans.

4- Agriculture

L'agriculture est un poste de consommation d'énergie sous forme de transport, de chaleur et d'électricité spécifique.

Ce poste a fait l'objet d'une analyse poussée au niveau national, l'évolution des consommations étant liée aux évolutions énergétiques analysées dans le scénario négaWatt national, mais également reliée aux analyses d'Afterres2050. La baisse des consommations d'énergie est donc liée à de multiples paramètres, agricoles (simplification des pratiques culturales, ...) et énergétiques (améliorations des moteurs des tracteurs, ...).

L'hypothèse pour la régionalisation est que la consommation du secteur évolue de la même façon que la consommation du secteur agricole du scénario négaWatt national. Compte tenu de la très faible part de consommation d'énergie du secteur agricole en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (moins de 1% de la consommation d'énergie régionale avec environ 1 TWh), ce secteur n'a pas fait l'objet d'une analyse plus détaillée.

III- Les secteurs de production d'énergie

Pour les secteurs de production d'énergie, la démarche est globalement différente des secteurs de consommation : la scénarisation de la production d'énergie renouvelable à l'échelle régionale est basée sur les nombreuses études de potentiel réalisées dans le cadre de l'Observatoire Régional de l'Energie.

Sont ainsi détaillées dans la suite :

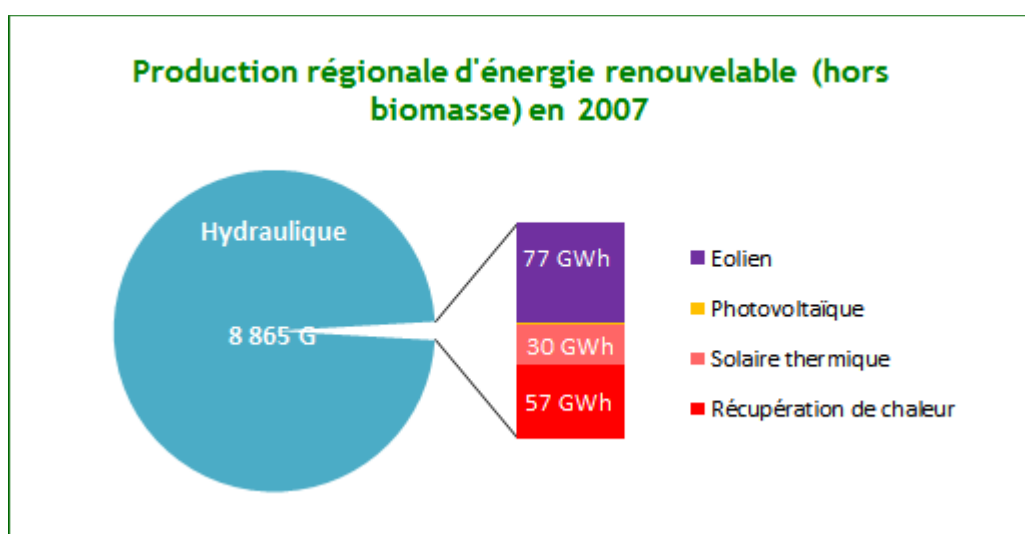
- Les énergies renouvelables hors biomasse
- La biomasse-énergie

1- Energies renouvelables hors biomasse

Le périmètre d'étude est le territoire régional ainsi que la zone maritime côtière attenante (limitée à 23 km pour l'éolien en mer). Les ressources traitées dans ce chapitre sont les énergies éolienne, solaire et hydraulique ainsi que la récupération de chaleur en géothermie de surface et sur eaux usées.

En 2007, la production régionale de ces énergies renouvelables est estimée à 9 TWh, dont la quasi-totalité est d'origine hydraulique.

Figure III-1: Production régionale d'énergie renouvelable (hors biomasse) en 2007



La Région Provence-Alpes-Côte d'Azur est pourtant riche en de nombreuses autres sources d'énergies renouvelables :

- Eolien : il s'agit d'une Région ventée pour laquelle le relief est un frein à l'utilisation de ce potentiel. On peut s'affranchir de ces contraintes avec l'éolien en mer.
- Solaire photovoltaïque et thermique : la Région dispose d'un des meilleurs gisements solaires de France métropolitaine, et une densité de population offrant de grandes surfaces de toitures exposées.
- Récupération de chaleur : les fortes densités littorales se prêtent bien à la récupération de chaleur pour de grosses installations collectives.

L'évolution de ces différents moyens de production d'énergie sur le territoire régional a été analysée au moyen des études de ces gisements et des potentiels mobilisables à l'échelle de la Région, et du scénario national négaWatt dans lequel notre scénarisation s'inscrit.

Les analyses détaillées par filière sont présentées ci-après. La synthèse des scénarios de production d'énergie renouvelable est présentée au final.

1-1 Hydroélectricité

En 2007, avec une puissance installée de 3 423 MW dont 3 223 en grande hydraulique, la production annuelle s'élève à 8 865 GWh. L'optimisation des installations existantes et l'exploitation d'un léger potentiel supplémentaire en petite hydraulique permettra d'accroître légèrement cette production annuelle.

L'ensemble des éléments de scénarisation de cette filière est basé sur deux études régionales. La première concerne la petite hydraulique uniquement. Réalisée par le GERES en 2005¹¹, elle détermine le potentiel de production supplémentaire mobilisable pour les petites installations hydrauliques, par un travail au cas par cas pour chacun des sites potentiels identifiés. La seconde, réalisée par le CETE en 2010¹², concerne les grandes installations, essentiellement en optimisation de l'exploitation du potentiel des masses d'eau. Ces deux études prennent en compte les différentes contraintes réglementaires, écologiques, patrimoniales, etc. pour déterminer au final un potentiel mobilisable.

Ces éléments précis prennent donc en compte les potentiels et les contraintes régionales, il ne semble pas pertinent de les modifier par rapport au scénario national. Les résultats présentés représentent donc la contribution possible de la Région à l'évolution de la production hydroélectrique dans le scénario négaWatt national.

1-2 Eolien

En 2007, le parc régional installé est d'un peu plus de 31 MW pour une production annuelle de 77 GWh. Par ailleurs, la puissance raccordée en 2010 s'élève à 45 MW, et 85 MW de permis ont été accordés fin 2010.

Notre scénarisation est basée sur l'étude régionale réalisée par VALOREM en 2010¹³, qui détermine le potentiel éolien terrestre mobilisable, et sur le scénario national négaWatt pour le développement de l'éolien off-shore ancré.

Ces deux sources prennent en compte les enjeux patrimoniaux, environnementaux, techniques et économiques à l'échelle de la Région ou de la Méditerranée. Pour l'éolien terrestre, les chiffres de l'étude ont été légèrement adaptés pour prendre en compte le « repowering » sur le long terme (après 2030), c'est-à-dire le remplacement des éoliennes en fin de vie par des éoliennes plus productives, de dernière génération.

Pour l'éolien en mer, la bathymétrie ne permet pas d'implanter d'éoliennes « plantées » en Méditerranée : la profondeur des fonds marins « plonge » très vite pour arriver à des fonds supérieurs à 50 mètres, où l'implantation d'éoliennes « plantées » classiques ne se justifie pas en termes de coûts et de techniques de mise en œuvre.

Le gisement éolien est toutefois favorable au développement d'un autre type d'éolien, dit éolien « ancré », ou un peu abusivement éolien « flottant ». Cette technique, peu présente en France, a cependant été retenue dans des proportions importantes au niveau du scénario national comme régional car des prototypes industriels d'éoliennes ancrées existent et fonctionnent (notamment au Danemark), et qu'il n'y a pas de rupture technologique pour leur mise en œuvre : ces éoliennes sont de même nature que les éoliennes terrestres, mais plus puissantes et installées sur des structures similaires à des plateformes pétrolières qui peuvent être ancrées à des profondeurs plus importantes.

Les hypothèses retenues pour le développement du potentiel d'éolien ancré correspondent à 2/3 des évaluations des industriels du secteur (20,8 GW en 2050 au niveau national). La zone de développement retenue se situe entre 10 km (pour limiter la visibilité) et 23 km des côtes (pour limiter les coûts de raccordement électrique). Les profondeurs prises en compte vont de 50 à 100 mètres. Les vents recherchés ont été ceux de plus de 8,5 m/s à 100 m d'altitude, et le nombre d'heures estimées entre 3400 et 3500 heures de fonctionnement pleine puissance par an (contre 3700 généralement retenues par les industriels). Les premières éoliennes sont ancrées à partir de 2025, pour laisser le temps à la filière de se développer, avec une puissance initiale de 5 MW, puis 8 MW une fois la filière mature (les industriels tablent sur 10 MW). La « parité réseau » (croisement du coût de production du kWh et du prix de vente de l'électricité sur le réseau) est prévue entre 2020 et 2025 pour 25 GW de puissance.



Photo : Principle Inc.

La puissance prévue en Méditerranée française représente près de 45% de la puissance prévue dans le scénario négaWatt national (9,2 GW sur 20,8 GW au total). Près de la moitié de cette puissance, soit 4,5 GW, est installée face à la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, principalement en face des Bouches-du-Rhône et en limite du Var.

¹¹ *Etude du potentiel régional pour le développement de la petite hydroélectricité*, GERES pour ADEME Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2005.

¹² *Identification du potentiel hydroélectrique mobilisable sur les cours d'eau de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, CETE pour DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2010.

¹³ *Etude du potentiel de production d'électricité d'origine éolienne terrestre en Provence-Alpes-Côte d'Azur*, VALOREM et Conexia pour l'ADEME Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Ces hypothèses conduisent à la mise en place d'une capacité de production éolienne sur un des ports de la façade méditerranéenne (par exemple Fos-sur-Mer) d'au moins 400 MW/an. Le raccordement électrique d'une telle puissance requiert une analyse spécifique pour voir où il est le plus pertinent d'effectuer la connexion.

Ces différentes hypothèses conduisent donc à l'installation de 1 300 MW éoliens terrestres d'ici 2030, et 1 500 MW terrestres et 4 500 MW flottants d'ici 2050, pour atteindre une production électrique totale de 19 000 GWh (contre 77 en 2007).

1-3 Photovoltaïque

En 2007, le parc installé en Provence-Alpes-Côte d'Azur est seulement d'environ 1,5 MW pour une production annuelle aux alentours de 1,7 GWh. La croissance de cette filière est toutefois très forte, puisqu'en 2011 on compte 249 MW installés en toiture et 57 MW au sol¹⁴.

La scénarisation est basée sur une étude de 2009¹⁵ qui détermine les potentiels réalisables sur la région de manière assez précise. Elle détermine les surfaces de toitures et surfaces au sol pour toute la région et analyse les contraintes techniques, patrimoniales et environnementales pour estimer le potentiel mobilisable. Quelques adaptations ont été réalisées pour notre scénarisation pour corriger les variations trop fortes dans l'évolution des installations, et pour prendre en compte à long terme notamment la diminution des contraintes économiques (hausse du prix des autres énergies).

Cette scénarisation conduit à une installation de 1 200 MW en toiture et 1 600 MW au sol d'ici 2020, pour une production annuelle de 3 883 GWh. D'ici 2050, les presque 9 000 MW installés au total assureront une production de plus de 11 TWh chaque année.

1-4 Solaire thermique

Pour estimer la contribution potentielle du solaire thermique, les quatre types de production suivants sont pris en compte :

- CESI : **Chauffe-Eau Solaire Individuel** dans l'habitat
- SSC : **Système Solaire Combiné** (en maison individuelle) dans l'habitat
- CESC : **Chauffe-Eau Solaire Collectif** dans l'habitat et dans le tertiaire
- CIND : production de **Chaleur** basse ou moyenne température pour l'**IND**ustrie

Les systèmes solaires combinés en logement collectif ne sont pas pris en compte, 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 se diffusent, les économies engendrées par ce développement se rajouteront au potentiel estimé ci-dessous.

Le potentiel est estimé de la manière suivante :

- Calcul des surfaces de toitures disponibles pour les logements individuels et les logements collectifs : on part des surfaces habitables des maisons individuelles et des logements (projection 2050, compte tenu des hypothèses décrites dans la partie Bâtiments), 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, 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%

¹⁴ D'après croisement de plusieurs sources, telles que SOeS, Energ'Air, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, et l'étude précisée ci-dessous.

¹⁵ *Etude du potentiel de production d'électricité d'origine solaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 2009, Axenne pour l'ADEME Provence-Alpes-Côte d'Azur.

(respectivement 7% et 6%) des surfaces disponibles utilisées en maison individuelle (respectivement logement collectif et tertiaire).

- Estimation des surfaces unitaires par équipement :
 - Pour les CESI : baisse progressive de **4,5 m²** (2010) à **2 m²** (2050) par maison équipée
 - Pour les SSC : **10 m²** par maison équipée
 - Pour les CESC en collectif : baisse progressive de **1,5 m²** (2010) à **1,2 m²** (2050) par logement
- Estimation d'un taux d'équipement par cible en 2050 :
 - Pour les CESI : **55%** des maisons équipées
 - Pour les SSC : **24%** des maisons équipées
 - Pour les CESC en collectif : **60%** des logements équipés
- Pour les CESC en tertiaire, on considère que **9%** 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'ECS en 2050 conformes aux objectifs de sobriété explicités dans les paragraphes précédents, estimation des productivités en kWh utiles par cible (correspondant à une réduction des besoins). Pour calculer les économies correspondantes en énergie finale, les rendements des systèmes d'appoint sont appliqués :
 - Pour les CESI : **250 kWh/m²** de capteur solaire
 - Pour les SSC : **275 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
- Pour l'industrie, les apports solaires sont calculés directement à partir des productivités en énergie finale. Les estimations sont obtenues par extrapolation d'une étude réalisée en Autriche¹⁶, en faisant l'hypothèse que la structure du tissu industriel est analogue en France et en Autriche. L'extrapolation est faite au prorata des populations, en gardant les productivités issues de l'étude autrichienne, ce qui constitue certainement une hypothèse conservatrice, compte tenu de la différence de climat entre les deux pays. 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

Finalement en 2050 et pour la France, on obtient les résultats suivants :

- Surface de capteurs solaires thermiques installés : 102 millions de m², soit environ 1,42 m²/habitant
- Contribution en énergie finale : 38 TWh (soit presque 5% de l'énergie finale totale) :
 - Environ 40% de l'ECS pour les maisons individuelles et 30% pour les logements collectifs
 - 8% du chauffage des maisons individuelles
 - 30% de l'ECS du tertiaire
 - 15% des besoins thermiques de l'industrie

La méthodologie de régionalisation suivie est en tout point identique à celle développée pour le scénario négaWatt national, explicitée ci-dessus, avec prise en compte des besoins régionaux en chauffage pour les maisons individuelles, en eau chaude sanitaire pour les maisons individuelles, les logements collectifs, le tertiaire et les besoins de chaleur basse et moyenne températures de l'industrie.

Par contre, un certain nombre de paramètres ont été adaptées au contexte local :

- La productivité en énergie utile des capteurs solaires a été augmentée pour tenir compte de l'irradiation plus importante en PACA qu'en moyenne nationale. (Les productivités ramenées en énergie finale sont plus élevées, du fait des rendements des générateurs d'appoint utilisés)

Tableau III-1 : Différences entre valeurs régionales et valeurs moyennes pour la France en termes de productivité

¹⁶ AEE Intec : PROMISE : Produzieren mit Sonnenenergie, Endbericht, 2003, 185 p.

Productivité utile (kWh/m ² .an)		Moyenne nationale	Valeur en PACA
Chauffe-eau solaires individuels	En énergie utile	250	284
Systèmes Solaires Combinés en individuel		275	294
Chauffe-eau solaires collectifs		300	360
Chauffe-eau solaires en tertiaire		300	360
Chaleur basse température pour l'industrie	En énergie finale	600	750
Chaleur moyenne température pour l'industrie		500	625

- Les surfaces unitaires installées ont été réduites en conséquence, de manière à éviter les surdimensionnement.

Tableau III-2: Différences entre valeurs régionales et valeurs moyennes pour la France en surfaces unitaires

Surfaces unitaires (m ²)	Moyenne nationale	Valeur en PACA
Chauffe-eau solaires individuels	2	1,6
Systèmes Solaires Combinés en individuel	10	8
Chauffe-eau solaires collectifs (m ² /logement)	1,5	1,2

1-5 Récupération de chaleur en géothermie de surface ou sur eaux usées

Cette rubrique concerne la géothermie sur sol, la géothermie sur nappe, la thalassothermie et la récupération de chaleur en station d'épuration, sur collecteur d'assainissement et en sortie d'immeuble. Dans tous les cas, le système fonctionne sur le même principe, avec une pompe à chaleur (« PAC ») qui puise les calories dans les différentes sources de chaleur que sont le sol, les nappes phréatiques, la mer et les eaux usées.

Plus propres que les énergies fossiles si elles sont alimentées en électricité d'origine renouvelable et plus performantes que le chauffage électrique classique, l'impact des pompes à chaleur sur le réseau électrique (fort appel de puissance au démarrage du compresseur) n'en reste pas moins problématique ; ces énergies sont donc à utiliser en dernier recours, et uniquement dans les cas où le COP (coefficient de performance, qui quantifie l'efficacité de l'appareil) est élevé. (COP de 3 pour les PAC sur nappe, 3,5 sur sol, 5 pour la thalassothermie, avec une légère hausse entre 2020 et 2050).

La scénarisation est basée sur des études régionales récentes (2011) pour chaque source d'énergie : l'étude du BRGM¹⁷ pour la géothermie de surface, l'étude de BG Consult¹⁸ pour la thalassothermie et l'étude d'AnteaGroup¹⁹ pour la récupération de chaleur sur eaux usées. Notre scénarisation prend également en compte les besoins de chaleur, qui ne doivent en aucun cas être dépassés par les sources de production de chaleur renouvelable.

Le potentiel géothermique, non défini précisément dans l'étude, a été estimé en croisant les besoins de chaleur année par année à l'échelle de la commune, et les différentes notes (pondérées) déterminées dans l'étude de BG Consult. Pour les causes évoquées précédemment, seul 30% du potentiel estimé est réalisé dans nos scénarios (uniquement collectif optimisé avec un COP élevé et utilisation de la climatisation par échangeur hors PAC).

Pour la géothermie de surface, des réserves supplémentaires ont été appliquées pour la préservation des ressources (surexploitation de nappe ou pollution des sols) et la faisabilité technique et économique (non évaluée dans l'étude), nous ne réalisons ainsi qu'une petite partie du potentiel (4% environ pour 2050).

La récupération sur eaux usées, chaleur produite dans les bâtiments mais perdues par les réseaux d'eaux usées, est, elle, exploitée en plus grande proportion. Le potentiel total n'est toutefois exploité qu'à 80% d'ici 2050, en raison des difficultés économiques et techniques en sortie d'immeuble, ainsi que de la probable diminution du gisement (sobriété et efficacité dans les bâtiments).

¹⁷ *Evaluation du potentiel géothermique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 2011, par le BRGM.

¹⁸ *Etude du potentiel thalassothermique de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 2011, BG Consult pour la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

¹⁹ *Evaluation du potentiel de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissement de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 2011, AnteaGroup pour la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Remarque générale - hypothèses d'évolution de la population et production d'énergie renouvelable

Les hypothèses d'évolution de la population retenues pour la Région peuvent influencer sur la production d'énergie renouvelable. Cette variation reste toutefois limitée en comparaison des différentes incertitudes sur la réalisation des potentiels renouvelables existants.

Les impacts de la hausse de population peuvent être, sans prétendre être exhaustif :

- Une baisse de la disponibilité en eau (hausse de la consommation), mais avec un impact faible
- Une diminution de l'espace disponible pour l'éolien terrestre et le photovoltaïque au sol, mais avec un impact faible également
- Une hausse du potentiel photovoltaïque et solaire thermique (plus de toitures et hausse des besoins), mais avec un impact assez faible
- Une hausse de la récupération de chaleur, très faible également.

Le potentiel chaleur augmente donc très légèrement, et la production électrique diminue très légèrement sur l'hydraulique et l'éolien. Ces effets ont donc été négligés, et dans cette étude la production d'énergie renouvelable est réputée indépendante de l'hypothèse de croissance démographique retenue.

2- Production issue de la biomasse-énergie

2-1 Le bois

Le bois énergie issu de la forêt

La consommation actuelle de bioénergies en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur est estimée à 5 TWh de bois (en énergie primaire), et à 0,5 TWh de déchets (dont par convention la moitié est considérée comme d'origine renouvelable). Les déchets représentent par ailleurs 0,8% de la consommation totale brute qui s'élève à 41,9 TWh. Les déchets produiraient donc 0,34 TWh d'électricité, chiffre non compatible avec la valeur en énergie primaire.

Le bois énergie est utilisé à 72% par les ménages, 1% en collectif et tertiaire et 27% en industrie. La puissance installée totale est estimée à 1,8 GW.

La consommation de bois dans le secteur résidentiel est apparemment stable. Les installations collectives et tertiaires se développent de manière significative depuis 2004.

La Mission Régionale Bois-Energie a estimé le potentiel mobilisable à 1,8 TWh²⁰.

L'étude réalisée par l'Institut Forestier National (IFN), le FCBA (Forêt Construction-Bois Ameublement) et Solagro pour le compte de l'ADEME, montre que le potentiel physique mobilisable en bois industrie / bois énergie s'élève à 58 TWh hors contraintes économiques. Il s'agit d'un potentiel estimé à 2020.

L'essentiel de la ressource est disponible pour un prix du bois inférieur à 28 €/MWh PCI.

Dans la version publiée et disponible sur le site Internet, la disponibilité dans les conditions actuelles est négative.

Cette étude a fait l'objet d'une présentation auprès des acteurs de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Il est apparu que pour la Région, la méthodologie adoptée par l'IFN a tendance à sous-estimer la disponibilité :

- Du fait de l'utilisation en BIBE (bois d'industrie / bois d'œuvre) de bois classés dans la catégorie BO (Bois d'œuvre) dans l'étude, en raison d'une qualité souvent moindre des bois et peut-être plus encore de la rareté des industries du BO dans ces régions ;
- Via le paramétrage du modèle économique (réfaction de la disponibilité brute à la disponibilité technico-économique) dans les régions méditerranéennes (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse) : les systèmes d'exploitation y sont spécifiques et il est probable que ces caractéristiques soient mal représentées dans notre modèle. Cette explication semble confirmée par l'analyse de la disponibilité supplémentaire dans le cas d'une hausse du prix du BIBE. Des hausses respectivement de 50 et 70% permettent de retrouver des niveaux positifs.

Le site www.dispo-boisenergie.fr qui présente cette étude n'a toutefois pas encore été remis à jour.

Par ailleurs, l'IFN ayant profondément révisé ses méthodes en 2011, de très nombreuses données sont progressivement remises à jour et aucun résultat actualisé n'est encore disponible. Toutefois la révision porte principalement sur le compartiment « bois d'œuvre des essences résineuses », et la forêt méditerranéenne devrait être moins affectée par ces révisions.

L'étude de synthèse de la Mission Bois-Energie et l'étude IFN / FCBA / SOLAGRO ne sont donc pas incohérentes : l'étude de la mission bois porte sur la ressource accessible dans les conditions actuelles, jugée initialement nulle dans l'étude IFN et révisée à la hausse.

Parmi les facteurs d'évolution à long terme, il est attendu que les phénomènes de stress hydrique réduiront à terme la productivité biologique et contrebalanceront les effets positifs de l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Les pratiques sylvicoles sont également amenées à évoluer : une meilleure prise en compte de la biodiversité et des enjeux environnementaux et sociaux de la forêt constitue des facteurs de diminution des taux de prélèvement, mais l'amélioration des pratiques sylvicoles constitue au contraire un facteur d'augmentation. La forêt française d'une façon générale voit sa surface augmenter légèrement, mais surtout sa production globale poursuit sa tendance à la hausse de manière régulière : le stock de bois sur pied augmente et la production biologique à l'hectare également.

Compte tenu de ces évolutions contraires, le potentiel forestier adopté dans le scénario négaWatt Provence-Alpes-Côte d'Azur pour l'horizon 2050 correspond au potentiel calculé par l'IFN à l'horizon 2020, accessible à moins de

²⁰ Mission Régionale Bois-Energie, étude Synthèse des gisements de bois disponibles pour une valorisation énergétique en PACA, 2009.

26 €/MWh, soit 5 TWh de disponibilité supplémentaire pour la catégorie « BIBE » de l'IFN et la catégorie « MB » (Menu Bois), à répartir entre bois énergie et bois industrie.

L'hypothèse principale est que les contraintes non strictement technico-économiques seront levées à cet horizon : organisation de la filière, desserte des massifs forestiers, regroupement de la propriété forestière.

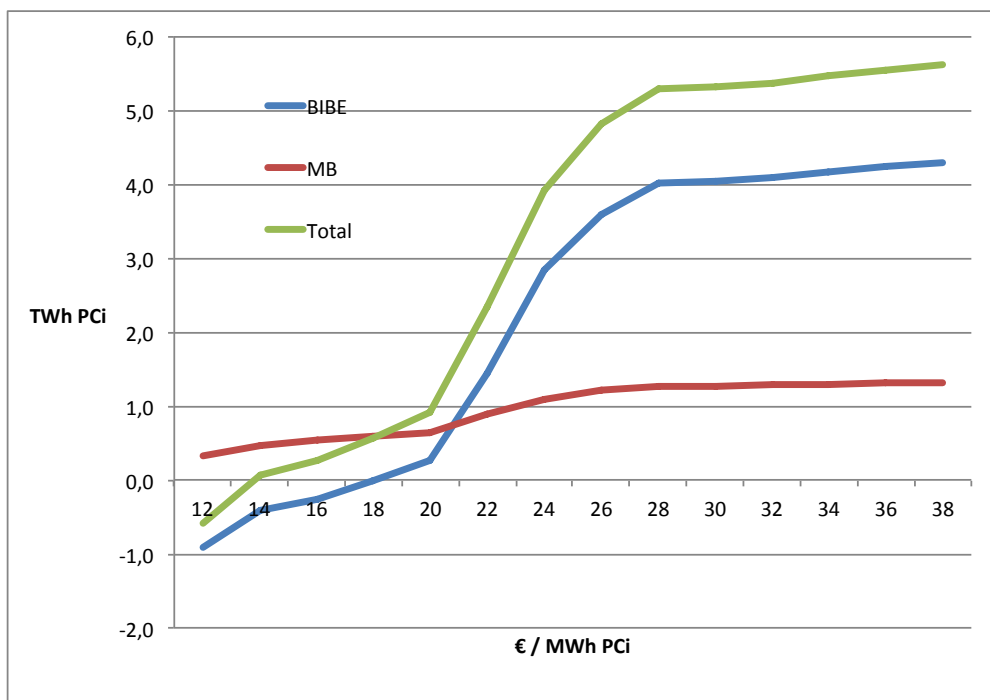


Figure III-2: Evolution de la disponibilité de la ressource en bois pour le Bois d'industrie / Bois d'œuvre (BIBE) et le Menu bois (MB)

Les produits connexes de scierie

La production de bois d'œuvre génère des produits connexes de scierie (PCS), utilisables comme bois d'industrie ou en énergie. Dans le scénario négaWatt, la production de bois d'œuvre augmente d'environ 50%. Les 2/3 des PCS sont affectés à la production d'énergie, et 1/3 à la production de pâte et de panneaux de particules, soit un potentiel estimé à 2,2 TWh.

Les espaces arborés non forestiers

Le bois énergie issu des espaces non forestiers est estimé à 0,4 TWh. Il provient des arbres urbains, des alignements, parcs, jardins et espaces verts, des vignes et vergers, ainsi que des haies et de l'agroforesterie.

Les déchets de bois

Hors PCS, les déchets dérivés du bois englobent toutes les matières issues de la transformation (liqueur noire et boues de papeteries, sciures et chutes des industries de seconde transformation, emballages, bois de rebut, BTP...), déchets de papiers cartons non recyclables... On prend comme hypothèse que les quantités mobilisables sont proportionnelles à la production de bois d'industrie et de bois d'œuvre : 70% du bois d'industrie est considéré comme récupérable pour la production d'énergie (il s'agit principalement des déchets de papiers cartons), de même que 30% du bois d'œuvre. Il s'agit ici d'ordres de grandeur indicatifs. La ressource globale en déchets de bois (hors PCS) est estimée à 5 TWh.

2-2 Le biogaz

Les ressources en biogaz sont des ressources annuelles générées essentiellement par le secteur agricole ainsi que par les déchets urbains et agro-alimentaires.

Actuellement il existe une production non négligeable de biogaz en Provence-Alpes-Côte d'Azur (station d'épuration de Marseille, usine de méthanisation de Fos-sur-Mer, centres d'enfouissement techniques).

Les déjections d'élevage

Le potentiel biogaz des lisiers et fumiers tient compte de l'évolution des effectifs d'animaux par catégorie ainsi que de l'évolution des pratiques d'élevage.

Le potentiel mobilisable est estimé à 0,2 TWh, pour environ 200 000 tonnes de matières sèches (MS) de lisiers et fumiers mobilisables.

Les résidus de culture

La production globale de résidus de culture est estimée à 450.000 tonnes (MS), principalement en pailles de céréales. 36% sont utilisées en méthanisation, en plus des 12% utilisées en litière animale. Le potentiel énergétique est estimé à 0,2 TWh.

Les cultures intermédiaires

Les cultures intermédiaires représentent un potentiel de 100 000 tonnes (MS) pour 180 000 ha de terres arables. Elles sont intégralement récoltées et méthanisées, et génèrent 0,3 TWh.

Le biogaz ex-prairie

55 000 ha de prairies naturelles productives sont affectés à la production de biogaz et produisent 0,8 TWh.

Les déchets alimentaires et agro-alimentaires

La production de déchets alimentaires et agro-alimentaires est estimée en ordre de grandeur à 0,7 TWh. Ce chiffre inclus le biogaz de décharge, le traitement des déchets ménagers et assimilés par méthanisation (biodéchets ou ordures ménagères résiduelles), la méthanisation des boues de stations d'épuration urbaines, des effluents agro-alimentaires et industriels.

2-3 Autres ressources biomasse

On considère que les autres ressources potentielles en biomasse sont marginales en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Compte tenu du contexte pédoclimatique, les résidus de culture ne sont pas envoyés en combustion.

Les surfaces en terres arables disponibles pour des utilisations non alimentaires en 2050 sont estimées à 12 000 ha. Il s'agit donc de faibles surfaces, qui pourraient être employées à des productions d'oléagineux ou d'autres productions de matériaux biosourcés. Ce potentiel n'a pas été pris en compte dans l'étude mais pourrait compter pour 0,3 TWh.

3- Production d'énergie d'origine fossile et fissile

3-1 La production d'électricité d'origine nucléaire

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur ne dispose pas de centrale nucléaire de production d'électricité. Pour autant, sa consommation d'électricité s'appuie fortement sur la production nucléaire d'autres régions. Or dans le scénario négaWatt national, 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 de la dernière unité 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, ...), mais aussi de structures d'évaluation et de contrôle. Cela n'a pas de sens, du point de vue industriel et économique comme du point de vue 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-contrainte montre surtout que la fenêtre est étroite : elle se situe entre 2030 et 2035, et elle se joue dans les prochaines années.

Les deux graphes suivants résument ces éléments de méthodologie et les résultats.

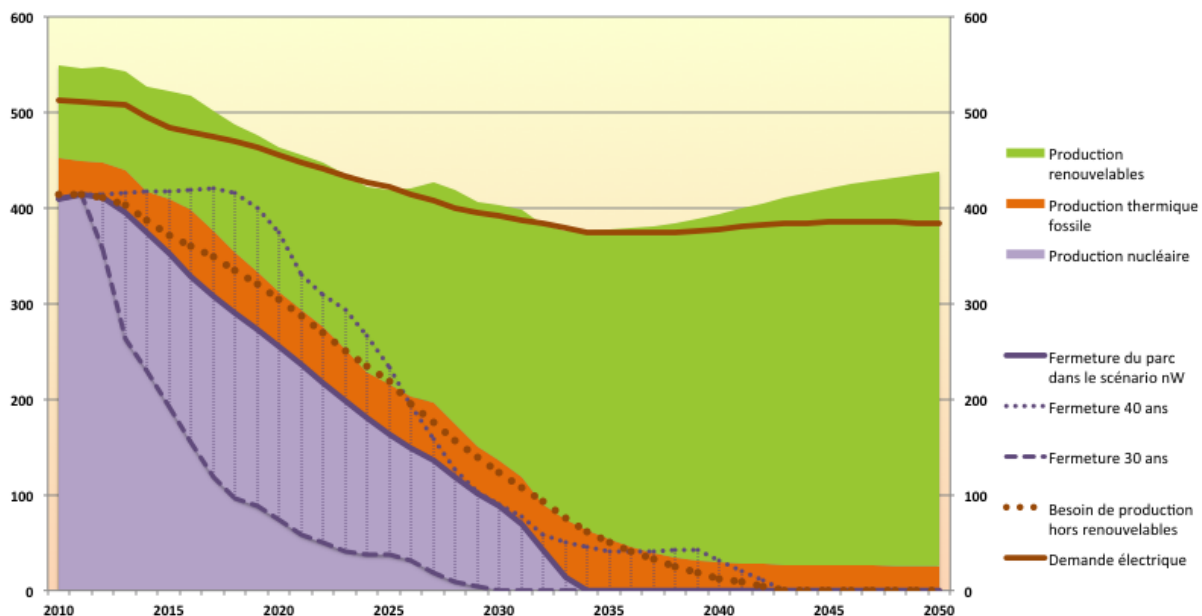


Figure III-3: Optimisation des contraintes sur le rythme de fermeture du parc de réacteurs nucléaires

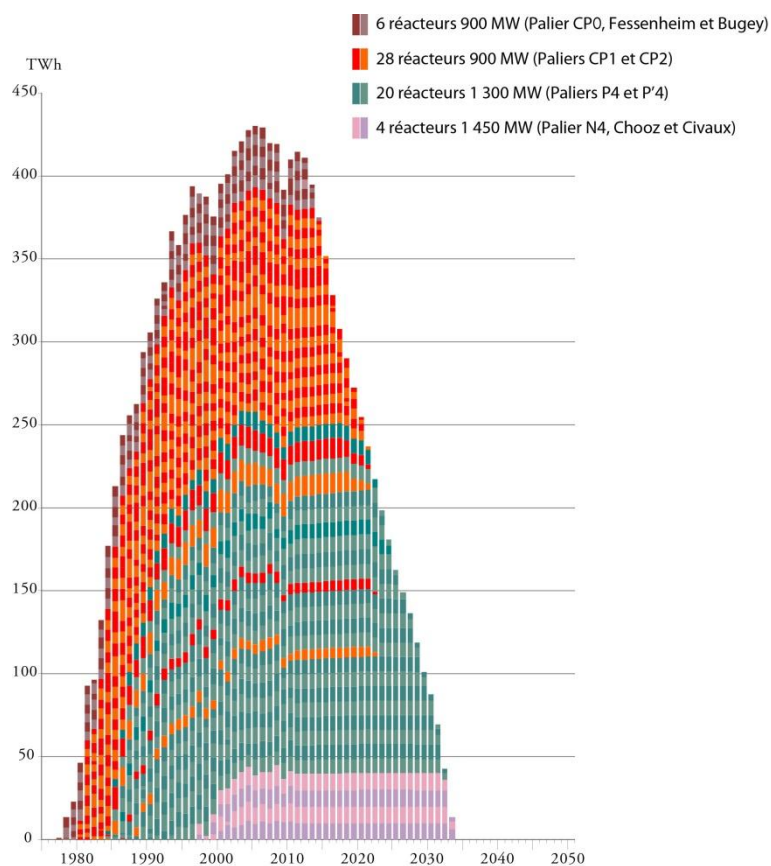


Figure III-4: Evolution du parc nucléaire de production électrique dans le scénario négaWatt 2011 (en TWh) – un rectangle est un réacteur, la hauteur représente la production annuelle d'électricité.

3-2 La production d'énergie d'origine fossile

Dans le scénario négaWatt national comme régional, la différence entre la production d'énergies renouvelables et les besoins totaux représente, « par défaut », la part résiduelle d'énergies fossiles qui seront encore nécessaires. Cette part est de l'ordre de 10% en 2050 dans les deux scénarios.

Partant d'une prépondérance de production d'énergie d'origine fossile en 2010, la France et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur peuvent ainsi en moins de quarante ans s'affranchir quasiment en totalité de leur très forte dépendance aux hydrocarbures.

Pour les usages restants en 2050, le pétrole subsiste essentiellement dans les transports, où il contribue encore à la moitié environ de l'approvisionnement d'un parc résiduel de véhicules à essence. Le charbon, plus réduit, est essentiellement lié à la chaleur de certains processus industriels et à l'utilisation comme matière première dans la sidérurgie. Enfin, le gaz est destiné essentiellement à la cogénération, notamment industrielle, et pour une part marginale de quelques TWh à un appoint flexible à la production d'électricité.

Le rythme de réduction des usages du gaz naturel fossile se distingue par un relatif plateau, autour de 2025 à 2035, qui s'explique par 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.

Les quantités de gaz fossile mises en jeu au niveau national n'excèdent jamais 70 TWh par an, si bien que cet appui temporaire sur le vecteur gaz fossile reste globalement inférieure aux économies de gaz réalisées dans d'autres secteurs, 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, mais il 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 (de nombreuses évolutions peuvent avoir lieu d'ici 2050), le scénario négaWatt 2011 ne la prévoit pas explicitement.

IV- Les réseaux et l'équilibre offre-demande en électricité

La gestion de l'équilibre du réseau est un problème important d'un scénario « 100% renouvelable ». Il est tout particulièrement important pour le réseau électrique, car l'électricité est très difficile à stocker, et son niveau de production doit donc être à tout instant en phase avec son niveau de consommation, sous peine d'effondrement du réseau (perte brutale de l'approvisionnement électrique) – c'est l'équilibre « offre-demande » en électricité.

Nous décrivons dans la présente section la logique qui a été adoptée au niveau national pour gérer cet équilibre offre-demande, et le fonctionnement de l'outil qui garantit cet équilibre dans le scénario négaWatt 2011 au niveau national.

L'analyse de l'équilibre offre-demande au niveau régional demanderait une étude à part entière, qui dépasse le cadre de la présente mission. Le travail au niveau national constitue une première approche, novatrice, permettant de montrer que cet équilibre peut être atteint au niveau national, et d'identifier les leviers les plus importants qui permettent de l'atteindre. Des investigations régionales complémentaires seront nécessaires pour approfondir ces questions d'équilibre offre-demande au niveau régional.

1- Enjeux de l'équilibre offre-demande et modes de gestion

L'enjeu d'un système « 100% renouvelable » est de pouvoir assurer à tout instant l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité avec une part importante de sources dont on ne contrôle pas directement le niveau de production.

Cette absence de contrôle direct du niveau de production est un changement de paradigme difficile à intégrer pour beaucoup d'énergéticiens, qui continuent trop souvent à qualifier d'« intermittentes » la production des énergies renouvelables, alors que celle-ci est variable et prévisible. Le foisonnement des énergies renouvelables (grand nombre d'installations sur un grand territoire) aboutit à une production qui fluctue autour d'un niveau de production « en base », cette fluctuation étant variable mais prévisible – nous sommes donc loin de « l'intermittence aléatoire » des détracteurs de ces productions renouvelables. Cette remarque est particulièrement vraie pour l'éolien, qui constitue la première source de production d'électricité renouvelable en volume en 2050.

La solution pour aboutir à une adéquation entre l'offre et la demande n'est pas unique, mais réside en une diversité de moyens, dont beaucoup existe déjà aujourd'hui et ne demandent qu'à être adaptés.

Les premiers niveaux d'actions portent sur la flexibilité de la demande et de l'offre :

- certains besoins de consommations peuvent être asservis à des périodes de forte production d'électricité renouvelable ; c'est aujourd'hui le cas, plus ou moins directement, avec les tarifs EJP (Economie Jours de Pointe) d'EDF, ou avec le signal tarifaire « heures pleines/heures creuses » modifiant les tarifs (incitation)
- l'hydraulique est une source d'électricité renouvelable très souple, qui permet d'augmenter rapidement la production électrique pour accompagner une hausse des consommations, ou une baisse des autres productions renouvelables.

L'interconnexion des réseaux électriques, par le foisonnement des sources de production et de consommation, favorise également l'équilibre offre-demande.

La mise en place de moyens de stockage à différentes échelles de quantité et de puissance et à différents points du réseau est un apport important à l'équilibre du réseau électrique. Les « stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage » (STEP) assurent déjà cette fonction pour le réseau actuel : le scénario négaWatt national prévoit d'en augmenter la capacité, mais de façon très limitée (peu de sites disponibles).

Au-delà des STEP, différents types de batteries d'accumulateurs (lithium-ion, vanadium, sodium-soufre, etc.) peuvent être envisagés en stockage, tout comme les véhicules électriques, qui pourraient être utilisés comme « batteries sur roues ». La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau pour alimenter des piles à combustible est également souvent citée comme stockage potentiel. Mais aucune de ces solutions « mono-technologie » n'est en mesure pour une raison ou une autre d'apporter une solution globale satisfaisante.

Une des difficultés de l'équilibre offre-demande, dans un scénario « 100% négaWatt » dans lequel la production électrique renouvelable devient forte, est la gestion des pointes de production d'électricité renouvelable (fonctionnement de l'essentiel du parc éolien, par un jour de grand soleil par exemple).

Au lieu de déconnecter la production renouvelable du réseau électrique, ce qui reviendrait à gâcher une partie de l'excédent de production d'électricité renouvelable, une piste de solution très prometteuse, en plein développement aujourd'hui en Allemagne et retenue dans le scénario négaWatt national est la « méthanation ». Cette technique consiste à produire du méthane synthétique obtenu par une réaction simple entre de l'hydrogène d'électrolyse et du gaz carbonique de combustion (réaction de Sabatier). Ce méthane synthétique est injecté au même titre que le biogaz dans le réseau où il remplace le gaz fossile. A la différence du biogaz d'origine organique, ce gaz est appelé « gaz renouvelable de synthèse », car il est issu des excédents de production d'électricité renouvelable ; il est cependant composé globalement des mêmes molécules (CH_4).

La « transformation » de l'électricité difficilement stockable en molécules qui, elles, le sont parfaitement, permet de résoudre plusieurs problèmes et de bénéficier à plein de la très grande flexibilité du vecteur gaz, tant à la production qu'à l'usage : le gaz méthane est stockable, transportable, et peut être utilisé pour produire de l'électricité, pour faire de la chaleur et pour le transport. Cette technique est en quelque sorte le « chaînon manquant » qui permet d'améliorer la souplesse de pilotage du réseau, en interconnectant le réseau de gaz et celui d'électricité.

Le scénario négaWatt prévoit ainsi que la production sur le réseau d'une trentaine de TWh de méthane synthétique par an sera suffisante. C'est une très faible quantité, moins de 10% de la quantité de gaz qui circule dans le réseau de gaz en 2050 dans le scénario négaWatt, mais elle contrebalance intégralement les fluctuations des sources variables d'électricité renouvelable, tout en produisant un peu de chaleur pouvant alimenter un réseau local : un bel exemple de complémentarité intelligente...

Le graphe ci-dessous synthétise la hiérarchie des solutions de gestion du réseau électrique utilisées dans le scénario négaWatt 2011.

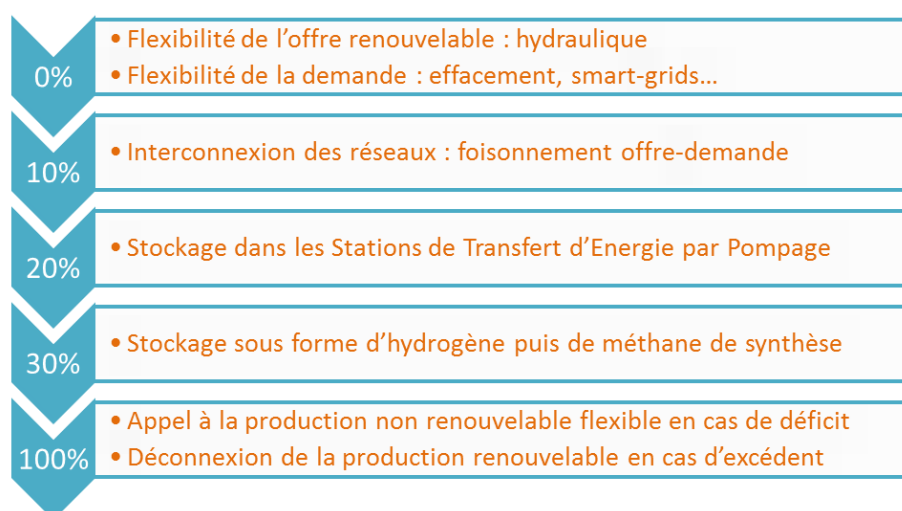


Figure IV-2: Hiérarchie des solutions pour la gestion de l'équilibre offre-demande du réseau électrique.

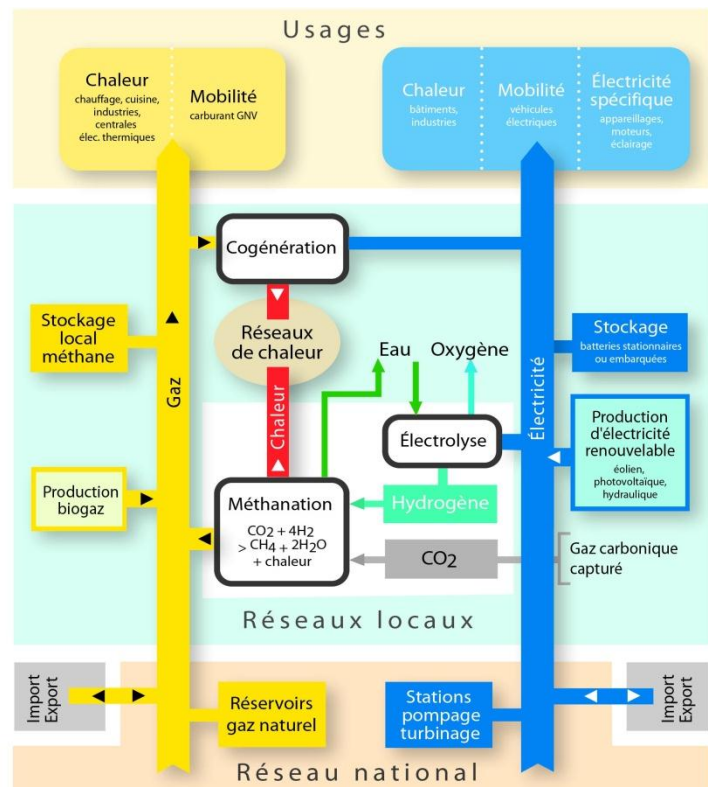


Figure IV-1: Complémentarité des réseaux : exemple de la « méthanation »

2- Outil de modélisation de l'équilibre offre-demande en électricité

L'outil de modélisation de l'équilibre offre-demande en électricité du scénario négaWatt 2011 permet la modélisation de la demande et de l'offre électrique au niveau national, heure par heure, de 2010 à 2050. C'est donc un outil lourd, qui modélise la demande en puissance, et l'offre en puissance

2-1 Modélisation de la demande en puissance

La demande en puissance est scénarisée sur 53 usages, avec pour chaque usage l'attribution année par année d'une courbe de charge normée horaire, pour reconstituer la puissance horaire.

Les pertes sont prises en compte par séparation des niveaux de puissance par usage, année par année, et par application d'un taux annuel de perte par niveau de tension. L'autoconsommation est prise en compte par déduction partielle de la production locale.

Pour l'usage chauffage, l'outil est basé sur un traitement statistique de l'historique de la température « électrique » et de la consommation (prise en compte d'une température seuil de non chauffage, gradient et déduction des cogénérations en suivi de charge).

2-2 Modélisation de l'offre en puissance

L'offre en puissance est basée sur 50 filières de production différenciées :

- filières de production non-dispatchables (éolien, PV, hydraulique au fil de l'eau, ...)
- filières de production dispatchables appelées par « merit order » (nucléaire, gaz de réseau - gaz naturel progressivement remplacé par biogaz, combustible solide - charbon puis biomasse solide, combustible liquide - fioul puis partiellement biocarburant liquide)
- filière dispatchable à stocks finis (hydraulique de barrage) et stockage/conversion (STEP et méthanation), gérées en optimisation annuelle

Le croisement des deux modélisations permet de garantir que l'équilibre offre-demande est atteint heure par heure, ainsi que de prendre en compte les consommations et émissions de CO₂ dues à l'appel des centrales thermiques utilisées pour l'équilibre.

Le graphique ci-dessous illustre le travail de cet outil de modélisation en puissance.

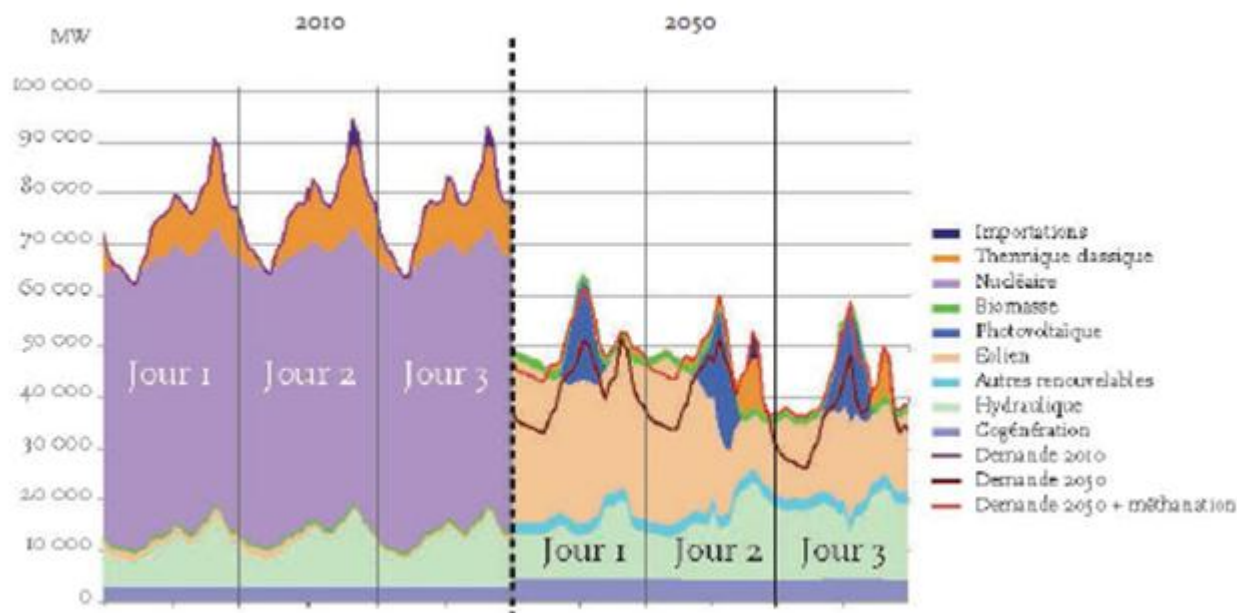


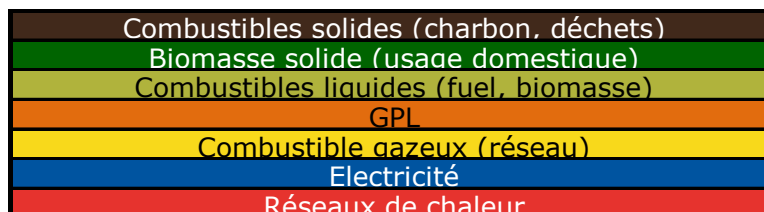
Figure IV-3: Exemple de répartition des sources d'électricité pour trois journées hivernales aux conditions météorologiques identiques en 2010 et 2050 (en MW).

Annexe 1 : Reconstitution des consommations de chauffage, ECS et climatisation pour le résidentiel dans le scénario national (« point zéro »)

Reconstitution des consommations finales de chauffage et d'ECS

Les consommations finales de chauffage et eau chaude sont reconstituées par énergie à partir des séries statistiques des années 2000 à 2009, en prenant en compte les paramètres suivants :

- Coefficient de besoins de chauffage pour les logements collectifs et les maisons individuelles, selon l'âge des bâtiments. On distingue les logements d'avant 1975 non encore rénovés, les logements construits avant 1975 déjà rénovés, ceux construits de 1975 à 1982, de 1982 à 1988 et après 1988.
- Répartition des modes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire par énergie, par catégorie de logement (maison individuelle ou logement collectif) et par âge (avant 1975, après 1975). Les énergies prises en compte sont :



- Rendements correspondants à ces différents modes de chauffage et production d'eau chaude sanitaire.

Les coefficients de besoins (Tableau A1-2) ont été ajustés avec le solveur de manière à obtenir le meilleur coefficient de corrélation entre les consommations finales reconstituées et celles issues des enquêtes statistiques (Figure A1-1).

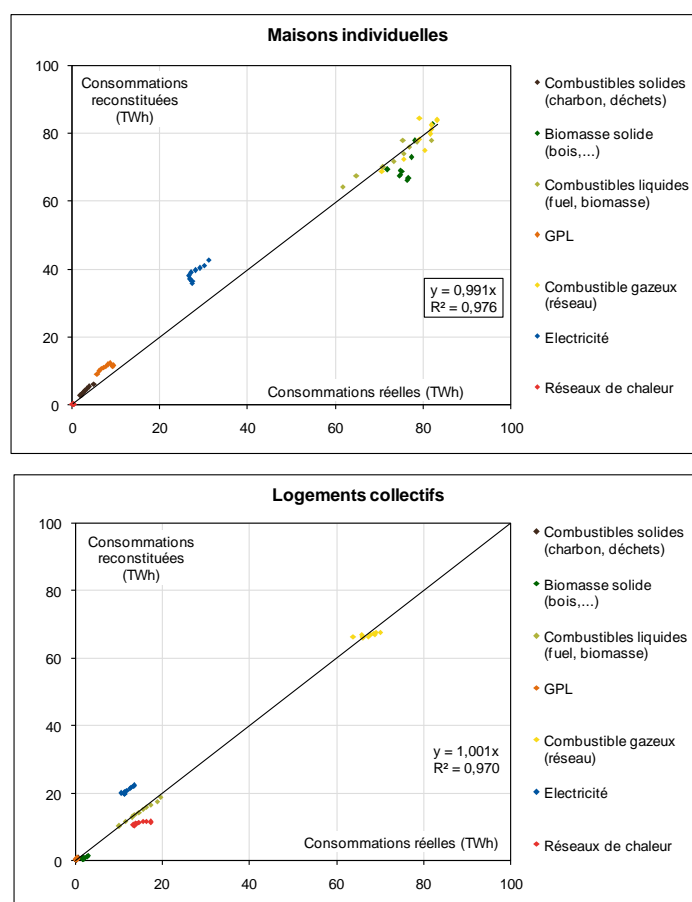


Figure A1-1: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour le chauffage des maisons individuelles (en haut) et des logements collectifs (en bas)

Tableau A1-1 : Coefficients de besoins de chauffage obtenus par identification

	Catégorie de logement	Coefficient de besoins (kWh/m².an)
Maisons individuelles	avant 1975 non rénovées	160
	avant 1975 déjà rénovées	95
	construites de 1975 à 1981	85
	construites de 1982 à 1988	65
	construites à partir de 1989	45
Logements collectifs	avant 1975 non rénovés	140
	avant 1975 déjà rénovés	80
	construits de 1975 à 1981	65
	construits de 1982 à 1988	50
	construits à partir de 1989	40

Tableau A1-2 : Rendements moyens des chauffages du parc de logements existants

		Type de chauffage	Rendements
Logements collectifs	Chauffage central collectif	Urbain	70%
		Charbon	60%
		Fuel	60%
		Gaz	60%
		Autres	60%
	Chauffage central individuel	Charbon-Bois	50%
		Fuel	65%
		Gaz	65%
		GPL	65%
		Electricité	95%
		Autres	65%
Maisons individuelles	Chauffage central individuel	Charbon	60%
		Bois	60%
		Fuel	65%
		Gaz	66%
		GPL	65%
		Electricité	100%
		Autres	60%
	Appareils indépendants	Cuisinières FOD	50%
		Cuisinières Charbon	50%
		Cuisinières Bois	50%
		Cuisinières Charbon-bois	50%
		Poêles FOD	50%
		Poêles Charbon	50%
		Poêles Bois	50%
		Poêles Charbon-bois	50%
		Radiateurs Electricité	95%
		Radiateurs GPL	65%
		Radiateurs Gaz	65%
		Cheminée	20%

Tableau A1-3 : Rendements moyens des productions d'eau chaude sanitaire du parc de logements existants (valeurs du DPE)

Maisons individuelles < 1975	ECS avec chauffage central	Charbon	30%	30%
		Bois	18%	18%
		Combustibles liquides (fuel, biomasse)	52%	52%
		GPL	52%	52%
		Combustible gazeux (réseau)	52%	52%
		Réseaux de chaleur	65%	65%
	ECS avec appareil indépendant	GPL	52%	52%
		Combustible gazeux (réseau)	52%	52%
		Electricité	68%	68%
Maisons individuelles > 1975	ECS avec chauffage central	Charbon	30%	30%
		Bois	18%	18%
		Combustibles liquides (fuel, biomasse)	55%	55%
		GPL	55%	55%
		Combustible gazeux (réseau)	55%	55%
		Réseaux de chaleur	65%	65%
	ECS avec appareil indépendant	GPL	55%	55%
		Combustible gazeux (réseau)	55%	55%
		Electricité	69%	69%
Logements collectifs < 1975	ECS avec chauffage central	Charbon	25%	25%
		Bois	22%	22%
		Combustibles liquides (fuel, biomasse)	37%	37%
		GPL	37%	37%
		Combustible gazeux (réseau)	37%	37%
		Réseaux de chaleur	42%	42%
	ECS avec appareil indépendant	GPL	52%	52%
		Combustible gazeux (réseau)	52%	52%
		Electricité	63%	63%
Logements collectifs > 1975	ECS avec chauffage central	Charbon	25%	25%
		Bois	22%	22%
		Combustibles liquides (fuel, biomasse)	40%	40%
		GPL	40%	40%
		Combustible gazeux (réseau)	40%	40%
		Réseaux de chaleur	42%	42%
	ECS avec appareil indépendant	GPL	55%	55%
		Combustible gazeux (réseau)	55%	55%
		Electricité	69%	69%

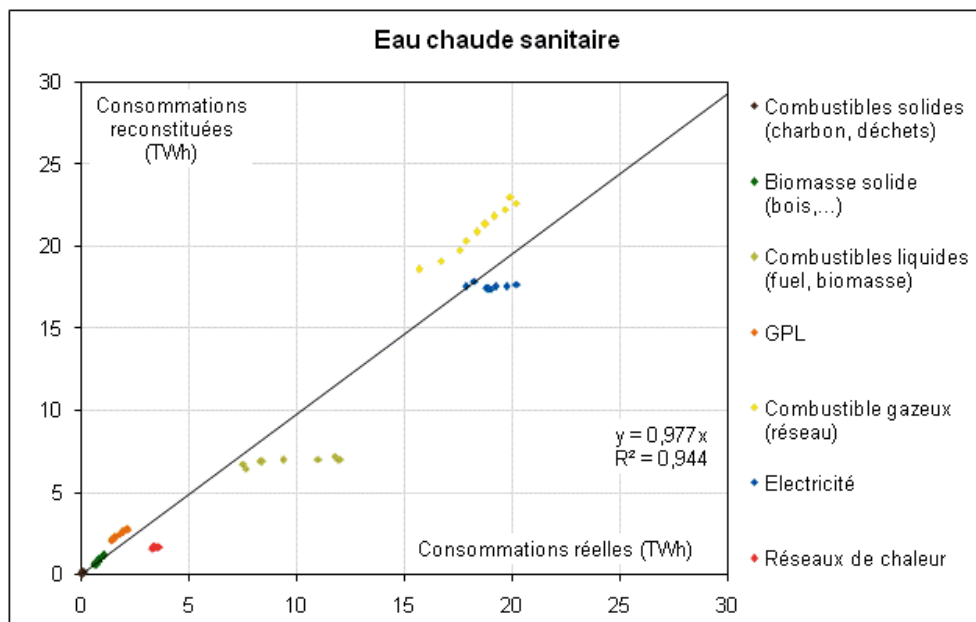


Figure A1-2: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour l'eau chaude sanitaire

On observe un écart significatif entre les consommations reconstituées et les consommations réelles pour les logements chauffés à l'électricité, provenant vraisemblablement du fait que, compte tenu du prix élevé de cette énergie, les utilisateurs de chauffage électrique chauffent en général leur logement à des températures plus faibles que les utilisateurs d'autres énergies.

Reconstitution des consommations finales de climatisation

Pour la climatisation, nous disposons d'estimations des parcs de climatiseurs dans le secteur résidentiel, ainsi que des consommations moyennes par logement climatisé pour les années 2002, 2005 et 2007 [1]. Les consommations finales de climatisation sont reconstituées à partir de l'efficacité énergétique moyenne des climatiseurs, prise égale à 2,2, et d'un coefficient de besoins surfaciques ajusté à l'aide du solveur.

Cette méthode conduit à un coefficient de besoins moyen pour la France de 11,8 kWh/m².an.

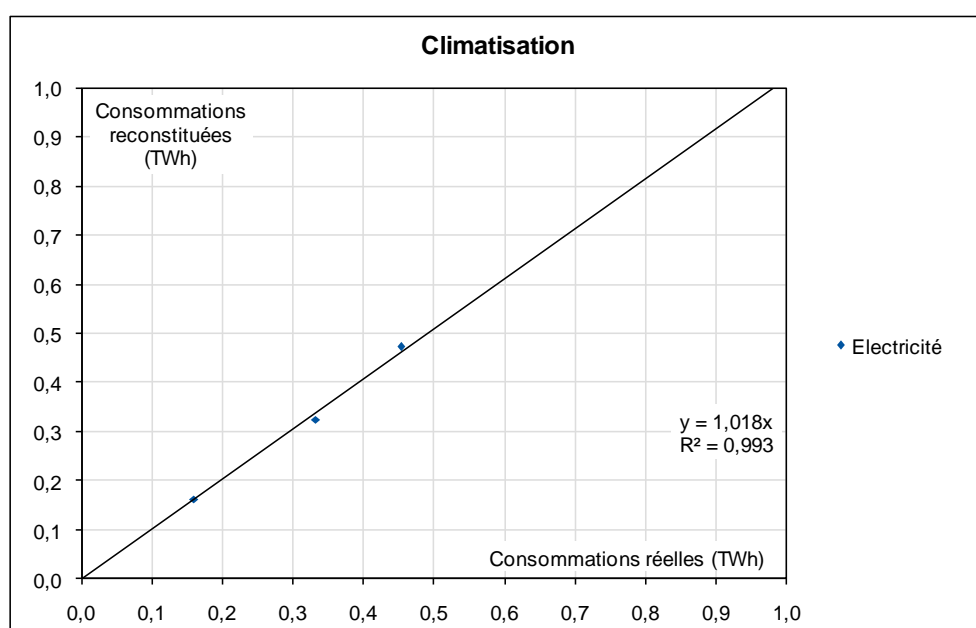


Figure A1-3: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour la climatisation

Annexe 2 : Reconstitution des consommations de chauffage, ECS et climatisation pour le tertiaire dans le scénario national (« point zéro »)

Reconstitution des consommations finales de chauffage et d'ECS

Une méthode analogue à celle exposée à l'annexe 1 est utilisée. Pour cela, nous disposons des consommations finales pour les années 2001, 2002, 2008 et 2009.

Les figures suivantes montrent que cette reconstitution donne globalement des résultats satisfaisants, même si des écarts sont observés pour certains secteurs.

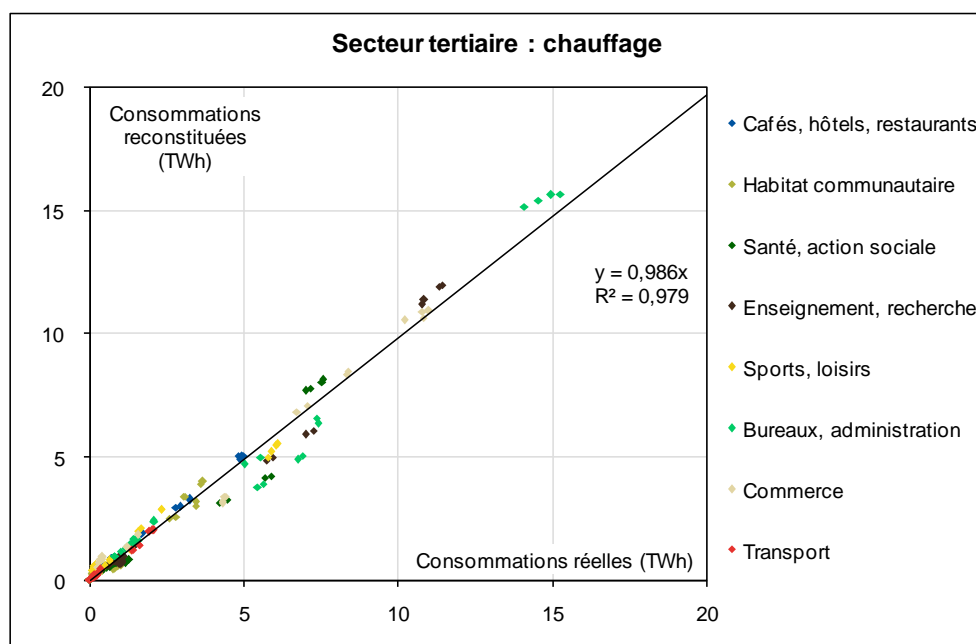


Figure A2-1: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour le chauffage du secteur tertiaire

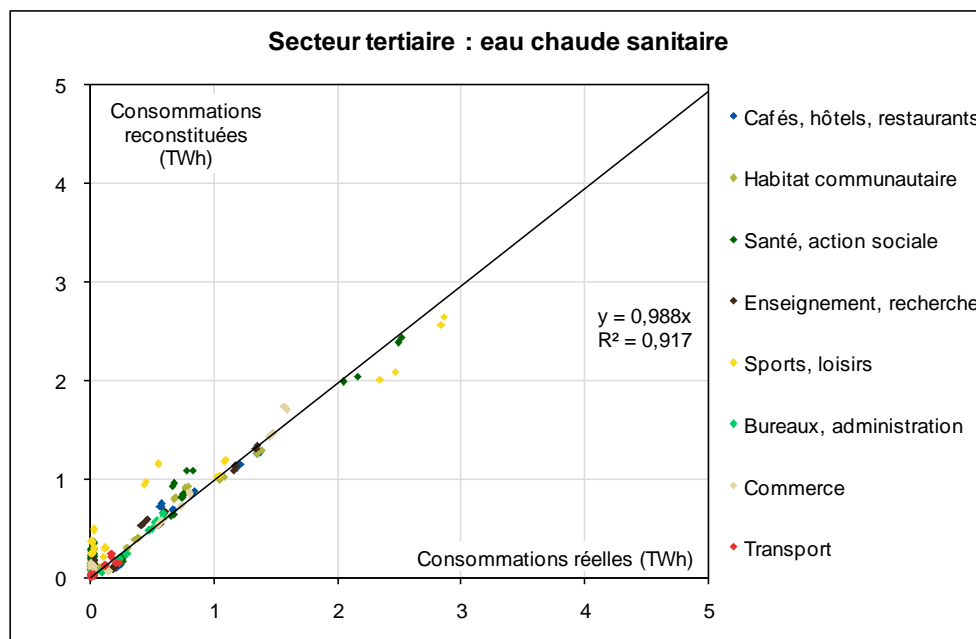


Figure A2-2: Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour l'eau chaude sanitaire du secteur tertiaire

Reconstitution des consommations finales de climatisation

Pour la climatisation, les proportions de surfaces climatisées de chacun des secteurs ont été utilisées [1] et des coefficients de besoins surfaciques de climatisation ont été obtenus à l'aide du solveur.

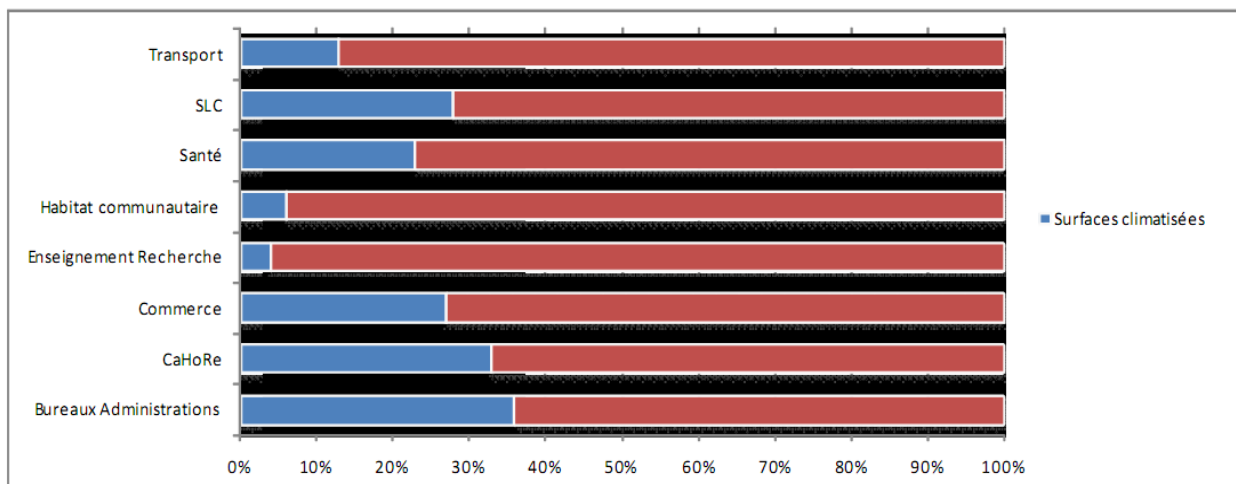


Figure A2-3 : Proportions de surfaces climatisées dans les différents secteurs du tertiaire

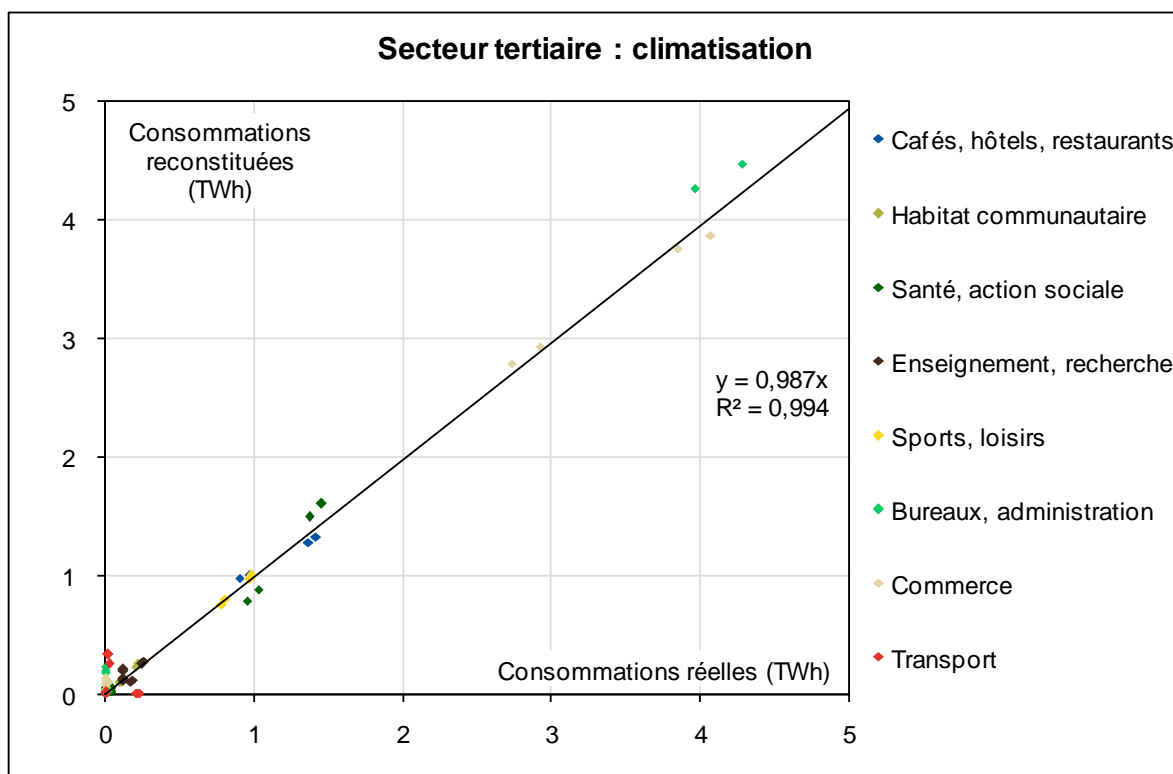


Figure A2-4 : Corrélations entre les consommations réelles et les consommations recalculées pour la climatisation du secteur tertiaire

Il est à noter que les statistiques disponibles sont assez imprécises, et les besoins et consommations reconstituées incluent non seulement les compresseurs, mais également la ventilation des locaux et des consommations annexes.

Annexe 3 - Complément du point zéro pour l'industrie

Pour l'industrie, les diverses données statistiques sont basées sur des périmètres différents. Le tableau suivant fait la synthèse des principales différences :

Tableau A3-4: Synthèse des principales différences dans les données statistiques pour les principales sources

	EACEI	SOeS	ORE	E&E - Négawatt
Secteurs	Manque secteur bâtiment et génie civil Corse incluse (mais seulement 6 ktep en 2007 d'après SOES)	Intègre bâtiment et génie civil		Manque secteur bâtiment et génie civil (ajout de 28ktep fioul)
Limite secteur énergie	Intègre les productions électriques des industries, les cokeries intégrées...	Idem EACEI pour les résultats régionaux (ce n'est pas vrai dans le bilan national)	Hors secteur énergie Retranche cokerie depuis 2010, pas en 2007	
Correction climat	Non	Non, pas à l'échelon régional	Oui	Non
Enquête	Etablissement >20 salariés (10 dans l'agro-alimentaire)	Enquête exhaustive auprès des fournisseurs gaz et électricité		
Matières premières	Oui	Oui, sauf GPL chimie	Non	Non : le GPL de la chimie n'est pas pris en compte Le charbon et coke sidérurgique est pris en compte

Etant donné la très faible part de l'industrie Corse (SOES l'estime à 6 ktep en 2007 contre 4447 ktep pour Provence-Alpes-Côte d'Azur), il n'a pas été jugé nécessaire de corriger les données EACEI utilisées pour l'étude.

Figure A3-1 – Consommation d'énergie de l'industrie de Provence-Alpes-Côte d'Azur, selon sources - 2007

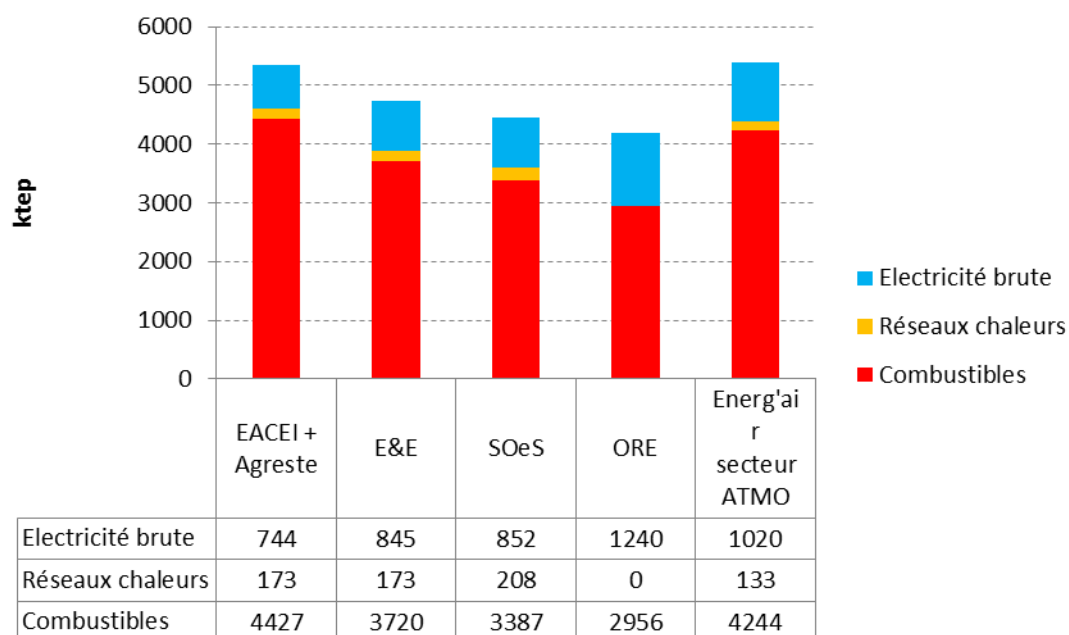


Tableau A3-5 – Corrections des statistiques

Correction des différences (ktep)	EACEI + Agreste	E&E	SOeS	ORE	Energ'air secteur ATMO	Energ'air ATMO+ (sous secteurs)	Energ'air secteur	Energ'air SNAP
Correction EACEI charbon sidérurgie	262	0	262	0	0	0	0	0
Energie consommée pour cogénération	0	0	0	257	0	0	0	0
Estimation secteur BTP + GC	28	0	0	0	0	0	0	0
Part cokerie	0	0	0	0	0	0	0	0
Matières premières chimie	-1131	0	0	0	-1131	-1131	-1131	-1131
	0	0	0	0	0	0	0	0
Autoconso électricité	-95	-95	0	-95	-95	-95	-95	-95
Combustibles	-841	0	262	257	-1131	-1131	-1131	-1131
Réseaux chaleurs	0	0	0	0	0	0	0	0
Electricité nette	-95	-95	0	-95	-95	-95	-95	-95

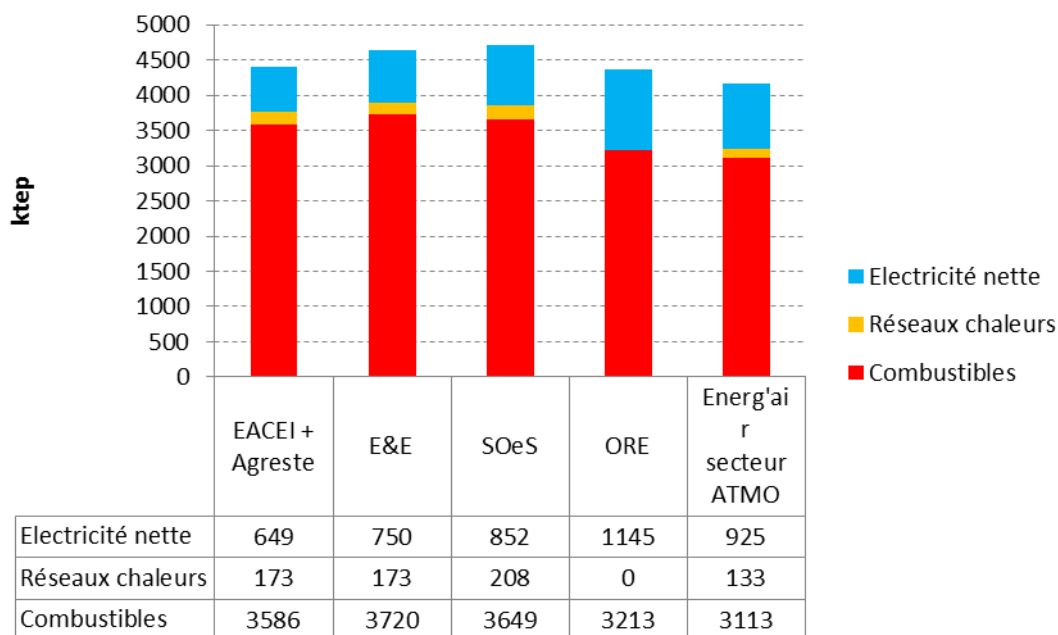


Figure A3-2 – Consommation d’énergie de l’industrie de Provence-Alpes-Côte d’Azur, selon sources, après correction des périmètres - 2007

Au final, en corrigeant les différentes sources de données pour revenir au même périmètre, les différences s’estompent. Reste la part de consommation électrique de l’industrie présente des estimations très diverses, qui justifieraient la recherche de données statistiques plus précises.

Données reconstituées pour la modélisation

Tableau A3-6 - Combustibles et vapeur, 2007 (ktep)

		Achat en ktep						
		Charbon	Gaz	Fioul	GPL	Biomasse	DIB	Vapeur
E16	Sidérurgie	2 048	128	100	0	0	0	0
E18	Métallurgie de 1ère transformation des métaux non ferr	0	98	0	0	0	0	-3
E19	Production de minéraux divers	0	0	0	0	0	0	0
E20	Fabrication de plâtres, produits en plâtre, chaux et c	120	36	48	0	3	7	0
E21	Production d'autres matériaux de construction et de cé	0	17	19	0	10	1	0
E22	Industrie du verre	0	31	1	0	0	0	0
E23	Fabrication d'engrais	0	0	0	0	0	0	0
E24	Autres industries de la chimie minérale	0	80	41	5	0	0	40
E25	Fab. de matières plastiques, de caoutchouc synthétique	0	0	6	0	0	0	0
E26	Autres industries de la chimie organique de base	0	262	338	0	17	13	69
E28	Parachimie et industrie pharmaceutique	0	21	0	0	0	0	11
E29	Fonderie et travail des métaux	0	15	0	0	0	0	0
E30	Construction mécanique	0	2	0	0	0	0	0
E31	Construction électrique et électronique	0	4	2	0	0	0	0
E32	Constr. de véhicules automobiles et d'autres matériels	0	1	0	0	0	0	2
E33	Constr. navale et aéronautique, armement	0	12	7	0	0	0	5
E34	Industrie textile, du cuir et de l'habillement	0	2	1	0	0	0	0
E35	Industrie du papier et du carton	0	30	9	0	120	0	41
E36	Industrie du caoutchouc	0	0	0	0	0	0	0
E37	Transformation des matières plastiques	0	3	2	0	0	0	0
E38	Industries diverses	0	4	1	0	1	0	5
AGR	Agroalimentaire	0	46	7	3	0	0	

Source : E&E, d’après EACEI, ORE, Energ’Air

Tableau A3-7 – Electricité, 2007 (ktep)

		Achat_élec	Vente_élec	Autoconso	Prod hyd	Prod ther	Conso pour prod élec
E16	Sidérurgie	232	0	0	0	0	0
E18	Métallurgie de 1ère transformation des métaux non ferr	71	0	0	0	0	0
E19	Production de minéraux divers	0	0	0	0	0	0
E20	Fabrication de plâtres, produits en plâtre, chaux et c	30	0	0	0	0	0
E21	Production d'autres matériaux de construction et de cé	24	0	0	0	0	0
E22	Industrie du verre	9	0	0	0	0	0
E23	Fabrication d'engrais	0	0	0	0	0	0
E24	Autres industries de la chimie minérale	74	0	12	0	12	32
E25	Fab. de matières plastiques, de caoutchouc synthétique	56	0	0	0	0	0
E26	Autres industries de la chimie organique de base	146	0	60	0	60	162
E28	Parachimie et industrie pharmaceutique	7	0	0	0	0	0
E29	Fonderie et travail des métaux	12	0	0	0	0	0
E30	Construction mécanique	4	0	0	0	0	0
E31	Construction électrique et électronique	34	0	0	0	0	0
E32	Constr. de véhicules automobiles et d'autres matériels	-2	0	0	0	0	0
E33	Constr. navale et aéronautique, armement	10	0	0	0	0	0
E34	Industrie textile, du cuir et de l'habillement	1	0	0	0	0	0
E35	Industrie du papier et du carton	37	0	23	0	23	62
E36	Industrie du caoutchouc	0	0	0	0	0	0
E37	Transformation des matières plastiques	9	0	0	0	0	0
E38	Industries diverses	5	0	0	0	0	0
AGR	Agroalimentaire	40					

Source : E&E, d'après EACEI, ORE, Energ'Air

Annexe 4 : Sidérurgie – Analyse du potentiel d'économie d'énergie

Cette annexe décrit le secteur de l'acier au niveau national, et ses évolutions prises en compte pour l'étude : les indices de production (haut-fourneau et aciérie électrique), ainsi que les performances sont repris au niveau régional.

1- Description du secteur

Tableau A4-1 – Chiffres clés 2008 – Acier

Production	Mt	17,9
Consommation	Mt	16
Taux de recyclage	%	50%

Source : ADEME, Fédération française de l'acier

Cette industrie se sépare principalement en deux :

- production d'acier par hauts-fourneaux (à partir principalement de minerais²¹ et coke de charbon) ;
- recyclage de ferraille et première transformation de l'acier par fours électriques.

Figure A4-1 – Répartition des consommations d'énergie par usage – Sidérurgie (national)

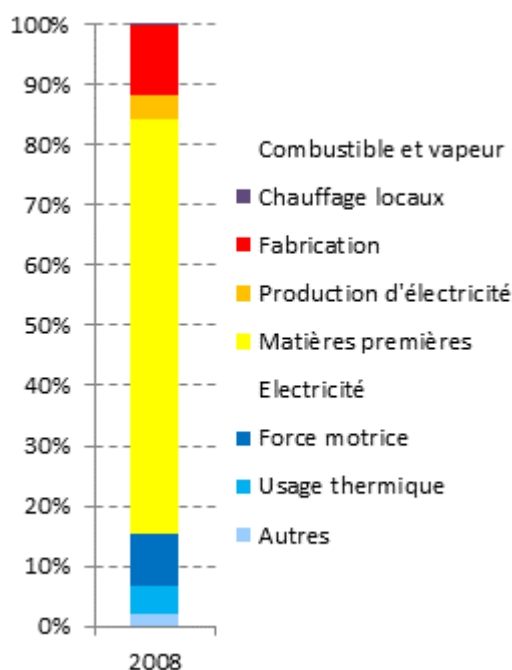
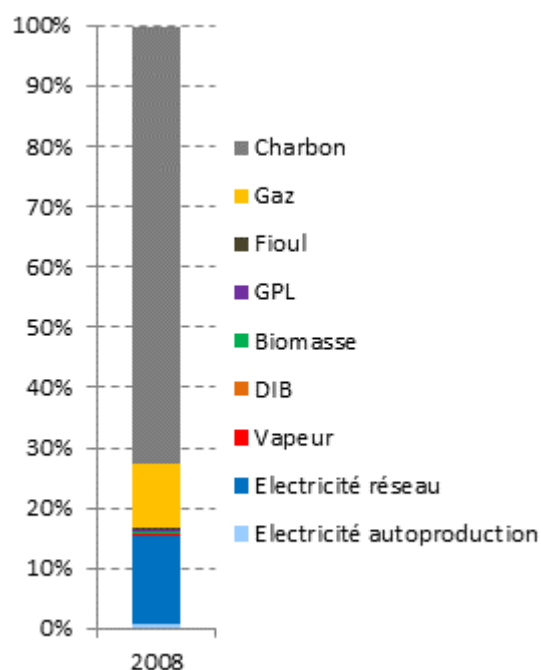


Figure A4-2 – Répartition des consommations d'énergie par type d'énergie – Sidérurgie (national)



Source : E&E, d'après EACEI

²¹ Une part de ferraille est aussi recyclée dans les hauts-fourneaux (HF). Actuellement les HF français utilisent environ 18% de ferraille.

Tableau A4-2 – Consommation d'énergie - Sidérurgie

Combustible et vapeur					
	TWh	%		TWh	%
Chauffage locaux	0,1	0%	Charbon	61,2	73%
Fabrication	9,8	12%	Gaz	8,9	11%
Production d'électricité	3,4	4%	Fioul	0,4	1%
Matières premières	58,2	69%	GPL	0,0	0%
			Biomasse	0,3	0%
			DIB	0,0	0%
			Vapeur	0,4	1%
Electricité					
	TWh	%		TWh	%
Force motrice	7,2	9%	Electricité réseau	12,2	14%
Usage thermique	3,9	5%	Electricité autoproduction	0,7	1%
Autres	1,8	2%			
Total					
	TWh	%		TWh	%
Consommation brute	84,3	100%	Consommation brute	84,3	100%
Consommation nette	83,6		Consommation nette	83,6	

Source : E&E, d'après EACEI

La spécificité du secteur est que la plus grande part de l'énergie est utilisée en tant que matière première. Le charbon est transformé en coke (concentré de carbone) avant d'être mélangé au minerai de fer. Le mélange entre en réaction de réduction dans le haut-fourneau, pour former la fonte, matière première aux divers alliages d'acier.

Pour l'électricité, on trouve une forte part d'usage en moteur. Cette industrie lourde utilise beaucoup de ventilateurs, concasseurs, convoyeurs... On trouve également un usage thermique important dans les aciéries électriques (recyclage de ferraille).

2- Economies d'énergie

Acier primaire

Pour l'acier primaire, sur le court terme, il ne semble pas qu'il y ait de possibilités d'amélioration des performances du procédé lui-même. L'incorporation de plastiques ou de bois, pratiquée dans d'autres pays, est de nature à améliorer le système en termes d'émissions, mais pas la performance énergétique du haut-fourneau lui-même.

Seules les améliorations sur les opérations transverses sont ainsi prises en compte ici.

Sur le plus long terme, plusieurs technologies sont en cours de développement²² qui pourront s'appliquer dans les prochaines décennies :

- **Top Gas Recycling (TGR) Blast Furnace – Recirculation des gaz de haut-fourneau**

Dans cette solution, les gaz de haut-fourneau actuellement valorisés énergétiquement (ex : centrale électrique de DK6 à Dunkerque) seraient réintroduits dans le haut-fourneau en tant qu'agent réducteur. La quantité de coke de charbon nécessaire à la réduction du minerai de fer diminue, entraînant par la même occasion la réduction d'émissions de CO₂.

Afin de permettre la capture du CO₂, on peut également substituer l'air chaud injecté dans le four par de l'oxygène, afin d'avoir directement des fumées concentrées en CO₂ (sans diazote, naturellement présent dans l'air).

Du strict point de vue énergétique, le recyclage des gaz n'apporte pas de réduction de consommation d'énergie puisque le gain sur le réducteur (le coke) est compensé par la consommation électrique nécessaire au traitement des gaz de recirculation (CE Delft, 2010, p. 37). Si de plus, le choix s'orientait vers la substitution de l'air par de l'oxygène, la consommation d'énergie augmenterait, en raison du procédé énergivore de la production d'oxygène ;

²² Les données sont principalement issues des informations collectées sur le site : www.ulcos.org, et d'un atelier sur la sidérurgie organisé à Dunkerque en octobre 2009 par E&E Consultant.

- **Réduction directe au gaz naturel**

Solution déjà utilisée aujourd'hui lorsque le gaz naturel est disponible et bon marché, elle permet une réduction de presque 50% des émissions de CO₂. Elle nécessite une qualité de minerai supérieure. ULCOS propose des solutions pour réduire la consommation de gaz naturel. Pas retenu pour cette étude, car la France ne possède pas de gisement de gaz naturel ;

- **Technologie HISarna**

Cette technologie fait appel au procédé de bain de fusion. Elle n'utilise plus de coke, mais directement du charbon mais en bien moins grande quantité par rapport au haut-fourneau. Ce procédé permet également une modularité du réducteur, en substituant partiellement du charbon par de la biomasse, du gaz naturel ou même de l'hydrogène.

Un pilote de 60000 t/an a été démarré à l'été 2010 aux Pays-Bas, une unité commerciale est visée pour 2017 (CE Delft, 2010, p. 32). Le gain énergétique est de 20% ;

- **L'électrolyse**

Grâce au passage d'un courant électrique dans un bain aqueux de minerai de fer, le procédé produit du fer et de l'oxygène. La production se fait donc sans émissions directes de CO₂, excepté celles de l'électricité. Cette technologie est la moins mature (stade expérimental) mais beaucoup d'éléments permettent de prédire un bel avenir à cette technologie, déjà en application industrielle dans d'autres secteurs (Aluminium, Zinc...). Les données de consommation sont encore inconnues ;

- **Réduction directe par l'hydrogène**

La technologie est disponible, mais il faut pouvoir produire l'hydrogène nécessaire proprement et à moindre coût, ce qui n'est pas encore le cas au niveau industriel. Pas retenu pour cette étude ;

- **Haut-fourneau à la biomasse ou déchets fatals**

Le charbon de bois remplace le coke dans le haut-fourneau. Si le bois est exploité de manière durable, le bilan CO₂ est quasi nul. De petites unités fonctionnent déjà au Brésil. Cette solution est, a priori, difficilement généralisable pour des raisons de ressources de biomasse.

Dans quelques pays (Japon, Autriche...), on injecte des plastiques usés dans le haut-fourneau afin de réduire l'utilisation de charbon. Cette solution ne peut être globale mais apporte quelques pourcents de réductions supplémentaires aux solutions actuelles. Ceci peut être une utilisation plus intéressante du point de vue climatique que leur utilisation dans un incinérateur. En effet, une telle utilisation, qui se substitue directement à du charbon ou à du coke, est beaucoup plus intéressante que la production d'électricité à faible rendement (moins de 25%) dans les incinérateurs français même récents.

Sur la base d'une économie de 29 GJ/t pour les plastiques mélangés recyclés, mesurée par les industriels japonais, alors les déchets plastiques permettent de substituer une part importante du charbon encore utilisé dans les hauts-fourneaux. Cette donnée dépend cependant largement de l'organisation du système à cet horizon : bioplastiques, taux de recyclage, procédés employés. En cas de captage du carbone sur le procédé, l'usage de plastiques permet d'obtenir un bilan « négatif » d'émissions, au moins pour ce secteur.

En conclusion, pour l'acier primaire sur le long terme on retient la technologie Hisarna qui permet une réduction de consommation d'énergie de 20%. La technologie par électrolyse, bien que très prometteuse n'est pas retenue car les performances sont encore trop difficiles à estimer.

Recyclage des ferrailles

Pour le recyclage des ferrailles, utilisant des aciéries électriques, les meilleures technologies actuellement en service consomment 0,47 MWh/t_{acier} (Worrel & Neelis, 2007, p. 16). Ces performances peuvent même être dès aujourd'hui abaissées à 0,4 MWh/t_{acier} en utilisant un préchauffeur. D'après les statistiques EACEI, il semble que les performances nationales soient proches de 0,7 MWh/t_{acier}. Un gain de près de 50% semble donc accessible. Pour l'étude ce gain est limité à 40%, étant donné que la consommation dépend également de la qualité des ferrailles traitées (les meilleures performances actuelles correspondent à des aciéries traitant des ferrailles de très bonne qualité, si l'on envisage d'augmenter le recyclage, il faudra sans doute aller chercher dans les ferrailles de moins bonne qualité). Pour l'horizon 2020, on retient un gain de 20% atteignable, le reste pour 2050. On applique également 30% sur l'usage combustible « fabrication » pour atteindre 0,8 GJ/t en 2050 (Worrel & Neelis, 2007, p. 16).

En parallèle de ces améliorations, le taux de recyclage de l'acier passe de 50 à 60% sur le court terme, puis atteint 90% sur le long terme, ce qui entraîne des gains très importants car comme indiqué au Tableau II-27, le gain en énergie du passage au recyclage est d'un facteur 5 pour l'acier.

3- Bilan

Le bilan est présenté dans le tableau suivant :

Tableau A4-3 – Bilan Sidérurgie

		2008	2020	long terme
Combustible et vapeur	TWh	71,4	57,9	21,4
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>19%</i>	<i>70%</i>
Electricité	TWh	12,9	11,9	11,7
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>8%</i>	<i>9%</i>
Consommation nette	TWh	83,6	69,2	32,9
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>17%</i>	<i>61%</i>

Source : E&E

Imprimé sur papier 100% recyclé

