

# Partie 1 - Démarche et méthodologie

---

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

## 1. Démarche du scénario

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

### 1.1. Démarche négaWatt

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

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

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

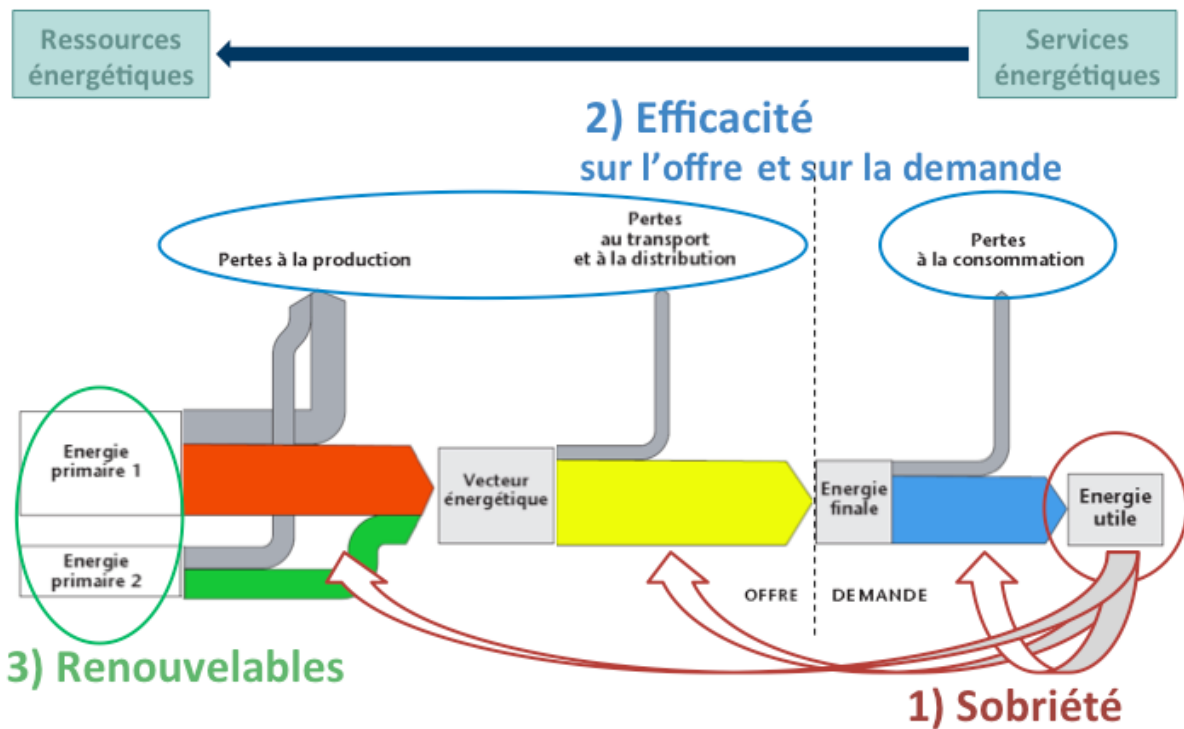


Figure 1 : Priorités de la démarche négaWatt

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

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

## 1.2. Crises et contraintes

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

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

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

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

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

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

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

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

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

L'urgence de notre mise en mouvement est d'autant plus vitale que les risques auxquels nous devons faire face ont un caractère cumulatif : chaque goutte de pétrole consommée nous rapproche de la pénurie, chaque gramme de CO<sub>2</sub> lâché dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre des décennies après son émission, chaque année supplémentaire de fonctionnement d'un réacteur nucléaire le rend plus dangereux. Remettre les changements de fond à plus tard, c'est avoir la certitude d'arriver trop tard.

### 1.3. Scénario

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

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

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

### 1.4. Fondamentaux du scénario

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

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

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

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

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

## 2. Méthodologie

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

### 2.1. Modèle

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

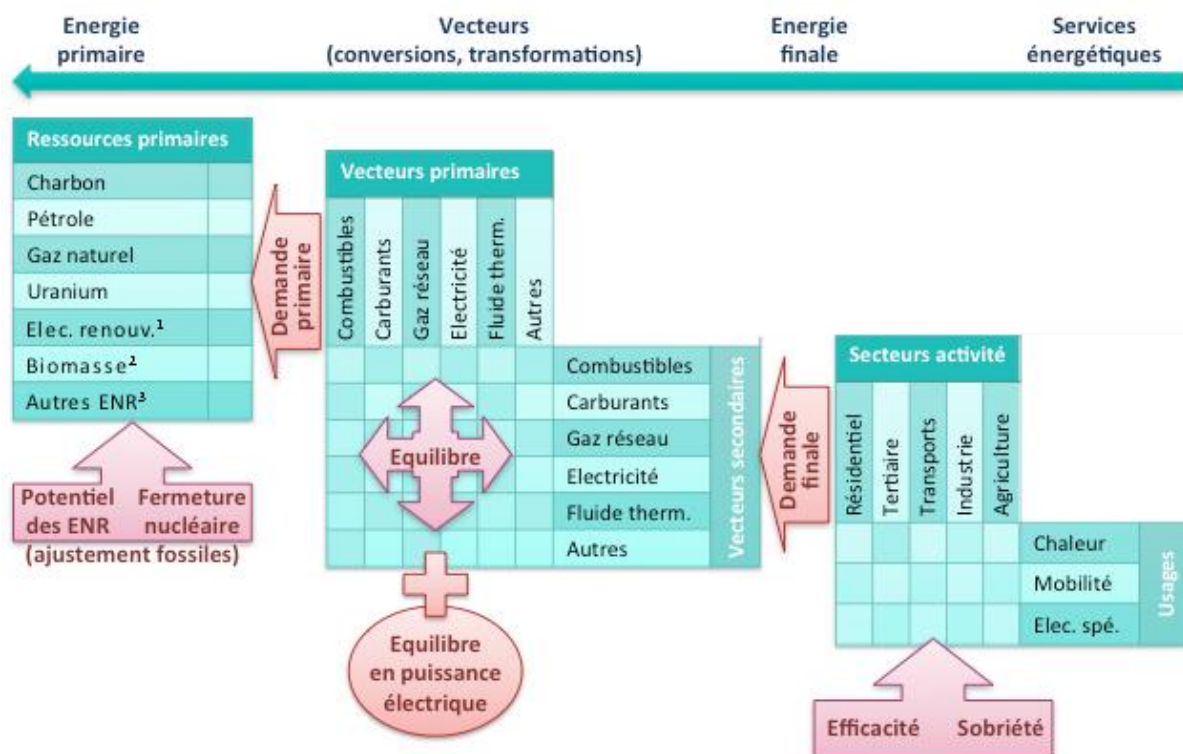
Cet outil est basé sur :

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

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

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

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



<sup>1</sup> Electricité primaire d'origine renouvelable : hydraulique, éolien, photovoltaïque, énergies marines...

<sup>2</sup> Biomasse solide, biomasse liquide et biogaz.

<sup>3</sup> Autres énergies renouvelables : solaire thermique, géothermie, déchets ménagers...

*Figure 2 : Démarche de modélisation du scénario négaWatt 2011*

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

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

## 2.2. Hypothèses de cadrage

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

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

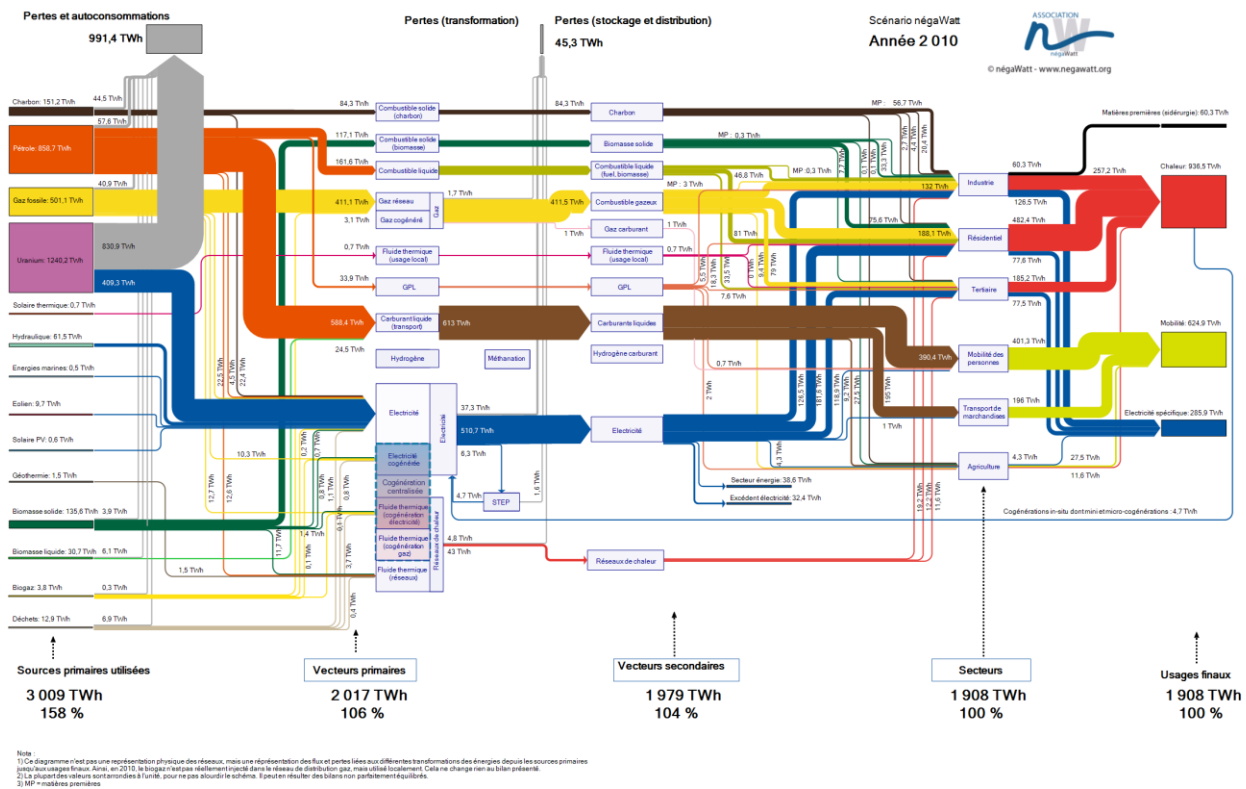


Figure 3 : Diagramme de Sankey - Bilan énergétique de la France pour 2010

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



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

Sur le plan démographique, le scénario s'appuie sur l'hypothèse médiane de l'INSEE<sup>1</sup> jusqu'en 2040, puis sur une extrapolation jusqu'à 2050. Ainsi, la population augmente jusqu'à 72,3 millions d'habitants vers 2050, une prévision largement supérieure à la précédente (datant de 2003), où la population se stabilisait entre 2035 et 2045 aux alentours de 64,5 millions d'habitants, avant de diminuer légèrement vers 2050. Ce sont donc 7 millions de personnes supplémentaires dont les besoins sont à satisfaire.

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

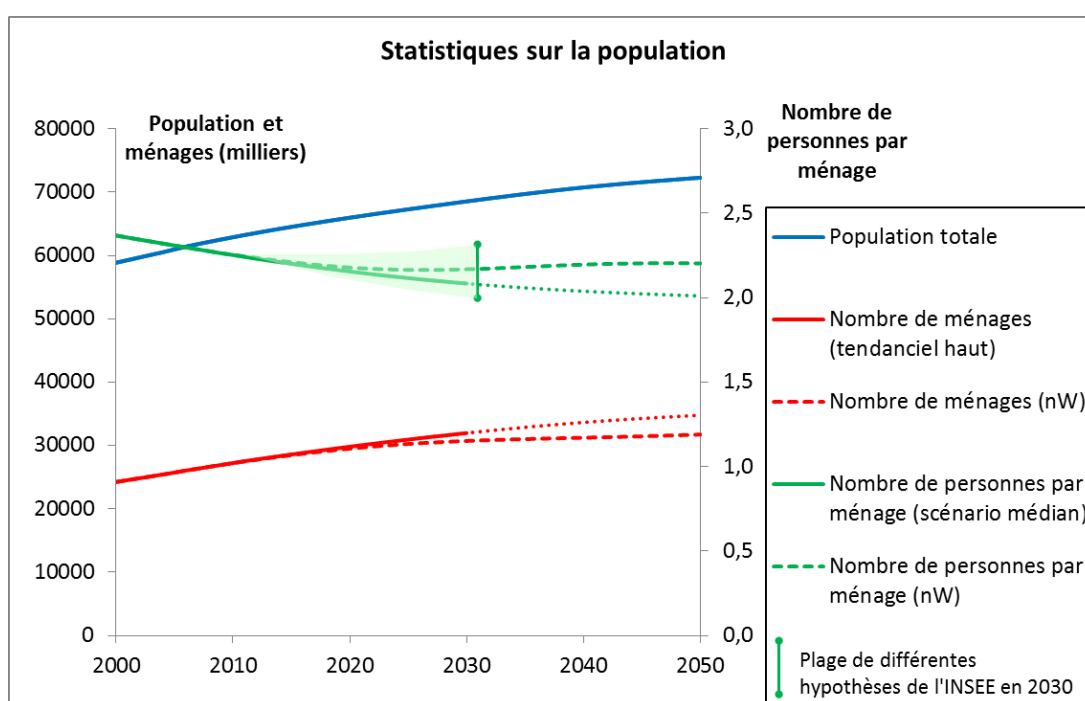


Figure 4 : Évolution de la population et du nombre de ménages (projection INSEE et négaWatt)

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

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

<sup>1</sup> Projections de population à l'horizon 2060, INSEE, octobre 2010.



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