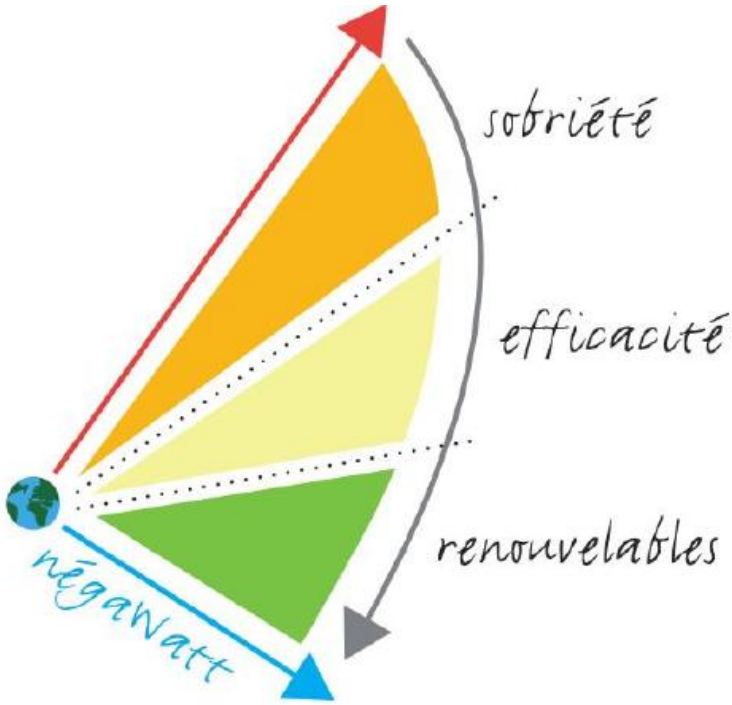
Dossier de synthèse

17 octobre 2011

Association négaWatt

Scénario négaWatt 2011



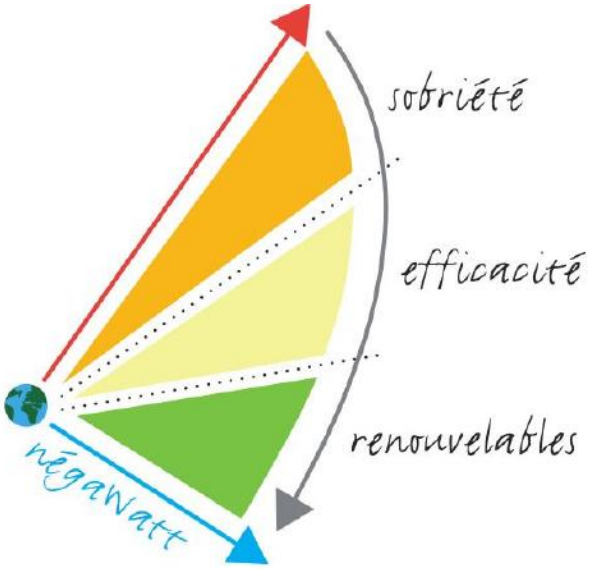
Les 10 points-clés du scénario négaWatt 2011

- Une politique très volontariste de sobriété et d'efficacité énergétique, aboutissant à une diminution en 2050 de la demande en énergie primaire de 65 % par rapport à la situation en 2010 : l'exploitation du « gisement de négaWatts » permet de faire les 2/3 du chemin !
- Malgré cette politique, le maintien d'un haut niveau de services énergétiques pour les besoins de chaleur, de mobilité et d'électricité spécifique.
- Un recours prioritaire aux énergies renouvelables qui représentent à terme, en 2050, 91 % de nos ressources énergétiques.
- Une gestion coordonnée des réseaux de gaz, d'électricité et de chaleur permettant de répondre à tout moment aux besoins et d'assurer l'équilibre en puissance.
- Une anticipation de la fin des « fossiles faciles » à l'approche des pics pétrolier et gazier, par la limitation de leur utilisation à la pétrochimie et aux matières premières industrielles, ainsi qu'à quelques usages très spécifiques tels que l'industrie ou l'aviation.
- Par rapport à 2010, des émissions de CO_2 divisées par 2 en 2030 et par 16 en 2050.
- Un système énergétique français presque totalement décarboné malgré un arrêt maîtrisé et cohérent de toute production d'électricité nucléaire en 2033, c'est-à-dire en 22 ans.
- Un cumul des émissions de CO_2 sur la période 2011-2050 conforme, dans une logique d'équité mondiale par rapport au poids démographique de la France, à l'objectif de limiter la hausse moyenne de la température sur Terre en dessous de 2°C d'ici 2100.
- Sur l'usage des sols et l'agriculture, un scénario énergétique équilibré malgré une relocalisation des productions et un recours très important à la biomasse pour la production de matériaux et d'énergie en cohérence avec le scénario Afterres2050 du bureau d'études associatif Solagro.
- Une France avançant vers l'autonomie et la démocratie énergétiques, créant des centaines de milliers d'emplois durables, et redonnant aux territoires et à leurs acteurs une place centrale dans notre paysage énergétique.

Les clés d'un avenir énergétique soutenable

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

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



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

Bien dimensionner notre niveau d'éclairement puis recourir à des luminaires à haute efficacité permet par exemple de diviser par cinq ou davantage la consommation d'électricité correspondante : ce sera d'autant plus facile de produire celle-ci par des énergies renouvelables. Cet exemple simple est transposable à l'ensemble de nos usages de l'énergie, des plus anecdotiques aux plus structurants.

L'urgence de la transition énergétique

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

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

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

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

représente plus de 10 000 fois la consommation annuelle mondiale d'énergie.

Les **énergies de stock** que sont le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium s'épuisent à un rythme très élevé : il nous reste quelques dizaines d'années de consommation de pétrole et deux ou trois siècles de charbon à consommation actuelle. A l'inverse, les **énergies de flux** que sont le solaire, l'éolien, l'hydraulique, le bois, la biomasse, le biogaz ou la géothermie se renouvelleront en permanence à l'échelle du passage de l'humanité sur Terre.

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

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

« Remettre les changements de fond à plus tard, c'est la certitude d'arriver trop tard »

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

L'urgence de notre mise en mouvement est d'autant plus vitale que les risques auxquels nous devons faire face ont un caractère cumulatif : chaque goutte de pétrole consommée nous rapproche de la pénurie, chaque gramme de CO_2 lâché dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre des décennies après son émission, chaque année supplémentaire de fonctionnement d'un réacteur nucléaire le rend plus dangereux. Remettre les changements de fond à plus tard, c'est avoir la certitude d'arriver trop tard.

Un scénario soutenable et réaliste

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

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

Forte de son expérience et face à l'urgence croissante, l'association négaWatt a jugé nécessaire d'actualiser son scénario. Cette nouvelle version 2011, portant sur la période 2012-2050, est le fruit d'un travail collectif de plus d'un an autour d'un noyau d'une quinzaine d'experts et de praticiens de l'énergie contribuant à titre strictement personnel.

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

- Au-delà d'un optimum « technico-économique » des différentes énergies, il intègre des critères sociaux et environnementaux dans la hiérarchie des solutions. Concrètement, cela signifie qu'il explore systématiquement les « gisements de négaWatts » de la sobriété et de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs, puis qu'il privilégie les énergies de flux par rapport aux énergies de stock. Ceci conduit à écarter la construction de nouveaux réacteurs nucléaires ainsi que le recours aux technologies de « capture et séquestration de carbone » ou l'exploitation des gaz de schistes.
- Le scénario ne repose sur aucun pari technologique. Des « ruptures » ou « bonnes surprises » ne sont pas à exclure d'ici à 2050 telles que la maturité des biocarburants liquides ou gazeux de 3e génération mais elles sont impossibles à prévoir. Le scénario ne retient que des solutions jugées réalistes et matures, c'est-à-dire dont la faisabilité technique et économique est démontrée même si elles ne sont pas encore très développées au niveau industriel. Il dessine ainsi une trajectoire robuste tout en restant ouverte aux évolutions futures.
- L'objectif du scénario ne se réduit pas à la lutte contre le changement climatique. Il ne suffit pas de « décarboner » l'énergie mais il faut réduire l'ensemble des risques et des impacts liés à notre modèle énergétique. Les contraintes sur l'eau, les matières premières ou l'usage des sols doivent également être prises en compte. Sur ce dernier point, le scénario est couplé avec Afterres 2050, un scénario centré sur les utilisations de la ressource biomasse pour l'alimentation, l'énergie et les matériaux et développé selon une démarche similaire à celle de négaWatt par l'association Solagro, spécialiste reconnue du domaine.

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

Une modélisation allant des usages vers les ressources

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

« L'économie doit s'adapter à la réalité physique de l'énergie, l'inverse n'est pas possible ! »

Les signaux économiques actuels, qui ne reflètent pas les contraintes de long terme sur les ressources énergétiques et leurs impacts, n'incitent pas les acteurs économiques à prendre les décisions les plus pertinentes.

En outre, les modèles utilisés en France pour la prospective énergétique reposent sur des règles purement économiques où seul le moindre coût immédiat détermine le choix des consommateurs : prisonniers de cette myopie, ils sont incapables de dessiner les trajectoires conformes à l'intérêt général du « moindre coût » pour la collectivité dans son ensemble et sur le long terme.

Le modèle utilisé par la version 2011 du scénario négaWatt ne relie pas directement choix énergétiques et mesure du PIB : si celui-ci s'avérait un indicateur pertinent, ce qui reste à démontrer, un module spécifique pour le calculer, avec d'autres indicateurs, pourrait facilement lui être ajouté.

Il permet en revanche de définir à partir d'une évolution des usages, des vecteurs et des sources d'énergie les grandes lignes du contenu en activité et en emplois d'une transition énergétique. La pratique de terrain et les exemples à l'étranger nous indiquent qu'elle peut être porteuse d'une véritable dynamique économique et sociale, surtout comparée aux conséquences de l'inaction.

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

énergétique français en termes d'usages et de ressources (hors usages non-énergétiques)

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

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

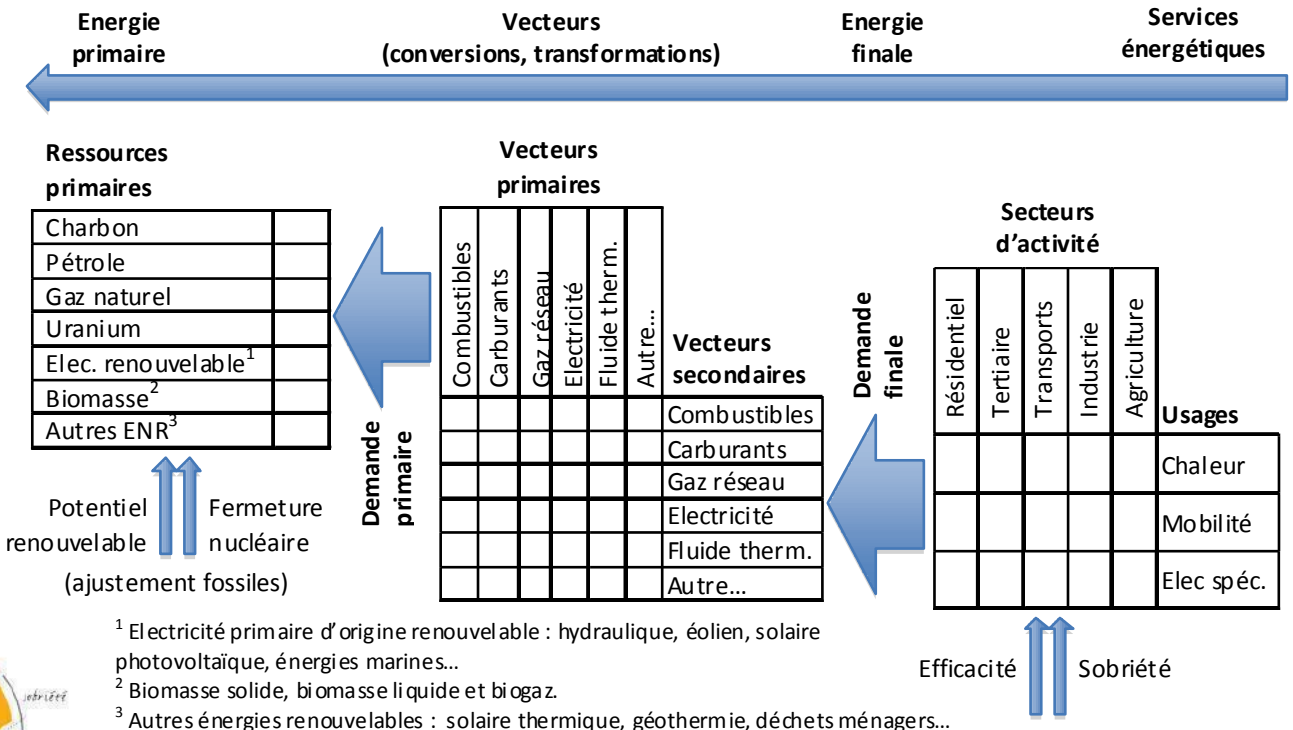
Ces services sont analysés par secteur d'activité (habitat, tertiaire, transports, industrie, agriculture) dans autant de « modules » qui intègrent plusieurs milliers de paramètres relevant de la sobriété et de l'efficacité pour fournir un chiffrage des consommations résiduelles en énergie année par année.

Un choix du « vecteur énergétique » le plus approprié (combustible solide, liquide ou gazeux, carburant, chaleur, électricité…) pour répondre à chaque besoin est ensuite effectué de façon à pouvoir remonter aux consommations en **énergie finale**, celle qui est délivrée aux consommateurs pour chacun de leurs usages. De même, on remonte ensuite des consommations finales aux consommations de **ressources primaires** (pétrole, gaz fossile, uranium, énergies renouvelables…) produites en France ou importées.

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

Pour l'électricité cet équilibre ne doit pas être assuré seulement en moyenne sur l'année mais à tout instant : le croisement de courbes-type de répartition de la consommation selon les usages et de production selon les filières, intégrant le calcul dynamique de la contribution des filières « pilotables » (thermique à flamme, hydraulique de barrage...) et des différentes solutions de flexibilité comme l'effacement et le stockage, permet d'assurer un équilibre heure par heure pour chaque année jusqu'à 2050.

Démarche de modélisation du scénario négaWatt 2011



[1] Electricité primaire d'origine renouvelable : hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque, énergies marines…
[2] Biomasse solide, biomasse liquide et biogaz.
[3] Autres énergies renouvelables : solaire thermique, géothermie, déchets ménagers…

Des hypothèses de cadrage actualisées

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

Du point de vue géographique, le modèle se limite à la France métropolitaine et n'intègre les évolutions qu'à l'intérieur de cette « frontière ». La France du scénario négaWatt s'inscrit dans une logique d'auto-suffisance, ou « d'autonomie énergétique » mais elle n'est pas pour autant repliée sur elle-même : elle continue à échanger avec les pays étrangers, mais elle réduit sa dépendance énergétique, y compris pour l'électricité.

Sur le plan démographique, le scénario retient l'hypothèse dite « centrale » des dernières prévisions de l'INSEE, qui intègre une révision sensible à la hausse de la projection de la population à l'horizon 2050 : 72,3 millions d'habitants contre 65 millions précédemment, soit 7 millions de personnes supplémentaires dont les besoins sont à satisfaire.

« La révision des projections démographiques : 7 millions de plus à nourrir, loger, déplacer à l'horizon 2050 »

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

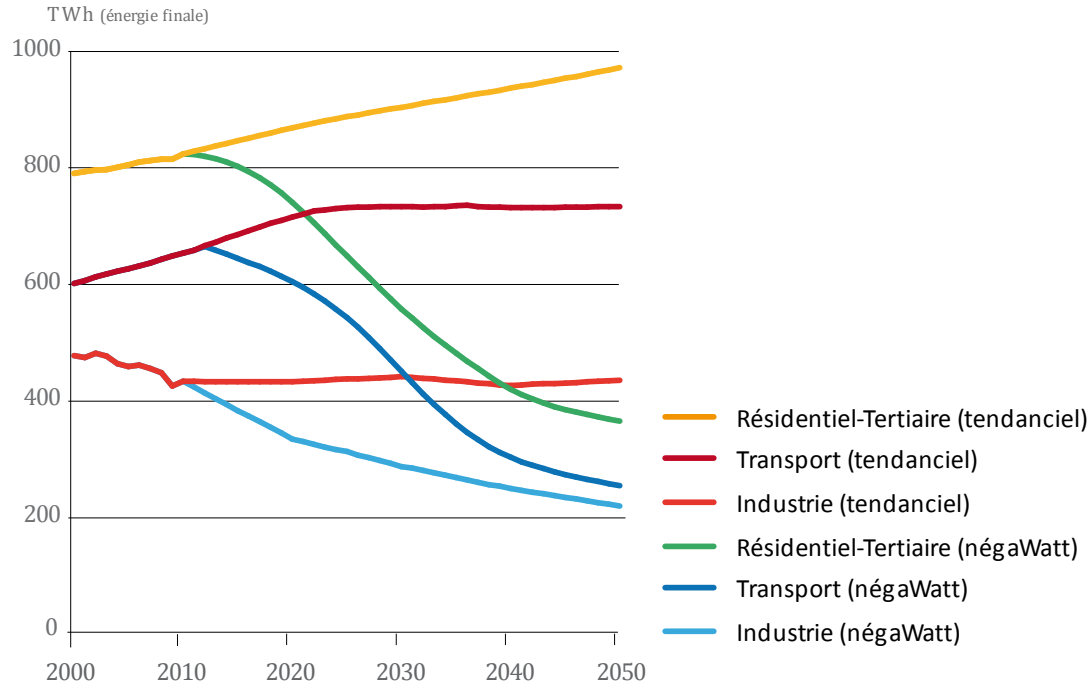
Par ailleurs, les événements observés depuis 2005 tels que la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement ou le passage de la crise économique de 2008 ont conduit à revoir la manière de bâtir le scénario tendanciel. Construit sur le même modèle que le scénario négaWatt, il vise à décrire ce qui se passerait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

Ainsi le scénario tendanciel 2012-2050 intègre une relative stabilisation de la consommation d'énergie à long terme, qui reflète une compensation entre les efforts d'économie d'énergie d'un côté, la croissance de la population et le développement des services énergétiques de l'autre. Du côté de la production, ce scénario projette un maintien de la capacité nucléaire d'une part, un développement modéré et non soutenu dans la durée des énergies renouvelables d'autre part.

Des gains de moitié à deux tiers sur les usages de l'énergie

Le scénario négaWatt analyse, secteur par secteur, les gains attendus de l'application systématique d'une démarche de sobriété et d'efficacité. Partant d'une consommation énergétique finale de 1 927 TWh en 2010, les économies les plus importantes sont trouvées dans le bâtiment résidentiel et tertiaire, avec plus de 600 TWh d'économie en 2050 par rapport au tendanciel, soit une réduction de 63 %. Suivent les transports, avec près de 400 TWh d'économie soit moins 67 %, puis l'industrie avec un peu plus de 200 TWh d'économie soit 50 %. Même si l'évolution des pratiques agricoles est fondamentale dans l'équilibre entre les besoins et les ressources, l'agriculture en tant que telle est marginale dans ce bilan sur les usages qui ne prend en compte que les consommations spécifiques (gazole des tracteurs, chauffage des serres, etc.) : elle est en fait intégrée à la courbe de l'industrie.

Evolution comparée des consommations énergétiques finales par grand secteur d'activité, entre le scénario négaWatt et le scénario tendanciel (en TWh)



Le bâtiment, enjeu énergétique essentiel

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

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

Les actions d'efficacité se concentrent sur l'amélioration massive des performances énergétiques des bâtiments, à la fois par l'isolation (parois et toiture), et par l'optimisation des systèmes de chauffage. Cette combinaison représente des gisements d'économies d'énergie considérables qu'il est indispensable de mobiliser non seulement dans le neuf, mais surtout dans l'existant.

« Un vaste programme de rénovation énergétique de l'ensemble des bâtiments, l'une des clés du scénario »

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

Ces rénovations visent systématiquement un degré élevé de performance pour atteindre une consommation moyenne de 40 kWh d'énergie primaire par m^2 par an pour les besoins de chauffage, soit quatre fois moins qu'aujourd'hui. La même exigence s'applique aux bâtiments neufs, construits au niveau « passif » avec une moyenne de 15 kWh par m^2 et par an pour le résidentiel, 35 le tertiaire.

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

Les bâtiments résidentiels et tertiaires sont aussi le siège d'importantes consommations d'**électricité spécifique** (60% du total), qui ne représentent que 8 % de notre consommation finale d'énergie, mais recouvrent des usages indispensables à notre confort. Le scénario négaWatt en distingue une trentaine auxquels il applique la même méthode : après une analyse sociologique et démographique des usages, il cherche les facteurs de sobriété et d'efficacité et se fixe comme règle pour chaque usage, d'appliquer systématiquement les bonnes pratiques et d'atteindre en moyenne les meilleurs niveaux de performance observés aujourd'hui. .

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

Les transports, un secteur à penser à long terme

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

« À long terme, préserver notre liberté de déplacement tout en nous libérant du monopole contraint de la voiture »

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

Il prévoit d'abord une évolution des besoins de mobilité sous l'effet des politiques d'aménagement du territoire et de nouvelles pratiques sociales. Une politique alternative à l'étalement urbain de densification des espaces urbains et de revitalisation des espaces ruraux, le développement du commerce en ligne ou celui de centres partagés de « télétravail » doivent permettre de réduire, pour les mêmes services, le nombre de kilomètres parcourus. Le scénario prévoit ainsi, globalement, un gain de 25 % environ sur le total des kilomètres parcourus par personne en une année.

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

Le transfert bénéficie en priorité aux modes de déplacement doux que sont la marche à pied et le vélo pour les courtes distances, et aux transports en commun pour les distances supérieures – ce qui

suppose bien sûr un aménagement correspondant des espaces publics urbains ainsi que des réseaux de trains régionaux ou d'autocars. Au centre des espaces urbains, des systèmes très flexibles tels que des petits véhicules électriques en auto-partage ou des taxis collectifs viennent compléter l'offre, excluant à terme totalement le véhicule automobile tel que nous le connaissons aujourd'hui.

Des gains sont ensuite envisagés dans les consommations, à la fois par une meilleure organisation, permettant d'augmenter le taux de remplissage des véhicules et par une régulation plus stricte avec par exemple la limitation des vitesses, mais surtout grâce à une meilleure efficacité des moteurs et une réduction du poids des véhicules en rapport avec les usages : la consommation unitaire par kilomètre parcouru diminue de 55 % entre 2012 et 2050.

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

La seconde est le véhicule fonctionnant au gaz dont le choix pour les voitures, les bus et les poids lourds, repose à la fois sur les avantages intrinsèques de ce vecteur et sur le potentiel qu'il ouvre pour basculer progressivement vers une utilisation de ressources renouvelables : gaz naturel véhicule (GNV) fossile dans un premier temps, il est progressivement remplacé par le gaz renouvelable véhicule (GRV) au fur et à mesure de l'incorporation du biogaz et du gaz de synthèse dans le réseau. La carburation au gaz, déjà largement développée par exemple en Italie, est adaptable sur les véhicules actuels, à essence ou Diesel, elle est fiable et performante. La plupart des stations services peuvent être alimentées par le réseau gazier – sauf dans les territoires très isolés où une part de véhicules à carburant liquide est maintenue. Les véhicules fonctionnant au gaz représentent à terme plus de 60 % des déplacements automobiles. Par ailleurs, ces véhicules, comme ceux fonctionnant aux carburants liquides, sont très majoritairement équipés de systèmes hybrides si possible rechargeables, ce qui en augmente fortement l'efficacité.

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

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

Une mutation de l'industrie

La transition énergétique va de pair avec une profonde évolution de l'industrie, dont la consommation finale d'énergie (23 % de la consommation totale de la France), est aujourd'hui relativement stabilisée grâce aux efforts des industriels pour améliorer l'« intensité énergétique » (la quantité d'énergie nécessaire par unité de production) mais aussi par l'effet des délocalisations qui masquent les consommations intermédiaires d'énergie en les exportant.

La démarche négaWatt introduit une nouvelle perspective en s'interrogeant sur les besoins réels et en reliant besoins de produits finis et de matériaux, avec de la sobriété et de l'efficacité aux différentes étapes. Le scénario prévoit par exemple une réduction importante des emballages ainsi que des papiers imprimés – en rétablissant la consigne sur les bouteilles ou en éliminant les prospectus publicitaires. Plus généralement, l'introduction de principes de « réparabilité » et de « recyclabilité », et surtout la fin de l'« obsolescence programmée » qui est la règle actuellement

permettent de réduire d'autant les besoins de production.

Les besoins énergétiques de l'industrie sont par ailleurs évalués en cohérence avec les évolutions des différents secteurs d'activité, parfois à la baisse avec par exemple une diminution de 45 % sur les engrais agricoles ou de 30 % sur les matériaux pour la construction automobile, parfois à la hausse comme dans le bâtiment en lien avec la rénovation énergétique. Au total, le scénario prévoit une baisse des besoins en matériaux de 10 % à 70 % selon les secteurs, et ceci malgré l'augmentation de 15 % de la population et surtout malgré la relocalisation en France de l'essentiel des industries de transformation, une condition impérative pour atteindre un bilan acceptable en consommation d'énergie et en émission de gaz à effet de serre en se refusant à tabler sur l'exportation des impacts de nos achats de produits manufacturés.

L'efficacité porte sur l'ensemble des procédés. Le scénario intègre par exemple un gain moyen en efficacité de 35 % pour l'ensemble des moteurs électriques, et des gains différenciés pour les procédés utilisant des combustibles, de 32 % dans la sidérurgie à 50 % dans les cimenteries. Il prévoit aussi de développer les solutions de cogénération et de récupération de chaleur sur les sites industriels.

La clé pour aller plus loin est le recyclage des matériaux. Aussi, le scénario prévoit d'augmenter les taux de recyclage actuels pour atteindre à terme des taux proches des maximums réalistes tant du point de vue des procédés que de la collecte. Par exemple, en 2050, 30% des plastiques et 90% de l'acier sont issus du recyclage contre respectivement 4,5% et 52% aujourd'hui

« Dans l'industrie, la clé pour aller loin dans les économies d'énergie est le recyclage des matériaux »

Comme dans le bâtiment et les transports, ces transformations remontent des usages vers les procédés techniques pour faciliter un plus grand recours aux énergies renouvelables. Outre leur contribution via un usage accru de l'électricité, celles-ci se substituent en partie aux sources fossiles : charbon de bois et plastiques recyclés pour la sidérurgie et la cimenterie, gaz d'origine renouvelable et bois ailleurs, et enfin solaire thermique qui couvre en 2050 plus de 30 % des besoins de chaleur basse température et 15 % des besoins en moyenne température.

Le secteur agricole au cœur de la transition

Comme l'industrie, l'agriculture relie consommation et production. Avec à peine plus de 2,5 % de la consommation finale d'énergie, son impact direct est faible, mais elle pèse à la fois par ses émissions de gaz à effet de serre non énergétiques (méthane et protoxyde d'azote) et par sa capacité de production d'énergie tirée de la biomasse, dont on doit veiller à ce qu'elle n'entre pas en concurrence avec les autres usages essentiels que sont l'alimentation mais aussi la production de matériaux.

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

« Comme notre consommation d'énergie, notre consommation de viande n'est pas soutenable »

Ce rééquilibrage a un effet bénéfique aussi sur l'énergie et les surfaces disponibles : l'élevage consomme bien plus de surface et d'énergie que

les productions végétales, et nous avons atteint un niveau de consommation de viande qui n'est pas soutenable à l'échelle de la planète.

Le scénario Afterres 2050 prévoit donc une division par deux des cheptels et une division par cinq de l'élevage intensif. Les modes de production agricole s'orientent plus largement vers le développement de l'agriculture biologique d'une part et de la production dite « intégrée » d'autre part, qui consiste à appliquer des techniques culturales respectueuses des équilibres écologiques (mixité, rotation longue, absence de labours profonds, agroforesterie, optimisation des semis et utilisation d'intrants naturels, etc.). Ces deux approches se partagent à moitié les surfaces cultivables et permettent de diviser par quatre ou cinq les besoins d'intrants chimiques tout en préservant de bons rendements et en améliorant la qualité des sols.

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

Vers des usages sobres, efficaces et renouvelables

À l'image de cette perspective de manger mieux et plus sain, la sobriété ne veut pas dire perte du plaisir, bien au contraire ! La France du scénario négaWatt ne vit pas dans la privation. On s'y loge un peu plus dans du petit collectif qu'aujourd'hui, sans toutefois de réduction notable de la surface de son logement. On y dépense beaucoup moins pour se chauffer tout en bénéficiant d'un meilleur confort thermique d'hiver comme d'été. Les équipements électriques des ménages sont plus efficaces et l'usage qui en est fait est plus rationnel, consommant en moyenne deux fois moins d'électricité spécifique.

Les modes de consommation et de production évoluent et l'activité tertiaire, industrielle et agricole avec eux. Au final, les Français ne consomment pas moins mais mieux. Ces changements s'accompagnent d'une meilleure répartition des activités sur le territoire qui conduit à une réduction des distances parcourues. Bénéficiant d'infrastructures de transports plus diversifiées et plus adaptées, ces déplacements s'effectuent dans des conditions plus agréables.

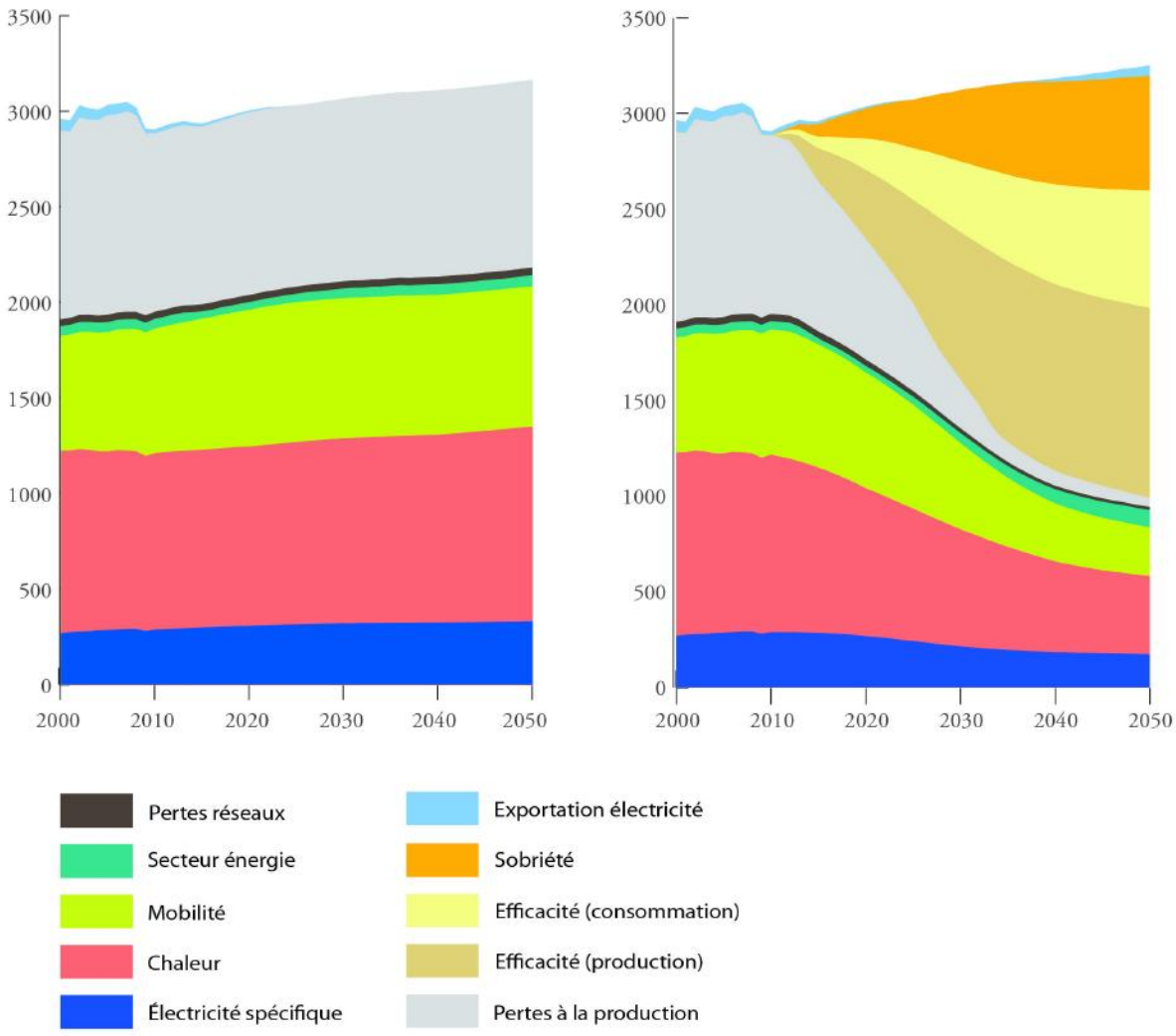
Au terme de ces évolutions ambitieuses, mais somme toute réalistes à l'échelle d'une ou deux générations en regard de ce qui nous sépare de nos grands-parents, le gisement d'économies d'énergie mis en évidence est considérable : les gains s'élèvent respectivement à 54 % sur la chaleur, 59 % sur la mobilité mais « seulement » 40 % sur l'électricité spécifique du fait que sa part progresse dans les usages.

Au total, les gains en consommation finale d'énergie s'élèvent à près de 60 % par personne. La sobriété et l'efficacité comptent globalement chacune pour moitié environ dans ce résultat, avec toutefois des différences selon les secteurs : plus de sobriété dans les transports, plus d'efficacité dans le bâtiment.

« Des évolutions ambitieuses, mais réalistes à l'échelle d'une ou deux générations »

Dès lors qu'il faut fournir en 2050 environ 2,2 fois moins d'énergie que dans un scénario tendanciel pour satisfaire les besoins de la société française, la question des ressources énergétiques pour y répondre change de nature. Les évolutions envisagées par le scénario négaWatt, qui s'accompagnent des transformations nécessaires sur les infrastructures et les équipements, permettent une bascule presque totale vers les énergies renouvelables : celles-ci peuvent couvrir en 2050 plus de 90 % des besoins de chaleur et de mobilité et près de 100 % des besoins en électricité spécifique.

Evolution comparée des consommations énergétiques finales par usages entre le scénario tendanciel et le scénario négaWatt (en TWh)



Le décollage des énergies renouvelables

Pour répondre à la demande résiduelle d'énergie issue des actions de sobriété et d'efficacité, le scénario envisage une offre fondée en priorité sur le développement des énergies renouvelables, avant de considérer le rythme de réduction des énergies fossiles et fissile en fonction de l'ajustement nécessaire aux besoins. Ce développement se veut réaliste. Il s'appuie notamment sur une estimation prudente des potentiels et sur le retour d'expérience industrielle tiré des programmes passés en France, mais surtout des réussites observées à l'étranger.

Le scénario négaWatt s'appuie aussi sur la principale richesse des énergies renouvelables : leur diversité et leur complémentarité. Un recours aussi judicieux que possible aux différentes ressources disponibles permet de mieux maîtriser les conditions de développement et les impacts spécifiques à chacune d'elles.

« Un système performant de mobilisation de la biomasse est au cœur de la transition énergétique »

Les énergies renouvelables électriques focalisent l'attention, mais l'électricité ne représente aujourd'hui que 24 % de nos consommations énergétiques. Du point de vue quantitatif, l'essentiel se joue donc ailleurs : c'est sur la mise en place d'un système moderne de mobilisation d'exploitation de la biomasse que repose avant tout la transition énergétique.

Le scénario négaWatt s'articule là aussi avec les projections d'Afterres 2050, où l'évolution du système agricole libère des espaces pour la production de biomasse énergie et de matériaux « biosourcés » qui, en se substituant à des matériaux classiques issus de ressources non-renouvelables, participent aux économies d'énergie dans d'autres secteurs que l'agriculture.

La première ressource en biomasse est le bois énergie. Si la surface forestière reste quasi-stable, sa meilleure exploitation, assortie d'un développement de l'agroforesterie et d'une récupération plus systématique des déchets de bois divers, permet de multiplier par 2,5 son apport pour atteindre 296 TWh en 2050.

Le scénario exploite ensuite la ressource agricole à plusieurs niveaux. L'un d'eux est la généralisation de la méthanisation des déjections d'élevage, ainsi que d'une partie des résidus solides de culture. L'herbe des prairies fournit également une très bonne ressource pour la méthanisation, et le recul de l'élevage libère environ 1,5 millions d'hectares qui peuvent lui être consacrés, portant la production de biogaz à 153 TWh en 2050 contre 4 TWh aujourd'hui.

Les biocarburants liquides présentent globalement, même si l'on tient compte des progrès possibles, un rendement et des impacts moins favorables que cette production de biogaz, préférée pour cette raison notamment sous forme de carburant gazeux dans les transports. Aussi, la production de biomasse liquide ne progresse que de 22 TWh à 44 TWh, contre les 65 qui avaient été envisagés pour 2015 par le « plan Villepin » lancé en 2005.

Au total, un triplement de l'utilisation de la biomasse sous toutes ses formes à l'horizon 2050 permet, avec 519 TWh, de couvrir plus de 45 % des besoins en énergie primaire.

« La France possède l'un des meilleurs potentiels en Europe pour les énergies renouvelables »

Riche en ressources agricoles, la France possède également l'un des meilleurs potentiels en Europe pour chacune des grandes filières d'électricité renouvelable : l'hydroélectricité, l'éolien et le photovoltaïque. Seule la première a atteint, avec 77 TWh, un niveau important de production que le scénario maintient stable dans l'avenir.

Aussi, la priorité va d'abord au rattrapage du retard pris par la France dans le domaine de l'éolien terrestre, avec une multiplication par 3,5 de la puissance installée d'ici 2020 puis encore par 2 avant 2050 avec un total de 17 400 machines installées contre 4 000 fin 2011 Le développement de l'éolien « offshore », d'abord avec des machines fixées sur des fondations à faible profondeur, puis sur des plateformes ancrées afin d'accéder aux zones les plus ventées, est plus tardif mais représente à terme, avec seulement 4 300 machines de forte puissance, presque la moitié des 194 TWh produits en 2050.

Le décollage du photovoltaïque est dans un premier temps rapide afin d'atteindre en quelques années un volume significatif d'installations annuelles. Il augmente ensuite progressivement dans une logique de « vitesse de croisière » pour atteindre à terme une production annuelle d'environ 90 TWh. Cette capacité est répartie entre une grosse majorité sur bâtiments, le reste par des parcs au sol sur des terrains adéquats ne rentrant pas en concurrence avec d'autres usages : sols pollués et artificialisés, abords des d'infrastructures de transport, etc. Si l'on retient une répartition deux tiers / un tiers, cela revient à équiper de systèmes photovoltaïques moins de 5 % de la surface totale des toitures françaises et à occuper pour les parcs au sol un terrain de 30 km par 30 km dont seulement 30 % de la surface est en pratique couverte par les panneaux.

La production d'électricité d'origine renouvelable, incluant une contribution modeste des énergies marines, atteint au total 347 TWh en 2050. Elle représente ainsi plus de 30 % des besoins en énergie primaire.

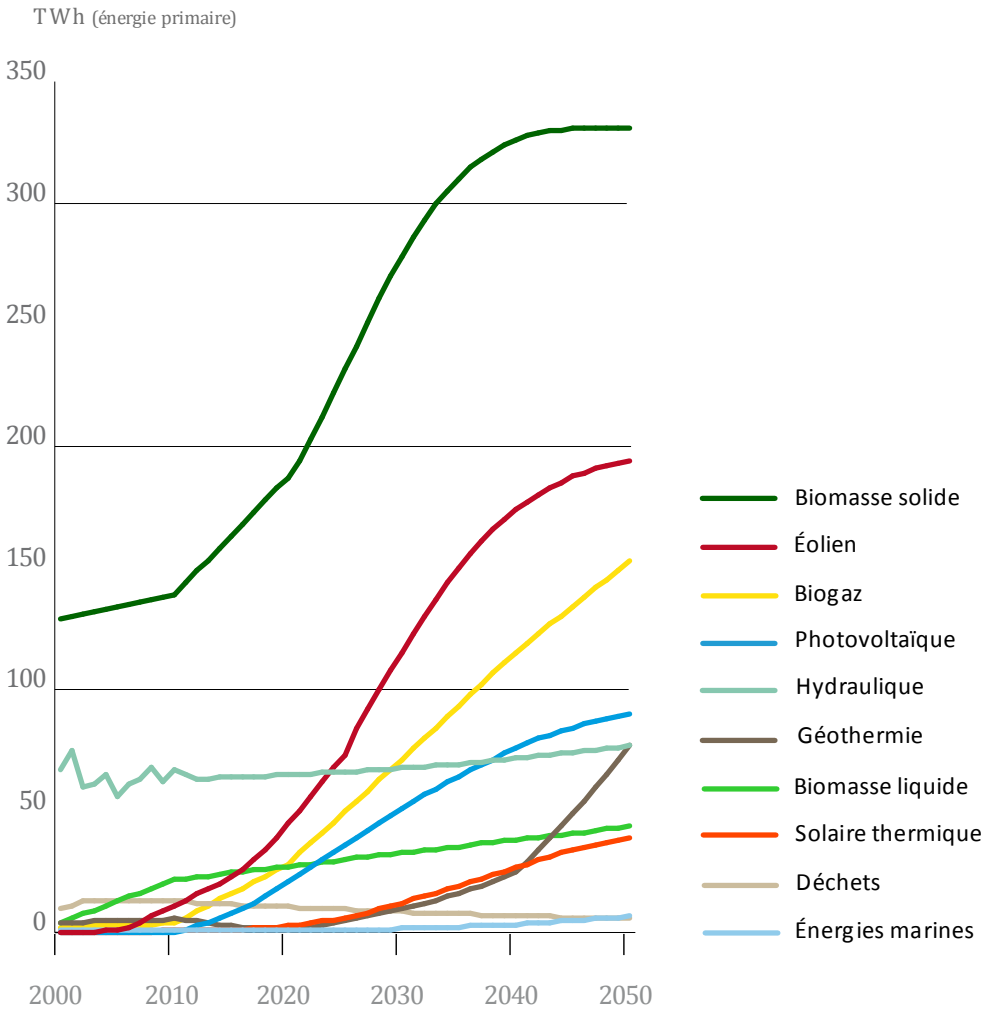
Enfin, d'autres sources renouvelables peuvent être mobilisées. La géothermie, progresse fortement essentiellement pour la production de chaleur avec 66 TWh en 2050 contre 6 TWh aujourd'hui.

L'incinération des ordures ménagères qui présente un mauvais rendement et pose des problèmes de pollution locale voit au contraire sa contribution se réduire de 13 à 6 TWh du fait de la progression du tri à la source et de la valorisation matière des déchets,.

Le solaire thermique, quasi inexistant aujourd'hui, est également fortement mobilisé : avec plus de 120 millions de m^2 de capteurs sur les bâtiments résidentiels, tertiaires et industriels, il fournit à terme 43 TWh de chaleur primaire.

Au final, un développement réaliste des énergies renouvelables conduit, en 2050, à une ressource disponible sur le territoire de plus de 990 TWh sur un total de 1 100 TWh de besoins en énergie primaire. Ainsi, la société française du scénario négaWatt, avec 90 % d'énergies renouvelables, a réussi en 2050 sa transition énergétique.

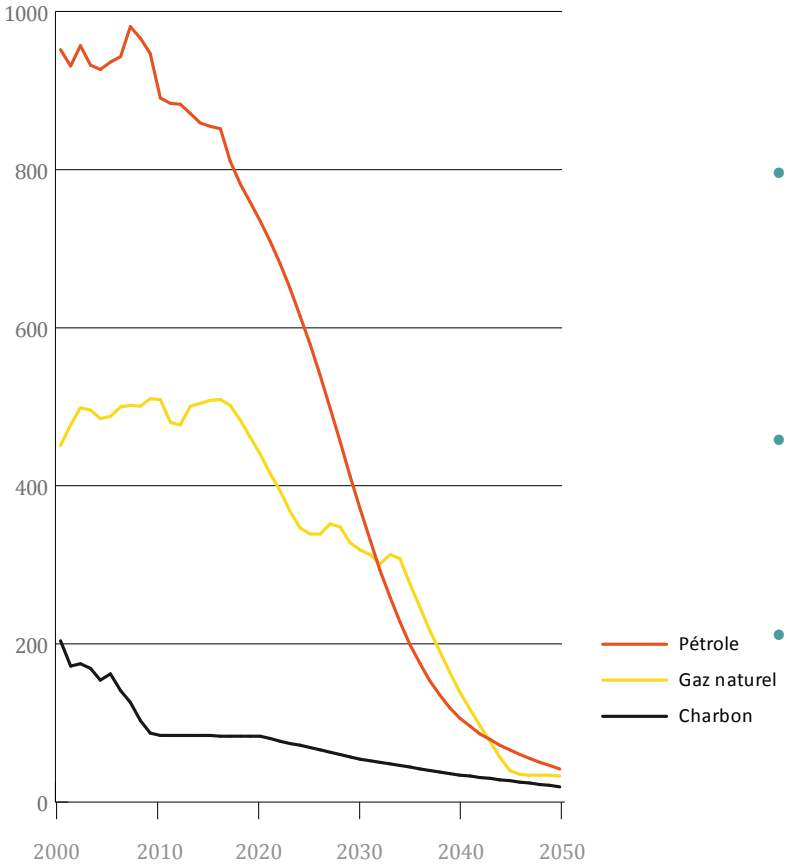
Développement des différentes filières renouvelables dans le scénario négaWatt (en TWh)



Un recours marginal aux énergies fossiles

La différence entre la production d'énergies renouvelables et les besoins totaux, soit environ 10% de ces derniers en 2050, représente la part résiduelle d'énergies fossiles qui seront encore nécessaires. Partant de plus de 70 % de consommation de pétrole, gaz naturel et charbon en 2010, la France peut ainsi en moins de quarante ans s'affranchir quasiment en totalité de sa très forte dépendance aux hydrocarbures.

Evolution des consommations de pétrole, de gaz naturel et de charbon dans le scénario négaWatt (en TWh)



Avec 19 TWh de charbon, 33 TWh de gaz naturel fossile et 42 TWh de pétrole, la consommation d'énergies fossiles est plus de 15 fois plus faible en 2050 qu'en 2010.

Leurs utilisations sont de natures différentes :

- L'usage du pétrole subsiste essentiellement dans les transports, où il contribue encore à la moitié environ de l'approvisionnement d'un parc résiduel de véhicules à carburant liquide.
- Celui du charbon, plus réduit, est essentiellement lié à la chaleur de certains procédés industriels et à l'utilisation comme matière première dans la sidérurgie.
- Enfin, celui du gaz naturel fossile est destiné essentiellement à la cogénération, notamment industrielle, et pour une part marginale de quelques TWh à un appoint flexible à la production d'électricité.

Le rythme de réduction des usages du gaz naturel fossile se distingue par une première phase de décroissance modérée, entre 2012 et 2035, qui s'explique par le recours temporaire à des centrales au gaz comme solution de transition pour assurer l'équilibre électrique en accompagnement de la fermeture progressive des réacteurs nucléaires. Les quantités de gaz fossile mises en jeu n'excèdent jamais 70 TWh par an, si bien que cette augmentation temporaire reste globalement inférieure aux économies de gaz réalisées dans d'autres secteurs par la rénovation énergétique et par la substitution de gaz renouvelable, qu'il s'agisse de biogaz ou de gaz de synthèse. Après la fermeture du parc de réacteurs nucléaires, la consommation de gaz diminue sur un rythme encore plus marqué entre 2035 et 2045 où elle se stabilise enfin à un niveau résiduel.

Une sortie complète de l'usage des énergies fossiles pour atteindre 100% d'énergies renouvelables serait envisageable mais demanderait des efforts supplémentaires qui pourraient s'avérer couteux et complexes : il faudra le cas échéant en mesurer l'intérêt et la pertinence au regard de l'ensemble des paramètres. Sans l'exclure, le scénario négaWatt ne la prévoit pas explicitement.

Un abandon progressif et raisonné du nucléaire

L'effacement progressif de la production d'électricité nucléaire au fur et à mesure de la montée en puissance des renouvelables permet d'envisager à terme un abandon complet de cette énergie qui représente en 2010 plus de 75 % de la production d'électricité française. Le scénario négaWatt applique dans cette perspective une logique très pragmatique : il s'agit, dès que le développement des alternatives par une combinaison sobriété-efficacité-renouvelables le permet, de fermer les réacteurs sans les remplacer, selon un rythme prenant en compte à la fois les enjeux de sûreté et l'évolution des besoins énergétiques.

La démarche consiste donc d'abord à considérer le besoin d'électricité correspondant aux différents usages, puis la part qui peut au fil des ans être couverte par les énergies renouvelables. La différence, qui est chiffrée en besoin annuel de production (en TWh) en tenant compte heure par heure de l'exigence d'équilibre entre l'offre et la demande, indique le niveau de production non renouvelable qu'il est nécessaire de maintenir.

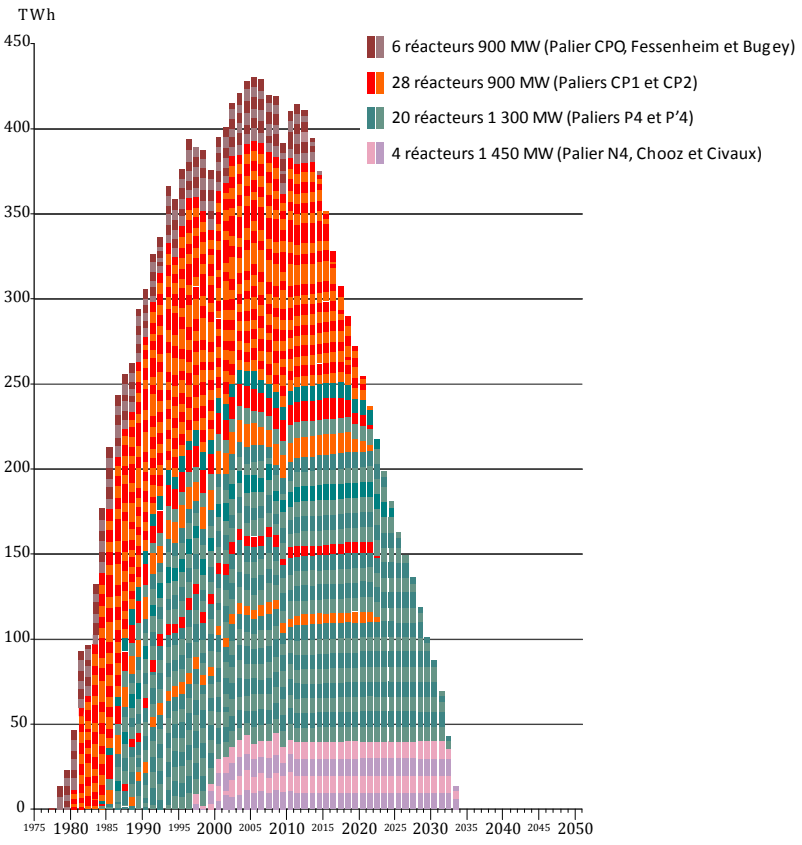
En croisant ce besoin avec l'état de vieillissement des réacteurs nucléaires, qui influence fortement le niveau de sûreté du parc, on peut déterminer le rythme de fermeture des réacteurs. Le cas échéant, les énergies fossiles, notamment le gaz naturel, assurent le complément de manière transitoire en attendant que les « alternatives négaWatt » soient disponibles.

Le vieillissement du parc est un problème délicat. Un certain nombre des réacteurs ont d'ores et déjà atteint voire dépassé une durée d'exploitation de 30 ans, qui avait été jugée comme un horizon maximal raisonnable lors de leur conception. L'industrie nucléaire veut se fixer désormais un objectif de 40 ans sur lequel on ne dispose d'aucun retour d'expérience. Dans le contexte de réévaluation de la sûreté suite à l'accident de Fukushima, cette limite constitue en tout état de cause un maximum absolu : aucun renforcement des dispositifs de sûreté ne pourra en effet remettre à niveau la conception initiale de ces réacteurs ni compenser l'usure de composants impossibles à remplacer.

Il faut compter avec l'effet de « falaise » de la pyramide des âges du parc : 80 % des réacteurs, représentant plus de 60 % de la production électrique actuelle, ont été mis en service entre 1977 et 1987, et tous les autres dans la décennie suivante, à l'exception du dernier fin 1999. Il est donc nécessaire de prévoir, à l'image de la règle introduite dès 2000 dans l'accord d'abandon du nucléaire en Allemagne, une certaine flexibilité sur l'âge de fermeture des réacteurs autour d'une moyenne visée, en fonction de différents critères liés à la sûreté.

Une modélisation du rythme de sortie réacteur par réacteur permet de trouver un optimum entre ces différentes contraintes. La fermeture du parc comprend trois phases.

Le parc nucléaire dans le scénario négaWatt (en TWh)



Dans la première, la surcapacité du parc actuel et les réserves d'exportation permettent de fermer rapidement les réacteurs les moins sûrs, en commençant par les plus anciens : jusqu'à 3 500 MW de capacité sont ainsi fermés chaque année.

Le rythme de fermeture se stabilise ensuite à un niveau plus modéré et régulier de 2 500 MW par an environ, ce qui est essentiel pour permettre aux renouvelables de prendre le relais sans à-coups dans leur dynamique industrielle.

Enfin, le rythme s'accélère à nouveau dans les dernières années, où jusqu'à 4 000 MW par an sont fermés : il s'agit, même si cela peut toucher les réacteurs les plus récents avant leurs 40 ans, de gérer la fin du repli industriel.

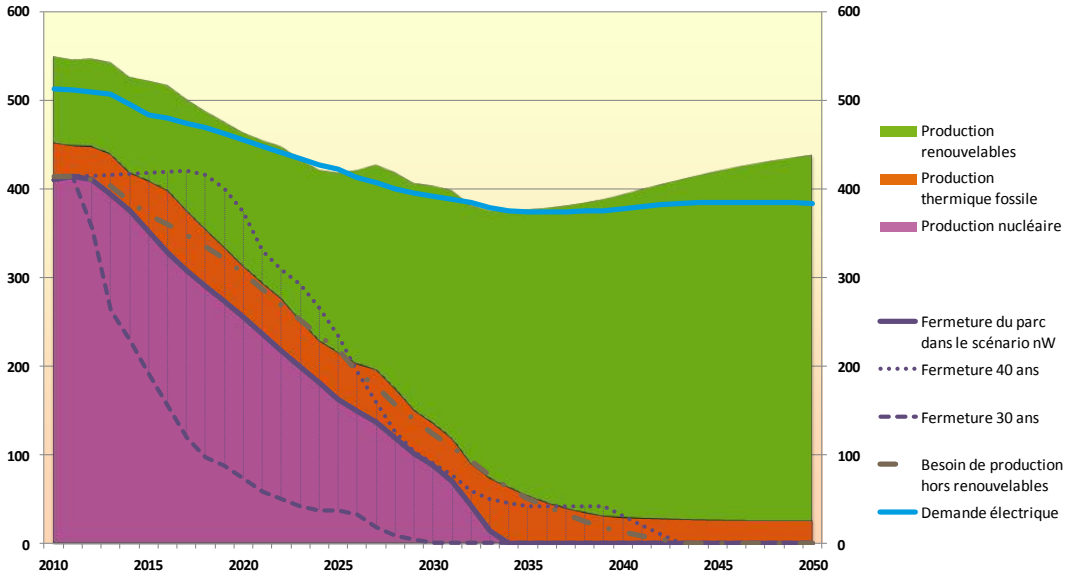
La sortie du nucléaire ne concerne en effet pas que les réacteurs : ceux-ci ont besoin pour fonctionner d'usines (pour la préparation et la fabrication du combustible, pour la prise en charge des déchets…), mais aussi de structures d'évaluation et de contrôle. Cela n'a pas de sens, du point de vue industriel et économique comme de celui de la sûreté, de prolonger ou de renouveler ces moyens pour le fonctionnement de quelques réacteurs pendant quelques années seulement.

Ainsi, le dernier réacteur du parc est fermé en 2033, ce qui correspond à un abandon de la production nucléaire en 22 ans. Ce rythme calculé au plus juste sans être volontariste est le fruit d'un optimum étroit entre les différentes contraintes. Il s'agit d'un côté, de fermer les réacteurs à un rythme suffisant pour respecter les enjeux de sûreté : la fermeture de chaque réacteur doit intervenir entre sa trentième et sa quarantième année de fonctionnement. De l'autre côté, il faut faire en sorte que la production nucléaire reste aussi proche que possible du besoin de compléter la production des renouvelables, afin de minimiser le recours au gaz fossile pour assurer la transition et d'éviter un pic non maîtrisé de l'usage de ce dernier.

La mise en regard de ces objectifs avec la nécessaire cohérence industrielle conduit à un croisement des contraintes au cours des prochaines décennies : dans la première partie de la période, c'est le rythme de développement des efforts sur la consommation et sur les renouvelables qui est dimensionnant ; à l'inverse, vers la fin de la période, c'est le vieillissement du parc qui constitue la principale contrainte avec un « point de resserrement » en 2027.

C'est pourquoi il est indispensable d'engager rapidement le processus d'abandon du nucléaire pour permettre en 15 ans un niveau suffisant de développement des alternatives avant le « mur » des 40 ans du parc. Au final, cette analyse multi-contraintes montre surtout que la fenêtre est étroite : elle se situe entre 2030 et 2035, et elle se joue dans les prochaines années.

Optimisation des contraintes sur le rythme de fermeture du parc de réacteurs nucléaires



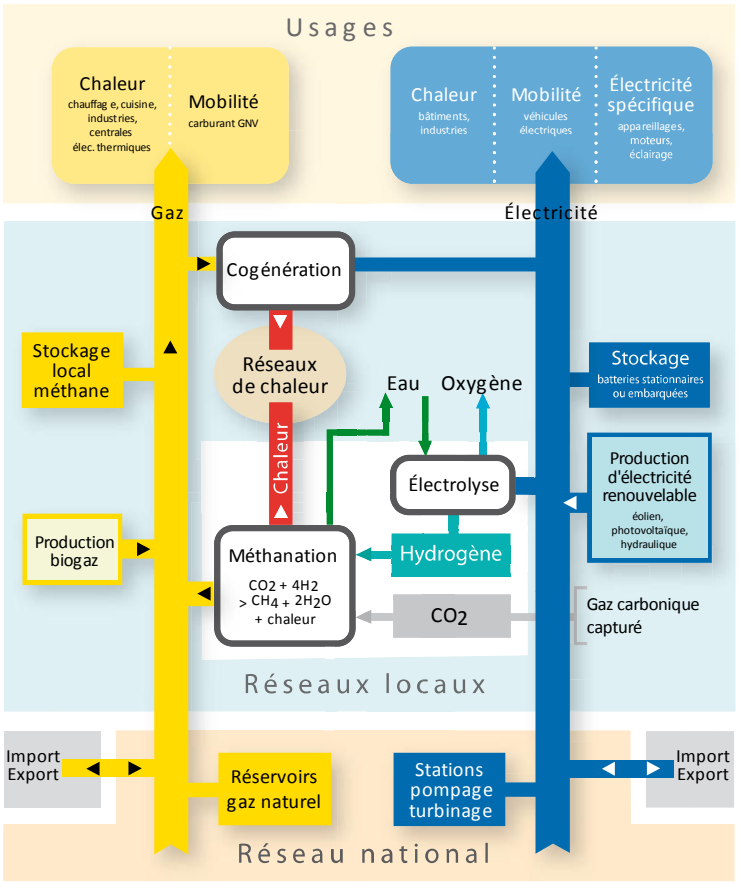
La complémentarité des réseaux pour atteindre les « 100 % négaWatt »

Les critiques adressées aux énergies renouvelables variables (et non « intermittentes » du fait de leur foisonnement) sont souvent très exagérées, mais il est vrai qu'il que l'impératif de devoir assurer à tout instant l'équilibre offre-demande du réseau électrique (et de lui seul) est l'un des défis à relever dans un système 100% négaWatt qui comporte une part importante de sources dont on ne commande pas la production sauf éventuellement en, les déconnectant

La solution réside évidemment dans les moyens de stockage à différentes échelles de quantité et de puissance et à différents points du réseau. Les « stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage » (STEP) assurent déjà cette fonction pour le réseau actuel : leur capacité ne peut pas beaucoup augmenter, mais elles peuvent être utilisées beaucoup efficacement

Différents types de batteries d'accumulateurs (lithium-ion, vanadium, sodium-soufre, etc.) sont souvent évoquées, ainsi que la possibilité d'utiliser les véhicules électriques comme « batteries sur roues », ou encore de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau pour alimenter des piles à combustible. Mais aucune de ces solutions ne présente des capacités de stockage à la hauteur de l'enjeu. Il ne s'agit pas en 2050 n'est pas de décaler de quelques heures une production pour répondre à des pics de consommation journalière, mais de stocker quelques centaines de GWh produits pendant des journées voire des semaines de bon ensoleillement ou de vent fort pour les restituer ensuite quand la situation s'inverse.

■ Complémentarité entre réseaux : la « méthanation »



Solution prometteuse, très étudiée en Allemagne, la *méthanation,* qui fut découverte par le Français Paul Sabatier, prix Nobel de Chimie en 1912 est la production de méthane synthétique par réaction simple entre de l'hydrogène d'électrolyse et du gaz carbonique de combustion qui peut être injecté comme le biogaz, dans le réseau où il remplace le gaz naturel fossile.

L'électricité non stockable est ainsi « transformée » en molécules qui, elles, le sont parfaitement.

En outre, la forte réduction de la pointe hivernale due notamment au chauffage électrique qui aura été progressivement éradiqué facilitera la réalisation de l'équilibre heure par heure en diminuant les aléas côté consommation

Le scénario négaWatt prévoit l'injection dans le réseau d'environ 30 TWh de méthane synthétique par an, une quantité suffisante pour contre-balancer intégralement la variabilité de la production d'électricité renouvelable, tout en fournissant un peu de chaleur coproduite par la réaction pour alimenter un réseau local.

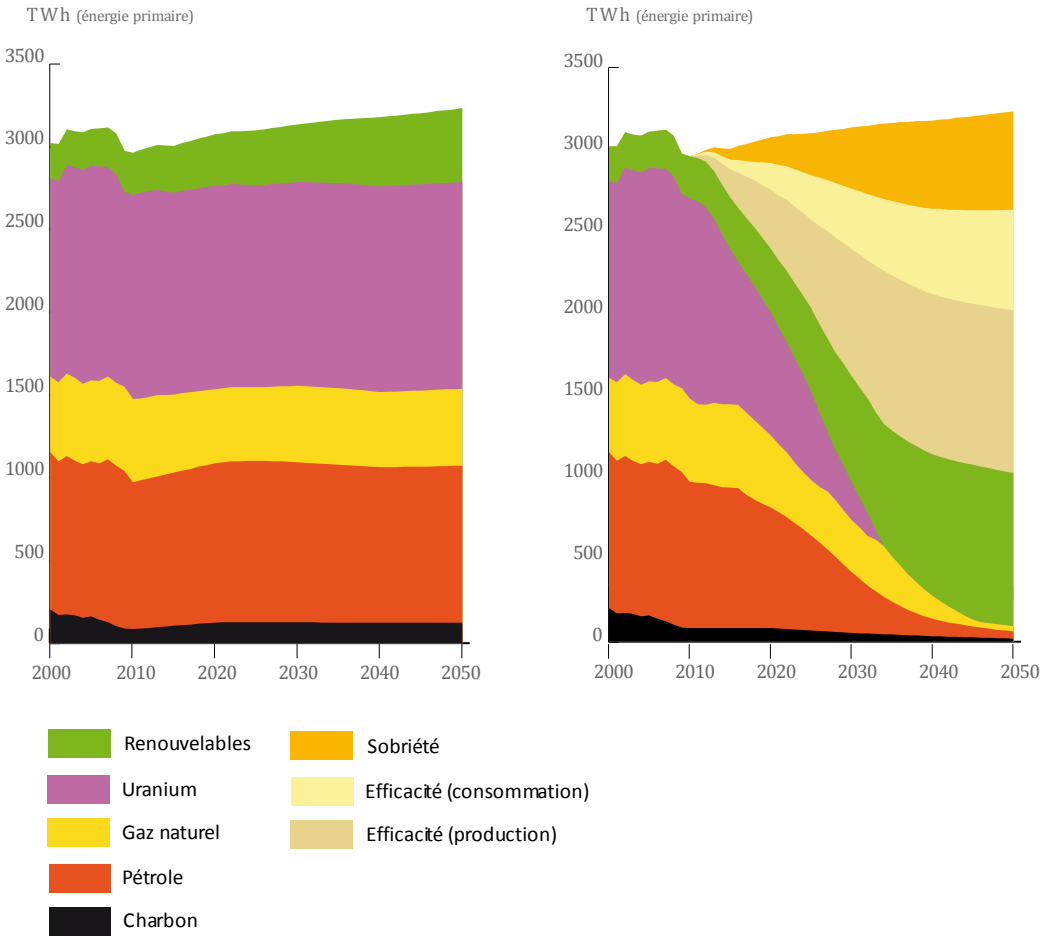
Or la France dispose de plus de 100 TWh de capacité de stockage souterrain de gaz : outre le stockage d'électricité excédentaire la très grande flexibilité à la production comme à l'usage du vecteur gaz peut ainsi être mise à profit dans une logique de complémentarité entre les différents réseaux énergétiques et non de concurrence absurde comme c'est le cas aujourd'hui.

Vers un bilan 100 % soutenable en énergie primaire

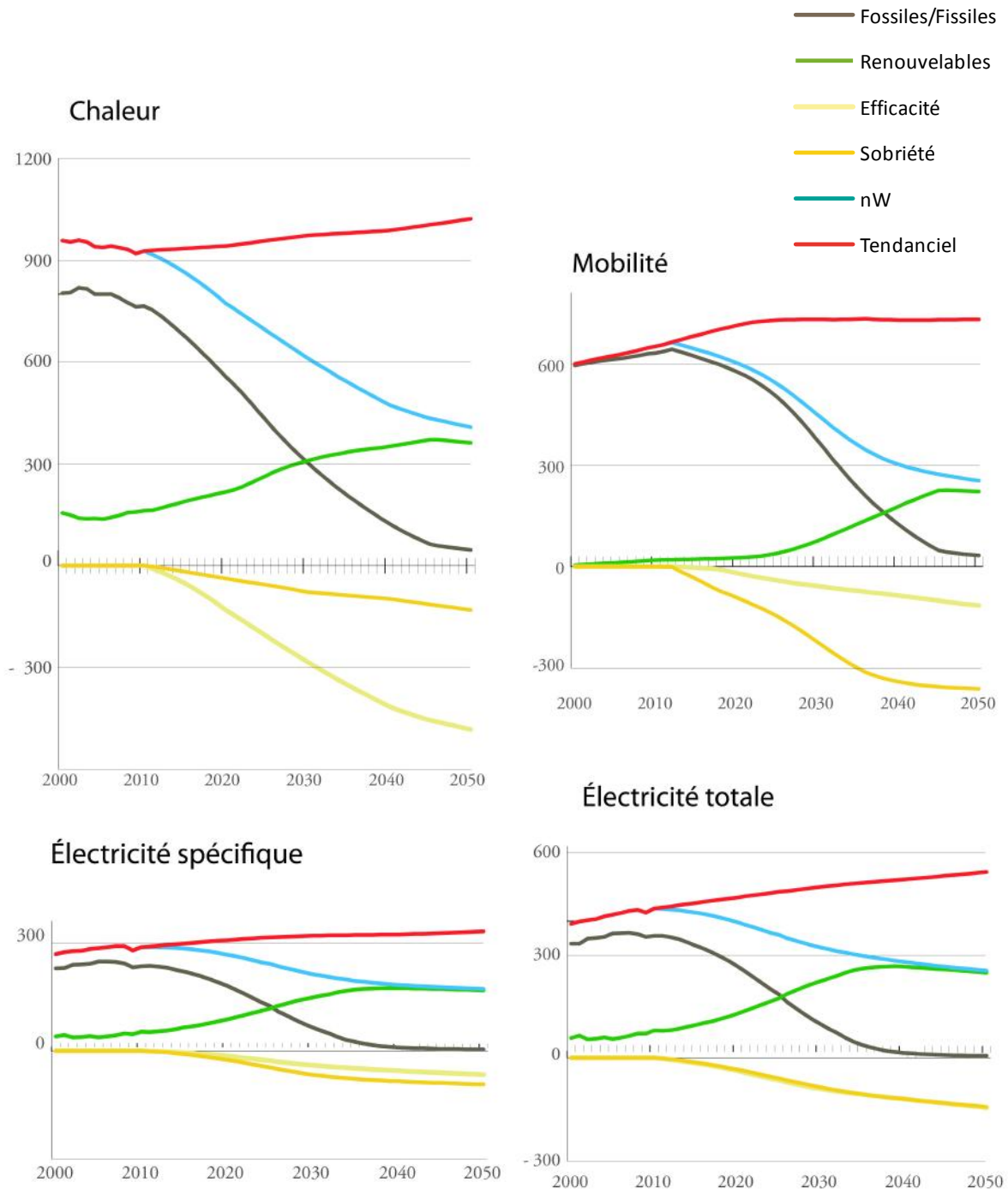
Le scénario négaWatt démontre la faisabilité d'une transition vers un système énergétique fondé sur les énergies de flux. La société française consomme à l'horizon 2050 environ 1 800 TWh d'énergie primaire de moins qu'aujourd'hui, soit, une réduction de près des deux tiers. C'est environ 30 % seulement des ressources énergétiques qu'elle consommerait dans un scénario tendanciel. Elle atteint en 2050 – et s'approche dès 2040 – d'un objectif de 90 % d'énergies renouvelables en énergie primaire.

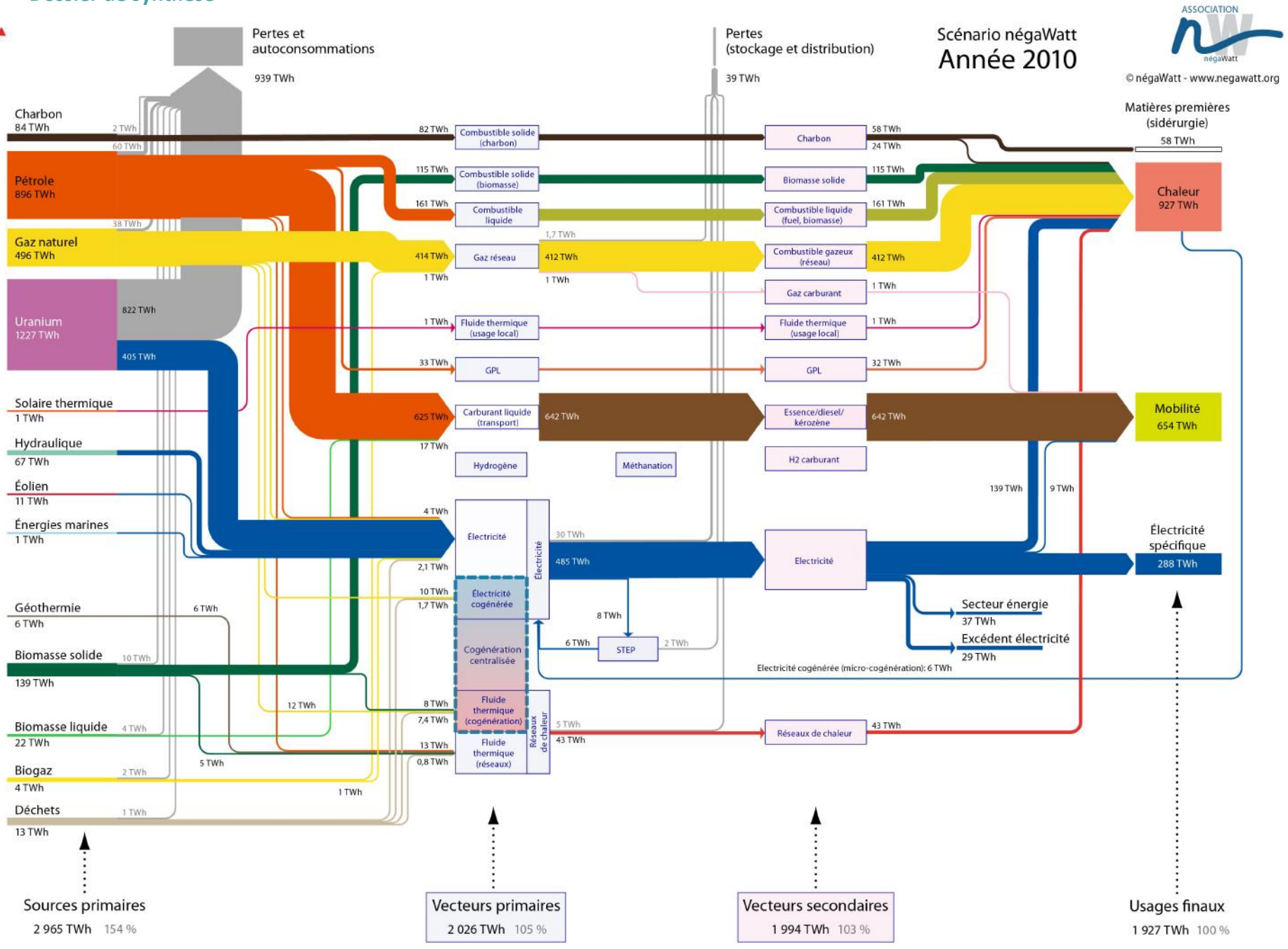
Ce changement s'accompagne d'un rendement très accru du système, ce que traduit le passage du ratio entre énergie finale et énergie primaire de 65 % à près de 87 %. Ces résultats sont notamment obtenus par une révolution dans la gestion des « vecteurs énergétiques », au premier rang desquels l'électricité et le gaz, jouant sur la diversité de leurs sources et de leurs usages, ainsi que sur la complémentarité opérationnelle de leurs réseaux.

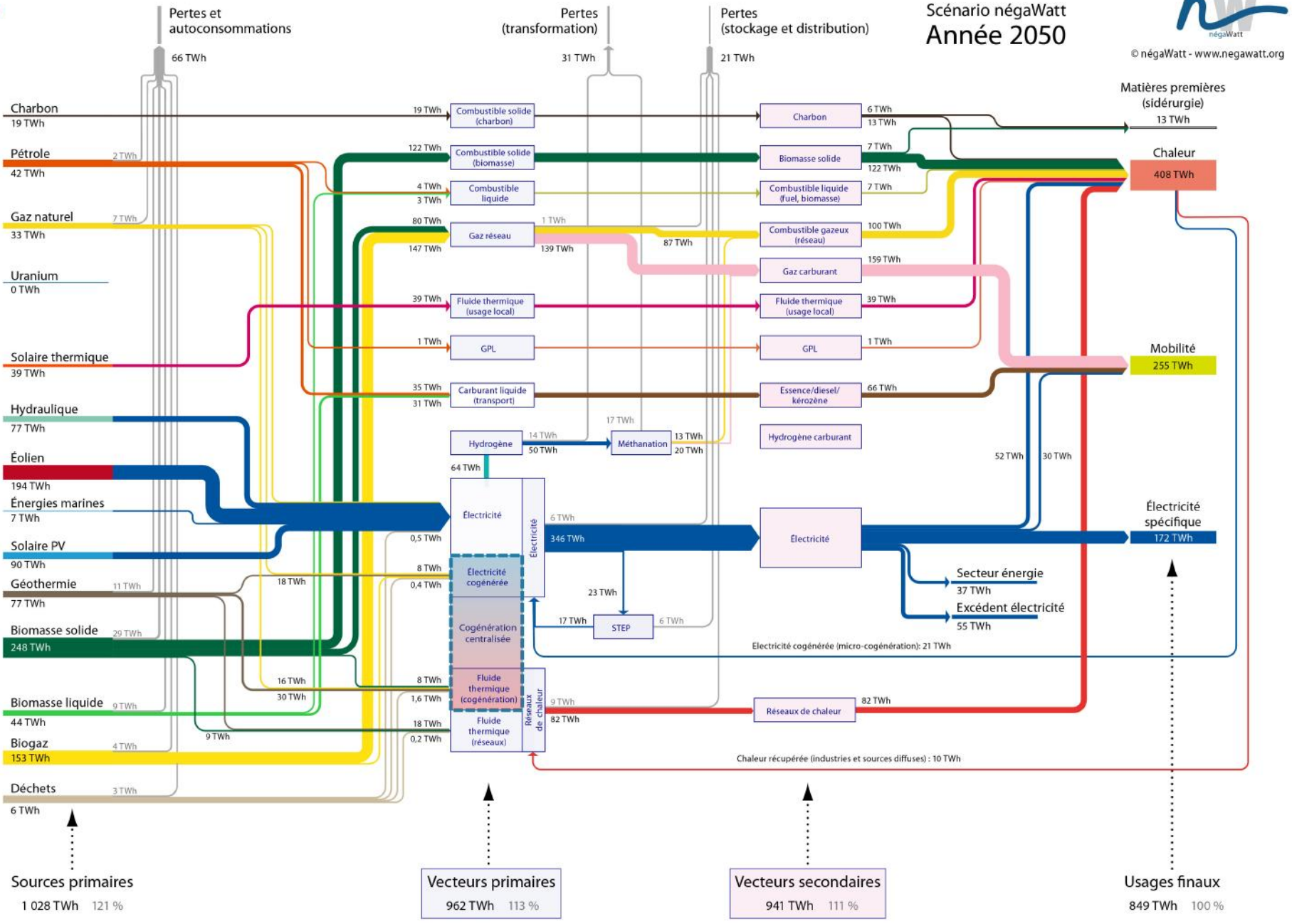
Evolution comparée des productions en énergies primaires par source entre le scénario tendanciel et le scénario négaWatt 2011 (en TWh)



■ **Evolution des besoins en énergie finale, de la sobriété, de l'efficacité et de la part d'énergies fossiles et fissile et d'énergies renouvelables par grand usage** (en TWh)




Pertes et autoconsommations
939 TWh
Pertes (stockage et distribution)
39 TWh
Scénario négaWatt
Année 2010
© négaWatt - www.negawatt.org
Charbon
84 TWh
Pétrole
896 TWh
Gaz naturel
496 TWh
Uranium
1227 TWh
Solaire thermique
1 TWh
Hydraulique
67 TWh
Éolien
11 TWh
Énergies marines
1 TWh
Géothermie
6 TWh
Biomasse solide
139 TWh
Biomasse liquide
22 TWh
Biogaz
4 TWh
Déchets
13 TWh
Combustible solide (charbon)
Combustible solide (biomasse)
Combustible liquide
Gaz réseau
Fluide thermique (usage local)
GPL
Carburant liquide (transport)
Hydrogène
Méthanation
Électricité
Électricité cogénérée
Cogénération centralisée
Fluide thermique (cogénération)
Fluide thermique (réseaux)
Réseaux de chaleur
STEP
Charbon
Biomasse solide
Combustible liquide (fuel, biomasse)
Combustible gazeux (réseau)
Gaz carburant
Fluide thermique (usage local)
GPL
Essence/diesel/ kérozène
H2 carburant
Electricité
Réseaux de chaleur
Matières premières (sidérurgie)
58 TWh
Chaleur
927 TWh
Mobilité
654 TWh
Électricité spécifique
288 TWh
Secteur énergie
37 TWh
Excédent électricité
29 TWh
Electricité cogénérée (micro-cogénération): 6 TWh
Sources primaires
2 965 TWh 154 %
Vecteurs primaires
2 026 TWh 105 %
Vecteurs secondaires
1 994 TWh 103 %
Usages finaux
1 927 TWh 100 %


Pertes et autoconsommations
66 TWh
Pertes (transformation)
31 TWh
Pertes (stockage et distribution)
21 TWh
Scénario négaWatt
Année 2050
© négaWatt - www.negawatt.org
Charbon
19 TWh
Pétrole
42 TWh
Gaz naturel
33 TWh
Uranium
0 TWh
Solaire thermique
39 TWh
Hydraulique
77 TWh
Éolien
194 TWh
Énergies marines
7 TWh
Solaire PV
90 TWh
Géothermie
77 TWh
Biomasse solide
248 TWh
Biomasse liquide
44 TWh
Biogaz
153 TWh
Déchets
6 TWh
Combustible solide (charbon)
Combustible solide (biomasse)
Combustible liquide
Gaz réseau
Fluide thermique (usage local)
GPL
Carburant liquide (transport)
Hydrogène
Méthanation
Électricité
Électricité cogénérée
Cogénération centralisée
Fluide thermique (cogénération)
Fluide thermique (réseaux)
Réseaux de chaleur
STEP
Charbon
Biomasse solide
Combustible liquide (fuel, biomasse)
Combustible gazeux (réseau)
Gaz carburant
Fluide thermique (usage local)
GPL
Essence/diesel/ kérozène
Hydrogène carburant
Électricité
Réseaux de chaleur
Matières premières (sidérurgie)
13 TWh
Chaleur
408 TWh
Mobilité
255 TWh
Électricité spécifique
172 TWh
Secteur énergie
37 TWh
Excédent électricité
55 TWh
Electricité cogénérée (micro-cogénération): 21 TWh
Chaleur récupérée (industries et sources diffuses) : 10 TWh
Sources primaires
1 028 TWh 121 %
Vecteurs primaires
962 TWh 113 %
Vecteurs secondaires
941 TWh 111 %
Usages finaux
849 TWh 100 %

Un scénario compatible avec les enjeux à 2050

Au terme de cette analyse du scénario négaWatt, il nous reste à répondre une question majeure : un tel scénario est-il compatible avec l'urgence des enjeux énergétiques et climatiques mondiaux ?

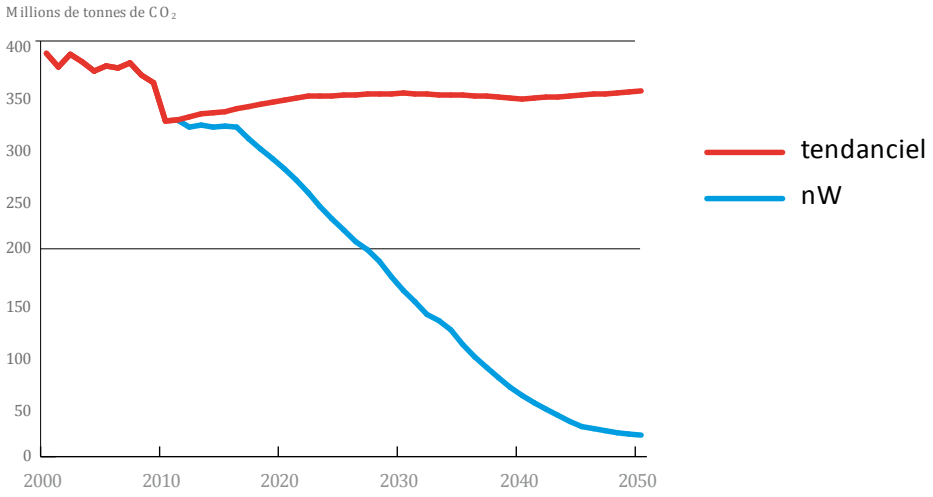
Les risques nucléaires pour la France mais aussi pour ses voisins sont réduits par un arrêt rapide des réacteurs présentant les risques les plus élevés, puis par un arrêt maîtrisé et cohérent de toute production d'électricité nucléaire en 2033. Le nombre cumulé d'heures de fonctionnement des réacteurs jusqu'en 2050 est divisé par 3,2, ce qui permet de réduire d'autant l'accumulation de déchets nucléaires dont le fardeau pèsera sur les épaules de nos descendants.

La fin du pétrole facile (*peak-oil*) est anticipée par la limitation de son utilisation à la pétrochimie et aux matières premières industrielles, ainsi qu'à quelques usages très spécifiques (industrie, aviation). Le gaz naturel fossile importé est progressivement substitué par du biogaz et du méthane de synthèse produit grâce à de l'électricité d'origine renouvelable.

Par rapport à 2010, les émissions de CO_2 d'origine énergétique sont réduites d'un facteur 2 en 2030 et d'un **facteur 16** en 2050.

Enfin les émissions de CO_2 cumulées sur 2011-2050 atteignent 7 milliards de tonnes : cette valeur est en phase avec la part d'émissions que le poids démographique de la France lui autorise dans une logique d'équité mondiale, pour que l'on puisse espérer limiter la hausse moyenne de la température sur Terre en dessous de 2°C en 2100.

Emissions annuelles de CO_2 liées à l'énergie dans le scénario négaWatt et le scénario tendanciel (en $MtCO_2$)



Quel est le coût de la transition énergétique ?

Question cruciale, au sujet de laquelle on voit circuler les chiffres les plus fantaisistes fondés essentiellement sur une analyse « au doigt mouillé ». Mais aussi question lourdement trompeuse !

D'abord parce que, avant de parler de coût de la transition, sachons définir par rapport à quoi nous allons l'évaluer. En effet, nous ne sommes pas dans une situation où nous pourrions choisir de ne rien faire : agir contre les changements climatiques coûtera 15 à 20 fois moins cher que l'inaction comme l'a évalué dès 2006 l'ancien chef économiste et vice-président de la Banque Mondiale Sir Nicholas Stern.

Quant au coût du démantèlement des réacteurs nucléaires et de la gestion des déchets sur le très long terme, il n'est en aucune manière imputable à un éventuel abandon de cette source d'énergie : que l'on en sorte ou pas, il faudra bien fermer un jour les réacteurs aujourd'hui en fonctionnement et s'occuper de leurs déchets pendant des milliers d'années.

Ensuite parce que, posée ainsi, cette question laisse entendre que la transition ne ferait que coûter et ne rapporterait rien, ce qui est évidemment faux :

- Les actions de sobriété sont par excellence celles qui ne coûtent rien ou très peu puisqu'elles relèvent de la décision ou du comportement, mais peuvent rapporter beaucoup en nous faisant économiser de l'énergie, donc de l'argent.
- Les actions d'efficacité nécessitent un investissement qui grâce aux économies générées est toujours rentable pour la collectivité, fût-ce sur le long terme, mais qui peut aussi l'être à court ou moyen terme pour celui qui le réalise. S'il est préférable de privilégier les actions dont le retour sur investissement sera le plus rapide, ce n'est pas pour autant qu'il faut s'interdire celles qui le sont moins.
- Les énergies renouvelables ont des coûts d'exploitation faibles mais sont aujourd'hui plus chères à l'investissement que les énergies fossiles ou nucléaire. Or le coût de ces dernières, qui n'intègrent pas tous leurs coûts externes notamment environnementaux, est appelé à augmenter. À l'inverse, celui des renouvelables baisse rapidement par l'effet des dynamiques industrielles qui sont à l'œuvre et les rendront inéluctablement compétitives à plus ou moins long terme.

D'un strict point de vue économique, la transition énergétique peut être considérée comme un investissement pour la collectivité qui sera nécessairement rentable à plus ou moins brève échéance.

Enfin, l'argent investi dans la transition énergétique ne sera pas jeté par les fenêtres. Il économisera des dizaines de milliards d'Euros sur les importations de pétrole et de gaz. Et il génèrera dans les services énergétiques, les équipements performants et les énergies renouvelables des milliards d'Euros d'activité pour les entreprises, des centaines de milliers d'emplois pour les salariés et des débouchés à l'exportation sur un marché mondial qui ne demande qu'à se développer.

C'est tout le contraire pour la mise à niveau de sûreté « post-Fukushima » des 58 réacteurs français, qui engloutirait près de 60 milliards d'Euros sans qu'un seul kilowattheure supplémentaire soit produit ! Mise dans la compensation du « surcoût » actuel du photovoltaïque, cette somme permettrait de financer une production d'électricité solaire supérieure à un an de production de tout le parc nucléaire français ; investie en totalité dans la construction de systèmes photovoltaïques elle permettrait de produire plus de 20 TWh par an dès aujourd'hui et pour au moins 20 ans. Dans les deux cas, elle contribuerait à accélérer la baisse des coûts vers la compétitivité du photovoltaïque.

Si nous nous posons la question de savoir combien la transition énergétique rapporte en euros et en emplois avant de savoir combien elle nécessite d'investissement, l'évidence nous saute aux yeux : mais qu'attendons-nous donc pour nous engager sur ce chemin de non-regret ?

Par où commencer la transition énergétique pour la réussir ?

C'est à cette question que les quelques propositions ci-dessous issues d'un effort de réflexion engagé depuis une dizaine d'années, tentent de répondre sous la forme un ensemble cohérent de politiques et de mesures.

Elles visent à fixer un cadre institutionnel, mettre en place des leviers d'actions économiques combinant des signaux de court terme et de long terme et définir des garde-fous dans les domaines prioritaires tout réorientant la production énergétique et industrielle.

Elles permettent aussi une véritable pédagogie du changement : la transition énergétique ne réussira que si nous en comprenons l'urgence et le prix de l'inaction, et si elle se réalise à la fois par tous et pour tous.

Ces propositions répondent à quatre grandes questions :

⇨ *Comment mettre en marche la société tout entière vers la transition énergétique :*
la question de la gouvernance

Un projet aussi vital et aussi ambitieux que la transition énergétique telle qu'elle est envisagée ne pourra devenir réalité qu'à une seule condition : donner à la multitude de décisions grandes et petites qu'il va nécessiter un poids juridique suffisant pour que les nombreux intérêts particuliers qui seront inéluctablement bousculés ne puissent pas bloquer ou ralentir un processus qui prendra de toute façon du temps.

Pour cela il est nécessaire de prendre appui sur trois instruments complémentaires qui devront, au niveau approprié, être inscrits dans les textes fondateurs de la République :

- Un **principe constitutionnel** : celui du droit de tout citoyen à avoir accès à une source d'énergie sûre, respectueuse de l'environnement et à un prix acceptable par la mise en œuvre d'une politique basée sur le développement de la sobriété énergétique, de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables
- Une **Loi d'Orientation et d'Engagements pour la Transition Énergétique** : visant à traduire dans les faits le principe précédent, elle devra être promulguée aussi rapidement que possible à l'issue d'un processus de consultation intégrant tous les acteurs de la société sur un modèle de « gouvernance à six » (État, Parlement, entreprises, syndicats, collectivités locales et société civile)
- La création d'une **Haute Autorité Indépendante de l'Énergie, du Climat et de l'Environnement** ayant pour mission d'aider les responsables politiques à préparer leurs décisions, d'en contrôler la mise en œuvre et de sanctionner les manquements à l'application des mesures prises dans le cadre de la Loi de transition énergétique. Dotée de larges pouvoirs d'investigation et de décision ainsi que de moyens financiers propres, elle doit être indépendante du pouvoir exécutif et législatif.

Trois chantiers prioritaires devront être mis à l'ordre du jour :

- **Rendre le pouvoir aux Territoires** par une nouvelle étape de décentralisation autour de la gestion locale de l'énergie et de la recherche de l'autonomie énergétique.
- **Faire de la transition énergétique l'affaire de tous** à travers un vaste programme de sensibilisation, d'information, d'éducation et de formation sur l'énergie et le climat.
- **Repenser l'urbanisme** à la lumière des impératifs concordants d'une réduction des besoins en énergie non-renouvelable et de la recherche d'un « mieux-vivre ensemble ».

⇨ *Comment remettre l'économie au service d'un projet de société soutenable et non l'inverse :*
la question du juste prix de l'énergie

Pris entre la nécessité de donner à l'énergie un prix qui reflète l'ensemble de ses coûts environnementaux, économiques et sociaux et celle de préserver un authentique « droit à l'énergie » pour les ménages les plus modestes, il nous faut imaginer un mécanisme reposant sur quatre piliers :

- L'instauration d'un **instrument fiscal unique** sous la forme d'une Contribution sur l'Energie Primaire et les Externalités environnementales (CEPEx) prenant en compte les impacts de l'ensemble des différentes chaînes énergétiques contribuant à l'approvisionnement du pays.
- La **généralisation du principe du « bonus-malus »** à tous les biens d'équipements générant une consommation d'énergie récurrente pour leur utilisation, calibré pour ne pas encourager une croissance du parc.
- L'application d'un **principe général de progressivité du prix de l'énergie**, de façon à dissuader les surconsommations inutiles tout en facilitant l'accès de tous à un minimum vital d'énergie.
- La mise en place d'un **programme de lutte contre la précarité énergétique** visant à sortir les ménages de leur situation de dépendance par des actions préventives et éducatives financées par les recettes des mesures précédentes.

⇨ *Comment réduire les besoins énergétiques des différentes activités :*
la question des politiques sectorielles

Au-delà des principes et des instruments économiques transversaux, le succès de la transition énergétique repose sur des programmes de réduction des besoins dans les secteurs prioritaires par leur poids dans le bilan en énergie consommée et en émission de gaz à effet de serre :

- La mise en place d'une **réglementation énergétique dans le bâtiment** concernant avec la même rigueur et le même degré d'ambition dans la construction neuve que dans la rénovation des bâtiments existants, sans oublier la maîtrise de la demande d'électricité de l'ensemble des appareils qui équipent les bâtiments.
- Le **choix d'une mobilité apaisée des personnes et d'un transport rationnel des marchandises** par la diversification des modes de déplacements et une incitation très forte au transfert modal vers les techniques et les motorisations les plus efficaces
- Le lancement d'un vaste programme d'**économie des ressources énergétiques et des matières premières non renouvelables** dans l'ensemble des secteurs industriels à travers notamment la promotion des principes de réutilisation (consigne), de réparabilité et de recyclabilité dans une perspective de relocalisation de la production

⇨ *Comment répondre à nos besoins de consommation de manière soutenable :*
la question de la production d'énergie

- Assurer le **développement des énergies renouvelables**, dont le caractère d'intérêt général doit être reconnu par la loi et fonder en droit les dispositifs de toutes natures en amont (soutien à la recherche et au marché) et en aval (coordination et décentralisation de la gestion des réseaux énergétiques).
- **Renoncer définitivement au nucléaire**, en conciliant au mieux les impératifs de sûreté et de lutte contre les changements climatiques avec la possibilité effective de la substitution de l'électricité nucléaire par les énergies renouvelables.

Rendre possible ce qui est souhaitable

Considérer la transition énergétique comme « un fardeau de plus » serait une erreur ; s'y lancer à reculons sans comprendre la chance qu'elle représente, sans percevoir les formidables opportunités qu'elle nous offre serait passer à côté de l'essentiel.

En desserrant l'étau des contraintes, elle nous permet de nous désaccoutumer de la drogue dure de l'énergie facile, de tenter de réduire les effets des graves crises de l'énergie et du climat qui sont devant nous et de progresser tous ensemble vers *l'autonomie énergétique* grâce à laquelle nous pourrons affronter l'avenir avec plus de sérénité et de *résilience*

La transition énergétique proposée par le scénario négaWatt n'est pas, loin s'en faut, un saut dans l'inconnu, elle en est même l'inverse c'est tout autant un chemin de non-regret qu'une voie du moindre risque.

Un chemin de non-regret car si demain d'autres pistes s'offrent à nous, il sera inutile de revenir en arrière : le parcours déjà effectué, jalonné de sobriété et d'efficacité, ne sera plus à faire.

Une voie du moindre risque, à commencer par celui de l'implosion de notre modèle social sous le triple coup de boutoir de la fin des fossiles trop faciles, des effets des bouleversements climatiques et de l'épée de Damoclès d'un accident nucléaire. Mais moindre risque ne veut pas dire frilosité, repli sur soi dans une stratégie purement défensive. Cette voie est aussi celle de la responsabilité de notre génération qui consiste à « *agir pour que les effets de notre action soient compatibles avec la permanence d'une vie authentiquement humaine* » (Hans Jonas).

Alors, qu'attendons-nous ? Osons maintenant le premier pas : il faut rendre possible ce qui est souhaitable.

ASSOCIATION négaWatt

Association négaWatt
BP 16280 Alixan
26958 VALENCE Cedex 9
06 64 52 63 42
contact@negawatt.org
www.negawatt.org

L'association négaWatt, née en 2001, est une « boîte à pensées », un groupe d'expertise et de propositions, soucieux de poser les bonnes questions et d'apporter des réponses opérationnelles pour évoluer vers un système énergétique respectueux du développement durable. Elle est animée par la Compagnie des négaWatts, un collège d'une vingtaine d'experts et praticiens, et s'appuie sur un réseau de plus de 500 adhérents, exclusivement des personnes physiques contribuant à titre personnel.

Association de type loi 1901, ses ressources financières proviennent essentiellement des dons et cotisations de ses membres. Des fondations, ONG, mécénat d'entreprise apportent également un soutien non négligeable aux travaux.

INSTITUT négaWatt

Institut négaWatt - BP 16181
26958 VALENCE Cedex 9
contact@institut-negawatt.com
www.institut-negawatt.com

Créé en 2009 par l'association, l'Institut négaWatt est un organisme de formation, d'études et de recherches focalisé sur les problématiques de l'énergie et du développement durable.

Outil opérationnel de l'association, il a pour vocation de préparer et d'accompagner la transition énergétique de notre société en prenant comme référence les travaux de l'association négaWatt.

Version 171011a