



RAPPORT

FR

2013

CETTE PUBLICATION
A ÉTÉ RÉALISÉE EN
PARTENARIAT AVEC



CONSULTANT
ENVIRONNEMENT
ÉNERGIE



GISEMENTS D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE

WWF

Le WWF est l'une des toutes premières organisations indépendantes de protection de l'environnement dans le monde. Avec un réseau actif dans plus de 100 pays et fort du soutien de 5,8 millions de membres, le WWF œuvre pour mettre un frein à la dégradation de l'environnement naturel de la planète et construire un avenir où les humains vivent en harmonie avec la nature, en conservant la diversité biologique mondiale, en assurant une utilisation soutenable des ressources naturelles renouvelables et en faisant la promotion de la réduction de la pollution et du gaspillage.

En 2011, le WWF a fêté ses 50 ans.

Depuis 1973, le WWF France agit au quotidien afin d'offrir aux générations futures une planète vivante. Avec ses bénévoles et le soutien de ses 187 000 donateurs, le WWF France mène des actions concrètes pour sauvegarder les milieux naturels et leurs espèces, assurer la promotion de modes de vie durables, former les décideurs, accompagner les entreprises dans la réduction de leur empreinte écologique et éduquer les jeunes publics. Mais pour que le changement soit acceptable, il ne peut passer que par le respect de chacune et chacun. C'est la raison pour laquelle la philosophie du WWF est fondée sur le dialogue et l'action.

Depuis décembre 2009, la navigatrice Isabelle Autissier est présidente du WWF France.

En 2013, le WWF France fête ses 40 ans.

Une étude réalisée en 2011 par Simon Métivier et Antoine Bonduelle
E & E Consultant, 900 vieux chemin de Saint-Omer, F-59670 Cassel
Téléphone : 03.66.72.10.03
Email : contact@ee-consultant.fr
Site : www.ee-consultant.fr

© Concept & design by © ArthurSteenHorneAdamson

© 1986 Panda Symbol WWF - World Wide Fund For nature
(Formerly World Wildlife Fund)

® "WWF" & "living planet" are WWF Registered Trademarks /
"WWF" & "Pour une planète vivante" sont des marques déposées.

WWF France, 1 carrefour de Longchamp, 75016 Paris.



www.wwf.fr



[/wwffrance](https://www.facebook.com/wwffrance)



[@wwffrance](https://twitter.com/wwffrance)



L'actu du WWF France dans ce code

Sommaire

1. RESUME	2
2. INTRODUCTION	7
3. METHODOLOGIE	9
3.1. RECONSTITUTION DES DONNEES DE CONSOMMATIONS.....	9
3.2. DETERMINATION DES POTENTIELS D'ECONOMIES D'ENERGIE.....	10
3.2.1. Evolution de la production.....	10
3.2.2. Recyclage	10
3.2.3. Réutilisation	11
3.2.4. Amélioration des procédés et des usages transverses des branches.....	11
3.2.5. Les économies dans le système.....	11
4. BILAN ACTUEL DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DANS L'INDUSTRIE.....	13
5. HYPOTHESES RETENUES.....	16
5.1. PROJECTION DE LA DEMANDE.....	16
5.2. REUTILISATION.....	16
5.3. RECYCLAGE.....	19
5.4. LES RYTHMES DE MISE EN ŒUVRE	20
6. RESULTATS GLOBAUX	21
6.1. ECONOMIE SUR LES SECTEURS TRANSVERSAUX	21
6.1.1. Description des gains sur les usages transverses.....	21
6.1.2. Gisements retenus des opérations transverses.....	23
6.2. CONSOMMATION TOTALE D'ENERGIE DE L'INDUSTRIE.....	24
7. EMISSIONS DE CO ₂	27
7.1. METHODE	27
7.2. RESULTATS	28
8. ECONOMIES D'ENERGIE SECTORIELLES	28
8.1. SIDERURGIE.....	28
8.1.1. Description et évolution du secteur	28
8.1.2. Economies d'énergie.....	30
8.1.1. Bilan	32
8.2. INDUSTRIE PAPETIERE	32
8.2.1. Description et évolution du secteur.....	32
8.2.2. Economies d'énergie	35
8.2.3. Bilan	36
8.3. CIMENT	36
8.3.1. Description et évolution du secteur.....	36
8.3.2. Economies d'énergie	38
8.3.3. Bilan	39
9. POUR ALLER PLUS LOIN	40
9.1. RECUPERATION DE CHALEUR.....	40
9.1.1. Définition.....	40
9.1.2. Résultats.....	41
9.2. COGENERATION	42
9.3. SOBRIETE	43
10. BIBLIOGRAPHIE	45
10.1. DOCUMENTS CITES DANS LE RAPPORT	45
10.2. AUTRES DOCUMENTS.....	45
11. ANNEXES	46
11.1. ABREVIATIONS	46
11.2. FACTEURS D'EMISSION DE CO ₂	46

Résumé

Le WWF a commandé à E&E consultant un rapport sur les potentiels de l'industrie française dans le domaine de l'efficacité énergétique. Le document montre des potentiels accessibles importants, de l'ordre de 17% des consommations dès 2020 et à plus long terme un gain de plus de 40% (base 2008). Ces chiffres s'appuient sur des sources solides et reconnues. Il ne fait appel qu'à des technologies déjà mises en œuvre industriellement, seules quelques technologies à l'état de pilote ont été retenues pour le long terme.

En termes d'émissions de CO₂, le gain accessible est de 32% en 2020 puis de 78% à long terme en tenant compte des substitutions d'énergies renouvelables et d'une part de récupération de chaleur.

Pour l'industrie française, le fait d'avoir déjà diminué fortement ses émissions depuis 1990, sous l'influence des crises énergétiques et pour partie via des baisses de production, ne justifie pas l'inaction. Au contraire, notre industrie accuse un retard certain sur l'efficacité de ses équipements électriques, et garde un potentiel économique considérable d'amélioration pour les énergies thermiques. Une conclusion importante du rapport est donc que l'industrie française peut contribuer de façon significative à l'effort national en matière d'efficacité et de lutte contre les changements climatiques.

Sources et méthodes

Les travaux se basent sur des sources officielles, comme les Enquêtes Annuelles sur les Consommations d'Energies de l'Industrie (EACEI). Ces données sont complétées par les données d'associations de branches industrielles (par exemple COPACEL pour les papetiers). A ces statistiques s'ajoutent des rapports de laboratoires scientifiques (Fraunhofer, Berkeley...) ou de groupements industriels ou publics (CEREN).

Le rapport décrit principalement deux horizons : l'échéance 2020 avec les engagements européens de la France, et aussi un horizon de plus long terme pour décrire les potentiels prouvés. Ceux-ci, pourront être mis en œuvre lors des renouvellements des équipements industriels.

Pour estimer le potentiel d'efficacité énergétique, l'étude reconstitue les consommations dans chacune des branches industrielles, en les découpant par usages (par exemple les moteurs électriques, les chaudières,...) et aussi par type d'énergie (électricité, coke, gaz naturel...).

Le potentiel est calculé à « demande constante », en particulier sans délocalisation ni relocalisation. Ceci permet ainsi de débattre des objectifs d'efficacité des branches décrites. D'autres questions, comme celle de la croissance ou de la sobriété, peuvent ainsi être traitées séparément et plus globalement.

En amont des projections de demande, l'étude tient compte des taux de recyclage (aluminium, plastiques), voire de réutilisation pour une partie des emballages en verre et plastiques. Cela peut amener des gains très importants sur la consommation d'énergie par rapport aux procédés de fabrication à partir de matériaux vierges : 5 fois moins pour l'acier, 12 fois moins pour l'aluminium, 2 fois moins pour le papier. Pour le verre et le plastique, le gain est plus limité ce qui peut justifier le développement de filières de verre consigné, qui apportent un gain net plus important.

Une fois les consommations et les recyclages estimés, on leur applique les technologies disponibles. On distingue notamment :

- Les opérations transverses, qui sont les utilisations énergétiques que l'on retrouve dans la majorité des secteurs industriels (moteur, éclairage, pompe, ventilateur...) ;
- Les procédés spécifiques, ainsi, des améliorations importantes ont été réalisées sur les hauts-fourneaux producteurs de fonte et d'acier, qu'il sera possible de mettre en œuvre d'ici à une décennie.

Les économies d'énergie dépendent d'une part des niveaux de performance des installations actuelles (vétusté des installations, niveau de maintenance/rénovation...), mais également des meilleures techniques aujourd'hui disponibles. Pour le long terme, certaines technologies non encore développées au stade industriel, mais où existent des pilotes, ont été prises en compte.

La cogénération et les échanges de chaleur : les usines peuvent produire leur propre électricité en cogénération, c'est-à-dire en produisant simultanément à la chaleur nécessaire pour le procédé. Elles peuvent également revendre leurs excédents de vapeur ou de chaleur récupérés sur leurs effluents. L'étude détaille enfin les potentiels dans quelques branches industrielles fortement consommatrices d'énergie, comme le ciment, l'acier ou le papier-carton.

Principaux résultats de l'étude

Le tableau suivant synthétise les résultats en matière d'économie d'énergie, présentés en énergie finale consommée par l'industrie (en TWh ou Milliards de kWh).

Consommation totale nette (énergie finale)	en TWh			Réduction		
	2008	2020	Long terme	2008	2020	Long terme
Sidérurgie	83,6	69,2	32,9	0%	17%	61%
Autre chimie organique	64,6	56,1	45,4	0%	13%	30%
Agroalimentaire	56,1	45,4	35,6	0%	19%	37%
Papier	43,7	32,9	20,4	0%	25%	53%
Ciment et autres	29,8	25,5	16,1	0%	15%	46%
Chimie minérale	28,2	25,1	21,5	0%	11%	24%
Travail des métaux	22,5	18,4	15,2	0%	18%	33%
Verre	15,3	9,8	3,9	0%	36%	74%
Mat. Construction	14,8	13,0	11,0	0%	12%	26%
Métallurgie non ferreux	14,1	11,4	6,7	0%	19%	52%
Plastiques	12,9	10,4	7,5	0%	19%	42%
Constr. de véhicules	11,2	8,6	6,8	0%	23%	39%
Divers	11,2	9,2	8,0	0%	17%	28%
Engrais	10,1	9,0	7,8	0%	11%	22%
Transformation plastique	9,1	7,3	5,5	0%	20%	40%
Construction élec.	8,7	7,2	6,1	0%	18%	30%
Construction mécanique	6,4	4,8	3,9	0%	24%	39%
Parachimie	5,8	4,4	3,6	0%	25%	37%
Textile	4,8	4,0	3,5	0%	18%	28%
Caoutchouc	4,4	3,7	3,2	0%	16%	26%
Constr. navale et aéronautique, armement	4,0	2,9	2,4	0%	28%	40%
Total industrie	461,3	378,1	267,0	0%	18%	42%

Au total, les économies d'énergie à l'horizon 2020 sont de 18%, et plus de 40% sur le long terme. Les secteurs représentant les gains les plus importants sont principalement les secteurs où le recyclage, voire la réutilisation (verre), peut être mis en œuvre de façon encore plus ambitieuse : sidérurgie, métaux non ferreux, papier-carton...

Par ailleurs, la réutilisation des contenants en verre, voire de certains plastiques à l'échelle régionale est une voie prometteuse. Sur le segment du verre d'emballage, qui représente plus de la moitié en poids des produits verriers, il est possible selon ce scénario de diviser par trois ou plus les quantités consommées, pour un même service rendu, ce qui est considérable.

Le ciment présente lui aussi des gains importants liés à la mise en œuvre de procédés plus efficaces. Pour les secteurs de la chimie et dans une moindre mesure de l'agroalimentaire, la diversité des procédés, et la moindre transparence des données rend la tâche d'estimation des gains plus difficile, il a donc été retenu des gains plus modestes et sans doute conservateurs.

Potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Quant aux émissions, l'étude réalise un chiffrage des gains de manière simplifiée qui ne tient compte que des émissions de CO₂ énergétiques. Au-delà des gains obtenus par l'efficacité énergétique, l'étude tient compte :

- d'une valorisation supplémentaire des matières plastiques en substitution du charbon dans les hauts-fourneaux ou sous forme de carburant ;
- de récupérations de chaleur fatale à basse température par des usines voisines ou pour l'alimentation de bâtiments du tertiaire ou du résidentiel (comme par exemple la récupération de chaleur sur l'usine sidérurgique de Dunkerque) ;
- de l'utilisation d'énergies renouvelables et notamment de biomasse pour la chaleur, en se basant sur les engagements pris par la France auprès de l'Union Européenne au titre de la directive de 2009 (PPI chaleur 2009).

Le potentiel de gain accessible est estimé à 32% en 2020 puis à 78% à long terme (base 2008), dont plus de la moitié est atteint par l'efficacité énergétique.

L'adoption de meilleures pratiques et technologies pour les moteurs électriques

C'est là un chantier très important, car les moteurs représentent plus de 70% des usages de l'électricité dans l'industrie : pompes, ventilateurs, convoyeurs mécaniques, machines-outils.... Les gains majeurs et rentables économiquement résultent de plusieurs actions :

- Un meilleur dimensionnement de la machine car les surdimensionnements entraînent généralement une surconsommation (fonctionnement du moteur en dehors de la zone optimale) ;
- L'utilisation des moteurs les plus efficaces (Normes IE3 puis IE4, disparition des anciens labels EFF 1). Même s'il y a un surcoût à l'achat, ce choix est largement rentable : aujourd'hui en moyenne, le coût d'achat d'un moteur industriel et son entretien représentent moins de 5% du coût complet (les 95% restants étant la facture d'énergie) ;

- L'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'usages les gains sont très importants ;
- Une bonne maintenance : du moteur en lui-même (graissage palier), et de la ligne de transmissions (alignement, tension courroie...).

Au total, le rapport E&E estime le potentiel accessible sur ces usages moteurs au-delà de 35 TWh pour ces seuls usages, dont près de 14 TWh d'ici à 2020, soit la production de deux anciennes tranches nucléaires.

De façon plus large, le CEREN estime à 43% le gisement d'économie sur les opérations transverses, 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.

Evolutions dans la production d'acier

Ce secteur produit déjà près de la moitié de l'acier français à partir de ferraille (recyclage), que l'on transforme majoritairement dans des fours électriques. Le reste est produit dans des hauts-fourneaux qui convertissent le minerai de fer et le charbon. Ces équipements gigantesques ne sont pas changés très souvent, mais les améliorations de plus court terme concernent notamment les moteurs électriques (ventilateurs, concasseurs, transporteurs...). Surtout, à plus long terme, plusieurs voies sont en développement, parmi lesquelles la technologie HIsarna. Ce procédé par bain de fusion n'utilise plus de coke, mais directement du charbon et en bien moins grande quantité. Ce procédé facilite aussi la substitution du charbon par de la biomasse, du gaz naturel ou de l'hydrogène. Un pilote a été démarré en 2010 au Pays-Bas sur ce principe, pour un gain énergétique de 20%, ce qui n'est pas négligeable car il s'agit de l'industrie la plus consommatrice d'énergie en France.

Quant au recyclage des ferrailles dans des aciéries électriques, les meilleures technologies actuellement en service peuvent encore être améliorées de 50% par l'adoption des meilleures technologies existantes. Par ailleurs, un passage du taux de recyclage de l'acier de 50 à 60% sur le court terme, puis à 90% sur le long terme, augmente aussi fortement les économies.

Améliorations dans l'industrie papetière

La France ne produit que 88% de sa consommation de papier et importe le reste. Au-delà de ce bilan négatif, elle importe également 40% de ses besoins en pâte à papier vierge. Elle est à contrario exportatrice nette sur le papier récupéré pour la production de papier recyclé.

L'industrie papetière se décompose en 2 principales activités : la préparation de pâte, et les machines à papier.

Les usines de pâte utilisent comme matière première principalement du bois, au moins en Europe. Les procédés de transformation peuvent être mécaniques ou chimiques. Pour ces deux types de procédés de fabrication de pâte, les usines performantes sont exportatrices d'énergie. Un sous-produit du procédé chimique, la liqueur noire, contient environ 50% du pouvoir calorifique du bois de matière première. On l'utilise comme combustible pour de la cogénération. Pour les procédés mécaniques, la chaleur de friction permet la production de vapeur. A cela s'ajoute l'utilisation éventuelle des écorces du bois utilisé comme combustible de chaudières.

En France, on utilise 60% de papier de récupération pour la fabrication de pâte. Le processus est alors simplifié et moins consommateur en énergie. Il dépend néanmoins de la qualité du papier de récupération et de l'usage final souhaité. Dans

la machine à papier, la pâte est déposée sur une toile, égouttée puis pressée et séchée à travers une série de rouleaux chauffés à la vapeur.

On peut réaliser les principales étapes de la fabrication du papier sur un même site que l'on appelle usine intégrée. La consommation d'énergie est alors réduite, car on transfère les surplus de la fabrication de la pâte vers la machine à papier. On évite aussi une étape de séchage. Par ailleurs, on économise beaucoup d'eau. En Europe, environ 60% de la production se fait dans de tels sites intégrés.

Par comparaison aux meilleures technologies actuelles, un gain important sur les procédés de fabrication de pâte est possible, soit 25% sur les combustibles et 30% sur l'électricité. Pour 2020, étant donné les durées de vie longues des équipements, un gain global de 10% est retenu dans les hypothèses de l'étude.

Pour les machines à papier, les gains sont plus limités à court terme. Néanmoins, la Compression Mécanique de Vapeur (CMV) mise en œuvre pour le séchage devrait pouvoir améliorer fortement les performances énergétiques à long terme (80% de gain en énergie finale par rapport à l'utilisation de vapeur). Une substitution à 60% des besoins thermique par de la CMV est prise en compte à long terme.

Changements de procédés dans les ciments

Dans les statistiques, les cimenteries sont souvent décomptées avec la fabrication de chaux et plâtre. L'étude se concentre sur le ciment, qui représente 60% du secteur. Dans ce secteur, on broie des minéraux (du calcaire) et on le passe au four pour la « décarbonatation ». Le produit obtenu (le « clinker ») est broyé et mélangé à d'autres ingrédients.

Pour ce secteur, le potentiel d'efficacité est considérable. A court terme en se rapprochant des meilleures technologies, principalement en remplaçant les plus vieux fours, qui fonctionnent par « voie humide » ou « semi-humide », par des procédés « voie sèche » qui consomment nettement moins d'énergie. Les ateliers de broyages et autres équipements électriques peuvent également être largement optimisés. Au total, les cimenteries françaises peuvent être nettement améliorées, car elles consomment 30% de plus que les meilleures installations dans le monde.

Mais ici la nouveauté la plus prometteuse est l'arrivée prochaine de « nouveaux liants », qui sont produits à basse température, par exemple dans un four à 700°C (au lieu de 1400°C) ou même dans un autoclave et qui remplacent le clinker : Novacement, une start-up issue de Imperial College à Londres ; Celitement à l'Université de Karlsruhe, ou Calera en Californie. Ces procédés existent déjà à l'état de pilote ils ont donc été intégrés dans les potentiels de long terme de l'étude. On pourrait voir rapidement du « ciment à basses émissions » sur les marchés européens de la construction, pour une baisse de 50% des consommations d'énergie et au-delà pour les émissions de GES de la tonne de liant.

1. Introduction

Pour débattre de prospective énergétique avec l'industrie ou avec les pouvoirs publics en charge des politiques, les questions et le cadre du débat diffèrent. Selon la question posée, on peut vouloir dialoguer avec un industriel, une branche entière, voire les représentants du pays ou de l'Union Européenne. On peut vouloir mesurer la contribution de l'industrie en isolant l'efficacité énergétique, ou en la combinant avec l'effet des énergies renouvelables d'une part, de la sobriété de l'autre.

Dans le présent travail, on a considéré avant tout l'efficacité énergétique le plus isolément possible puisque la production est peu ou prou considérée comme constante. Cela facilitera le dialogue avec l'industrie, qui préfère toujours raisonner en « énergie spécifique » sans s'engager sur des valeurs absolues de production. Par définition, l'industriel ignore sa production à moyen et long terme, mais il souhaitera juger de sa position relative par rapport à ses concurrents ou à d'autres secteurs de l'économie.

Des biais systématiques dans la projection

De telles discussions sont cependant dominées par deux tendances ou biais, d'abord un gonflement des prévisions, d'autre part une surestimation des difficultés de la maîtrise de l'énergie :

- L'industriel va souvent se « border » sur les prévisions, en choisissant toujours des chiffres optimistes de production et pessimistes sur l'évolution des technologies. Les branches industrielles ont des réflexes encore plus accentués, et les pouvoirs publics suivent en général ;
- Les difficultés de la maîtrise de l'énergie sont, eux, plus objectives. Les améliorations de procédés sont très liés aux investissements industriels, qui sont souvent incertains : contraintes financières, réglementaires, décisions de groupes industriels, soutiens publics variables, prévisions de production aléatoires... Seules les obligations réglementaires peuvent donner une certitude, mais ce n'est bien sûr pas l'option préférée des industries.

On peut noter que les états ont les mêmes réflexes. Ils donnent toujours des prédictions particulièrement pessimistes sur leurs consommations, un cas typique étant les projections « laisser-faire » de l'AIE où l'on ne tient même pas compte des politiques déjà décidées et crédibles. Ces exercices sont intéressants à titre de comparaison internationale, mais ils risquent d'être interprétés ou cités abusivement comme étant des prévisions, ce qui pollue le débat sur les potentiels d'économie d'énergie.

Les ONG, elles, s'intéressent avant tout à l'intégrité environnementale des objectifs climatiques, et peuvent être aveugles aux contraintes économiques ou aux déterminants internes aux industries. D'où parfois un dialogue difficile.

Notre avenir à tous...

Dans ce débat une première étape est de reconnaître les contraintes de chacun, et aussi son existence. De manière générale, les industriels ont accepté la légitimité des grandes ONG à pousser les objectifs climatiques et énergétiques. Les discussions particulières comme celle de l'allocation des quotas carbone montrent qu'elles tentent de se défaire sur les

concurrents ou les autres branches, ou encore qu'elles contestent des points techniques des règles imposées. Mais, contrairement à ce qui se passe aux Etats-Unis, elles ne contestent plus les objectifs collectifs d'efficacité, de renouvelables ou de lutte contre les changements climatiques.

Une autre étape de ce cheminement est l'acceptation que la contrainte climatique, malgré son caractère radical, ne supprime pas l'avenir des entreprises. Une difficulté du dialogue provient parfois d'une vision très (trop) partagée en France dans les administrations ou dans certaines associations, d'une disparition totale de l'industriel lourde, sous les coups de la mondialisation et de la délocalisation.

Un dialogue fructueux ne peut pourtant se produire si les interlocuteurs se nient eux-mêmes ou n'imaginent pas leur avenir. Dans cette optique, une étape très intéressante de reconstitution d'une vision « positive » de l'avenir a été l'étude « Scénarios de transition vers un monde économe en carbone en 2050 : quels enjeux pour l'industrie ? » (CIRED, LEPII, & Enerdata, 2008a) lancée par l'association d'industriels EPE et l'institut IDDRI, et réalisée par les laboratoires d'économie de l'énergie du LEPII et CIRED ainsi qu'Enerdata. Même si on peut critiquer les résultats et les méthodes de la projection, qui ont aussi pris avec la crise un coup de vieux, on retiendra la possibilité du dialogue autour de la représentation prospective.

Court terme, long terme...

Souvent dans les études prospectives, l'horizon de référence souvent employé comporte deux dates : 2020 et 2050.

- 2020 c'est l'objectif de l'Union Européenne pour les renouvelables, les émissions de GES, et pour une partie des règlements sur les économies d'énergie ;
- 2050 c'est l'horizon de la division par quatre des émissions décidée par la France et par l'Union Européenne.

Ces jalons des objectifs climatiques sont pratiques pour symboliser le « court terme » et le « long terme ». Cependant, les potentiels décrits ici ne coïncident pas nécessairement avec la date d'échéance souvent employée. C'est pourquoi nous avons choisi de considérer d'une part le 2020, qui est l'horizon légal des objectifs de l'UE et d'une éventuelle seconde période d'engagement de Kyoto, et d'autre part la dénomination « long terme » et non 2050.

En effet, beaucoup des économies « à court terme » sont d'abord définies par un temps de retour (par exemple 3 ans pour le CEREN). On peut considérer que d'ici à 2020 ces économies de court terme sont tout à fait accessibles. Dans de nombreux cas, les économies sont à un horizon de moins de dix ans.

A l'inverse, d'autres économies dites « de long terme » peuvent se produire avant 2020 si l'appareil industriel est renouvelé dans l'intervalle. Ainsi, les nouveaux procédés dans les industries lourdes pourront être mis en œuvre bien avant 2050.

2. Méthodologie

2.1. Reconstitution des données de consommations

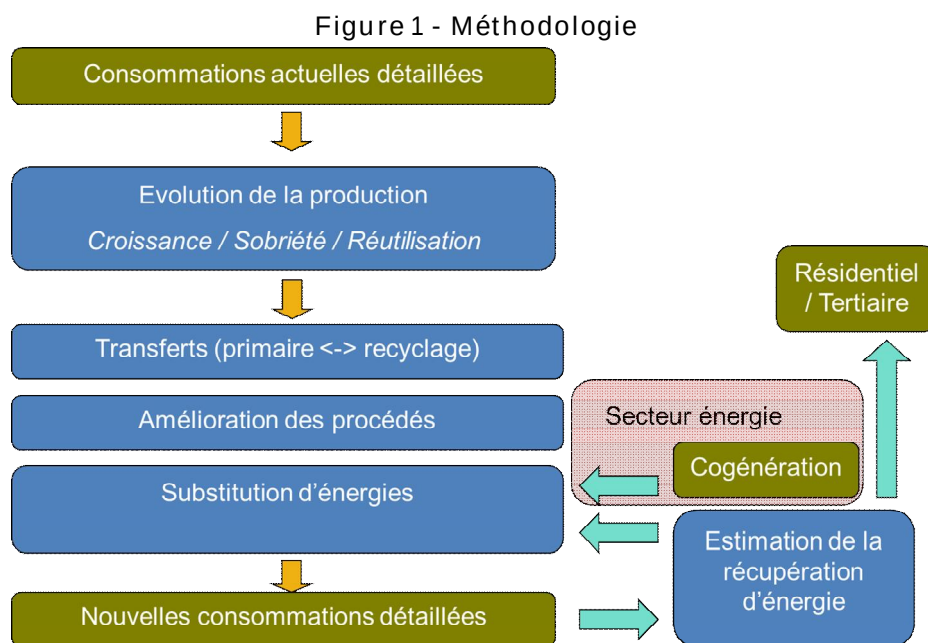
La première étape de la modélisation consiste à reconstituer les données de consommation de l'industrie, de manière la plus détaillée possible. Au final, la reconstitution obtenue se fait selon les découpages suivants :

- Par branche industrielle, voire si possible, par sous-branche (par exemple, pour la sidérurgie, Haut-fourneau et aciérie électrique)
- Par type d'énergie
 - o Chaleur
 - Charbon
 - Gaz
 - Fioul
 - GPL
 - Biomasse
 - Déchet
 - Vapeur
 - o Electricité
- Par usage
 - o Pour la chaleur
 - Chauffage des locaux
 - Fabrication
 - Production d'électricité
 - Matières premières
 - o Pour l'électricité
 - Force motrice
 - Usage thermique
 - Autres

Les sources de données sont principalement les résultats des Enquêtes Annuelles sur les Consommations d'Energies de l'Industrie (EACEI). Ces données peuvent être complétées par les données d'associations de branche industrielles (par exemple COPACEL pour les papetiers). EACEI intègre dans sa comptabilité les combustibles qui sont utilisés comme matière première (exemple : Coke pour la sidérurgie, fioul pour la pétrochimie...).

2.2. Détermination des potentiels d'économies d'énergie

La Figure 1 synthétise le principe du modèle.



2.3. Evolution de la production

Une fois élaborées les données initiales de consommation, les hypothèses de projection de la production dans chaque branche sont définies. Ces évolutions de production reflètent l'évolution de la société : évolution de la demande (quantité, taille...), délocalisation/relocalisation de la production... Ce domaine de prospective demande donc à ouvrir sur la vision de société à moyen et long terme ce qui dépasse le cadre de l'étude, il a donc été retenu que l'étude se fait à « demande constante », et sans délocalisation ni relocalisation. Ceci permet ainsi de débattre des objectifs d'efficacité « pure », les questions de croissance ou de sobriété, ou encore la substitution des sources d'énergie étant traitées séparément et plus globalement.

Reste que l'évolution de production par branche industrielle est néanmoins possible dans le cas de réutilisation (réutilisation de bouteille de verre par exemple).

2.4. Recyclage

Une fois les volumes de productions définis, les taux de recyclages sont déterminés. Dans chaque branche où le recyclage est possible et apporte un gain, les taux de recyclage sont pris en compte.

2.5. Réutilisation

Dans le cas du verre, la réutilisation à l'échelle régionale des contenants semble une voie prometteuse pour diviser les besoins de produits vierges et aussi pour substituer certains contenants plastiques, voire carton ou acier (boissons, yoghourts, lait, conserves...). Une telle évolution est techniquement et politiquement faisable sur une part significative des usages, et a un impact non négligeable sur les secteurs concernés. Elle est déjà pratiquée à une échelle réduite : bière en Allemagne, Danemark, Belgique (...), eaux minérales en Suisse, bières du secteur cafés-hôtels en France, vins dans certaines régions.

De même, une part importante des plastiques d'emballage peut être remplacé par des emballages réutilisables, à la fois par des flacons PET réutilisables, mais aussi par des flacons en verre (voir §4.2).

2.5.1. Amélioration des procédés et des usages transverses des branches

Une fois ces premières étapes déterminées, les gains d'efficacité des procédés industriels sont appliqués. Ces potentiels d'économie d'énergie dépendent d'une part des niveaux de performance des installations actuelles (vétusté des installations, niveau de maintenance/rénovation...), 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 pour les détails les chapitres sectoriels). 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 de « utilités » dans certaines sources ;
- Les procédés spécifiques : il s'agit ici particulièrement des procédés des Industries Grosses Consommatrices d'Energie (IGCE).

2.5.2. Les économies dans le système

Certains gains énergétiques nécessitent la substitution d'énergie. Ainsi, certains usages de l'électricité peuvent 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 pour les opérations de concentration peut être qualifié d'électricité performante. 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).

La modélisation des autres substitutions (gaz, biomasse, solaire...) aurait plus d'importance dans une étude complète, avec objectif de réduction des GES, mais nécessite également une vision globale des énergies dans les autres secteurs (transport, résidentiel, tertiaire, énergie) pour pouvoir déterminer la répartition optimale des ressources. L'augmentation du recours aux énergies renouvelables n'est donc pas modélisée dans la présente étude. Un calcul des émissions de CO₂ est néanmoins effectué pour juger en premier lieu de l'impact sur le climat. Les valeurs d'émissions obtenues sont donc partielles, puisqu'elles seraient diminuées aussi par le recours aux ENR.

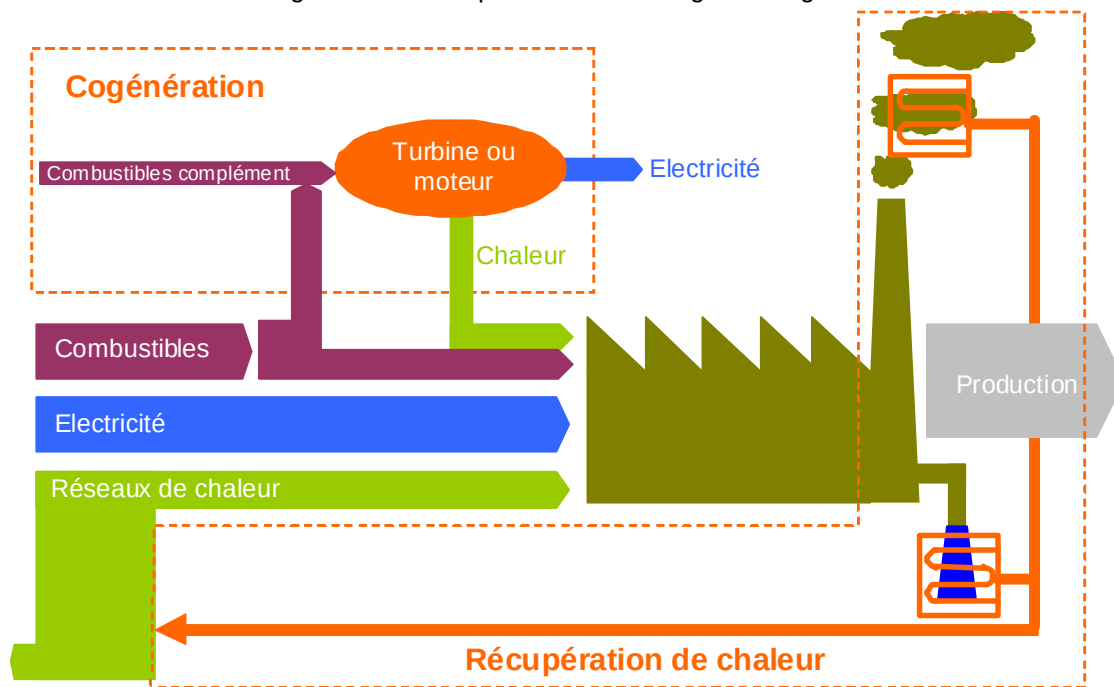
Dans cette étude, il est également proposé une itération supplémentaire dans le calcul, de façon à estimer le gisement restant de chaleur récupérable, une fois appliquées les meilleures technologies disponibles. De même, l'alimentation des industries en chaleur à basse et moyenne température permet d'envisager une substitution des moyens de production d'électricité classiques par de la cogénération.

Ces deux potentiels supplémentaires ont été identifiés puis quantifiés de façon simplifiée :

- 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 chaleurs 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, pourrait aussi amener un bilan carbone positif.

Ces deux potentiels sont illustrés sur la figure suivante :

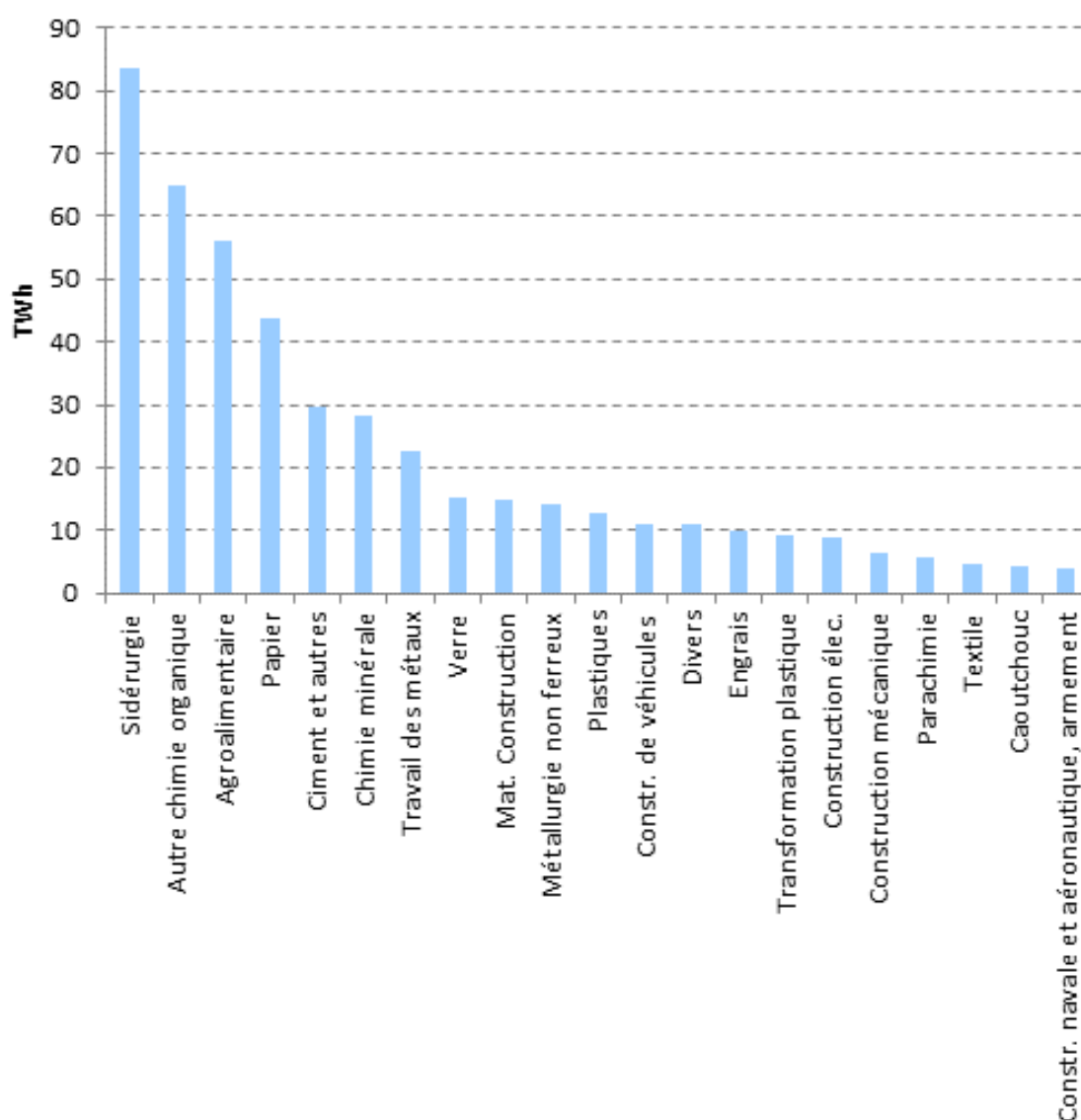
Figure 2 – Récupération d'énergie et cogénération



Source : E&E

3. Bilan actuel de la consommation d'énergie dans l'industrie

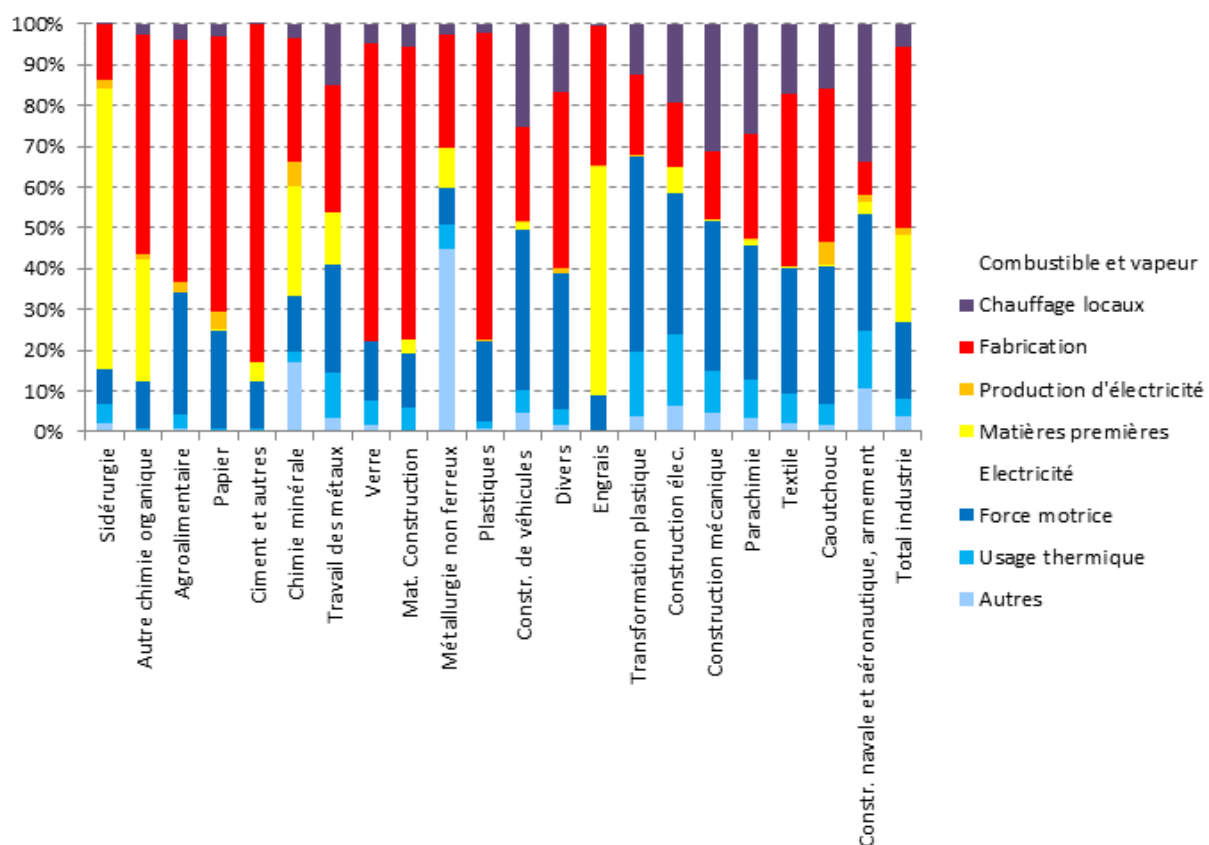
Figure 3 – Consommation nette d'énergie par secteur industriel



Remarque : les secteurs sont classés par ordre décroissant de consommation d'énergie

Source : EACEI

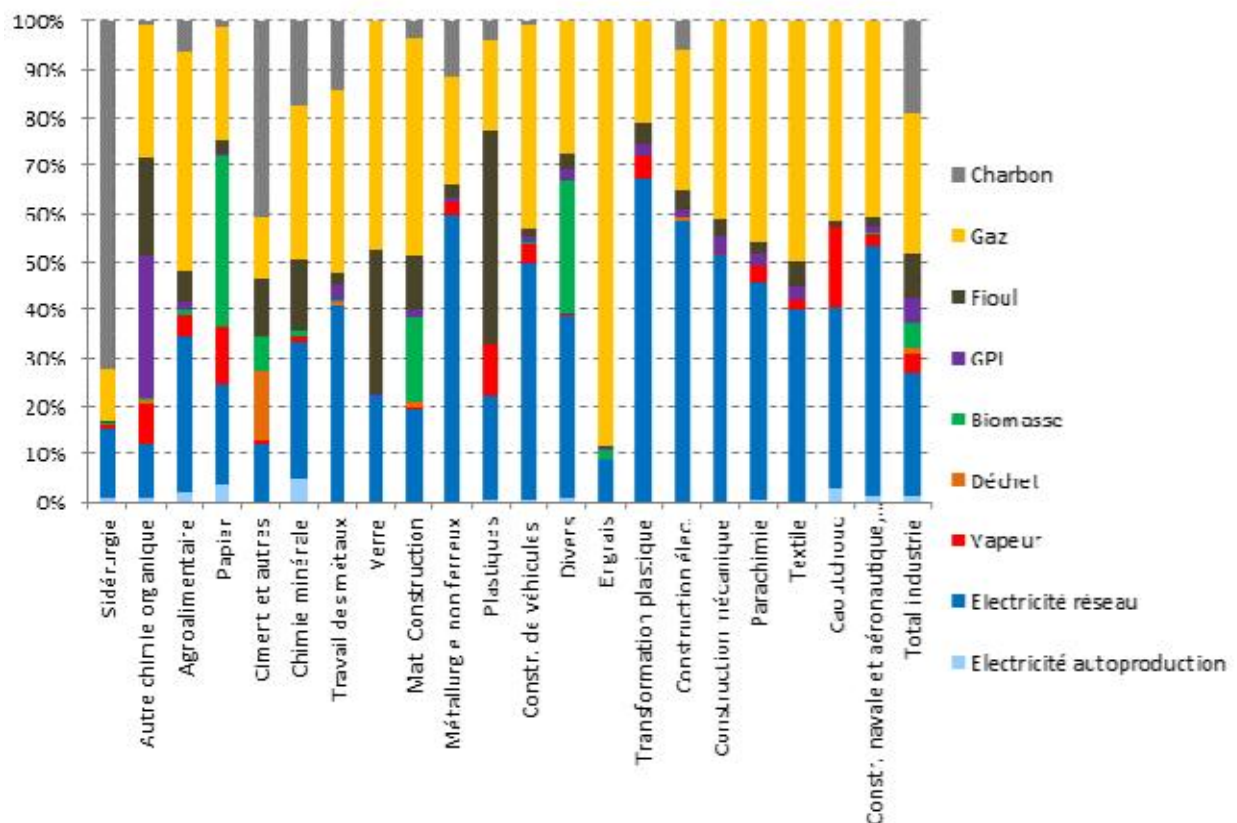
Figure 4 – Consommation d'énergie par secteur industriel - Répartition par usage



Remarque : les secteurs sont classés par ordre décroissant de consommation d'énergie

Source : EACEI

Figure 5 – Consommation d'énergie par secteur industriel - Répartition par type d'énergie



Remarque : les secteurs sont classés par ordre décroissant de consommation d'énergie

Source : EACEI

4. Hypothèses retenues

4.1. Projection de la demande

Pour l'ensemble des secteurs de l'industrie, la demande finale a été considérée constante. Ce choix d'hypothèse est un compromis entre les hypothèses de hausse de la consommation et celles de décroissance. Il impose aussi l'arrêt de délocalisation d'industrie, et ne prend pas en compte d'éventuelles relocalisations. Il permet de regarder dans un premier temps les leviers techniques. Une étude complémentaire, allant au-delà de la connaissance technique du secteur industrielle est donc nécessaire pour travailler sur des hypothèses alternatives : nécessité d'imaginer les modes de vie et de société, à la fois locale et globale.

Pour des raisons de disponibilité statistique et de compromis de modélisation, l'année de base retenue a été 2008. Cette année a vu se dérouler le tout début de la crise mondiale (qui a démarré à la fin de l'automne). Les productions sont donc supérieures à celles des années qui ont suivi. A l'inverse, la période qui avait précédé avait été en croissance exceptionnelle, ce qui peut aussi ne pas être représentatif.

4.2. Réutilisation

Verre consigné

La discussion porte sur le remplacement des emballages de liquides (sodas, lait, jus de fruit, eau) et d'aliments (appertisés, etc.), par des emballages retournés et –sans doute- consignés.

En pratique il s'agit de bouteilles, flacons et bocaux en verre, regroupés en caisses plastiques, ou bois si cela était praticable. Des récipients de polyéthylène, PET ou métal peuvent aussi avoir un tel retour.

Ceci suppose quelques conditions :

- Les flacons sont normalisés au moins par région ou par groupe de région, voire au niveau européen ;
- Les camions de retour de livraison prennent en charge les emballages consignés sans surcroît de distance ;
- Des centres de remplissage ou d'éclatement sont créés dans chaque grande région, qui peuvent être liés aux circuits de distribution, aux coopératives de production, aux producteurs artisanaux ou industriels ;
- L'économie réalisée sur l'énergie, les émissions ou d'autres facteurs est valorisée tandis qu'une taxation frappe les récipients issus d'autres régions ou hors normes. Pour ces derniers il peut même s'agir d'une interdiction.

Les gains et les pertes à considérer sont de plusieurs ordres, qui concernent d'une part l'industrie des flaconnages (verriers, boîtes alu ou acier le cas échéant), d'autre part les conséquences sur l'organisation de l'approvisionnement de l'agro-alimentaire (relocalisation des produits, trajets retour...). Les taux moyens de réutilisation sont présentés en hypothèses (l'étude ADEME suggère de 8 à 30 utilisations).

Les conséquences de la réutilisation sont de plusieurs ordres :

- Moindre besoin en matériaux de base, suivant les ratios proposés ;
- Une organisation des retours est nécessaire, mais peut être optimisée (ADEME, 2008) ;
- Consommation unitaire supérieure due au poids supérieur du verre consigné sur le verre perdu ou le PET (selon (ADEME, 2008) et (Pilz, Brandt, & Fehringer, 2010)).

Au total, les conséquences sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1 - Hypothèses de réutilisation / consigne des emballages en verre

		2010	2020	2030	2040	2050
Marché	Mt	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
Taux de verre consigné		1%	10%	35%	50%	80%
Nombre de réutilisations		10	5	8	12	20
Ratio de poids		1,5	1,4	1,3	1,25	1,2
Tonnage enlevé	Mt	0,0	0,4	1,3	1,8	2,9
Tonnage ajouté	Mt	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2
Emballages verre restant	Mt	3,6	3,4	2,6	2,0	0,9

Source : E&E 2011

Sur le segment du verre d'emballage, qui représente plus de la moitié en poids des produits verriers, il est possible selon ce scénario de diviser par trois ou plus les quantités consommées, pour un même service rendu. Ceci est considérable.

Substitution des plastiques d'emballage

Une possibilité –non encore mise en œuvre dans le chiffage- sera de substituer par du verre une partie des emballages plastiques. Le poste « bouteilles boisson » serait remplacé essentiellement par 12,8 fois plus de verre, par de l'acier et de l'aluminium. Le poste « autres emballages rigides » par une combinaison d'acier, de bois, de carton, de verre.

Actuellement le plastique s'impose dans un contexte d'euphorisation des unités de production et de faible coût des matières premières. La proposition suivante combine réutilisation des plastiques, transfert au verre consigné :

Tableau 2 - Hypothèses d'évolution sur les emballages plastiques (Poids en %)

		Répartition actuelle	Réutilisation ou consigne		Transfert au verre consigné	
			%	Part	%	Part
Petits emballages	%	3%			30%	1%
Boissons	%	5%			50%	2%
Autres bouteilles	%	3%			30%	1%
Autres emballages rigides	%	13%	30%	4%		
Films étirables	%	4%				
Sachets	%	1%				
Autres emballages flexibles	%	11%	10%	1%	10%	1%
Part dans total plastique	%	40%		5%		5%
Part dans total emballage	%	100%		12%		13%

Source : E&E d'après Pilz, Brandt, Fehringer

Cela correspond à une diminution de 25% des plastiques d'emballage, sans compter les gains possibles de sobriété (suppression des emballages superflus) ce qui est considérable pour un matériau qui a actuellement le vent en poupe.

Si nous considérons uniquement le poste « boissons » et petits contenants (yoghourts...), un programme de substitutions prendrait la forme suivante :

Tableau 3 - Hypothèses de substitution des flacons plastiques

		2010	2020	2030	2040	2050
Tonnage plastique substitué	Mt	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Part plastiques substituée	%	0,0%	1,1%	2,1%	3,7%	5,3%
Tonnage plastique substitué	Mt	0	0,04	0,09	0,15	0,21
Réutilisation verre		0	5	8	12	20
Ratio poids Verre consigné/PET		0	15	12	10	8
Tonnage verre supplémentaire	Mt	0	0,13	0,13	0,12	0,09

Source : E&E

Le tonnage plastique substitué l'est au départ par un tonnage de verre supérieur. Ceci est dû aux hypothèses conservatrices sur le nombre de cycle des bouteilles verres en début de période (verre non normalisé, habitudes, coûts et organisation). On a aussi considéré que le verre était au départ nettement plus lourd puis que ce paramètre s'améliore.

Pour ce calcul, on prend pour hypothèse que le reste du bilan (transports, étiquetage, logistique retour) s'équilibre entre le contenant PET et le verre consigné, grâce à la proximité des centres d'embouteillage, etc. Ceci pourra faire l'objet d'une étude plus poussée, en particulier pour montrer les bénéfices d'un éclatement régional des centres d'embouteillage et de conserveries, un raisonnement qui a la même logique pour le verre réutilisé.

Le tableau suivant part de l'hypothèse de 30% des emballages rigides et 10% des emballages flexibles faisant l'objet d'une telle réutilisation,

Tableau 4 - Hypothèses de réutilisation des emballages rigides en plastique (caisses, etc...)

		2010	2020	2030	2040	2050
Marché	%	0	1%	2%	4%	5%
Nombre de réutilisations		0	5	7	9	12
Ratio de poids		0	3	2,5	2	1,8
Tonnage substitué	Mt	0	0,04	0,08	0,16	0,20
Tonnage ajouté	Mt	0	0,02	0,03	0,04	0,03
Gain net	Mt	0	0,02	0,05	0,13	0,17

Source : E&E

Bilan net des plastiques

Les deux opérations donnent un bilan net de :

Tableau 5 – Bilan sur les plastiques

Bilan total sur les plastiques		2010	2020	2030	2040	2050
Economie sur la production	Mt	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4
Demande résultante	Mt	4,0	4,0	3,9	3,8	3,7

Source : E&E

Cette petite simulation montre que les conditions sont nombreuses (sans doute plus que pour le verre) pour réussir une substitution massive du plastique. L'estimation des gains et des contraintes d'une telle politique mérite certainement d'être précisée, de même que les bénéfices liés à l'emploi, à la production plus localisée, etc.

4.3. Recyclage

Les taux de recyclage permettent bien souvent, en plus de préserver les ressources naturelles de matières premières, une économie important d'énergie, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 6 – Gain énergétique actuel du recyclage

	<u>Energie produit primaire</u> <u>Energie produit recyclé</u>
Acier	5
Aluminium	12
Papier-Carton	2
Plastique	Selon configuration
Verre	1,3

Remarque : ratios en énergie finale

Source E&E d'après BREF

Les recyclages suivants ont été retenus :

Tableau 7 – Taux ultimes de recyclage

Matière	Taux ultime 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 2011

Pour le verre le recyclage apporte au final peu en termes énergétiques 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. Pour les plastiques la situation est détaillée au §4.3.

Le Tableau 8 montre les taux actuels de gain énergétique du recyclage.

Tableau 8 – Taux de recyclage modélisés

	Actuel	2020	2050
Acier	49%	60%	90%
Aluminium	30%	50%	86%
Papier-Carton	60%	75%	80%
Plastique	6%	15%	30%

Source : E&E

Les métaux permettent de très haut 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 dépend 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, leur 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 telle. 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 moindre 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.

4.4. Les rythmes de mise en œuvre

Pour les opérations transverses, il est considéré que l'ensemble des actions ayant un retour sur investissement inférieur à 3 ans étaient réalisées sur le court terme. D'autres critères, plus complexes à quantifier, pourraient être mis en œuvre comme la taille des entreprises, la part de la facture énergétique dans le chiffre d'affaire, la formation ou le développement de compétence dans l'optimisation énergétique...

Pour les gains complémentaires concernant les procédés spécifiques, les choix ont été faits en fonction de la maturité des technologies, et des rythmes de rénovations usuels.

5. Résultats globaux

5.1. Economie sur les secteurs transversaux

Avant d'étudier quelques secteurs industriels de manière détaillée, cette partie présente les économies faites sur les usages transverses, c'est-à-dire des usages de l'énergie que l'on retrouve dans chaque branche. Ce travail se base principalement sur l'étude récente du CEREN (CEREN, 2010) et en reprend 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. C'est cette dernière que nous considérons comme accessible, puisque les fabricants de moteurs diffusent déjà ces modèles.

5.1.1. Description des gains sur les usages transverses

5.1.1.1. *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 là 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...

5.1.1.2. *Production de chaleur*

La production 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.

5.1.1.3. *Transport et distribution de chaleur*

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

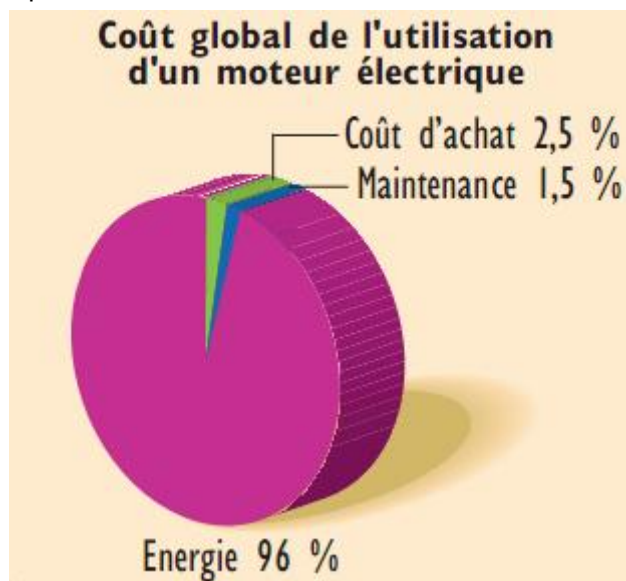
5.1.1.4. *Moteurs électriques*

C'est un chantier très important, car comme le montre la Figure 4, les moteurs représentent plus de 70% des usages de l'électricité dans l'industrie. Des gains très importants sont possibles résultants de plusieurs actions :

- bien dimensionner la machine que l'on souhaite entrainer, les surdimensionnements entraînent 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 surcôt 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 6) ;
- 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 ;

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

Figure 6 - Répartitions des coûts d'utilisation d'un moteur électrique



Source : Guide technique Motor Challenge

5.1.1.5. Fluide : Pompage, air comprimé, ventilation

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

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

5.1.1.6. 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.

5.1.1.7. Production de froid

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

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

5.1.1.8. 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.

5.1.2. Gisements retenus des opérations transverses

Le CEREN a estimé les potentiels de gisements « techniquement réalisable » dans l'industrie française (cf. Tableau 9).

Le terme réalisable qualifie les actions qui ont déjà été mises en place industriellement.

Tableau 9 – Estimation CEREN du gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses en 2007

En 2007	Total industrie	Opération transverses de l'industrie			
	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 10 – Détail du potentiel d'économie d'énergie dans les opérations transverses en 2007

	Consommation actuelle		Potentiel d'économie			Potentiel d'économie		
	TWh	Part	Total			Temps retour < 3 ans		
			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. 30% du potentiel total est retenu.

Source : E&E, d'après CEREN 2010

Lecture Tableau 10, 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 l'étude, 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).

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.

5.2. Consommation totale d'énergie de l'industrie

Au final, les gains estimés en énergie finale sont de l'ordre de 18% à court terme (2020) et plus de 40% sur le long terme.

Tableau 11 – Evolution des consommations d'énergies par secteur

Consommation totale nette (énergie finale)	en TWh			Réduction		
	2008	2020	Long terme	2008	2020	Long terme
Sidérurgie	83,6	69,2	32,9	0%	17%	61%
Autre chimie organique	64,6	56,1	45,4	0%	13%	30%
Agroalimentaire	56,1	45,4	35,6	0%	19%	37%
Papier	43,7	32,9	20,4	0%	25%	53%
Ciment et autres	29,8	25,5	16,1	0%	15%	46%
Chimie minérale	28,2	25,1	21,5	0%	11%	24%
Travail des métaux	22,5	18,4	15,2	0%	18%	33%
Verre	15,3	9,8	3,9	0%	36%	74%
Mat. Construction	14,8	13,0	11,0	0%	12%	26%
Métallurgie non ferreux	14,1	11,4	6,7	0%	19%	52%
Plastiques	12,9	10,4	7,5	0%	19%	42%
Constr. de véhicules	11,2	8,6	6,8	0%	23%	39%
Divers	11,2	9,2	8,0	0%	17%	28%
Engrais	10,1	9,0	7,8	0%	11%	22%
Transformation plastique	9,1	7,3	5,5	0%	20%	40%
Construction élec.	8,7	7,2	6,1	0%	18%	30%
Construction mécanique	6,4	4,8	3,9	0%	24%	39%
Parachimie	5,8	4,4	3,6	0%	25%	37%
Textile	4,8	4,0	3,5	0%	18%	28%
Caoutchouc	4,4	3,7	3,2	0%	16%	26%
Constr. navale et aéronautique, armement	4,0	2,9	2,4	0%	28%	40%
Total industrie	461,3	378,1	267,0	0%	18%	42%

Source : E&E

Les secteurs représentant les gains les plus importants sont principalement les secteurs où le recyclage, voire la réutilisation (verre) peut être mis en œuvre de façon encore plus ambitieuse : sidérurgie, métaux non ferreux, papier-carton... Le ciment présente lui aussi des gains importants liés à la mise en œuvre de procédés plus efficaces. Pour les secteurs de la chimie et dans une moindre mesure de l'agroalimentaire, la diversité des procédés, et la moindre transparence des données rend la tâche d'estimation des gains plus difficile, il a donc été retenu des gains plus modestes et sans doute conservateurs.

Tableau 12 – Evolution des consommations de chaleur par secteur

Consommation chaleur (énergie finale)	en TWh			Réduction		
	2008	2020	Long terme	2008	2020	Long terme
Sidérurgie	71,4	57,9	21,4	0%	19%	70%
Autre chimie organique	57,3	49,6	39,5	0%	13%	31%
Agroalimentaire	37,7	28,5	22,2	0%	24%	41%
Papier	34,2	24,9	12,5	0%	27%	63%
Ciment et autres	26,2	22,4	13,8	0%	14%	47%
Chimie minérale	19,8	17,7	15,7	0%	11%	21%
Travail des métaux	13,3	10,0	8,4	0%	25%	36%
Verre	11,9	6,9	2,7	0%	42%	77%
Mat. Construction	11,9	10,5	8,9	0%	12%	25%
Métallurgie non ferreux	5,7	4,4	3,3	0%	22%	42%
Plastiques	10,1	8,1	6,0	0%	20%	41%
Constr. de véhicules	5,7	3,7	2,8	0%	35%	50%
Divers	6,9	5,6	5,4	0%	19%	22%
Engrais	9,2	8,2	7,3	0%	11%	21%
Transformation plastique	3,0	2,1	1,7	0%	31%	44%
Construction élec.	3,6	2,7	2,6	0%	25%	28%
Construction mécanique	3,1	1,9	1,5	0%	39%	52%
Parachimie	3,2	2,1	2,0	0%	32%	37%
Textile	2,9	2,3	2,2	0%	21%	24%
Caoutchouc	2,7	2,2	2,2	0%	16%	18%
Constr. navale et aéronautique, armement	1,9	1,1	0,9	0%	44%	49%
Total industrie	341,7	272,9	183,2	0%	20%	46%

Source : E&E

Tableau 13 – Evolution des consommations brutes d'électricité par secteur

Consommation électricité brute (énergie finale)	en TWh			Réduction		
	2008	2020	Long terme	2008	2020	Long terme
Sidérurgie	12,9	11,9	11,7	0%	8%	9%
Autre chimie organique	8,0	7,2	6,6	0%	10%	18%
Agroalimentaire	19,6	18,0	14,5	0%	8%	26%
Papier	11,2	9,1	8,8	0%	19%	21%
Ciment et autres	3,6	3,0	2,3	0%	17%	36%
Chimie minérale	9,9	8,9	7,3	0%	10%	26%
Travail des métaux	9,3	8,5	6,8	0%	9%	27%
Verre	3,4	2,9	1,2	0%	15%	64%
Mat. Construction	2,9	2,6	2,1	0%	11%	28%
Métallurgie non ferreux	8,4	7,0	3,5	0%	17%	59%
Plastiques	2,8	2,3	1,5	0%	18%	46%
Constr. de véhicules	5,6	5,0	4,0	0%	10%	28%
Divers	4,4	3,7	2,7	0%	15%	37%
Engrais	0,9	0,8	0,6	0%	14%	37%
Transformation plastique	6,1	5,2	3,8	0%	15%	38%
Construction élec.	5,1	4,5	3,5	0%	13%	31%
Construction mécanique	3,3	2,9	2,4	0%	11%	28%
Parachimie	2,7	2,3	1,7	0%	15%	37%
Textile	1,9	1,7	1,3	0%	13%	33%
Caoutchouc	1,8	1,6	1,2	0%	15%	35%
Constr. navale et aéronautique, armement	2,2	1,9	1,5	0%	13%	32%
Total industrie	125,8	110,7	88,8	0%	12%	29%

Remarque : consommation brute d'électricité comprend la consommation totale des équipements de l'usine (y compris l'électricité autoproduite)

Source : E&E

Pour l'électricité, les gains totaux sont plus faibles, alors que le potentiel sur les seules opérations transverses affichent un gain de 30% (voir Tableau 9), l'estimation finale annonce seulement 29% sur le long terme. Deux raisons à cela, d'une part, les évolutions de productions retenues, à savoir l'augmentation des filières de recyclage qui sont généralement des filières électriques (acier en particulier), d'autre part, la substitution d'électricité aux combustibles dans certaines applications telles que four et séchage (Voir compression mécanique de vapeur et four à induction dans le §2.2).

6. Emissions de CO₂

6.1. Méthode

L'étude se concentre sur les économies d'énergie, néanmoins, un chiffrage de la réduction des émissions de CO₂ est réalisé ici de manière simplifiée. Une étude supplémentaire permettrait d'approfondir et probablement d'améliorer ces potentiels (potentiel ENR, potentiel cogénération en particulier).

Différentes actions sont mises en œuvre pour estimer le potentiel de réduction d'émissions de CO₂ :

- Valorisation des plastiques : en plus du recyclage mécanique de 30% de plastique consommé, il est estimé que sur le long terme 30% supplémentaires peuvent être récupéré et réinjecté dans l'industrie : plastiques, mais aussi pétrole pour les transports ou encore injection directe dans un haut-fourneau. Le gain n'est pas négligeable –le bilan est nettement meilleur que la valorisation dans un incinérateur- mais il est moindre que pour le recyclage mécanique (sidérurgie, plastiques, etc.). En 2020, seul 10% sont mis en œuvre. Ici encore le potentiel est estimé de façon simplifiée ;
- Récupération de chaleur (voir §8.1) : il s'agit de récupération de chaleur fatale récupérée sous forme de chaleur basse température (réseau basse température). Cette chaleur récupérée peut être utilisée par des usines voisines ou alimenter des bâtiments du tertiaire ou du résidentiel (comme par exemple la récupération de chaleur sur l'usine sidérurgique de Dunkerque). Pour l'étude il est considéré que ce gisement accessible de la chaleur récupérée n'alimente que l'industrie. De façon très conservatrice, la valorisation représente 2 TWh en 2020 et 9 TWh sur le long terme. Cette récupération d'énergie est considérée comme une substitution d'énergie (combustible substitué par du réseau de chaleur) ;
- Substitution d'énergie renouvelable ou d'énergie moins carbonée : Aucune étude spécifique n'a été réalisée sur ce point, il est pris comme base de calcul l'estimation faite dans la PPI chaleur 2009 (MEEDDM, 2010). On considère qu'en 2020, environ 5000 ktep d'énergie renouvelable « chaleur », principalement biomasse (mais aussi géothermie et solaire) pourrait être mobilisées par l'industrie (la projection long terme considère un doublement, soit 10000 ktep). Pour l'électricité, de manière simplifiée, il n'est pas considéré de modification de contenu carbone. Ces hypothèses sont très normatives et devront être complétées pour valoriser une part plus importante du gisement des renouvelables.

Les facteurs d'émissions retenus sont ceux issus du GIEC (« Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre »). La biomasse est considérée non émettrice. Les détails des facteurs d'émissions retenus sont en annexe §10.2.

6.2. Résultats

Tableau 14 – Evolution des émissions de CO₂ d'énergies

	Consommation d'énergie (finale)			Emissions CO ₂				
	TWh			Mt CO ₂				
	2008	2020	long terme	2008	2020	long terme		
Calcul efficacité	455	373	262	90,6	74,0	-18%	47,7	-47%
+ usage énergétique plastique	455	373	262	90,6	72,7	-20%	44,0	-52%
+ Récupération chaleur fatale	455	373	262	90,6	72,2	-20%	42,1	-54%
+ Substitution ENR	455	373	262	90,6	62,1	-32%	19,7	-78%

Source : E&E

Au total les réductions d'émissions de CO₂ de l'industrie, sont de l'ordre de 30% à horizon 2020 et 80% à long terme.

L'avantage de cette présentation est de montrer la part prédominante de l'efficacité énergétique dans les potentiels de réduction des émissions. Sur ces potentiels il faudra bien entendu faire jouer les évolutions de consommations : croissance/décroissance des usages, limitation des gaspillages, ou encore évolutions des usages entre branches, comme la diminution du poids des autos ou au contraire augmentation du taux de vitrages dans les véhicules.

7. Economies d'énergie sectorielles

Dans cette partie, on détaille les économies de quelques secteurs importants. Les résultats sont également présentés en termes d'émissions CO₂, mais le calcul est partiel car il ne prend pas en compte les substitutions d'énergie (ENR en particulier) telles que décrites à l'échelle du secteur industrielle au §6.1)

7.1. Sidérurgie

7.1.1. Description et évolution du secteur

Tableau 15 – 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 haut fourneaux (à partir principalement de minerais¹ et coke de charbon) ;
- recyclage de ferraille et première transformation de l'acier par fours électriques.

¹ Une part de ferraille est aussi recyclée dans les haut-fourneaux (HF). Actuellement les HF français utilisent environ 18% de ferraille.

Figure 7 – Répartition des consommations d'énergie par usage - Sidérurgie

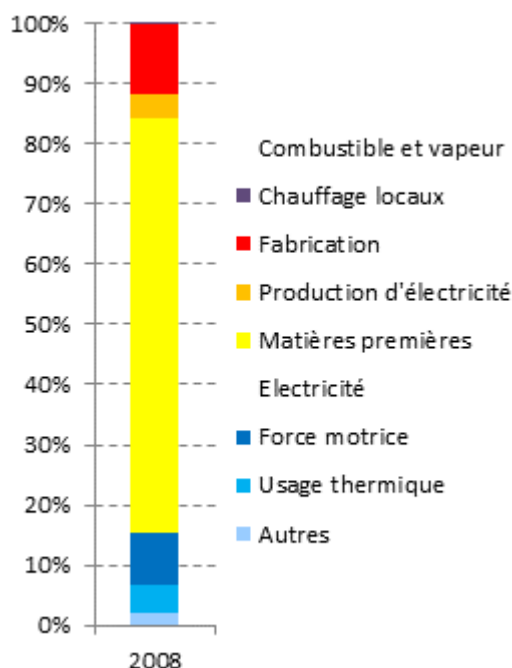
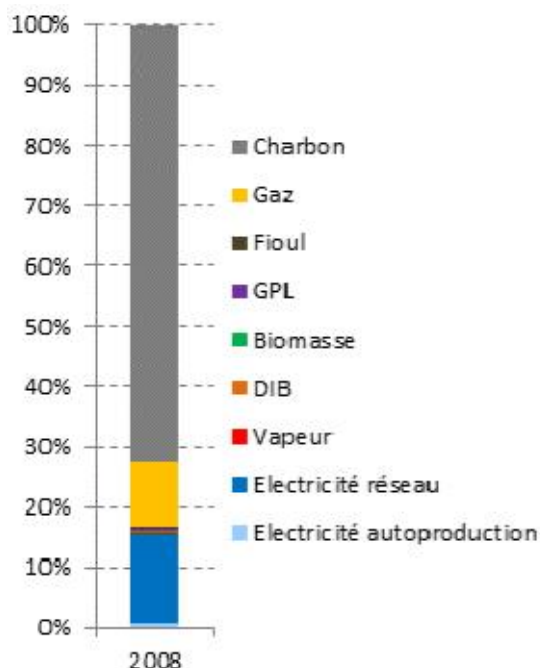


Figure 8 – Répartition des consommations d'énergie par type d'énergie - Sidérurgie



Source : E&E, d'après EACEI

Tableau 16 – 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).

Quelques éléments sur les projections :

Tableau 17 – Etudes sur projections - Sidérurgie

Etude	Projection	Source
DGEMP	Stable en 2030	(DGEMP, 2008, p. 5)
RTE	Stable en 2025	(RTE, 2011, p. 125)

Ces projections, ainsi par exemple celles de l'étude (CIRED, LEPII, & Enerdata, 2008b) montrent une consommation d'acier stable en France et en Europe à terme. Pour la présente étude, un maintien de la production est conforme avec l'idée de non délocalisation des procédés émetteurs. L'étude des gisements envisage des possibilités accrues de recyclages et, bien sûr, l'amélioration ou la transformation des procédés.

7.1.2. 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 développement² 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 di-azote, 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 ;

- 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

² 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.

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, exceptées 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 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 haut-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 6, le gain en énergie du passage au recyclage est d'un facteur 5 pour l'acier.

7.1.3. Bilan

Tableau 18 – Bilan Sidérurgie

		2008	2020	long terme
Combustible et vapeur	TWh	71,4	57,9	21,4
<i>Economie</i>	%		19%	70%
Electricité	TWh	12,9	11,9	11,7
<i>Economie</i>	%		8%	9%
Consommation nette	TWh	83,6	69,2	32,9
<i>Economie</i>	%		17%	61%
Emissions CO ₂	ktCO ₂	24 905	20 192	7 334
<i>Economie</i>	%		19%	71%

Source : E&E

Remarque : les projections des émissions de CO₂ sont sans doute surestimées car calculées sans les substitutions d'énergies décrites au §6.1

7.2. Industrie papetière

7.2.1. Description et évolution du secteur

La France ne produit que 88% de sa consommation de papier et importe le reste. Au-delà de ce bilan négatif, elle importe également 40% de ses besoins en pâte à papier vierge. Elle est a contrario exportatrice nette sur le papier récupéré pour la production de papier recyclé.

Tableau 19 – Chiffres clés 2008 – Papier-Carton

Production	Mt	9,4
Consommation	Mt	10,7
Taux de recyclage	%	60 %

Source : COPACEL

L'industrie papetière se décompose en 2 principales activités : la préparation de pâte, et les machines à papier.

Les usines de pâte utilisent comme matière première principalement du bois, au moins en Europe. Les procédés de transformation peuvent être mécaniques ou chimiques (ou les deux). Le choix entre ces deux principales filières se fait principalement en fonction des matières premières et des caractéristiques du produit finale souhaité :

- ✓ Pâte mécanique : fibres plus courte, papier/carton de moins bonne résistance au vieillissement (qualité mécanique et, mais rendement matière meilleur ;
- ✓ Pâte chimique (en particulier le procédé Kraft = 80% dans le monde) : permet de conserver des fibres plus longues et donc d'avoir une meilleure résistance du papier.

Dans les deux types de procédés, les usines performantes sont exportatrices d'énergie. Dans le procédé chimique, un sous-produit du procédé, la liqueur noire (contient environ 50% du pouvoir calorifique du bois de matière première) est utilisée comme combustible pour de la cogénération. Pour les procédés mécaniques, la chaleur de friction permet la production de vapeur. A cela s'ajoute l'utilisation éventuelle des écorces du bois utilisé comme combustible de chaudières (EC, 2001)

Le papier de récupération peut aussi être utilisé pour la fabrication de pâte (60% de la pâte à papier en France). Le processus est alors simplifié et moins consommateur en énergie (principalement de l'électricité). Il dépend néanmoins de la qualité du papier de récupération (impuretés) et de l'usage final (nécessite un désencrage ou pas). A noter que le recyclage ne peut être infini, et qu'une part de fibre vierge est nécessaire pour assurer les qualités principalement mécanique au papier.

La ou les pâtes sont ensuite utilisées dans l'usine à papier (machine à papier). La pâte est déposée sur une toile, égouttée puis pressée et séchée à travers une série de rouleau chauffés à la vapeur.

Ces deux principales étapes peuvent être réalisées sur un même site que l'on appelle usine intégrée. Cette intégration présente plusieurs avantages dont :

- ✓ Réduction de la consommation énergétique ;
 - o Surplus de la chaleur du procédé de fabrication de pâte transféré à la machine à papier (vapeur voire électricité) ;
 - o Il n'est pas nécessaire de sécher la pâte pour le transport ;
- ✓ Réduction des consommations d'eau et effluents, les eaux récoltées pour le séchage du papier pouvant être utilisé dans le procédé de la pâte.

En Europe, environ 60% de la production se fait dans des sites intégrés (EC, 2001, p. 39).

Figure 9 – Répartition des consommations d'énergie par usage – Papier-carton

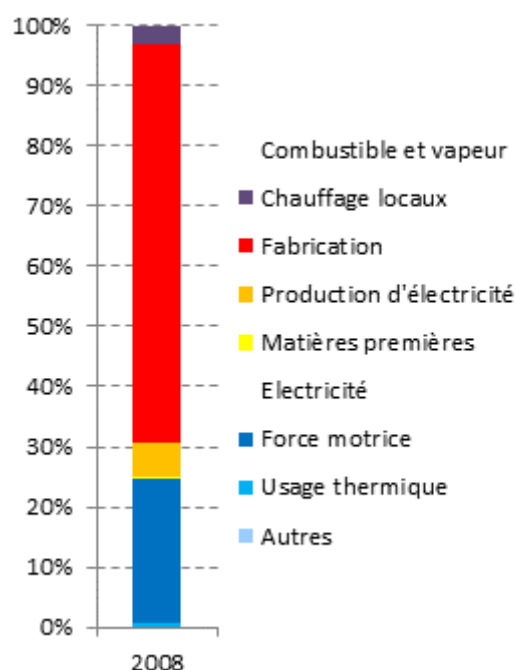
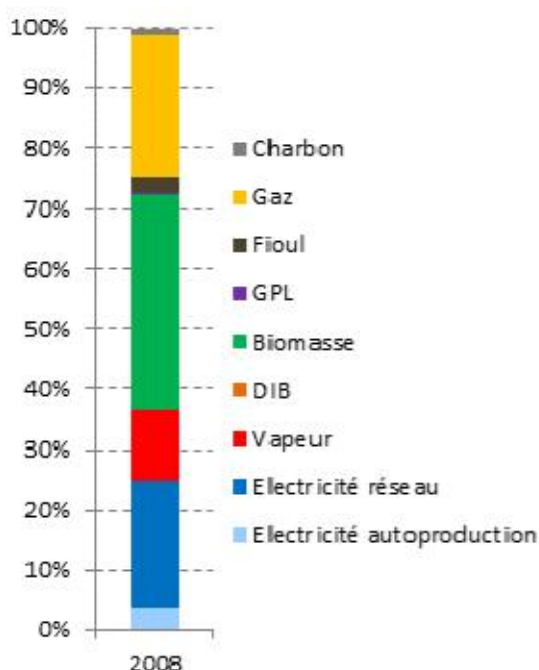


Figure 10 – Répartition des consommations d'énergie par type d'énergie - Papier-carton



Source : E&E, d'après EACEI

Tableau 20 – Consommation d'énergie - Papier-carton

Combustible et vapeur					
	TWh	%		TWh	%
Chauffage locaux	1,4	3%	Charbon	0,5	1%
Fabrication	30,1	66%	Gaz	10,7	24%
Production d'électricité	2,5	5%	Fioul	1,2	3%
Matières premières	0,2	1%	GPL	0,2	0%
			Biomasse	16,1	36%
			DIB	0,0	0%
			Vapeur	5,4	12%
Electricité					
	TWh	%		TWh	%
Force motrice	10,8	24%	Electricité réseau	9,5	21%
Usage thermique	0,3	1%	Electricité autoproduction	1,6	4%
Autres	0,1	0%			
Total					
	TWh	%		TWh	%
Consommation brute	45,4	100%	Consommation brute	45,4	100%
Consommation nette	43,7		Consommation nette	43,7	

Source : E&E, d'après EACEI

La lecture de la Figure 10 montre que la consommation d'énergie se répartit de manière assez égale entre combustibles et électricité. A noter qu'une part importante de l'énergie est aussi apportée par la matière première (écorces, résidus de bois) ou des résidus de procédé (liqueur noire), ce qui n'apparaît pas sur les graphes des usages.

La Figure 10 montre également une part importante de vapeur, l'industrie du papier est fortement utilisatrice de vapeur, notamment pour le séchage du papier. Cette vapeur est majoritairement produite en interne (avec en général une production d'électricité en cogénération, voir Figure 9), mais ces achats de vapeur montrent une certaine externalisation de la production de vapeur.

Quelques éléments sur les projections :

Tableau 21 – Etudes sur projections – Papier Carton

Etude	Projection	Source
DGEMP	Augmentation pour atteindre 23 Mt en 2030	(DGEMP, 2008, p. 5)
RTE	Recul en 2025	(RTE, 2011, p. 125)

Pour DGEMP prévoit l'augmentation de la production de papier en raison des conflits sur l'usage du bois dans les autres pays d'Europe : la France est importatrice nette de papier et tente alors d'améliorer ce bilan.

Pour RTE qui a revu sa position par rapport à son dernier bilan justifie le recul par :

- Baisse des emballages (Directive européenne) ;
- Baisse de la presse papier ;
- Développement des pratiques d'économie du papier (dématérialisation des archives, factures...).

7.2.2. Economies d'énergie

Actuellement les consommations d'énergie dans la production de pâtes à papier en France sont de l'ordre de 19 à 23 GJ/t d'énergie calorifique spécifique et 1200-1260 kWh/t d'énergie électrique spécifique (selon les sources statistiques COPACEL / EACEI). Les meilleures technologies doivent pouvoir permettre d'atteindre 14 GJ/t en moyenne. Soit un gain d'environ 25%. Dans le modèle environ 5% proviennent des opérations transverses, le reste est appliqué comme gain sur procédé et la partie cogénération. (10% à court terme et 20% à long terme). Pour l'énergie électrique, les meilleures technologies actuelles donnent environ 1000 kWh/t en moyenne (environ 500 kWh/t pour les pâtes chimiques et plus de 2000 kWh/t pour les pâtes mécaniques), soit un gain de 20%. Dans le modèle, ces gains sont pris en compte dans les opérations transverses, donnant un gain d'environ 10% en court terme et 30% en long terme (ce qui est au-delà des MTA, mais qui peut se comprendre par le fait que les meilleures usines, même si elles ont optimisé leur procédé, ont sans doute encore de la marge sur le dimensionnement de chaque élément (intégration des moteurs notamment et de leurs usages).

Pour la partie de production de pâte de papier recyclée qui utilise principalement de l'énergie électrique, seuls les gains des opérations transverses sont considérés, représentant 10% à court terme et 30% à long terme.

Pour la partie machines à papier, les estimations des consommations d'énergie spécifique sont de 6-7 GJ/t d'énergie calorifique et de 300 à 650 kWh/t d'énergie électrique selon les sources statistiques. Sachant que les meilleures technologies actuelles donnent des consommations spécifiques de l'ordre de 6,5 GJ/t et 630 kWh/t.

Dans le modèle, de faibles gains sur les consommations thermiques ont été retenus (8% à court terme et 13% à long terme). Par contre, il est considéré sur le long terme l'utilisation de la compression mécanique de vapeur (CMV) pour la partie séchage du papier (voir (CE Delft, 2010, p. 69). En effet, l'opération de séchage pourrait être largement améliorée

en récupérant l'énergie la chaleur latente des vapeurs d'eau sortant du sécheur (par l'intermédiaire de la CMV). L'emploi de la CMV substitue de l'énergie calorifique (combustible) par de l'électricité (alimentant des compresseur), avec un gain en énergie finale d'environ 80% (Global Chance, 2010, p. 15). Cette technologie largement développée dans d'autres procédés, n'est pas encore répandue. On la considère donc uniquement pour le long terme à hauteur d'une substitution de 60% des usages de chaleur des machines à papier.

7.2.3. Bilan

Tableau 22 – Potentiels d'économies pour les papiers-carton

		2008	2020	long terme
Combustible et vapeur	TWh	34,2	24,9	12,5
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>27%</i>	<i>63%</i>
Electricité	TWh	11,2	9,1	8,8
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>19%</i>	<i>21%</i>
Consommation nette	TWh	43,7	32,9	20,4
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>25%</i>	<i>53%</i>
Emissions CO ₂	ktCO ₂	4 944	4 348	2 251
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>12%</i>	<i>54%</i>

Source : E&E

Remarque : les projections des émissions de CO₂ sont largement surestimées car calculées sans les substitutions d'énergies décrites au §6.1

Sur le court terme, les gains CO₂ sont inférieurs aux gains d'efficacité, car les économies d'énergies sur cette première période se font majoritairement sur la fabrication de la pâte (utilisateur majoritaire de combustible biomasse, et donc non émetteur de CO₂).

7.3. Ciment

7.3.1. Description et évolution du secteur

Tableau 23 – Chiffres clés 2008 – Ciment

Production	Mt	21,4
Consommation	Mt	24,1

Source : COPACEL

Le secteur de la fabrication du ciment est intégré à celui de la fabrication de chaux et plâtre dans la nomenclature NCE (Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie).

60% de la consommation énergétique du secteur provient des cimenteries, le reste, est principalement de la production de chaux. L'étude se concentre sur la production de ciment, prépondérante en France. De plus, le processus de fabrication de chaux est assez similaire (broyage et cuisson), avec un procédé à moins haute température.

A noter que ces deux procédés sont fortement émetteurs de CO₂, leurs émissions ayant la spécificité de provenir autant de la consommation d'énergie que du procédé lui-même (décarbonatation de la matière première principale, le calcaire :

principalement $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). La décarbonation des matières premières n'est pas prise en compte dans l'estimation des émissions faite dans cette étude. Les gains des procédés alternatifs proviennent soit de la consommation d'énergie du procédé, soit d'une formulation chimique différente.

Figure 11 – Répartition des consommations d'énergie par usage – Ciment/Chaux/Plâtre

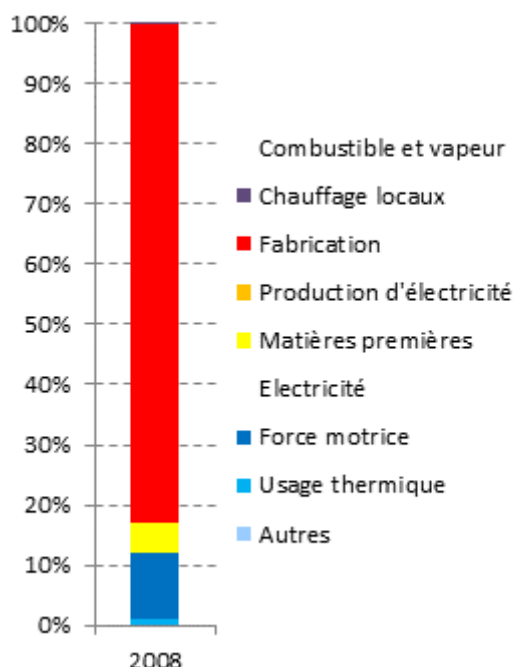
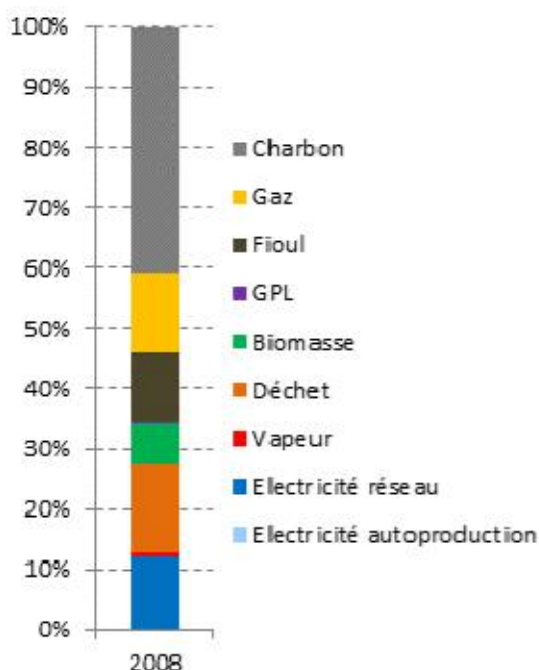


Figure 12 – Répartition des consommations d'énergie par type d'énergie - Ciment/Chaux/Plâtre



Source : E&E, d'après EACEI

Tableau 24 – Consommation d'énergie - Ciment/Chaux/Plâtre

Combustible et vapeur					
	TWh	%		TWh	%
Chauffage locaux	0,1	0%	Charbon	12,1	41%
Fabrication	24,7	83%	Gaz	4,0	13%
Production d'électricité	0,0	0%	Fioul	3,4	11%
Matières premières	1,5	5%	GPL	0,1	0%
			Biomasse	2,1	7%
			Déchet	4,3	15%
			Vapeur	0,2	1%
Electricité					
	TWh	%		TWh	%
Force motrice	3,3	11%	Electricité réseau	3,6	12%
Usage thermique	0,2	1%	Electricité autoproduction	0,0	0%
Autres	0,0	0%			
Total					
	TWh	%		TWh	%
Consommation brute	29,8	100%	Consommation brute	29,8	100%
Consommation nette	29,8		Consommation nette	29,8	

Source : E&E, d'après EACEI

Le procédé cimentier se résume en :

- Extraction des matières premières (principalement calcaire) ;
- Broyage du cru (matières premières, principalement calcaire) ;
- Cuisson en vue d'obtenir du clinker ;
- Broyage du clinker (+ajouts divers selon le type de ciment produit).

La lecture de la Figure 12 montre que la plus grande partie de l'énergie est consommée sous forme de combustible (90%), servant à échauffer la matière dans le four (1400°C pour le ciment, 900°C pour la chaux). Cette grande consommation de combustible représente une bonne part des coûts de production du ciment (environ 30%), c'est en particulier ce qui explique l'utilisation de combustibles dérivés ou spéciaux (Figure 12) : Coke de pétrole, brais, farines animales, huiles usagés, déchets divers... Dans certains cas, les combustibles sont gratuits voire subventionnés. Les ateliers de broyage consomment la majorité de l'électricité.

Quelques éléments sur les projections :

Tableau 25 – Etudes sur projections - Ciments

Etude	Projection	Source
DGEMP	Stabilité du ciment mais baisse du clinker en 2030	(DGEMP, 2008, p. 5)
RTE	Léger recul en 2025	(RTE, 2011, p. 125)

La DGEMP prévoit ou bien une délocalisation de la fabrication du clinker (partie la plus polluante en CO₂ et autre), ou bien un recours plus important aux ajouts (laitiers, pouzzolane...) :.

RTE confirme la tendance à la délocalisation de la production. RTE a revu sa position par rapport à son dernier bilan justifie le recul par une baisse des capacités de production, et non une baisse de la consommation (dans son bilan précédant il prévoyait une hausse tirée par le chantier de rénovation des bâtiments).

7.3.2. Economies d'énergie

La moyenne nationale des cimenteries est à 4 GJth/t_{clinker}³, les meilleures cimenteries actuelles sont à 3 GJth/t_{clinker} (peut varier notamment en fonction de l'humidité des matières premières), soit 25% de gains. Il subsiste en France quelques vieilles cimenteries par « voie humide » ou « semi-humide » (de 4 à 7 GJ/t_{clinker})(IEFP, 2003, p. 3). Ces procédés dépassés ajoutent de l'eau lors de la préparation matière, cette eau doit ensuite être évaporée, ce qui augmente énormément la consommation du four. Dans la modélisation nous retenons un gain de 12% à court terme grâce à la modernisation vers les meilleures technologies de « voie sèche ».

Sur le long terme, pour arriver à des gains plus importants, il faut envisager d'autres types de liant que le ciment Portland (ciment produit actuellement). Divers produits sont en cours de développement, on peut retenir les trois suivants :

- Novacement (start-up émanant d'un laboratoire d'Imperial College London) : l'idée est d'utiliser une autre matière première le silicate de manganèse, le procédé est assez proche sauf que la température du four est

³ En France aujourd'hui il faut en moyenne 0,8t de clinker pour faire 1t de ciment. La différence provient d'ajouts : gypse, laitiers de haut-fourneau (HF), pouzzolane...

beaucoup plus faible (700°C). Le plus intéressant du procédé est qu'en plus de réduire la consommation d'énergie, il n'y a pas de décarbonatation des matières premières : au contraire, il permet une capture de carbone qui se retrouve ensuite piégé dans la matrice du ciment. Un pilote fonctionne déjà, une installation semi-industriel devrait voir le jour d'ici 2015 (CE Delft, 2010, p. 51–53) ;

- Celitement, un autre procédé développé par l'Université de Karlsruhe, met en œuvre également des températures très inférieures : 300 °C dans un autoclave au lieu de 1 450 °C dans les fours cimentiers. Au total, la production de chaque tonne de produit émettrait 50 % d'émissions en moins que le ciment classique. Les travaux se poursuivent pour passer à une production industrielle ; un pilote est en cours de mise en service en association avec le groupe cimentier Schwenk ;
- Calera : Cette technologie, bien qu'à ses prémises, est particulièrement attrayante, puisque sa matière première ne provient plus de roches extraites, mais du CO₂ issu de fumées d'autres procédés industriels. L'idée consiste à « arroser » avec de l'eau de mer des fumées chargées en CO₂ pour le précipiter en carbonate (réaction similaire à la création des coraux). Cette solution n'est pas retenue car pas encore assez avancée (WBCSD, 2009, p. 5).

A l'horizon 2050, on retient donc le procédé Novacem, permettant une réduction de 50% de la consommation de combustible pour atteindre 2 GJ/t_{clinker}. Pour la partie broyage, pas de gains supplémentaires pris en compte. Une étude plus approfondie pourrait montrer des gains plus importants en tenant compte des performances réelles des pilotes en cours de démarrage.

Pour la consommation électrique, il s'agit principalement du broyage cru et du clinker : actuellement la moyenne nationale rapporté à la tonne de ciment produite est de 122 kWh/t_{ciment}. Les meilleures pratiques sont actuellement à 90 kWh/t_{ciment} (WBCSD, 2009, p. 6), soit plus de 25% d'économies. Même si les matières premières ont un impact sur les puissances de broyage, les ateliers modernes (broyeurs verticaux et surtout Horomill) peuvent consommer beaucoup moins que les broyeurs à boulets traditionnels (de 20 à 30% de moins). La modernisation des ateliers de broyage doit permettre au moins 15% à court terme et 35% sur le long terme (80 kWh/t_{ciment}).

7.3.3. Bilan

Tableau 26 – Potentiel de gains, Ciment/chaux/Plâtre

		2008	2020	long terme
Combustible et vapeur	TWh	26,2	22,4	13,8
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>14%</i>	<i>47%</i>
Electricité	TWh	3,6	3,0	2,3
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>17%</i>	<i>36%</i>
Consommation nette	TWh	29,8	25,5	16,1
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>15%</i>	<i>46%</i>
Emissions CO ₂	ktCO ₂	6 413	5 510	3 506
<i>Economie</i>	<i>%</i>		<i>14%</i>	<i>45%</i>

Source : E&E 2011, potentiel d'économies d'énergie

Remarque : les projections des émissions de CO₂ de l'énergie sont surestimées car calculées sans les substitutions d'énergies décrites au §6.1. Par contre les gains sur les émissions des procédés représentent nettement plus de gains possibles.

8. Pour aller plus loin

8.1. Récupération de chaleur

8.1.1. Définition

La récupération de chaleur est estimée en considérant qu'elle se fait à basse température (réseau de chaleur à 75 ou 90°C). Ce niveau de température est important car il fixe une limite physique de récupération, cette limite étant la nécessité d'avoir un gradient de température entre le milieu où l'on récupère la chaleur et le niveau de température de l'alimentation du réseau de chaleur (pincement sur l'échangeur).

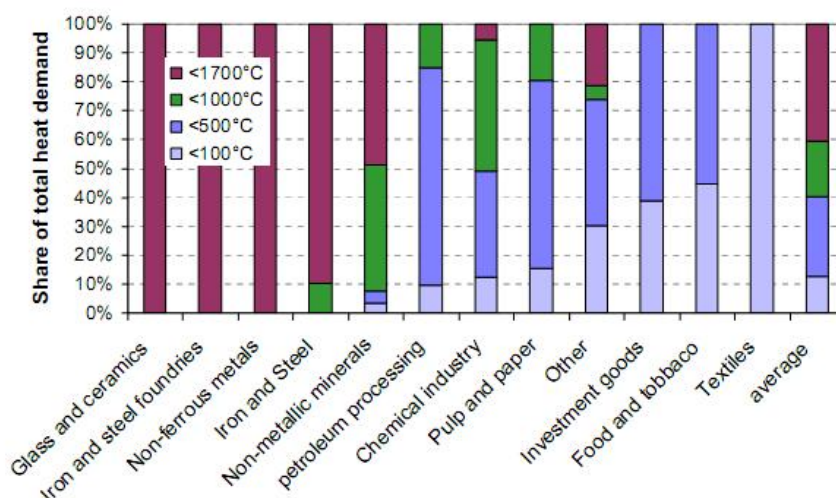
Ce potentiel pourrait être augmenté en utilisant des pompes à chaleur ce qui permet de prendre en compte des gisements à plus basse température. Ceci mériterait une étude détaillée combinée à celle des potentiels d'usage sur réseaux de chaleur urbain.

Dans cette estimation il faut bien avoir à l'esprit que le potentiel de récupération d'énergie pour une valorisation hors procédé est inversement proportionnel à l'efficacité du procédé. En effet, dans de nombreux procédés énergivores, une source majoritaire de réduction des consommations d'énergie consiste en l'utilisation d'énergie perdue à des fins de préchauffage.

De manière générale, les plus gros taux de récupération se trouvent sur les procédés nécessitant des hautes températures pour le procédé (industrie lourde), telle que la sidérurgie, la métallurgie, l'industrie chimique, la cimenterie... La Figure 13 présente pour les principales branches industrielles les niveaux de température des procédés.

A l'inverse, les procédés basse température sont les industries qui peuvent devenir consommatrices d'énergies provenant de réseaux de chaleur basse température. Des pompes à chaleur peuvent être alors installées pour relever que quelques dizaines de degré si nécessaire, là encore des études plus fines pourraient préciser les gains et le caractère plus ou moins coûteux de leur mise en œuvre.

Figure 13 – Demande de chaleur par branche industriel et niveau de température – Europe - 1994



Source : (Franhofer Institute, 2009, p. 225)

Il n'a pas été envisagé dans cette étude, une conversion de la chaleur en électricité par cycle thermodynamique (Eau-vapeur ou ORC⁴). Bien que des installations de ce type existent (par exemple sur des cimenteries), elles sont (en Europe) encore peu rentables, à moins d'avoir des sources de chaleur à haute température. Avec l'amélioration des procédés de production, les sources de températures disponibles baisseront et diminueront d'autant les potentiels. Ainsi, par exemple, les sucreries actuelles ont fait de grands progrès sur le recyclage de leurs effluents... ce qui retire une bonne part des potentiels de récupération. A moins d'améliorer les cycles de conversions (ORC, cycle Kalina, matériaux thermosensibles), ou de se situer sur des sites relativement isolés, il semble plus économique de valoriser cette récupération d'énergie directement sous forme de chaleur, dans le site ou à l'extérieur.

8.1.2. Résultats

Au final le potentiel de récupération de chaleur considéré sur l'industrie représente environ 2 TWh à court terme et plus de 9 TWh à long terme, ce qui représenterait une économie supplémentaire respectivement de 0,5% et 3,5% de la consommation d'énergie de l'industrie. Ce potentiel prend en compte la mise en œuvre progressive (10% à court terme), car le potentiel brut à court terme est beaucoup plus important. Cette chaleur récupérée peut être utilisée dans le secteur industriel (usages basse température) mais aussi dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

Tableau 27 – Potentiel de récupération d'énergie

Récupération de chaleur (TWh)	2008	2020	Long terme
Sidérurgie	0,00	0,20	1,49
Autre chimie organique	0,00	0,26	1,44
Agroalimentaire	0,00	0,36	1,71
Papier	0,00	0,19	0,45
Ciment et autres	0,00	0,33	0,94
Chimie minérale	0,00	0,09	0,59
Travail des métaux	0,00	0,07	0,49
Verre	0,00	0,07	0,22
Mat. Construction	0,00	0,09	0,66
Métallurgie non ferreux	0,00	0,05	0,30
Plastiques	0,00	0,04	0,23
Constr. de véhicules	0,00	0,01	0,09
Divers	0,00	0,02	0,18
Engrais	0,00	0,01	0,10
Transformation plastique	0,00	0,01	0,09
Construction élec.	0,00	0,01	0,10
Construction mécanique	0,00	0,01	0,05
Parachimie	0,00	0,01	0,06
Textile	0,00	0,01	0,08
Caoutchouc	0,00	0,01	0,00
Constr. navale et aéronautique, armement	0,00	0,00	0,02
Total industrie	0,0	1,9	9,3

Source : E&E

⁴ ORC : Organic Rankine Cycle, cycle thermodynamique utilisant une fluide organique

8.2. Cogénération

Le principe a été exposé au paragraphe 2.2. Aujourd'hui, le secteur industriel produit entre 6 (enquêtes EACEI) et 10 TWh (MEEDDM, 2010, p. 17) d'électricité par cogénération, cela correspond à 5-8% de sa consommation brute d'électricité. Cet écart provient sans doute de l'externalisation de l'exploitation des unités de cogénération (l'exploitant de la centrale de cogénération d'un site industriel est alors rattaché au secteur de l'énergie et non au secteur industrie dans l'enquête EACEI).

Le potentiel identifié se base sur les besoins en chaleur basse et moyenne température de l'industrie. Ces potentiels ont été chiffrés par 2 études (CEREN, 2002) et (MEEDDM, 2010) respectivement à 120 TWh (en 1999) et 112 TWh (en 2008), sur lequel on applique une forte décote. Ce coefficient (ici 80%) prend en compte le fait que 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 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 28) :

- 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, adapté au combustible souhaité). Valable pour des puissances assez élevées ;
- TAC/MAC : ratio chaleur/électricité plus faible permettant une production plus importante d'électricité. Limité aux combustibles gazeux ou liquide. (GN, Fioul, biogaz, huiles végétales...). Pour des fonctions de séchage, l'utilisation des gaz d'échappement peut être faite directement.

Tableau 28 – 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, MEDDM, 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 29 – Potentiel net de cogénération

		2008	2020	long terme
Consommation combustible	TWh	127	92	68
Production électricité	TWh	31	25	21
Production chaleur	TWh	74	54	39
Rendement	%	83%	87%	88%

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 fonctionnement, 6 en construction, 8 autorisés et 13 autres en projet soit un total de plus de 14,5 GW). Un volume de 25 TWh à court terme représente l'équivalent de 12 centrales de 400MW fonctionnant à 5000 h.

Ces chiffres sont cependant sujet à discussion, car pour être intéressant le choix de la cogénération doit avoir un impact positif sur les émissions de CO₂ (c'est le cas sur une grosse partie de l'hiver), un impact positif sur la répartition des puissances (un point qui dépend des choix techniques sur le réseau), un impact positif sur la compétitivité des entreprises (un 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...

8.3. Sobriété

Le présent rapport ne prend pas en compte la sobriété. Celle-ci peut provenir bien entendu d'une récession forte et d'une baisse de pouvoir d'achat, de mouvements volontaires limitant la consommation, mais aussi et de façon plus probable à court terme de mouvements de fond chez les consommateurs et les industriels modifiant l'offre de produits.

Ainsi, un premier exemple est la modification de la consommation automobile, soit par des véhicules plus légers car moins consommateurs et incorporant moins d'acier, soit par la multi-propriété ou les usages partagés (auto-partage, co-voiturage...), soit encore par la substitution de l'auto par d'autres modes comme les transports en commun ou le vélo.

D'autres mouvements, déjà évoqués dans le Grenelle de l'Environnement, correspondent à des attentes de la société qui font consensus, comme une forte diminution des consommations de pesticides et d'intrants dans les cultures, y compris dans les jardins privés et les terrains communaux.

La diminution des emballages, qui représentent la première consommation pour le verre et pour les plastiques, est aussi une direction qu'a pris la société, sous la pression de la question des déchets notamment. Nous avons développé l'hypothèse qu'une fraction des emballages devenait réutilisable, une hypothèse déjà réalité chez certains de nos voisins. L'impact est non négligeable sur le bilan énergétique et carbone. Un tel bilan fait naturellement débat car il met en jeu des analyses de cycle de vie (ACV) qui restent en bonne partie subjectives, ce qui pourra faire débat dans la société.

Enfin, l'éco-conception pour le recyclage, la possibilité de réparation de modules ou de pièces, ou encore la consommation moindre de matériaux et d'énergie constitue un axe important des politiques de l'Union Européenne. Il est donc probable que les produits dont nous disposerons dans dix ans auront intégré certains de ces principes nouveaux et nous permettront de limiter nos consommations.

Reste des discussions complexes sur l'usage des matériaux dans le bâtiment. La métamorphose des logements et bureaux neuf à laquelle nous assistons en Europe, ainsi que la rénovation plus ou moins systématique du parc aura des

conséquences encore incertaines sur la production de matériaux : relance des consommations de bois ou de matériaux biosourcés, d'équipements thermiques performants, d'une part, mais diminution de matériaux traditionnels d'autre part. Ce dernier point de débat met en lumière une faiblesse traditionnelle des exercices de prospective sur l'industrie, qui ont souvent été avant tout basés sur des compilations des projections des branches, voire des entreprises, productrices de biens et de matières premières, et non un débat de société sur les productions à prévoir pour remplir des besoins de la société. Mais ceci est une autre histoire...

9. Bibliographie

9.1. Documents cités dans le rapport

- ADEME. (2008). *Emballages réutilisables* : évaluation environnementale, économique et sociale de l'intérêt comparé entre réutilisation et usage unique.
- CE Delft. (2010). *Technological developments in Europe; A long-term view of CO2 efficient manufacturing in the European region*.
- CEREN. (2002). *LE GISEMENT DE MAITRISE DE L'ENERGIE DANS L'INDUSTRIE EN 1999 Opérations transversales*.
- CEREN. (2010). *Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie* (Synthèse diffusable) (p. 4).
- CIREN, LEPII, & Enerdata. (2008a). *Scénarios de transition vers un monde économe en carbone en 2050 : quels enjeux pour l'industrie ?* (Résumé pour décideur).
- CIREN, LEPII, & Enerdata. (2008b). *Étude « Scénarios sous Contrainte Carbone »* (Rapport complet).
- DGEMP. (2008). *Scénario énergétique de référence DGEMP-OE(2008)* (Synthèse).
- EC. (2001). *Document de référence sur les meilleures technologies disponibles dans l'industrie papetière*.
- Franhofer Institute. (2009). *Energy Savings Potentials in EU Member States*.
- Global Chance. (2010). *Du gâchis à l'intelligence. Le bon usage de l'électricité*. (Vol. 27).
- IEFP. (2003). *Diagnostic énergétique d'une cimenterie*. Fiches techniques PRISME.
- MEEDDM. (2010). *Analyse du potentiel national pour l'application de la cogénération à haut rendement*.
- Pilz, H., Brandt, B., & Fehring, R. (2010). *The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe Harald Pilz Bernd Brandt Roland Fehring* (Summary report) (p. 45).
- RTE. (2011). *Bilan Prévisionnel*.
- WBCSD. (2009). *Cement technology roadmap 2009*.
- Worrel, E., & Neelis, M. (2007). *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*.

9.2. Autres documents

- GIMELEC 2010, Livre Blanc - Efficacité énergétique Bâtiment-Infrastructures-Industries, Paris
- RDC-Environnement pour l'ADEME 2008, rapport sur la réutilisation du verre

10. Annexes

10.1. Abréviations

MTA : Meilleures Technologies Actuelles
CEREN : Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie
ENR : Energie renouvelable
CMV : Compression mécanique de vapeur
HF : Haut-fourneau
TAC : Turbine à combustion
MAC : Moteur à combustion
TAV : Turbine à vapeur
EACEI : Enquêtes Annuelles sur les Consommations d'Energies de l'Industrie

10.2. Facteurs d'émission de CO₂

Tableau 30 – Facteurs d'émission de CO₂

Energie	tCO ₂ /tep	Source
Houille	4,1	GIEC
Lignite - charbon pauvre	4,2	GIEC
Coke de houille	4,5	GIEC
Gaz naturel	2,3	GIEC
Autres gaz de réseau	0,0	GIEC
Coke de pétrole	4,1	GIEC
Butane propane	2,6	GIEC
Fioul lourd	3,2	GIEC
Fioul domestique	3,1	GIEC
Autres produits pétroliers	3,1	GIEC
Liqueurs noires	0,0	
Bois et sous-produit du bois	0,0	
Combustibles spéciaux renouvelables	0,0	
Combustibles spéciaux non renouvelables	0,0	
vapeur	3,2	Moyenne combustible industrie dégradé d'un rendement de 85%
Electricité réseau	1,0	AIE

Ces facteurs ne prennent en compte que les émissions de CO₂.

100%
RECYCLÉ
ET
RECYCLABLE

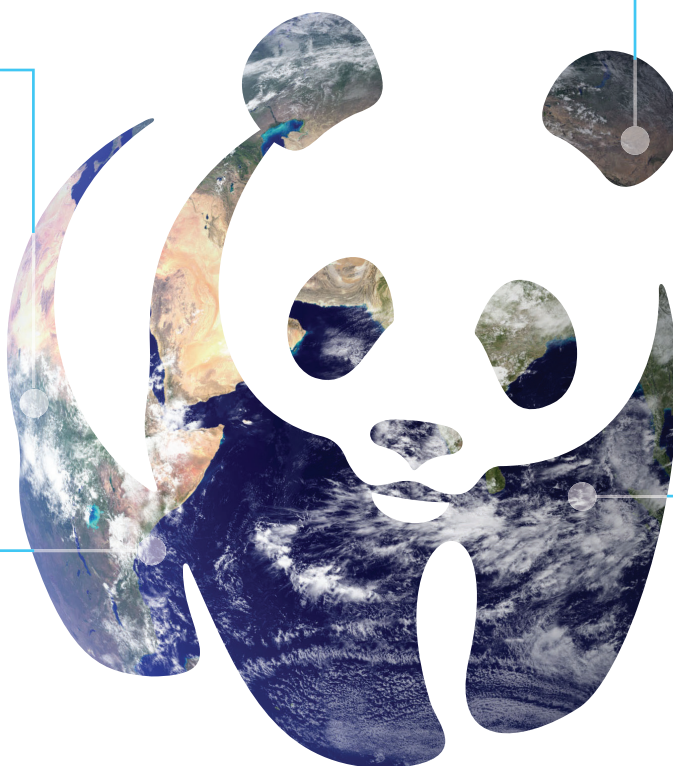


1973

année de la création du
bureau français du WWF

107

salarié(e)s du WWF
France engagé(e)s au
quotidien pour offrir
aux générations futures
une planète vivante



187 000

donateurs du WWF France
au 1^{er} septembre 2012

6 200

bénévoles actifs en
France métropolitaine
et ultra-marine



Notre raison d'être

Arrêter la dégradation de l'environnement dans le monde et construire un avenir où les êtres humains pourront vivre en harmonie avec la nature.

www.wwf.fr

© 1986 Panda Symbol WWF - World Wide Fund For nature
(Formerly World Wildlife Fund) ® "WWF" & "living planet" are WWF Registered Trademarks/
"WWF" & "Pour une planète vivante" sont des marques déposées.
WWF France, 1, carrefour de Longchamp, 75016 Paris.