ASSOCIATION négaWatt

RAPPORT

Juillet 2019

Cadre harmonisé pour le volet énergie des SRADDET

Méthodologie

Juillet 2019

Avec le concours financier des Régions :

RÉGION BOURGOGNE FRANCHE COMTE

Centre-Val de Loire
www.regioncentre-valdeloire.fr

RÉGION Nouvelle-Aquitaine

AVEC LE SOUTIEN DE
climaxion anticiper • économiser • valoriser
Union européenne
Grand Est

Table des matières

Préambule *4*

Introduction *5*

1. Rappel des définitions utilisées dans les statistiques énergétiques au niveau national *6*

1.1. Définitions générales 6

1.2. Périmètres des secteurs 8

2. Rappel des objectifs nationaux et européens *13*

2.1. Réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) 14

2.2. Réduction de la consommation d'énergie finale 16

2.3. Réduction de la consommation d'énergie primaire fossile 17

2.4. Augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie 18

2.5. Réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité 19

2.6. Focus sur le taux d'indépendance énergétique 19

2.7. Commentaires sur d'autres objectifs généraux 20

3. Approches régionales *22*

3.1. Périmètre géographique 22

3.2. Périmètre technique (secteurs) 22

3.3. Niveau de détail 24

3.4. Approche par les vecteurs énergétiques 25

3.5. Equilibre des réseaux 26

3.6. Présentation globale (diagramme de Sankey) 26

4. Propositions méthodologiques *28*

4.1. Se placer au « bon niveau » de complexité 28

4.2. Articuler la modélisation autour d'une représentation « vectorielle » du système énergétique (Energies primaires / vecteurs primaires / vecteurs secondaires / énergies finales 33

4.3. Etablir un bilan importations/exportations régionales 35

4.4. Evaluer les paramètres locaux (problème de l'accès à la donnée) et trouver des solutions pour pallier le manque de données 36

4.5. Choisir les « bonnes unités » 36

4.6. Définir des indicateurs adaptés 37

5. Conclusion *39*

6. Annexe 1 : équilibre du réseau électrique *40*

7. Annexe 2 : description de l'outil PRES *41*

7.1. Organisation générale 41

7.2. Energies primaires 41

7.3. Réseaux 44

7.4. Périmètres des secteurs 46

Liste des tableaux *47*

Liste des figures *48*

Préambule

La réalisation d'un exercice de scénarisation énergétique au niveau d'un territoire requiert de s'appuyer sur une modélisation du système énergétique territorial, qui mette en rapport les ressources primaires, mobilisées sur le territoire ou à l'extérieur de celui-ci, avec la demande finale des différents secteurs consommateurs.

Pour tenir compte du fait que les différentes ressources renouvelables ne sont pas équivalentes et qu'elles peuvent être utilisées pour satisfaire certaines demandes énergétiques et pas d'autres, il faut s'appuyer sur les notions de vecteurs énergétiques, et de transformation de ces vecteurs.

La modélisation peut être plus ou moins fine, faisant appel à une représentation détaillée ou au contraire plus agrégée des vecteurs énergétiques.

Le présent rapport a pour objectif de présenter une méthode qui réponde aux objectifs suivants :

- Croiser de manière complète les demandes énergétiques sectorielles avec les ressources énergétiques primaires
- Représenter de manière synthétique les transformations énergétiques en s'appuyant sur une décomposition en 8 vecteurs
- Mettre en évidence les solidarités entre territoires, en quantifiant les importations et les exportations d'énergie.

Un outil simplifié de type tableur a été développé pour cet usage.

Avant sa présentation, nous développons plusieurs éléments de cadrage :

- Un rappel des définitions utilisées dans les statistiques énergétiques au niveau national
- Un rappel des objectifs nationaux et européens
- Un développement sur les particularités régionales
- Des éléments méthodologiques pour la bonne réalisation de l'exercice de scénarisation

Introduction

Par la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV) adoptée en août 2015, l'Etat formule plusieurs objectifs à atteindre au niveau national à l'horizon 2030 et 2050, par exemple la division par deux de la consommation d'énergie finale à l'horizon 2050. Par ces engagements récents et plus anciens (division par 4 des émissions de gaz à effet de serre - GES, engagements européens, etc.), l'Etat a donc besoin de formuler des indicateurs à consolider pour montrer où la France se situe dans la réalisation de ses objectifs ; il est donc susceptible d'exiger des Régions une remontée d'informations.

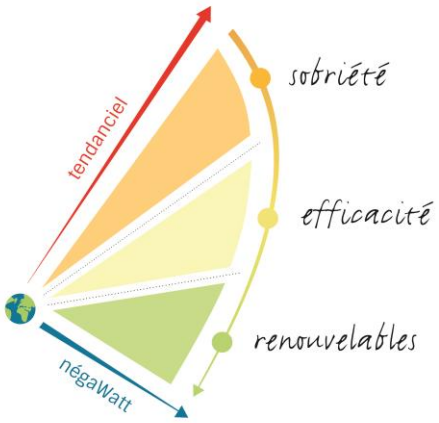
Par ailleurs, en application de la loi NOTRe, les SRCAE établis par les Régions entre 2012 et 2014 vont être remplacés pour la grande majorité des Régions par un volet énergie intégré dans les nouveaux SRADDET (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires) qui devront être approuvés avant juillet 2019.

Lors de la réalisation des précédents SRCAE, l'absence de définition d'un cadre interrégional harmonisé a conduit à une impossibilité méthodologique de les comparer, ou de les agréger au niveau national pour vérifier leur cohérence vis-à-vis des engagements nationaux et européens de la France (objectifs 3x20 européens et facteur 4 sur les GES) et leur articulation par rapport aux actions nationales (Annexe).

C'est pourquoi l'Association négaWatt a pris l'initiative de proposer le développement d'un cadre de travail, harmonisé entre Régions, afin d'arriver à une plus grande cohérence des politiques régionales qui permettrait de peser sur les orientations nationales par la remontée des analyses prospectives régionales. Ce travail de construction entre Régions leur laisse **toute latitude pour répondre à la demande de l'Etat en matière de consolidation nationale sans se faire imposer des solutions d'en haut, voire à définir une base d'évaluation simple et harmonisée de leur travail et de leurs actions**.

Développer un cadre harmonisé interrégional vise à :

- Garantir une compatibilité minimale des exercices régionaux, une base de comparaison entre régions, et la mise en exergue de leurs **complémentarités** : données fondamentales pour une bonne politique publique nationale de l'énergie, et pour travailler à une bonne coordination des échelons de décision et de mise en œuvre,
- Rendre possible une agrégation nationale, permettant de vérifier la convergence avec les objectifs de la LTECV (baisse de 50 % de la consommation finale en 2050 par rapport à 2012, réduction d'un facteur 4 des émissions de GES par rapport à 1990, part de 32 % des énergies renouvelables dans la consommation finale brute en 2030, ...), et de donner ainsi une **cohérence** aux plans régionaux.
- Mettre en évidence la nécessaire **solidarité** entre Régions, afin que celles qui ont le meilleur potentiel en énergies renouvelables échappent à la tentation du repli et développent leurs capacités pour en faire bénéficier les Régions moins favorisées.



©Association négaWatt - www.negawatt.org

L'ambition du présent travail est de proposer une méthodologie qui soit le plus compatible possible avec l'obtention d'indicateurs compatibles avec ceux de la LTECV (réduction demande finale, pourcentage d'énergies renouvelables) tout en gardant un niveau de simplicité/complexité permettant de l'utiliser en pratique.

Il s'agit de trouver un équilibre entre une méthodologie 100 % compatible avec les statistiques du Service de la donnée et des études statistiques et une approche plus simple qui permette de positionner l'effort des Régions au regard des engagements nationaux (objectifs LTECV) et internationaux (paquet énergie climat).

Les Régions Bourgogne-Franche Comté, Centre-Val de Loire, Grand-Est et Nouvelle-Aquitaine ont soutenu la réalisation de ce cadre méthodologique et ce à partir des travaux qu'elles conduisent pour la réalisation de leur Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires.

1.

Rappel des définitions utilisées dans les statistiques énergétiques au niveau national

Le domaine de l'énergie est un domaine complexe, où différentes acceptions sont parfois mises derrière les mêmes vocables, ce qui rend leur compréhension délicate. C'est pourquoi, dans ce premier chapitre, les définitions principales utilisées au niveau national sont reprécisées.

Les bilans énergétiques établis par le Service de la donnée et des études statistiques (SDES)[1] mettent en regard :

- Les approvisionnements :
  - La production primaire ;
  - Plus les importations ;
  - Moins les exportations ;
  - La variation des stocks (par convention, quel que soit son signe) ;
  - Les soutes maritimes.
- Les emplois :
  - La consommation de la branche énergie ;
  - Les pertes sur les réseaux ;
  - La consommation finale énergétique par secteur ;
  - La consommation finale non énergétique.

1.1. Définitions générales

Nous reproduisons ci-après les principales définitions du document référencé en note de bas de page, en y apportant les commentaires nécessaires.

1.1.1. Energie primaire

L'énergie primaire est l'énergie tirée de la nature (énergie tirée du soleil, des fleuves ou du vent) ou contenue dans les produits énergétiques tirés de la nature (comme les combustibles fossiles ou le bois) avant transformation. On considère donc que l'énergie électrique produite à partir d'une éolienne, d'un barrage ou de capteurs photovoltaïques est une énergie primaire. Par convention internationale, la chaleur produite par une centrale nucléaire est également une énergie primaire ; dans le bilan énergétique, c'est l'électricité qui en résulte qui est enregistrée comme énergie primaire.

Les déchets combustibles fournis par les activités humaines sont par convention également comptabilisées comme ressources primaires[2].

L'énergie nucléaire est traitée d'une manière particulière, puisque contrairement au pétrole, au charbon ou au gaz naturel utilisés pour produire de l'électricité, la chaleur perdue dans la transformation énergétique (rendement de Carnot) n'est pas comptabilisée dans les bilans, mais elle est prise en compte pour le calcul du taux d'indépendance énergétique (voir § 2.6).

---

[1] Note introductive sur les statistiques de consommation finale d'énergie par secteur : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Themes/Energies_et_climat/Consommations_par_secteur/Tous_secteurs/note-intro-conso-finale-par-secteur-08-2013.pdf

[2] http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GCnHS1p10-11.pdf

1.1.2. Energie secondaire

L'énergie secondaire est l'énergie issue de la transformation d'une énergie primaire ou d'une autre énergie secondaire : électricité produite dans une centrale thermique, carburant ou fioul issu du raffinage du pétrole brut… La branche industrielle qui effectue cette transformation est appelée industrie de l'énergie, ou plus simplement branche énergie.

1.1.3. Energie finale

On parle de consommation d'énergie quand l'énergie, primaire ou secondaire, est utilisée de façon irréversible. Dans le bilan de l'énergie, on s'intéresse à deux notions de consommation :

- La consommation finale d'énergie, qui correspond à la consommation des seuls utilisateurs finaux, ménages ou entreprises autres que celles de la branche énergie. L'énergie consommée peut être une énergie primaire (consommation de charbon de la sidérurgie par exemple) ou non.
- La consommation d'énergie primaire, qui correspond à la consommation totale d'énergie des acteurs économiques.

La consommation d'énergie primaire est égale à la somme de la consommation finale d'énergie et de la consommation, nette de la production, de la branche énergie. On tient compte de la consommation nette plutôt que de la consommation brute pour éviter des doubles comptes : par exemple, une fois la consommation de charbon d'une centrale à charbon et une seconde fois la consommation d'électricité qui en a résulté.

De façon comptable, la consommation nette de la branche énergie est égale aux pertes subies lors de la transformation de l'énergie (par exemple, pertes lors de la réaction de combustion ou de la réaction nucléaire) et de son acheminement (par exemple, pertes en lignes lors du transport et de la distribution de l'électricité)…

… Il existe des pertes liées à la réaction de combustion du fioul et des pertes de chaleur dans le réseau de canalisation de l'immeuble. Il ne faut donc pas assimiler consommation finale d'énergie et énergie utile, énergie réellement disponible pour le consommateur final, la différence entre les deux étant fonction du rendement des équipements énergétiques du consommateur final (chaudière, moteur de véhicules, etc.).

Le graphique suivant illustre le périmètre des définitions précédentes.

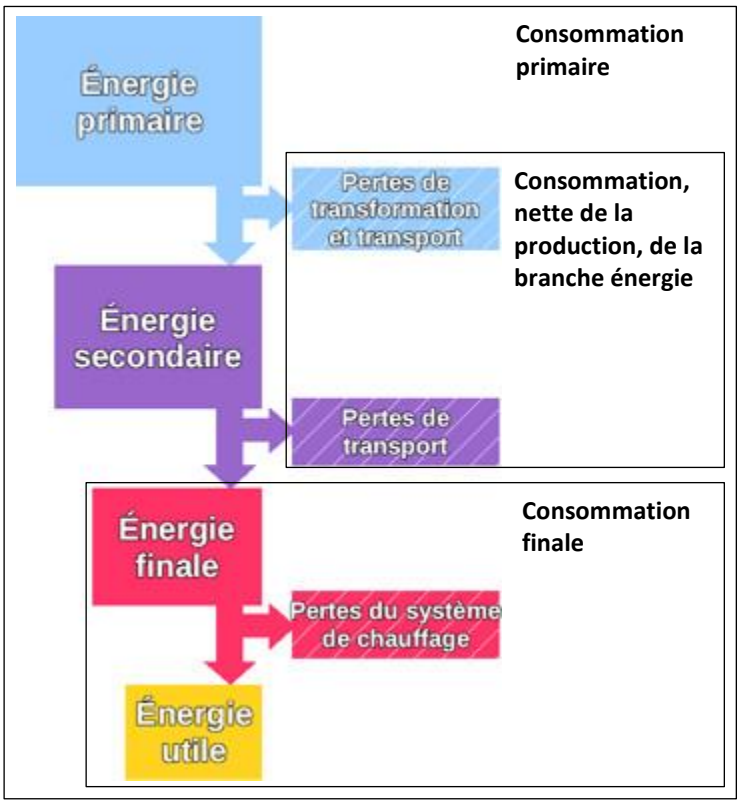


Figure 1 : Les différents stades de l'énergie

Source : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/les-differents-stades-de-lenergie

La consommation finale brute d'énergie comprend les produits énergétiques fournis à des fins énergétiques à l'industrie, aux transports, aux ménages, aux services, y compris aux services publics, à l'agriculture, à la sylviculture et à la pêche, y compris l'électricité et la chaleur consommées par la branche énergie pour la production d'électricité et de chaleur et les pertes sur les réseaux pour la production et le transport d'électricité et de chaleur[3].

Attention donc à ne pas confondre la consommation de l'industrie de l'énergie (= électricité et chaleur consommées par la branche énergie pour la production d'électricité et de chaleur) avec la consommation, nette de la production, de la branche énergie (= pertes subies lors de la transformation de l'énergie et de son acheminement).

1.1.4. Consommation non énergétique

Le plus souvent, la consommation d'une molécule énergétique consiste à brûler cette molécule, de façon à ce qu'elle "libère" son énergie. Dans ce cas, on parle de consommation énergétique. Mais il existe d'autres utilisations. Ainsi, les bitumes, utilisés principalement pour la construction routière, et certains lubrifiants, sont des hydrocarbures. La chimie consomme du gaz naturel pour la fabrication d'engrais, et la chimie organique des produits pétroliers (pour fabriquer des matières plastiques par exemple) sans que les molécules ne soient brûlées. Dans tous ces cas, on parle de consommation non énergétique, ou encore de consommation en tant que matière première.

1.2. Périmètres des secteurs

Au niveau des usages de l'énergie, six grands secteurs sont considérés :

- Industrie de l'énergie (considérée comme une consommation intermédiaire)

• Industrie hors énergie
• Résidentiel
• Tertiaire
• Agriculture-pêche
• Transports :
  - Mobilité des personnes
  - Transport de marchandises
	= consommation finale

Nous apportons ci-dessous des précisions sur l'étendue des périmètres, avec des éléments méthodologiques qui ne sont pas forcément de l'ordre du normatif, mais qui sont plus des éléments d'information à prendre en compte pour être le plus exhaustif possible.

1.2.1. Résidentiel

Le secteur résidentiel comprend les consommations pour les usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, climatisation) et les consommations d'électricité spécifique (éclairage, produits blancs, bruns et gris, circulateurs, ventilateurs, parties communes des immeubles, etc.) pour les segments :

- Maisons individuelles
- Logements collectifs
- Résidences principales / résidences secondaires / logements vacants

3 Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=FR

1.2.2. Tertiaire

Le secteur tertiaire comprend :

- Les consommations pour les usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, climatisation) et les consommations d'électricité spécifique (éclairage, produits blancs, bruns et gris, circulateurs, ventilateurs, parties communes des immeubles, etc.) pour les huit branches suivantes, correspondant au découpage utilisé par le CEREN4 :
  - Bureaux
  - Cafés-hôtels-restaurants (CAHORE)
  - Commerces, regroupant les grandes, moyennes et petites surfaces
  - Etablissements d'enseignement (niveaux maternels, primaires, secondaires et universitaires)
  - Habitat communautaire (foyers pour enfants, maisons de retraite, casernes, foyers, Cité-U)
  - Etablissements de santé (hôpitaux, cliniques, dispensaires, établissements médicalisés pour adultes ou enfants handicapés…)
  - Etablissements de sports et de loisirs ainsi que les équipements collectifs divers ;
  - Etablissements de transport regroupant les gares, ports et aéroports, ainsi que les compagnies de taxi.
- Les consommations d'énergie de certaines activités relevant du secteur tertiaire ne sont pas incluses dans les restitutions statistiques du CEREN, car elles ne relèvent pas d'une problématique « bâtiment » et sont principalement liées à un procédé de type industriel ou un usage très spécifique de l'énergie (principalement électricité). Ce sont :
  - Les consommations du secteur des télécommunications
  - Les entrepôts frigorifiques
  - Les datacenters
  - Les consommations du secteur de l'eau (distribution et assainissement)
  - Les grands établissements de recherche, ainsi que certains très grands établissements lorsqu'ils ne répondent pas aux enquêtes du CEREN : exemple : les aéroports parisiens
  - L'éclairage public
  - Le traitement des déchets
  - Les consommations de la Défense Nationale (y compris les transports[5])

1.2.3. Industrie

Ce secteur comprend deux sous-secteurs, qui sont pris en compte différemment dans le calcul des indicateurs présentés au paragraphe 0 :

1.2.3.1. Industrie de l'énergie

La branche énergie regroupe ce qui relève de la production et de la transformation d'énergie (centrales électriques, cokeries, raffineries, pertes de distribution, etc.). Elle inclut tous les établissements qui transforment l'énergie, y compris quand ils sont intégrés à une activité industrielle. Les pertes de transformation liées à la production d'électricité par voie thermique ne sont pas incluses dans ce périmètre (voir § 1.1.3).

4 ADEME : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/cahier-2_le-residentiel-tertiaire.pdf
5 Note introductive sur les statistiques de consommation finale d'énergie du secteur des transports : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Themes/Energies_et_climat/Consommations_par_secteur/Transport/note%20intro%20conso%20finale%20secteur%20transport%20juillet%202012.pdf

1.2.3.2. Industrie hors l'énergie

Ce secteur est très complexe. Les énergies finales utilisées sont beaucoup plus diversifiées que celles des autres secteurs. Le tableau suivant présente les principales :

Energies consommées	Sous-détail
Charbon	
Coke de houille	
Gaz naturel	
Autres gaz de réseau	
Coke de pétrole et autres produits pétroliers	
	Butane propane
	Fioul lourd
	Fioul domestique
Bois et sous-produits du bois	
	Liqueur noire
Combustibles spéciaux renouvelables	
	Charbon de bois
	Boues d'épuration
	Farines animales
	Déchets végétaux agro-alimentaires
	etc.
Combustibles spéciaux non renouvelables	
	Pneus usagés
	Peintures, solvants
	etc.

Tableau 1 : Energies utilisées dans le secteur industriel

Ces énergies sont utilisées pour couvrir des usages multiples détaillés dans le tableau suivant :

Chaleur	Chauffage des locaux
Process	Fabrication
	Autres
	Chauffage liquide
	Fusion
	Energie mécanique
	Séchage
	Traitement thermique
	Chauffage des métaux
	Réactions chimiques
Électricité spécifique	

Tableau 2 : Utilisation de l'énergie dans le secteur industriel

Le découpage suivant, appuyé à la classification NCE[6], a été utilisé dans le scénario négaWatt 2017 (des éléments plus détaillés sont donnés dans le rapport technique de 2011[7]).

6 Nomenclature d'activités économiques NCE : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwjXntra-8XaAhUMtRQKHRPqB34QFgg3MAI&url=https%3A%2F%2Fwww.insee.fr%2Ffr%2Fstatistiques%2Ffichier%2F3101143%2Fireco eacei15_correspondance_NCE_NAF.pdf&usg=AOvVaw0gKcYxWEDhuREa914kkL_D

7 Rapport technique du scénario négaWatt 2011-2050 : https://negawatt.org/Rapport-technique-du-scenario-negaWatt-2011-2050-189

Regroupement 1	Regroupement 2	Regroupement 3
Industries agro-alimentaires	Industrie laitière	
	Sucreries	
	Autres IAA	
Papier-cartons	Pâte à papier vierge	
	Papier-carton recyclé	
	Machines à papier	
Métaux	Production d'acier	Hauts-fourneaux
		Aciérie électrique
		Laminoirs
	Métaux non ferreux	Aluminium primaire
		Aluminium recyclé
		Autres non ferreux
	Fonderie et travail des métaux	Travail des métaux
		Articles de fonderie
Construction	Matières premières pour la construction	Minéraux non métalliques
		Plâtres, chaux et ciment
	Matériaux de construction	Blocs de béton
		Céramiques
	Production de verre	Verre primaire
		Verre recyclé
Chimie	Divers chimie	Ammoniac et engrais
		Chimie minérale
		Parachimie
	Chimie organique	Composés de base
		Autres composants
		Pétrochimie
		Chimie du bois
	Matières plastiques	Plastique primaire
		Plastique recyclé
	Autres matières plastiques	Caoutchouc
		Transformation des plastiques
Biens de consommations	Industrie électrique	Electricité et électroménager
		Informatique
		Fabrication silicium PV
	Transports	Transports terrestres
		Industrie navale et aérospatiale
	Mécanique et textile	Industrie mécanique
		Textile
	Divers	Divers bois
		Divers autres

Tableau 3 : Secteurs industriels

Il illustre la diversité des sous-secteurs d'activités de l'industrie.

1.2.4. Agriculture-pêche

Dans ce secteur sont comptabilisées à la fois les consommations des bâtiments agricoles (étables, serres, locaux pour le séchage) et les carburants pour le machinisme agricole et les bateaux de pêche.

1.2.5. Transports

Ce secteur recouvre la consommation pour la traction ou la propulsion de tous les véhicules, mis à part ceux qui peuvent être rattachés à un secteur précis (machinisme agricole et bateaux de pêche rattachés au secteur agriculture-pêche, engins de chantier aux travaux publics, donc à l'industrie, consommations de l'Armée au secteur tertiaire).

La question du périmètre géographique doit être regardée de près : dans le bilan de l'énergie établi par le SDES, ce sont les ventes de carburant sur le territoire métropolitain qui sont comptabilisées (approche dite « gravitaire »). Cela implique par exemple que les carburants correspondant à des déplacements effectués sur le territoire par des poids lourds qui font le plein avant de pénétrer en France, et qui disposent de l'autonomie suffisante pour traverser (trafic de transit), ne sont pas comptabilisés.

Pour représenter plus fidèlement les consommations d'énergie sur le territoire, et notamment celles qui sont à l'origine des émissions polluantes (GES, poussières), il faut calculer à l'aide d'un modèle de déplacements les flux des différentes catégories de véhicules qui empruntent les voies de circulation, et les consommations de carburant qui en découlent, à l'aide des consommations spécifiques des véhicules. C'est cette méthodologie qui est généralement utilisée par les ASSQA (Associations Agrées de Surveillance de la Qualité de l'Air).

1.2.5.1. Mobilité des personnes

Pour ce secteur, les segments suivants devraient normalement être pris en compte :

- Marche (n'entraine pas de consommation d'énergie, mais important à prendre en compte pour le calcul des reports modaux de déplacements)
- Vélo (dont une partie croissante est progressivement assurée par des vélos électriques)
- 2 roues motorisées
- Voitures particulières
- Bus/Car
- Tram/Métro/RER
- TER/TET/Transilien
- TGV
- Avion – intérieur
- Avion international
- Transport fluvial

Pour les transports aériens, l'ensemble des consommations de kérosène n'est pas systématiquement pris en compte : dans les statistiques nationales, elles sont intégrées, mais lorsqu'on descend au niveau des Régions, et en particulier lorsque les chiffres sont issus des ASSQA, seules les phases de décollage et d'atterrissage (qui génèrent l'essentiel des pollutions locales) sont prises en compte.

Par ailleurs pour les vols internationaux se pose également la question de l'affectation des consommations (et des émissions liées) au pays de départ ou au pays d'arrivée. Dans le scénario négaWatt, la moitié des vols décollant ou atterrissant en France est comptabilisée, en considérant que l'autre moitié doit logiquement être affectée aux pays de destination ou provenance.

Ce point sera reprécisé dans le paragraphe 3.2.

1.2.5.2. Transport de marchandises

De manière similaire aux déplacements de voyageurs, l'évaluation doit s'appuyer sur les différents segments suivants :

- Véhicules utilitaires légers
- Poids lourds français ou étrangers (transit)
- Ferroviaire
- Fluvial

2.

Rappel des objectifs nationaux et européens

Au niveau supranational, le cadre est fixé par les enjeux climatiques globaux, notamment celui des émissions de gaz à effet de serre. Les rapports successifs du GIEC situent les enjeux à travers les différentes trajectoires RCP (Representative Concentration Pathway). Ci-dessous est donné le cadre considéré comme acceptable pour éviter un emballement du climat :

GIEC	RCP 2,6
Une des conclusions de l'AR5 est que le total des émissions de dioxyde de carbone cumulées depuis le début de l'ère industrielle devrait être limité à environ 100 gigatonnes de carbone afin de limiter le réchauffement à moins de 2 °C par rapport au niveau préindustriel. Etant donné que la moitié de ce total a déjà été émis en 2011, une proportion significative du changement climatique est probablement irréversible à l'échelle humaine	

Tableau 4 : Objectifs du GIEC

La COP 21 tenue en décembre 2015 à Paris a indiqué que l'objectif souhaitable devait plutôt se situer à un niveau de réchauffement ne dépassant pas 1,5 °C. Or l'agrégation des contributions volontaires de chacun des pays montre que les efforts nationaux ne permettront pas d'atteindre cet objectif.

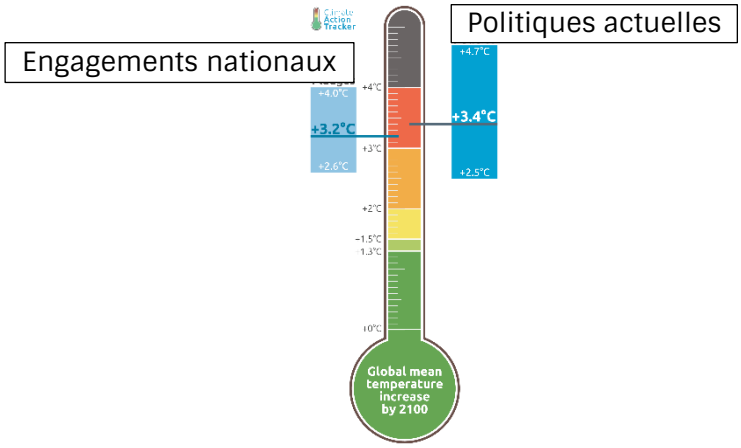


Figure 2 : Augmentation de la température à la fin du siècle[8]

Au niveau européen, des objectifs communs sont établis, concernant la baisse de la consommation finale, la baisse des émissions de GES et l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables. Ces objectifs sont ensuite déclinés par pays.

Cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030	France
Emissions GES entre 1990 et 2030	-40%
Consommation énergie finale 2030/ 2005	-27%
Part ENR dans consommation finale brute en 2030	27%

Tableau 5 : Objectifs européens pour la France[9]

[8] Climate Action Tracker. (2015). INDCs lower projected warming to 2.7°C: significant progress but still above2°C : https://climateactiontracker.org/documents/62/CAT_2017-11-15_CATThermometer_Infographic.png
[9] https:/www.ecologique-solidaire.gouv.fr/cadre-europeen-energie-climat%20

Au niveau national, la loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte[10] fixe à son tour des objectifs pour le pays. La question qui se pose ensuite est de savoir comment chaque territoire devrait contribuer à l'atteinte de ces objectifs communs, sachant que la diversité des territoires en termes de demande énergétique et de ressources renouvelables locales conduit nécessairement à une répartition de l'effort modulée en fonction de ces deux éléments.

Emissions GES entre 1990 et 2030	-40%
Emissions GES entre 1990 et 2050	-75%
Consommation énergie finale 2030 / 2012	-20%
Consommation énergie finale 2050 / 2012	-50%
Consommation énergie primaire fossile 2030 / 2012	-30%
Part ENR dans consommation finale brute en 2020	23%
Part ENR dans consommation finale brute en 2030	32%
Part du nucléaire dans production d'électricité en 2025	50%
Part ENR dans électricité en 2030	40%
Part ENR dans chaleur en 2030	38%
Part ENR dans carburant en 2030	15%
Part ENR dans gaz en 2030	10%

Tableau 6 : Objectifs de la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte

Il convient de préciser qu'en matière de réduction des GES, l'objectif désormais affiché par l'actuel gouvernement, mais non inscrit encore dans la loi, est de pousser l'objectif de baisse de la consommation d'énergies fossiles de 30 à 40 % en 2030, et de viser la neutralité carbone à l'horizon 2050. L'atteinte d'une réduction de la part du nucléaire dans la production électrique est décalée à 2035 au lieu de 2025.

2.1. Réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES)

Ce point est mentionné pour mémoire, car son champ d'application est beaucoup plus vaste que celui de la seule consommation d'énergie, et beaucoup de secteurs d'émissions sont complètement disjoints (secteur agricole). Le calcul des émissions de GES, sur les 6 gaz du protocole de KYOTO (CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, HFC, PFC), auquel s'ajoute maintenant le NF3, est très complexe. Cependant, nous rappelons ci-après quelques éléments de cadrage.

Code de l'énergie : *Art. L. 100-4. – I. – La politique énergétique nationale a pour objectifs : De réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. La trajectoire est précisée dans les budgets carbone mentionnés à l'article L. 222-1 A du code de l'environnement ;*

Article D222-1-A créé par DÉCRET n°2015-1491 du 18 novembre 2015 - art. 1

> *I. – Les émissions de gaz à effet de serre comptabilisées au titre des budgets carbone fixés en application de l'article L. 222-1 A sont celles que la France notifie à la Commission européenne et dans le cadre de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques.*
>
> *II. – Sont comptabilisées les émissions en métropole, en Guadeloupe, en Guyane, en Martinique, à La Réunion, à Saint-Martin et à Mayotte ainsi que les émissions associées au transport entre ces zones géographiques. Sont exclues les émissions associées aux liaisons internationales aériennes et maritimes.*
>
> *III. – Lors de la fixation initiale des budgets carbone pour les périodes 2015-2018, 2019-2023 et 2024-2028, les émissions associées à l'usage des terres et à la foresterie sont exclues du périmètre retenu ; elles sont incluses dans le périmètre retenu à partir de la période 2029-2033. Lors de la fixation du budget carbone pour la période 2029-2033, les budgets carbone des périodes 2019-2023 et 2024-2028 sont révisés afin de prendre en compte ces émissions.*

[10] https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385&categorieLien=id

Commentaires :

- Il manque dans le bilan les liaisons internationales aériennes et maritimes. Ainsi, les consommations de kérosène, bien que comptabilisées dans les bilans énergie, disparaissent des bilans d'émissions de GES.
- Il manque les émissions et puits UTCF (Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt) qui sont loin d'être négligeables à l'échelle planétaire.
- L'empreinte GES n'est pas prise en compte alors qu'elle représente un facteur non négligeable de l'évolution des GES imputables à la France[11]. « *[L'empreinte GES] inclut les GES directement émis par les ménages (chauffage et voiture) et les émissions générées lors de la fabrication et du transport des produits consommés par ces derniers, que ces produits soient fabriqués en France ou à l'étranger. L'empreinte carbone de la consommation en France ne sert de support à aucun engagement international, mais elle constitue l'un des 15 indicateurs phares de la Stratégie nationale de développement durable* »[12].

Pour le calcul des seules émissions de CO_2 dues à l'énergie, le SDES applique une méthode simplifiée rappelée ci-dessous :

La méthode de calcul simplifiée des émissions dues à l'énergie

Les émissions de CO_2 ici calculées sont celles issues de la combustion d'énergie fossile.

Elles représentent 95 % des émissions totales de CO_2 et environ 70 % des émissions de gaz à effet de serre en France.

Le SDES applique des facteurs d'émissions moyens aux consommations d'énergies fossiles (produits pétroliers, gaz, combustibles minéraux solides), hors usages non énergétiques. Les inventaires officiels en matière d'émissions de gaz à effet de serre, dont le CO_2, font appel à une méthodologie beaucoup plus complexe, nécessitant des données plus détaillées. Ces inventaires couvrent l'ensemble des gaz à effet de serre du protocole de Kyoto. En 2015, la méthodologie du SDES a été modifiée pour assurer une meilleure cohérence avec le périmètre des inventaires nationaux.

Il subsiste néanmoins des différences dont les plus notables sont :

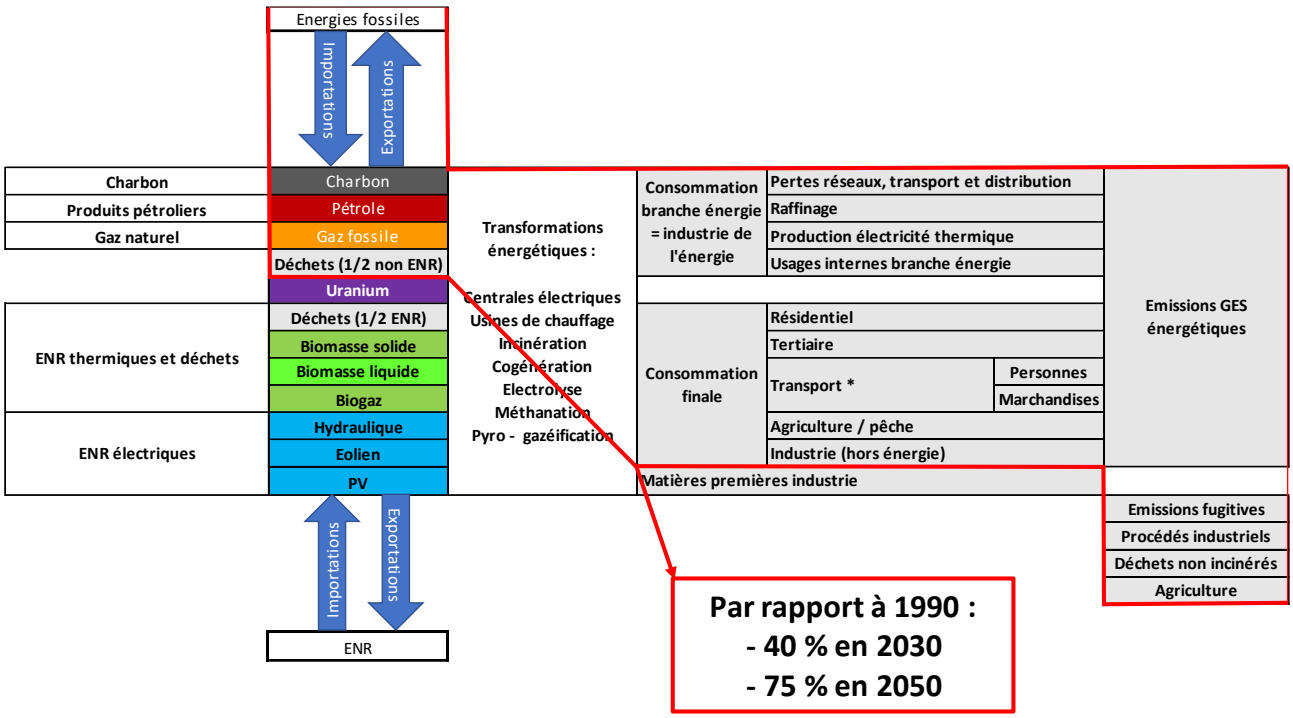
- les émissions des déchets non renouvelables utilisés comme combustibles sont comptabilisées dans les inventaires officiels mais pas par le SDES ;
- dans le bilan de l'énergie, les émissions dues à l'autoproduction d'électricité sont affectées à la branche énergie. Dans les inventaires, elles sont affectées aux secteurs consommant l'électricité. Quant aux émissions liées à la production de chaleur vendue, elles sont affectées au secteur de l'énergie dans les inventaires alors qu'elles sont réparties entre secteurs consommateurs dans ce bilan.
- le SDES ne prend pas en compte les émissions des départements d'outre-mer.

Les inventaires officiels comme l'estimation du SDES, ne mesurent que les émissions de CO_2 dues aux activités sur le territoire. Les émissions de gaz à effet de serre engendrées par les importations (« empreinte carbone ») sont estimées dans « Les Chiffres clés du climat ».

Le schéma de la figure suivante illustre le périmètre des éléments pris en compte dans le calcul des émissions de GES du territoire.

[11] « Officiellement, la France a diminué ses émissions territoriales de CO_2 de 7 % entre 2000 et 2010, ce qui est comparable à la moyenne de l'Union européenne qui a réduit ses émissions de 6 %. Or, si l'on ajoute à ce chiffre les émissions incorporées dans les produits importés, tout en enlevant les émissions incorporées dans les biens exportés et destinés à la consommation étrangère, alors
La situation est bien différente. La France a augmenté ses émissions de CO_2 de 15% sur la période »
https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Les-e%CC%81missions-importe%CC%81es-le-passager-clandestin-du-commerce-mondial-.pdf

[12] http://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/ressources/fiche%20numero%20124.pdf



* : transports aériens internationaux non compris, transports maritimes internationaux non compris

** : liste des ENR thermiques et électriques non exhaustive

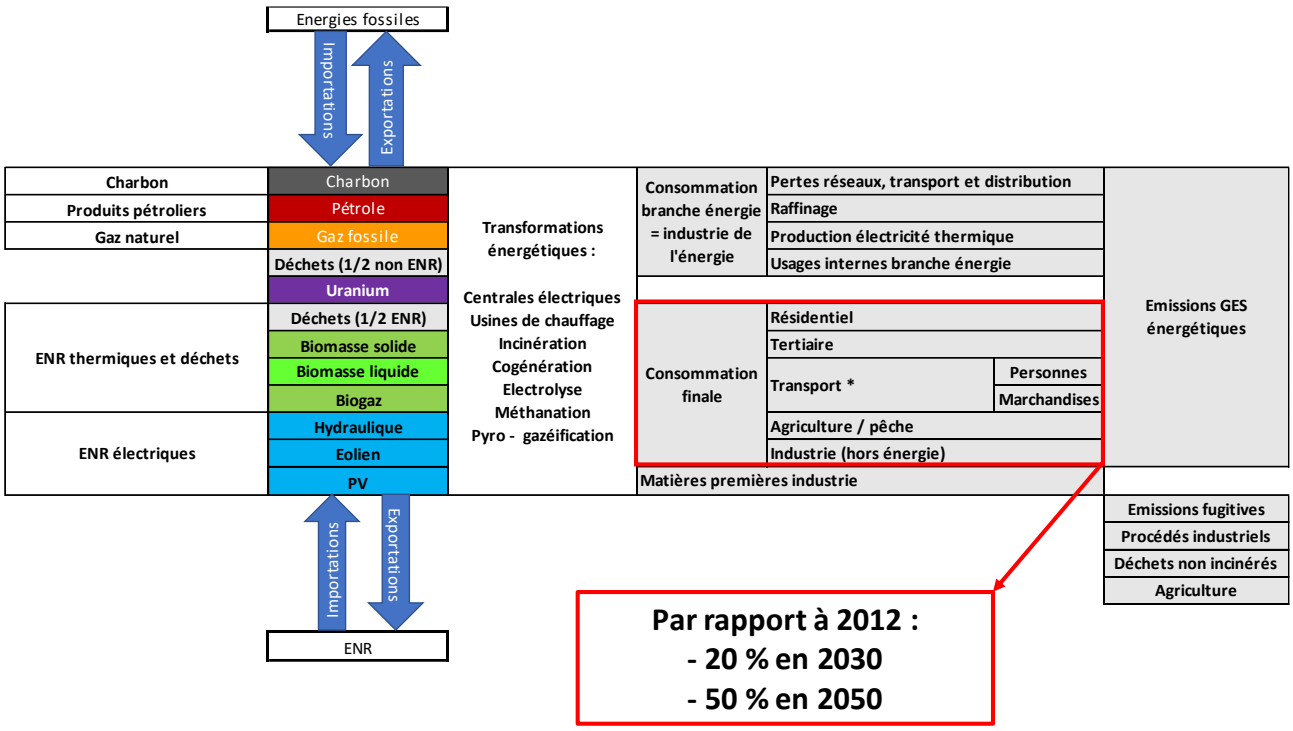
Figure 3 : Périmètre du calcul des émissions de GES

2.2. Réduction de la consommation d'énergie finale

Code de l'énergie : *Art. L. 100-4. – I. – La politique énergétique nationale a pour objectifs : […] De réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012, en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030. Cette dynamique soutient le développement d'une économie efficace en énergie, notamment dans les secteurs du bâtiment, des transports et de l'économie circulaire, et préserve la compétitivité et le développement du secteur industriel ;*

Commentaires :

- Le périmètre de la consommation finale comprend les secteurs résidentiel/tertiaire, industrie (hors industrie de l'énergie), agriculture/pêche, transport, avec ses deux composantes mobilité des personnes et transport de marchandises.
- Les transports aériens nationaux et internationaux sont pris en compte
- Ce qui n'est pas le cas des transports maritimes internationaux.



* : transports aériens internationaux compris, transports maritimes internationaux non compris

** : liste des ENR thermiques et électriques non exhaustive

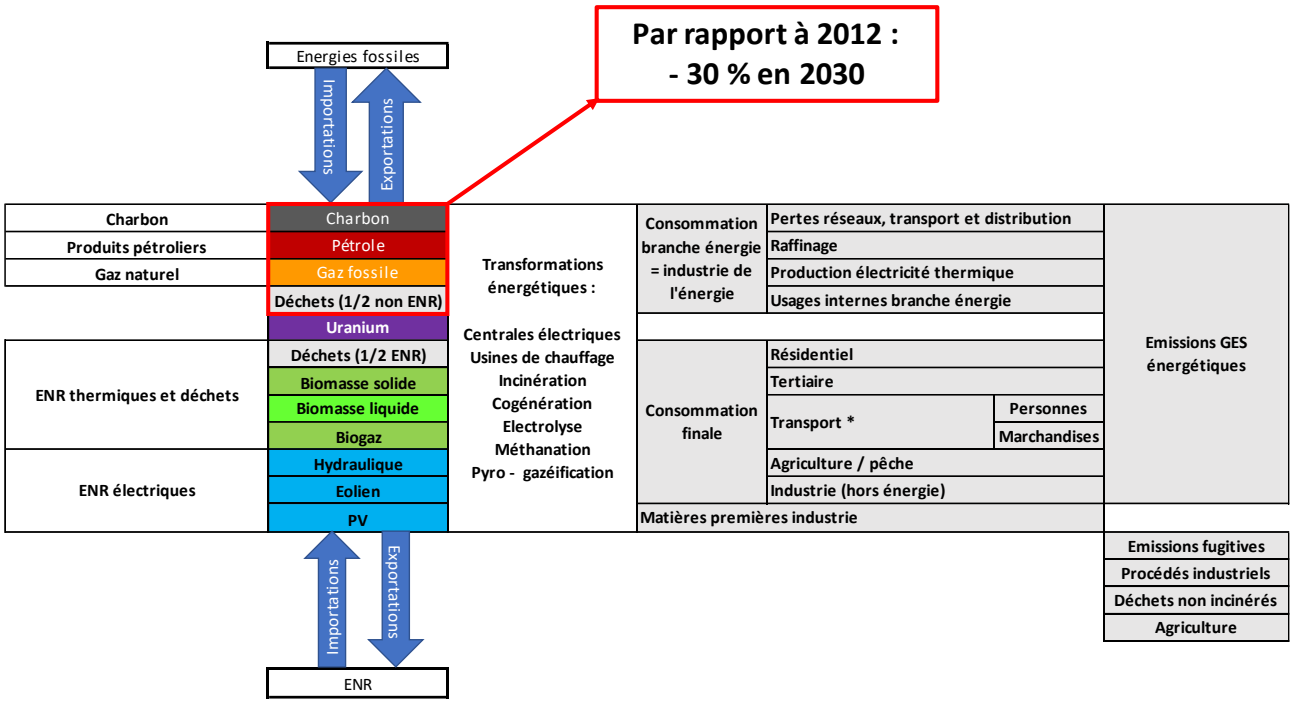
Figure 4 : Périmètre du calcul de la consommation finale

2.3. Réduction de la consommation d'énergie primaire fossile

Code de l'énergie : *Art. L. 100-4. – I. – La politique énergétique nationale a pour objectifs : […] De réduire la consommation énergétique primaire des énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à l'année de référence 2012, en modulant cet objectif par énergie fossile en fonction du facteur d'émissions de gaz à effet de serre de chacune ;*

Commentaires :

- Le périmètre de la consommation primaire inclut le charbon et ses dérivés, le pétrole et ses dérivés ainsi que le gaz naturel.
- La consommation du territoire est égale à la production sur le territoire, augmentée des importations et diminuée des exportations



* : transports aériens internationaux compris, transports maritimes internationaux non compris
** : liste des ENR thermiques et électriques non exhaustive

Figure 5 : Périmètre du calcul de la consommation d'énergie primaire

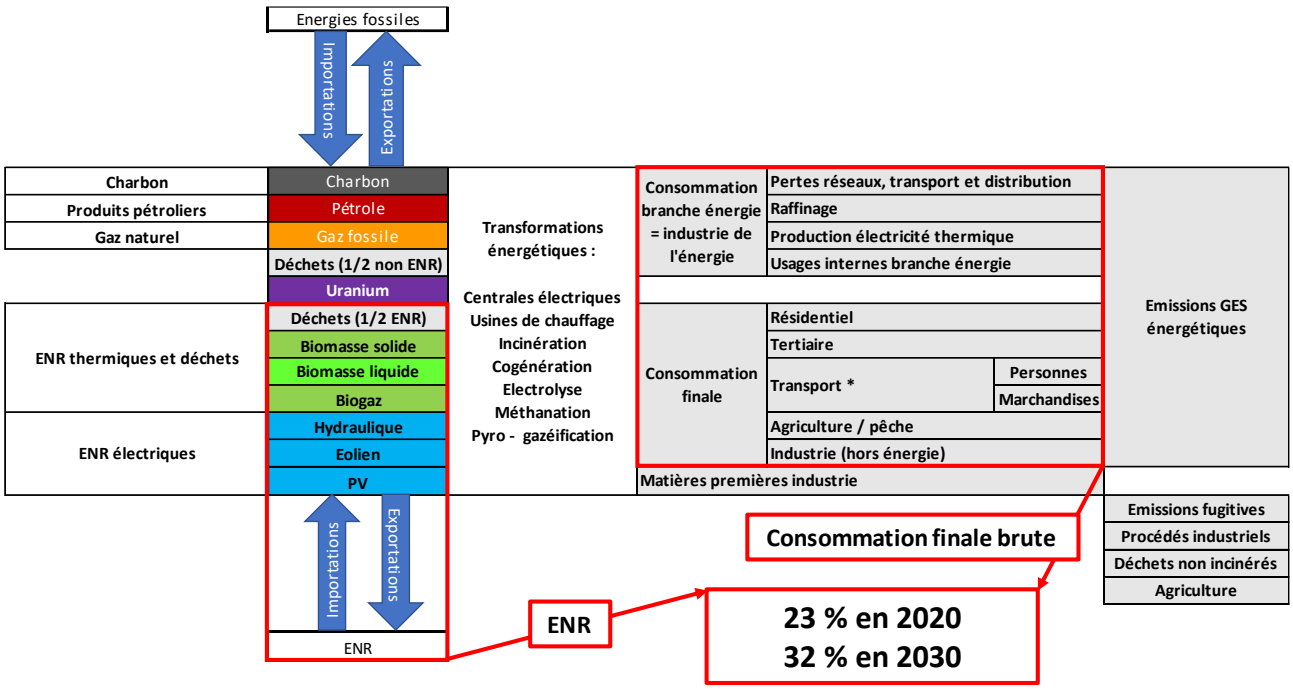
2.4. Augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie

Code de l'énergie : *Art. L. 100-4. – I. – La politique énergétique nationale a pour objectifs : […] De porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030 ; à cette date, pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent représenter 40 % de la production d'électricité, 38 % de la consommation finale de chaleur, 15 % de la consommation finale de carburant et 10 % de la consommation de gaz ;*

Commentaires :

- Par rapport au périmètre de la consommation finale, celui de la consommation finale brute inclut en plus celle de l'industrie de l'énergie
- Conventionnellement et faute de connaitre précisément la composition des déchets incinérés, la moitié de ceux-ci sont considérés comme renouvelables[13].

[13] Par convention internationale, les déchets renouvelables correspondent à la moitié des déchets urbains. Les déchets non renouvelables correspondent à l'autre moitié, à laquelle sont ajoutés les déchets industriels. (http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2764/1080/bilan-energetique-france-2016.html)



* : transports aériens internationaux compris, transports maritimes internationaux non compris
** : liste des ENR thermiques et électriques non exhaustive

Figure 6 : Périmètre du calcul de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute

2.5. Réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité

La Loi TECV fixe un objectif de « réduire de la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025 ». Cet objectif est aujourd'hui remis en cause[14].

2.6. Focus sur le taux d'indépendance énergétique

Dans les statistiques officielles, l'électricité produite par les centrales nucléaires sur le sol national est appelée « électricité primaire ». L'énergie issue du minerai uranium, comprenant également les pertes thermiques dans les centrales nucléaires, est considérée comme une production nationale, et rentre donc dans ce qui est appelée « production primaire ». Celle-ci englobe donc le contenu énergétique de l'uranium, les énergies renouvelables produites sur le territoire, ainsi que les très petites productions nationales de pétrole et de gaz naturel. A partir de cette définition, le taux d'indépendance énergétique national atteint 55 %. Mais ce calcul ne reflète pas la réalité, puisque la totalité de l'uranium utilisé en France est importé.

[14] http://www.lemonde.fr/energies/article/2017/11/07/nicolas-hulot-reporte-l-objectif-de-baisse-du-nucleaire-de-50-d-ici-a-2025_5211451_1653054.html

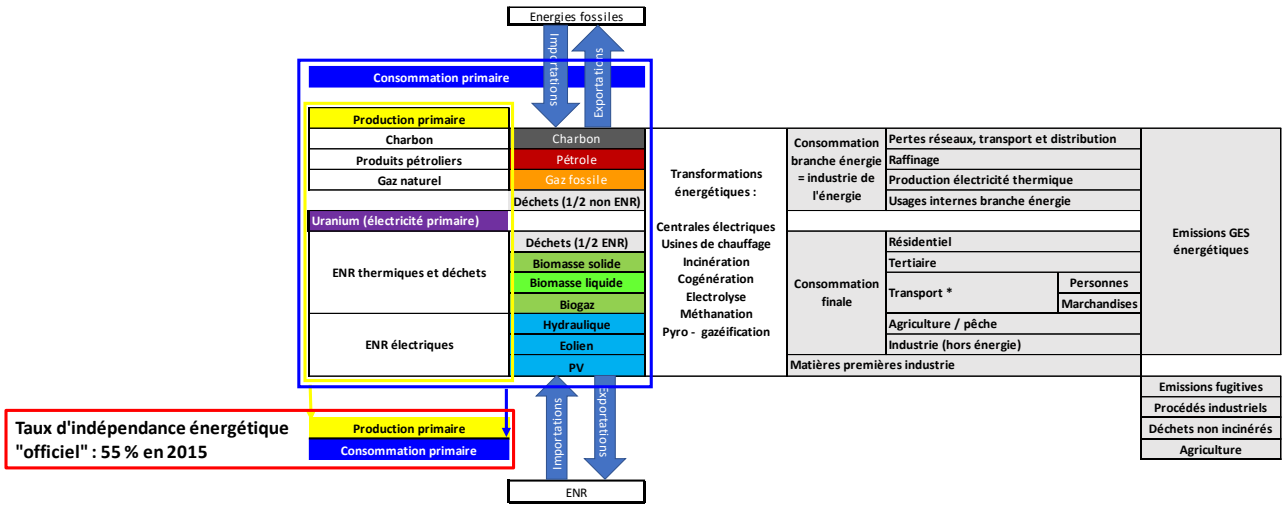


Figure 7 : Périmètre du taux d'indépendance énergétique « officiel »

En réalité, si on prend en compte cette réalité, le taux d'indépendance énergétique réel descend à environ 10 %.

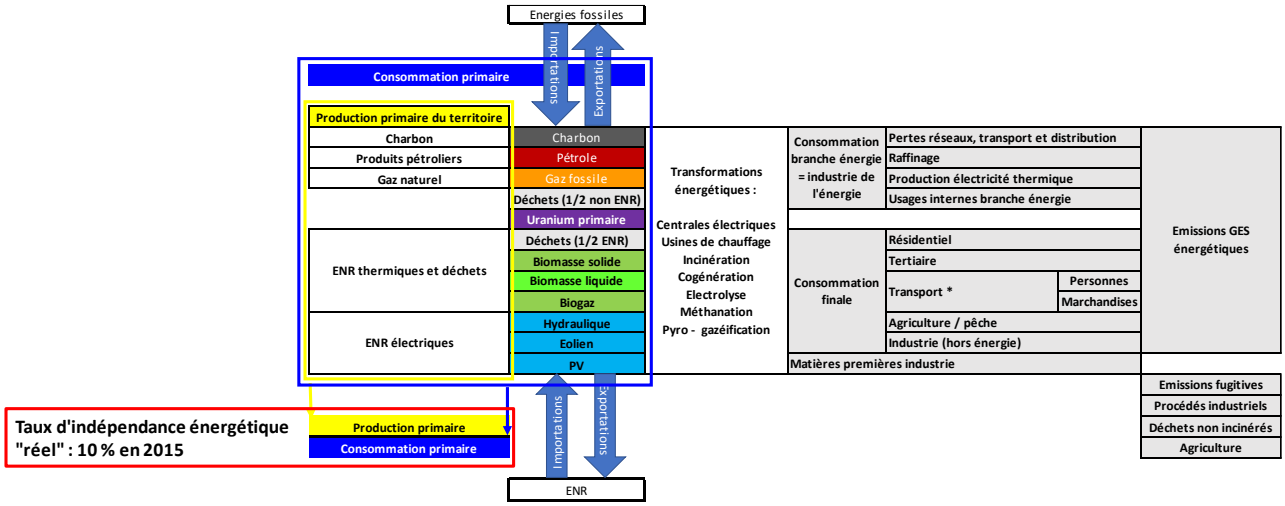


Figure 8 : Périmètre du taux d'indépendance énergétique « réel »

Compte tenu de la quantité quasi nulle d'énergies fossiles produites sur le territoire, ce taux correspond en fait au taux d'énergies renouvelables dans la consommation primaire.

2.7. Commentaires sur d'autres objectifs généraux

D'autres objectifs sectoriels sont fixés dans la loi TECV (article L. 100-4. – I) :

- *« La politique énergétique nationale a pour objectifs (…) :*
  - *De disposer d'un parc immobilier dont l'ensemble des bâtiments sont rénovés en fonction des normes "bâtiment basse consommation" ou assimilées, à l'horizon 2050, en menant une politique de rénovation thermique des logements concernant majoritairement les ménages aux revenus modestes ;*

- *De multiplier par cinq la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030*

Ces deux objectifs ne sont pas forcément compatibles : en effet, plus les bâtiments qu'il dessert sont économes en énergie, plus la rentabilité d'un réseau de chaleur est difficile à assurer, du fait de la part importante des investissements liés à la construction des canalisations. Ce qui est en fait important est d'arriver à réduire fortement les besoins de chauffage des bâtiments, et à faire en sorte qu'ils consomment (quasi) exclusivement des énergies renouvelables, que celles-ci soient distribuées par des réseaux de chaleur ou qu'elles proviennent directement de biomasse, gaz ou électricité renouvelables.

3.

Approches régionales

Nous avons vu dans le premier chapitre les principales définitions relatives aux bilans énergétiques nationaux. Nous abordons ici leur déclinaison régionale, en ayant en ligne de mire de veiller autant que faire se peut à la cohérence de ces exercices. Pour cela, les principes suivants doivent être respectés :

- la comptabilité régionale doit utiliser les mêmes définitions que la comptabilité nationale ;
- les périmètres doivent également être similaires afin d'éviter les doubles comptes et/ou les omissions. Celles-ci peuvent notamment résulter de la difficulté à obtenir certaines données. Le secret statistique fait que les consommations de certaines industries peuvent ne pas être publiées. En France, des règles strictes de diffusion ont été définies : ainsi, sur un territoire donné, « *[...] pour les données relatives aux entreprises : aucun résultat publié ne concerne moins de trois entreprises ou établissements. De plus, aucun résultat n'est diffusé quand une entreprise ou un établissement contribue à lui seul à plus de 85% de ce résultat* ».

3.1. Périmètre géographique

La question du périmètre géographique est fondamentale dans les exercices de planification énergétique, avec deux contraintes qui jouent en sens inverse l'une de l'autre :

- D'un côté, quand la maille géographique se réduit, les « effets de bord » prennent de plus en plus d'importance. Certains acteurs affichent la volonté de devenir territoire (ou Région) à Energie Positive[15]. Cette notion qui mériterait d'être clarifiée en termes de périmètre énergétique ne doit pas induire une vision selon laquelle les territoires seraient des ilots énergétiques indépendants les uns des autres, alors qu'ils sont au contraire reliés par de multiples flux et échanges.
- D'un autre côté, le calcul plus ou moins précis des échanges d'énergie aux frontières du territoire devient de plus en plus compliqué, parce que beaucoup d'incertitudes apparaissant dans la connaissance précise des consommations des différents secteurs.

En théorie, il faudrait donc disposer d'un outil de modélisation qui permette de mettre en évidence les importations / exportations des différentes énergies primaires.

3.2. Périmètre technique (secteurs)

Le périmètre technique doit être précisément défini, en respectant les principes suivants :

- Toutes les composantes de la demande d'énergie d'un territoire devraient être prises en compte. De ce point de vue, les bilans énergétiques régionaux et nationaux sont souvent incomplets, car ils ne prennent pas en compte, ou seulement partiellement, les transports aériens internationaux et les transports maritimes. Pour les transports aériens nationaux, les données issues des AASQA[16] ne comptabilisent que les phases LTO (= Landing and Take-Off, phases d'atterrissage et de décollage en-dessous de 900 m), considérant que les vols au-dessus de 900 m d'altitude n'ont pas d'impact en termes de pollution sur le territoire. Même si les transports maritimes ne peuvent facilement être réintégrés dans les bilans, il faut *a minima* prendre en compte la totalité des consommations de kérosène des avions et pas seulement les consommations des phases LTO.

[15] Le réseau TEPos animé par le CLER définit ainsi la notion de territoire à énergie positive : « Un territoire à énergie positive vise l'objectif de réduire ses besoins d'énergie au maximum, par la sobriété et l'efficacité énergétiques, et de les couvrir par les énergies renouvelables locales ("100% renouvelables et plus") http://www.territoires-energie-positive.fr/presentation/qu-est-ce-qu-un-territoire-a-energie-positive

[16] AASQA : Association Agréés de Surveillance de la Qualité de l'Air

- Il convient de bien préciser le périmètre opérationnel, au sens des scopes attachés aux sources d'émission de gaz à effet de serre (et donc des consommations d'énergie qui les sous-tendent), définis dans les normes et méthodes de calcul internationales[17].
    - Émissions directes de GES (ou SCOPE 1) : Émissions directes provenant des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur du périmètre organisationnel, c'est-à-dire émissions provenant des sources détenues ou contrôlées par l'organisme comme par exemple : combustion des sources fixes et mobiles, procédés industriels hors combustion, émissions des ruminants, biogaz des centres d'enfouissements techniques, fuites de fluides frigorigènes, fertilisation azotée, biomasses…
    - Émissions à énergie indirectes (ou SCOPE 2) : Émissions indirectes associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation.
    - Autres émissions indirectes (ou SCOPE 3) : Les autres émissions indirectement produites par les activités de l'organisation qui ne sont pas comptabilisées au 2 mais qui sont liées à la chaîne de valeur complète comme par exemple : l'achat de matières premières, de services ou autres produits, les déplacements des salariés, le transport amont et aval des marchandises, la gestion des déchets générés par les activités de l'organisme, l'utilisation et la fin de vie des produits et services vendus, l'immobilisation des biens et équipements de productions…
- Les consommations d'énergie liées au transport doivent être précisément définies, afin d'être exhaustives, sans générer de double compte. La question se pose particulièrement pour le transit de véhicules sur un territoire : les consommations de carburant correspondant aux kms parcourus sur le territoire doivent-elles être affectées au territoire traversé ou à celui dans lequel le carburant a été acheté ? Deux approches sont utilisées, comme déjà indiqué au paragraphe 1.2.5 :
    - L'approche cadastrale, utilisée par les AASQA, vise à comptabiliser les polluants émis sur le territoire. Pour cela, elle se base sur une modélisation des trafics de toute nature ayant lieu sur le territoire, et un calcul des énergies correspondantes utilisées sur le territoire.

NOTA : dans l'approche décrite ici, 2 composantes de la consommation ne sont généralement pas prises en compte, mais méritent d'être réintégrées pour avoir une vision complète :

- Les vols aériens internationaux ou nationaux qui survolent le territoire, sans que les avions n'y atterrissent ou n'y décollent
- Les transports maritimes internationaux. Ceux-ci transportent des marchandises qui profitent à tous les territoires, même si les navires n'y accostent pas.

Afin d'en tenir compte et d'affecter à chaque territoire la part qui lui revient, nous proposons d'évaluer au niveau national les consommations d'énergie des 2 modes de transport, et de les répartir ensuite au prorata des populations :

- Pour les vols aériens, comme dans le scénario négaWatt, on retiendra la moitié des vols décollant ou atterrissant de France, ce qui est à peu près équivalent aux soutes aériennes internationales.
- Pour le fret maritime, on retiendra les soutes maritimes internationales du pays.

- L'approche gravitaire (ou de responsabilité) se base sur les caractéristiques des déplacements générés par le territoire et correspond plus à un périmètre sur lequel celui-ci peut agir.

[17] http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/bilan+ges+organisation/siGras/0

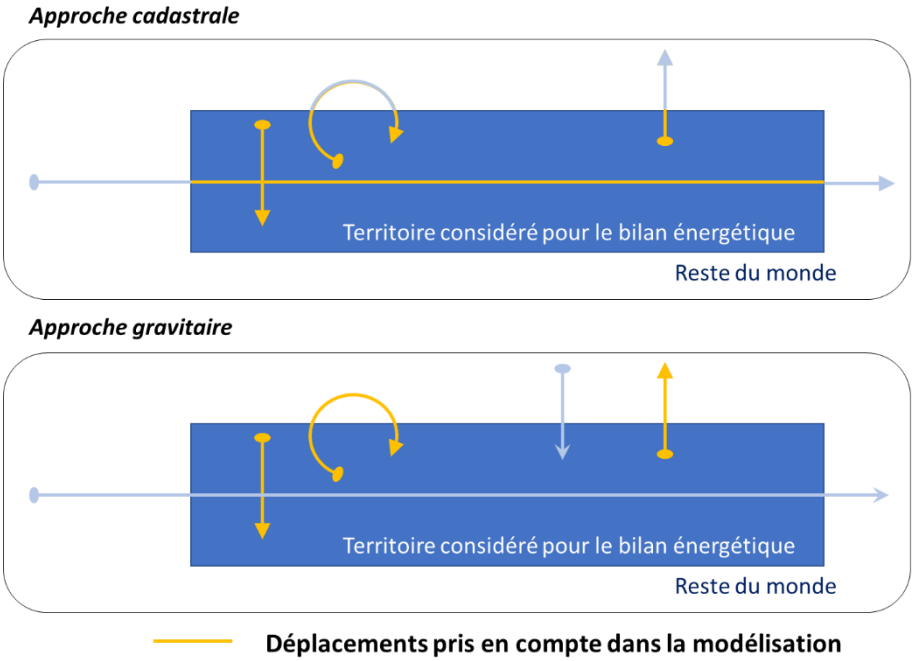


Figure 9 : Modes de calcul des émissions polluantes pour les transports

La première approche est directement additive, alors que dans la deuxième subsistent des effets de bord quel que soit le niveau territorial étudié. **Nous recommandons donc de retenir la première approche, afin d'avoir une vision complète de l'impact d'un territoire, et de permettre le cumul national des approches territoriales.**

- Chaque territoire doit s'efforcer de diminuer au maximum la demande d'énergie finale, par des actions touchant tant à la sobriété qu'à l'efficacité.
- Chaque territoire doit s'efforcer de mobiliser son potentiel d'énergie renouvelable (ENR) de manière équilibrée, mais en allant aussi, si cela est possible, au-delà de la satisfaction de ses seuls besoins, de manière à pouvoir alimenter d'autres territoires voisins moins favorisés. Il importe de favoriser la notion de solidarité entre les territoires, quelle que soit la maille géographique.

Il faut donc que le bilan énergétique soit à même de donner une représentation fidèle des flux d'énergie aux frontières :

- Energies fossiles et renouvelables importées pour équilibrer le bilan offre/demande
- Energies renouvelables exportées et qui peuvent être mises à disposition de territoires déficitaires.

De ce point de vue, la compilation d'exercices de scénarisation territoriale à un niveau donné devrait autant que possible être en cohérence avec un exercice de scénarisation réalisé à un niveau territorial supérieur. Inversement, les objectifs nationaux de réduction des consommations finales et des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que de pénétration des ENR dans les différents secteurs de la consommation finale devraient être déclinés sur des territoires de niveau inférieur en tenant compte tant de la demande d'énergie que des potentiels ENR mobilisables sur ces territoires.

3.3. Niveau de détail

Comme indiqué précédemment, un modèle énergétique territorial se base sur une représentation des consommations et des productions d'énergie. Celles-ci peuvent être plus ou moins détaillées. Par exemple, si on considère le secteur résidentiel, au moins 4 niveaux peuvent être identifiés, et on pourrait sans doute encore détailler.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Résidentiel	Chaleur	Chauffage	
		ECS	
		Cuisson	
		Climatisation	
	Electricité spécifique	Lavage	Lave-linge
			Sèche-linge
			Lave-vaisselle
		Froid	Réfrigérateur
			Réfrigérateur combiné
			Congélateur
		Eclairage	
		Electronique de loisir	Ecrans
			Ordinateur
			Lecteurs musicaux
			Box internet et décodeurs TV
			Console de jeux
		Gestion & hygiène	
		Nouveaux usages	

Tableau 7 : Différents niveaux de détail possible pour une modélisation (Exemple du résidentiel)

Pour réaliser un calcul à un niveau donné, il faut disposer des paramètres physiques ou déterminants à ce niveau : par exemple pour les postes lavage ou froid, connaitre le nombre de lave-linge ou de congélateurs et les consommations moyennes de chacun de ces deux parcs. De même pour l'éclairage, il faudrait détailler les différents types de source d'éclairage, les stocks de chacune d'entre elles et leur évolution, et les consommations moyennes correspondantes.

La difficulté de toute scénarisation réside dans ce paradoxe : plus on reste à un niveau élevé (par exemple au niveau 2 ou au niveau 3), moins le calcul est précis. Mais plus on descend à un niveau fin, plus il est difficile d'obtenir des données statistiques pertinentes sur un territoire géographique réduit.

En d'autres termes, on peut utiliser des modélisations de niveau fin sur de grands territoires, là où des statistiques de parc d'équipements existent. Et sur des territoires de petite taille, on peut difficilement modéliser de manière précise les parcs d'équipements, faute de données pertinentes.

3.4. Approche par les vecteurs énergétiques

Une planification énergétique doit pouvoir permettre de répondre à la question : est-ce que les ressources énergétiques disponibles sont en adéquation avec la demande énergétique finale, en tenant compte de la répartition de cette dernière entre les différents secteurs et les différents vecteurs énergétiques (électricité, combustibles et carburants solides, liquides ou gazeux, etc.) ?

La notion de vecteur énergétique correspond au fait que pour fonctionner correctement, chaque équipement consommateur d'énergie doit être alimenté par la source d'énergie adéquate, délivrée par un vecteur énergétique. Il faut donc qu'à chaque demande pour un vecteur énergétique corresponde une offre de ce même vecteur.

Les modélisations utilisées pour les exercices de planification doivent donc intégrer cette dimension, de manière à s'assurer de la cohérence de l'ensemble du système et du bon équilibre offre/demande pour les différents vecteurs énergétiques.

3.5. Equilibre des réseaux

Pour quasiment toutes les énergies, le bilan énergétique décrit au paragraphe précédent peut être fait en valeur annuelle. Mais pour l'électricité, qui se stocke difficilement, il faudrait pouvoir vérifier cette adéquation en puissance, c'est-à-dire avec un pas de temps très fin, horaire par exemple.

Ainsi, l'équilibre en puissance du réseau électrique devrait être vérifié pour représenter correctement la contribution des renouvelables électriques (photovoltaïque, éolien, etc.) au mix énergétique global. La question se pose aussi pour le fonctionnement du réseau gaz, dans une moindre mesure cependant, car celui-ci dispose d'une capacité de stockage importante dans des cavités souterraines.

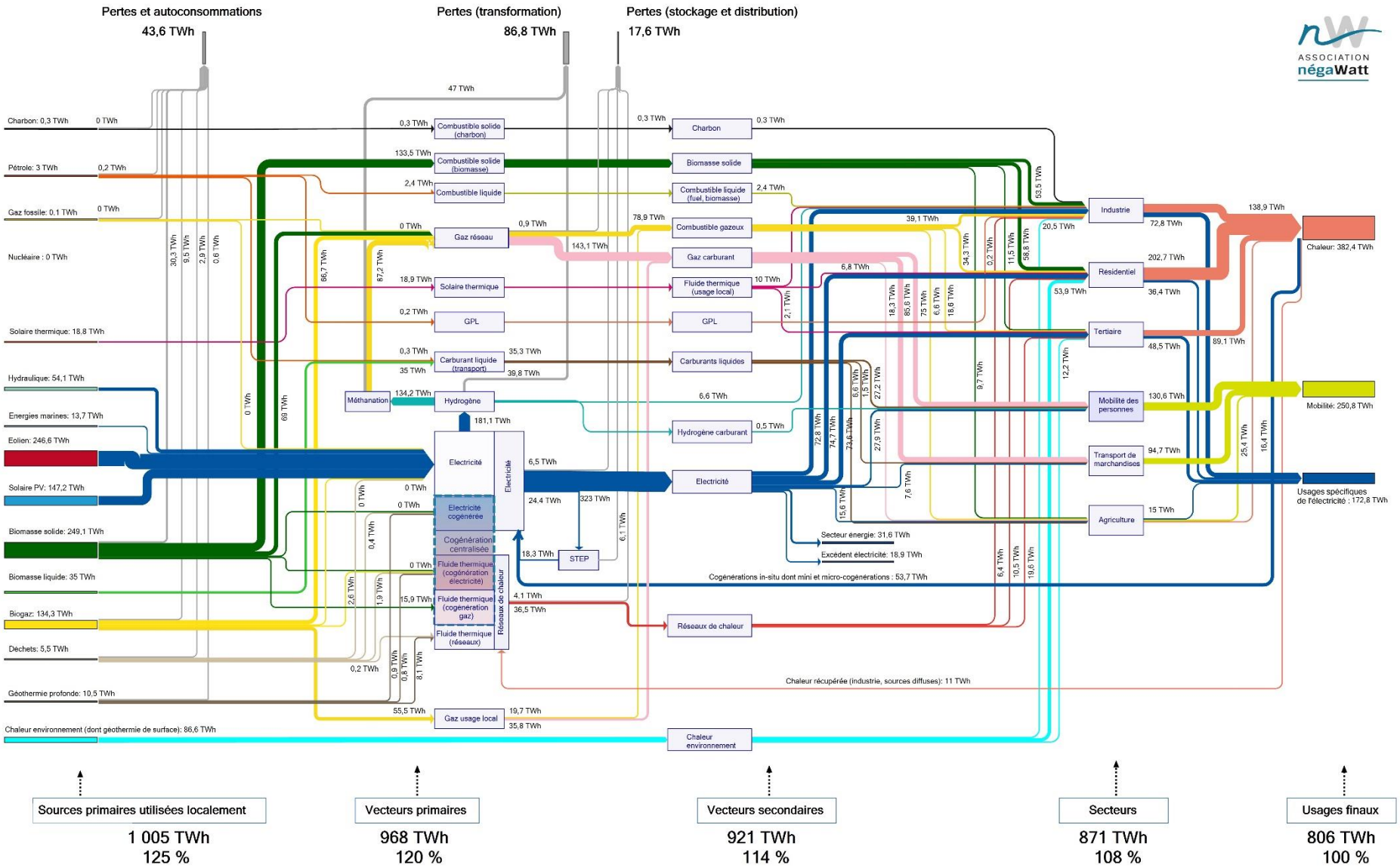
La vérification de l'équilibre en puissance du réseau électrique, basée sur une représentation physique détaillée des réseaux de transport et de distribution, est hors de portée des exercices de planification énergétique courants. Plusieurs approches simplifiées peuvent cependant être envisagées (voir annexe Equilibre du réseau électrique).

3.6. Présentation globale (diagramme de Sankey)

De plus en plus d'exercices d'état des lieux ou de prospective font appel à des diagrammes de Sankey pour visualiser les flux d'énergie et leurs transformations.

L'intérêt de ces diagrammes est évident : ils permettent de rassembler en une seule vue de très nombreuses informations. Cependant, on note une hétérogénéité des représentations, qui rend une lecture comparative complexe. Un travail pourrait être entrepris pour établir un mode de représentation commun, qui est hors du périmètre de la présente étude.

La figure suivante présente un exemple d'un tel diagramme.



Nota :
1) Ce diagramme n'est pas une représentation physique des réseaux, mais une représentation des flux et pertes liées aux différentes transformations des énergies depuis les sources primaires jusqu'aux usages finaux. Ainsi, en 2010, le biogaz n'est pas réellement injecté dans le réseau de distribution gaz, mais utilisé localement. Cela ne change rien au bilan présenté.
2) La plupart des valeurs sont arrondies à l'unité, pour ne pas alourdir le schéma. Il peut en résulter des bilans non parfaitement équilibrés.

Figure 10 : Exemple de diagramme de Sankey

4.

Propositions méthodologiques

Dans cette partie, nous allons préciser les éléments qui ont guidé la réalisation d'un **outil simplifié** développé sur tableur et que nous proposons d'utiliser **pour homogénéiser la présentation des résultats des prospectives régionales et faciliter leur agrégation au niveau national**. Le nom provisoire de cet outil est PRES (Prospective Régionale Energétique Simplifiée).

L'outil PRES n'a pas pour vocation de modéliser l'évolution des demandes sectorielles finales ou celle des énergies renouvelables mobilisables sur le territoire. Ces données doivent être évaluées en amont par des études *ad hoc*, en particulier des études de potentiels d'économies d'énergie (sobriété, efficacité) et de gisements ENR.

Nota : la méthodologie exposée ci-après est développée dans le cadre du travail mené en direction des Régions à l'occasion de l'élaboration des SRADDET. Cependant, elle pourrait s'appliquer également à des territoires différents (Départements, EPCI avec les Plans Climat Air Energie Territoriaux, démarches de stratégie TEPOS, etc.)[18]. C'est pour cela que les qualificatifs régional ou territorial seront employés indifféremment par la suite.

4.1. Se placer au « bon niveau » de complexité

Comme expliqué précédemment au paragraphe 0, un bon équilibre doit être trouvé entre une représentation trop sommaire qui fait l'impasse sur certaines réalités physiques, et une représentation trop détaillée qui demanderait beaucoup d'efforts pour réunir les données, ou qui serait « surdimensionnée » par rapport à l'objectif poursuivi. Nous proposons donc le compromis suivant[19] :

4.1.1. Le niveau « minimum » : 7 énergies primaires, 8 vecteurs secondaires, 6 secteurs de demande

Energies primaires	Vecteurs	Secteurs
Uranium	Electricité	Résidentiel
Charbon	Carburants gazeux	Tertiaire
Pétrole	Carburants liquides	Industrie
Gaz naturel	Combustibles solides	Agriculture
Renouvelables électriques (Hydraulique, Eolien, PV, géothermie très haute énergie)	Combustibles liquides	Transport
Renouvelables thermiques (Solaire thermique, Chaleur environnement, géothermie haute et moyenne énergie, chaleur de récupération, déchets)	Combustibles gazeux	Industrie de l'énergie
Renouvelables biomasse (solide, liquide, biogaz) : peuvent fournier chaleur et/ou électricité, combustible, carburant	Réseau de chaleur	
	Chaleur environnement	

Tableau 8 : Segmentation proposée pour le bilan énergétique

[18] Notons cependant que la planification ne doit pas constituer un préalable obligatoire à l'action. Nous indiquons simplement que la méthodologie présentée ici pourrait s'appliquer également sur des territoires de taille plus réduite que des régions, si les moyens pour réaliser un tel exercice sont disponibles.
[19] Dans la mesure où les OREGES sont en capacité de délivrer les données nécessaires

4.1.2. Un niveau plus détaillé possible

La modélisation de la demande sera d'autant plus pertinente qu'elle s'appuiera sur une représentation plus détaillée des consommations d'énergie, elles-mêmes reliées à des paramètres physiques. Le tableau indicatif ci-dessous donne quelques exemples de ceux-ci, sans être évidemment exhaustif. En effet, il est délicat d'être prescriptif à ce niveau, du fait que différents découpages sont possibles, sans que l'un soit nécessairement meilleur qu'un autre, et que le choix de ces paramètres va dépendre d'une part de la spécificité du territoire, et d'autre part de la disponibilité des données.

Secteur	Paramètres principaux (liste non exhaustive)	Paramètres secondaires (liste non exhaustive)
Général	Population	
Résidentiel	Nombre de maisons individuelles	Répartition des logements par typologies urbaines
	Nombre de logements collectifs	Possibilité de raccordement à un réseau de chaleur
	Répartition résidences principales/résidences secondaires/logements vacants	
	Parts modales des différentes énergies selon les usages principaux (et secondaires)	
Tertiaire	Surfaces par branches	Possibilité de raccordement à un réseau de chaleur
	Nombre d'emplois salariés par branche	
Industrie	Tonnages transportés par sous-secteur	Part d'électricité cogénérée à partir des combustibles achetés
Agriculture	Surface agricole utile	
	Cheptel	
Mobilité personnes	km parcourus par véhicule	Répartition en mobilité de proximité (< 80 km) avec différenciation par types de zone urbaine, mobilités longue distance privée et professionnelle
	Taux de remplissage	Part modale des différentes motorisations (thermique, électrique, hybride)
	Part modale des différentes énergies	Consommations spécifiques des différents modes de transports
		Vitesses limites de circulation
Transport marchandises	km parcourus par type de véhicule	Part modale des différentes modes de transport (VUL, poids lourds, train, etc.)
	Charge moyenne (t/véhicule)	Part modale des différentes motorisations (thermique, électrique, hybride)
	Part modale des différentes énergies	Consommations spécifiques des différents modes de transports
		Vitesses limites de circulation

Tableau 9 : Exemples de paramètres physiques

Le tableau suivant détaille les paramètres pouvant intervenir dans le calcul des consommations énergétiques :

Secteur	Usage principal	Usage secondaire	Détail
Résidentiel	chaleur	Chauffage	
		ECS	
		cuisson	
		Climatisation	
	électricité spécifique	Lavage	
		Froid	
		Eclairage	
		Electronique de loisir	
		Gestion & hygiène	
		Nouveaux usages	
Tertaire	chaleur	Chauffage	
		ECS	
		Climatisation	
		cuisson	
	électricité spécifique	Froid	
		Eclairage intérieur	
		Eclairage public	
		Electronique	Bureautique et serveurs
			Telecoms et data centers
		Gestion & hygiène	Parties communes d'immeubles
		Nouveaux usages	
		Autres usages tertiaires	internes aux 8 branches
		Autres usages tertiaires	hors branches (eau, défense nationale, …)
Industrie	chaleur	Chauffage des locaux	
	process	Fabrication	
		Autres	
		Chauffage liquide	
		Fusion	
		Energie mécanique	
		Séchage	
		Traitement thermique	
		Chauffage des métaux	
		Réactions chimiques	
	électricité spécifique		
Agriculture	chaleur		
	électricité spécifique		
	engins agricoles		
Transports	Mobilité personnes	2 roues	
		VP	
		Transports urbains	Bus
			Métro, tram
		Transports interurbains	Cars
		Train	Intercités, TER
			TGV
		Avion	Vols intérieurs
			Vols internationaux
	Transport marchandises	VUL	
		PL français	
		PL étrangers	
		Fret ferroviaire	
		Fluvial	
		Maritime	
		Aérien	

Tableau 10 : Détail des secteurs

Au niveau des vecteurs, les 8 principaux listés précédemment recouvrent en fait plus de diversité, comme le montre le tableau suivant :

Regroupement	Détail 1	Détail 2
Electricité	Electricité	
Carburants gazeux	Gaz naturel carburant	
	H2	
Carburants liquides	Essence	
	Gazole	
	Kérozène	
Combustibles solides	Charbon	
	Biomasse solide (bois,...)	Bois buche
		Plaquette
		Granulé
		Déchets bois
Combustibles liquides	Fioul	
	GPL	
Combustibles gazeux	Combustible gazeux réseau	CH4
		H2
	Combustible gazeux (usage local)	CH4
Réseau de chaleur	Réseaux de chaleur	
Chaleur environnement	Solaire thermique	
	Source froide des pompes à chaleur	air
		sol
		eau

Tableau 11 : Détail des vecteurs

Enfin, les 7 regroupements d'énergies primaires peuvent également être détaillés, comme le montre le tableau suivant.

Energies primaires	Catégories	Détail
Uranium	Uranium	
Charbon	Charbon	
Pétrole	Pétrole	
Gaz naturel	Gaz naturel	
Renouvelables électriques	Hydraulique	Fil de l'eau
		Eclusé
		Lac
		Petit hydraulique
		STEP
	Energies marines	Hydrolienne
		Houlo-motrice
		Marémotrice
	Eolien	Terrestre ancienne génération
		Terrestre nouvelle génération
		Maritime ancré
		Maritime flottant
	Solaire PV	Grandes toitures
		Diffus
		Au sol
	Géothermie très haute énergie	
Renouvelables thermiques	Solaire thermique	CESI
		SSC en maison individuelle
		CESC en LC
		SSC en LC
		CESC en tertiaire
		SSC en tertiaire
		sur réseau de chaleur
		industrie BT
		industrie MT
	Géothermie profonde (Basse et haute énergie)	
	Chaleur environnement (=source froide PAC)	Air
		Eau
		Sol = géothermie très basse énergie
	Déchets (OM, DIB, CSR)	OM
		DIB
		CSR
Renouvalables biomasse	Biomasse solide	Bois buche
		Plaquette
		Granulé
		Déchets bois
	Biomasse liquide	Agrocarburants
	Biogaz	Biométhane
		Production locale

Tableau 12 : Détail des énergies primaires

4.1.3. La place des réseaux

Quelques énergies primaires peuvent être utilisées directement au niveau final. C'est le cas essentiellement du solaire thermique, ainsi que l'énergie prélevée directement sur l'environnement pas les pompes à chaleur.

D'autres sont transformées plus ou moins pour être utilisables : c'est le cas des carburants liquides et combustibles solides et liquides.

Enfin, les réseaux tiennent une place importante, et leur interdépendance est amenée à croitre à l'avenir : ainsi, le réseau gaz peut recevoir et stocker/distribuer des excédents d'électricité transformés en gaz par électrolyse suivie éventuellement d'une réaction de méthanation. Inversement, le réseau gaz peut fournir de l'électricité par l'intermédiaire de centrale à gaz (cycles combinés) ou par des centrales de cogénération, qui fournissent également de la chaleur aux réseaux de chaleur.

4.2. Articuler la modélisation autour d'une représentation « vectorielle » du système énergétique (Energies primaires / vecteurs primaires / vecteurs secondaires / énergies finales

4.2.1. Evaluer les consommations finales sur les 8 vecteurs secondaires pour chacun des secteurs

La première étape consiste à évaluer la demande au niveau des secteurs pour les différents vecteurs. Il faudra donc remplir un tableau comme indiqué ci-dessous (situation de départ et prospective à l'horizon 2050).

	Résidentiel	Tertiaire	Transport	Industrie	Agriculture	Secteur énergie
Electricité						
Carburants gazeux						
Carburants liquides						
Combustibles solides						
Combustibles liquides						
Combustibles gazeux						
Réseau de chaleur						
Chaleur environnement						

Tableau 13 : Croisement vecteurs / secteurs

4.2.2. Pour chacune des énergies primaires, évaluer son apport au niveau des consommations finales en regardant les transformations possibles, et les pertes liées à ces transformations ainsi que les pertes de réseaux

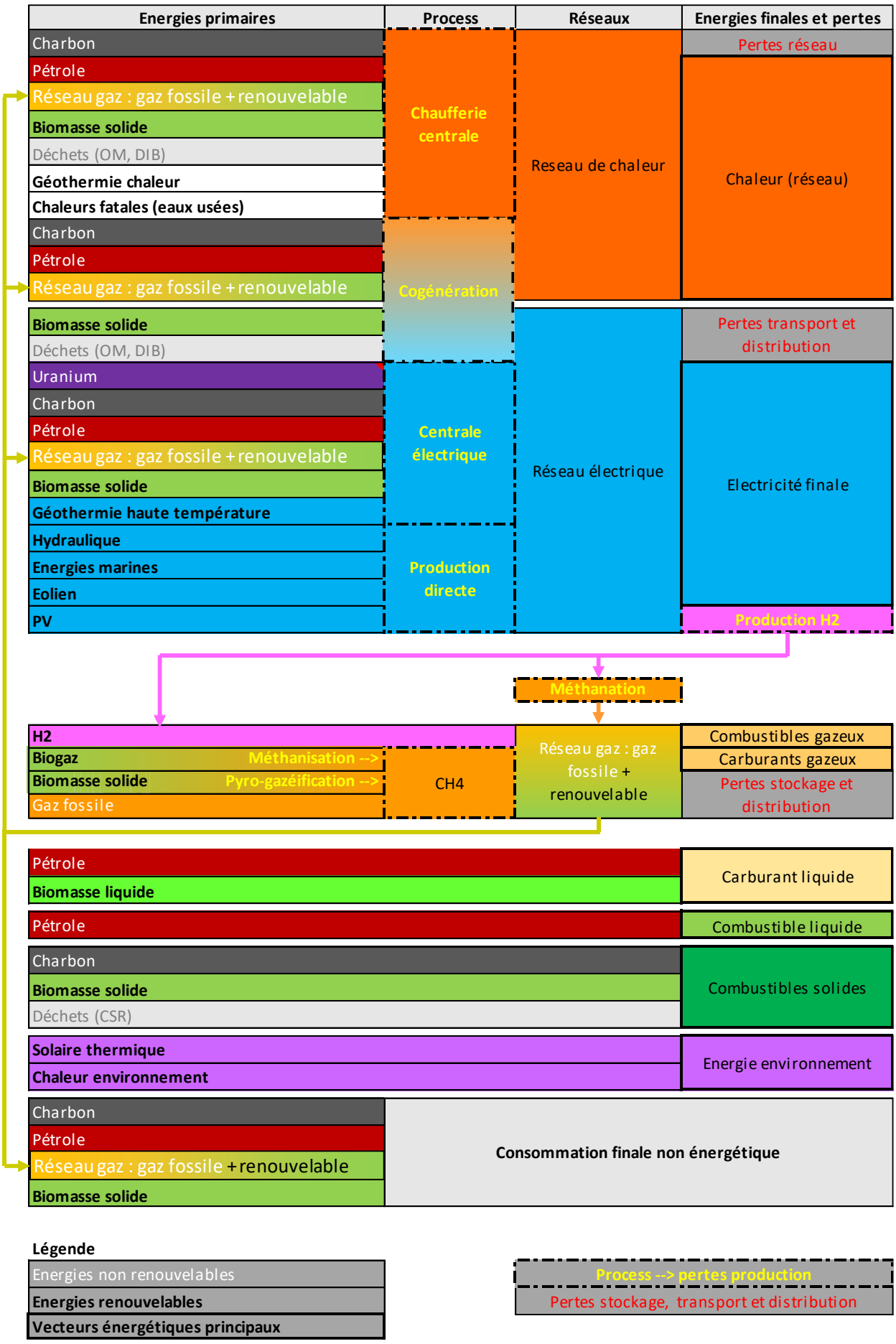


Tableau 14 : Synoptique des transformations énergétiques

Le schéma du Tableau 14 synthétise les interactions possibles entre les réseaux, et les pertes associées à l'utilisation de différents process énergétiques, ainsi que les pertes de stockage, transport et distribution des réseaux. Il illustre la manière dont les 8 vecteurs principaux peuvent être calculés au niveau final à partir des énergies primaires, en prenant en compte les équipements de transformation énergétique présents sur le territoire :

- Centrales électriques « classiques » (charbon, gaz, pétrole, le cas échant biomasse)
- Chaufferies alimentant des réseaux de chaleur
- Centrales de cogénération (alimentés par énergies fissiles ou renouvelables)
- Unités de méthanisation
- Unités de fabrication de gaz renouvelable (électrolyse, méthanation, pyro-gazéification)
- Production directe d'électricité renouvelable (hydraulique, éolien, PV, etc.)

L'outil PRES intègre les calculs de ces transformations, à partir d'une description simple des caractéristiques de ces équipements, sans préjuger de la facilité ou de la difficulté de l'obtention des données.

4.3. Etablir un bilan importations/exportations régionales

Au-delà de la quantification du positionnement du territoire aux objectifs de la Transition Energétique, la démarche proposée vise à déterminer son équilibre énergétique, et donc à quantifier les importations nécessaires, qu'elles soient en énergies renouvelables ou pas, et les exportations ou excédents, là-aussi renouvelables ou pas, qui peuvent être mis à disposition d'autres territoires moins bien lotis.

Le tableau suivant donne un exemple du bilan énergétique annuel complet pour une Région.

Année	2020	VECTEURS ENERGETIQUES	Electricité	Carburants liquides	Carburants gazeux	Combustibles gazeux	Combustibles liquides	Combustibles solides	Chaleur	Chaleur environnement		BILAN
Production locale	Energies primaires	Nucléaire	80 265							Source froide PAC	Solaire thermique	80 265
		Fossiles	6 163	0	186		186	0	327			6 862
		Renouvelables	19 230	181	2 734			11 381	1 399	819	404	36 148
Importations		Nucléaire	0									0
		Fossiles	0	34 965	25 971		9 327	9 317	0			79 579
		Renouvelables	49	4 847	4 583			0	0			9 478
Exportations (comptées négativement)		Nucléaire	-57 348									-57 348
		Fossiles	-823	0	0		0	0	0			-823
		Renouvelables	-11 149	0	0			-1 039	0			-12 188
Usages internes	Emplois	Fossiles			7 880		160	7 780				15 821
		Renouvelables	1 559		2 205			1 819				5 583
		Description	Electrolyse		Chaufferie, centrale électrique, cogénération, pyro-gazéification							
Pertes transformation et transport / distribution		Nucléaire	1 604									1 604
		Fossiles	374		366				26			765
		Renouvelables	460		102				110			672
OFFRE (au point de livraison)		Nucléaire	21 313									21 313
		Fossiles	4 967	34 965	3 200	14 710	9 353	1 536	302			69 033
		Renouvelables	6 110	5 028	895	4 115		8 523	1 289	1 222		27 183
EQUILIBRE OFFRE / DEMANDE (GWh)			32 390	39 992	4 095	18 826	9 353	10 059	1 591	1 222		117 529
			32 390	39 992	4 095	18 826	9 353	10 059	1 591	1 222		117 529
DEMANDE (à la consommation)	Energie finale	Résidentiel	14 490	0	0	9 812	4 746	6 011	796	712		36 568
		Tertiaire	9 473	0	0	4 583	2 874	298	349	261		17 837
		Transport	2 304	37 115	4 042	0	0	0	0	0		43 462
		Industrie	4 666	0	0	3 794	1 285	3 330	447	196		13 718
		Agriculture	356	2 877	53	270	80	53	0	53		3 743
		Industrie de l'énergie	1 100	0	0	0	0	0	0	0		1 100
		Consommations non énergétiques de l'industrie	0	0	0	367	367	367	0	0		1 100

Tableau 15 : Exemple d'équilibre énergétique territorial

4.4. Evaluer les paramètres locaux (problème de l'accès à la donnée) et trouver des solutions pour pallier le manque de données

L'accès aux données est souvent problématique, même si les choses évoluent de manière positive depuis quelques années, avec l'ouverture progressives des données publiques de l'Etat et des administrations, et la publication par certains organismes de données de plus en plus détaillées.

Mais l'accès à la donnée n'est pas tout. Il importe également de disposer d'une méthodologie pour relier entre ces différentes données et bâtir un modèle cohérent.

Un travail récent[20],[21] vise à recenser les sources de données pour les exercices de planification énergétique territoriale.

4.5. Choisir les « bonnes unités »

Quand on réalise des bilans énergétiques, on trouve souvent des unités énergétiques diverses et variées :

- Pour les puissances, le Watt (W) et ses multiples kW, MW, GW
- Pour les énergies, le Wattheure (Wh) et plus usuellement ses multiples kWh, MWh, GWh et TWh. En toute rigueur, l'unité à utiliser devrait être celle du Système International d'unités, à savoir le Joule (J) et en pratique ses multiples TJ et PJ. Mais cet usage n'est pas courant, notamment parce que le Joule représente une toute petite quantité d'énergie. On rencontre aussi la tonne-équivalent-pétrole (tep) et ses multiples ktep et Mtep. Cette unité était adaptée à l'origine à la mesure d'énergie calorifique « primaire ». Or, il est compliqué de définir ce qu'est l'énergie « primaire » dans le cas de certaines installations produisant de l'électricité « finale » : centrales nucléaires, panneaux photovoltaïques, éoliennes, etc.[22]

Par ailleurs, lorsqu'on comptabilise les combustibles dont les molécules comportent de l'hydrogène, la chaleur latente de condensation de l'eau présente dans les gaz brulés, usuellement sous forme de vapeur, peut être, ou non, prise en compte dans le pouvoir calorifique. Dans le premier cas, on parle du Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et dans le deuxième cas du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).

Ce choix augmente donc les quantités d'énergie considérées par rapport au PCI (car PCS = PCI + chaleur latente de l'eau) pour plusieurs vecteurs. L'usage du PCI permet d'afficher des rendements de chaudière supérieur à 100 % pour les chaudières à condensation, ce qui n'a pas grand sens physique, mais qui est très couramment pratiqué par les constructeurs., car plus flatteur…

Il importe d'être vigilant lors de la réalisation de bilans, à ce que les combustibles soient pris en compte de manière homogène. Ainsi, certaines énergies sont usuellement facturées en PCI (fioul) alors que d'autre le sont en PCS (gaz naturel).

Pour simplifier les choses, et parce que la condensation est de plus en plus utilisée, non seulement dans les chaudières à gaz, mais également dans celles fonctionnant au fioul et également dans certaines fonctionnant au bois, nous proposons d'exprimer toutes les énergies en TWh PCS.

En toute rigueur, une valeur précise de conversion PCS/PCI devrait être utilisé pour chacun des combustibles. Pour simplifier et uniformiser, nous proposons de retenir les coefficients suivants :

	PCS/PCI
Charbon	1,052
Biomasse solide	1,090
Combustibles liquides	1,075
GPL	1,087
Gaz réseau (méthane)	1,111

Tableau 16 : Rapport PCS/PCI pour différents combustibles

[20] ADEME, Anne-Laure DUBILLY, ACCTEES (Aurélien Alfaré), Institut négaWatt, (Thomas Letz, Benoît Verzat). 2018. Planification énergétique territoriale : Etat des lieux de l'accès aux données et recommandations. 29 pages. Publication à venir sur www.ademe.fr/mediatheque

[21] ADEME, Données pour la planification énergétique territoriale : présentation de deux supports pour faciliter la collecte des données. Publication à venir sur http://www.ademe.fr/mediathequewww.ademe.fr/mediatheque

[22] https://www.connaissancedesenergies.org/unites-de-lenergie-quest-ce-quune-tep-161118

4.6. Définir des indicateurs adaptés

Nous proposons ci-dessous[23] un certain nombre d'indicateurs dérivés de ceux présentés au paragraphe 0, prenant en compte les importations et exportations d'énergie. Cette liste n'est pas exhaustive, et pourrait être complétée par d'autres indicateurs.

4.6.1. Taux de réduction de la consommation d'énergie primaire fossile

La consommation d'énergie primaire fossile étant obtenue en additionnant les importations fossiles aux productions du territoire et en retranchant les exportations, le taux de réduction pour une année n par rapport à la situation de 2012 est obtenu par la formule suivante :

$$1 - \frac{(\text{production locale fossile} + \text{importation fossile} - \text{exportation fossile})_n}{(\text{production locale fossile} + \text{importation fossile} - \text{exportation fossile})_{2012}}$$

4.6.2. Réduction de la consommation d'énergie finale

La consommation d'énergie finale étant obtenue en additionnant les consommations des cinq secteurs, le taux de réduction pour une année n par rapport à la situation de 2012 est obtenu par la formule suivante :

$$1 - \frac{(\text{consommation résidentiel} + \text{tertiaire} + \text{industrie} + \text{transport} + \text{agriculture/pèche})_n}{(\text{consommation résidentiel} + \text{tertiaire} + \text{industrie} + \text{transport} + \text{agriculture/pèche})_{2012}}$$

4.6.3. Taux d'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie globale (toutes provenances)

Ce paramètre est calculé de la manière suivante :

- Pour chaque vecteur énergétique, calcul de l'offre brute renouvelable (niveau demande brute) du vecteur considéré, qui prend en compte la demande finale et les pertes de transport et distribution. Cette offre est obtenue à partir de la production primaire, augmentée des importations et diminuée des exportations, et des consommations liées aux transformations énergétiques. En ce sens, elle quantifie la part renouvelable, mais sans tenir compte de la provenance des énergies renouvelables consommées
- Somme de toutes ces valeurs pour l'ensemble des huit vecteurs
- Rapport entre cette somme et la consommation finale brute de l'année considérée

$$\frac{\sum_{vecteurs\ énergétiques} (\text{consommation totale finale brut ENR du vecteur})_n}{(\text{consommation finale brute résidentiel} + \text{tertiaire} + \text{industrie} + \text{transport} + \text{agriculture/péche} + \text{industrie de l'énergie})_n}$$

Le paramètre présenté ici ne distingue pas si les ENR utilisées sont produites localement ou importées.

4.6.4. Taux d'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie globale (production locale)

Si on veut chiffrer la part des ENR produites localement qui sont utilisées pour couvrir les besoins finaux, il faut modifier comme suit l'indicateur précédent :

$$\frac{\sum_{vecteurs\ énergétiques} \left[\text{consommation totale finale brute ENR du vecteur.} \frac{\text{production locale renouvelable du vecteur}}{(\text{production locale renouvelable du vecteur} + \text{importation renouvelable du vecteur})}\right]_n}{(\text{consommation finale brute résidentiel} + \text{tertiaire} + \text{industrie} + \text{transport} + \text{agriculture/péche} + \text{industrie de l'énergie})_n}$$

[23] L'année utilisée pour le calcul est indiquée par la lettre n.

4.6.5. Taux d'exportation d'énergie renouvelable

Ce taux est calculé comme le rapport entre le total des énergies renouvelables exportées par le territoire et la production totale d'ENR du territoire :

$$\frac{\sum_{vecteurs\ énergétiques}(\text{exportations ENR})_n}{\sum_{vecteurs\ énergétiques}(\text{productions locales ENR})_n}$$

Il quantifie la part des énergies renouvelables produites sur le territoire et qui sont exportées parce qu'elles ne peuvent être valorisées localement, du fait de l'inadéquation de ces ressources avec les différents vecteurs nécessaires au niveau final. Ces exportations pourront être utilisées par un autre territoire moins bien pourvu.

4.6.6. Taux d'ENR dans la production d'électricité

Ce taux caractérise la part renouvelable de l'électricité produite :

$$\frac{\text{production ENR électricité}}{\text{production totale électricité}}$$

4.6.7. Taux d'ENR dans les carburants

Ce taux caractérise la part renouvelable dans les carburants liquides et gazeux :

$$\frac{\sum_{carburants\ liquides,carburants\ gazeux}(\text{ Offre nette ENR au point de livraison})}{\text{Consommation totale finale carburants}}$$

4.6.8. Taux d'ENR dans le gaz

Ce taux caractérise la part renouvelable dans le gaz :

$$\frac{\sum_{combustibles\ gazeux,carburant\ gazeux}(\text{ Offre nette ENR au point de livraison})}{\text{Consommation totale finale gaz}}$$

4.6.9. Taux d'ENR dans les réseaux de chaleur

Ce taux caractérise la part renouvelable dans les réseaux de chaleur :

$$\frac{\text{Offre nette ENR au point de livraison réseaux de chaleur}}{\text{consommation finale totale réseaux de chaleur}}$$

4.6.10. Réduction des émissions de CO_2 par rapport à 1990

Rappelons ici que seules les émissions CO_2 engendrées par les combustions de combustibles fossiles sont prises en compte, selon la méthodologie simplifiée du SDES rappelée page 19.

$$1-\frac{\sum_{charbon,pétrole,gaz\ naturel,déchets}(\text{consommations primaires . coefficients d'émission })_n}{\sum_{charbon,pétrole,gaz\ naturel,déchets}(\text{consommations primaires . coefficients d'émission })_{1990}}$$

5.

Conclusion

L'outil PRES présenté précédemment permettra ultérieurement :

- La remontée et la compilation des exercices de planification énergétique régionale, pour déboucher sur une synthèse nationale.
- À partir du moment où toutes les Régions utilisent le même outil de présentation de leur scénario, il sera plus aisé de compiler l'ensemble des données régionales et de situer la somme des ambitions locales au regard des objectifs nationaux et/ou européens.
- On peut également imaginer d'utiliser un tel outil pour la présentation et la consolidation d'exercices de planification à un autre échelon territorial : PCAET à l'échelon d'un EPCI. Là aussi un cadrage méthodologique ne peut être que bénéfique pour faciliter le dialogue entre les différents acteurs de terrain qui travaillent sur cette thématique.
- La constitution d'un groupe de travail interrégional pour discuter et coordonner les efforts de chacune d'entre elles à l'atteinte d'un objectif national commun. Il est probable que dans l'exercice actuel SRADDET, les ambitions des différentes seront vraisemblablement hétérogènes, et qu'une réflexion sur une répartition équitable de l'effort nécessaire pour réaliser la Transition Energétique est indispensable, pour moduler les contributions des territoires en fonction de leurs particularités (caractère urbain/rural, tissu industriel, potentiel de développement des différentes énergies renouvelables, etc.).
- Dans cette optique-là, une réflexion sur la territorialisation d'objectifs et un travail méthodologique pour « descendre » des valeurs définies à un niveau territorial supérieur sur des mailles territoriales plus fines est indispensable. Différentes tentatives ont déjà eu lieu, mais le sujet est suffisamment complexe et transdisciplinaire pour mériter la constitution d'un groupe de travail « ad hoc ».

6.

Annexe 1 : équilibre du réseau électrique

Pour l'électricité, l'équilibre ne doit pas être assuré seulement en moyenne sur l'année mais à tout instant.

Rappel sur la méthodologie du scénario négaWatt[24] pour le niveau national

Une méthode simplifiée, qui ne modélise pas le réseau électrique de transport et de distribution réel, est utilisée. Elle est basée sur le croisement de courbes-type de répartition de la consommation selon les usages et de production selon les filières. Elle permet, en intégrant différentes solutions de flexibilité, un équilibre heure par heure pour chaque année jusqu'à 2050.

L'outil développé pour réaliser ce calcul 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.

Problématique sur un niveau territorial inférieur

Difficile de dire au niveau d'une Région comment se comporte le réseau électrique :

1. Soit on fait un calcul du type équilibre en puissance à partir des consommations et ressources électriques territoriales, en utilisant la méthodologie et des courbes-type analogues à celles utilisées au niveau national
2. Soit on applique au territoire le prorata de l'équilibre électrique du Scénario négaWatt, en fonction du rapport de sa consommation d'électricité à la consommation totale de la France
3. Soit on fait un calcul national du type équilibre en puissance à partir des consommations électriques et ressources territoriales agrégées au niveau national

Dans l'outil simplifié développé dans le cadre du présent projet, c'est la deuxième approche qui a été utilisée.

[24] Rapport technique du scénario négaWatt 2011-2050 : https://negawatt.org/Rapport-technique-du-scenario-negaWatt-2011-2050-189

7.

Annexe 2 : description de l'outil PRES

L'outil croise les énergies nécessaires pour satisfaire les besoins finaux du territoire, en mobilisant prioritairement les ressources locales, en modélisant de manière simplifiée les principales transformations entre vecteurs énergétiques ainsi que les pertes dans les réseaux de transport et distribution, et en équilibrant le bilan en faisant appel le cas échéant à des importations ou des exportations.

Les ressources considérées sont soit des ressources primaires, soit des ressources issues de celles-ci, après une première transformation : ainsi, la biomasse liquide prise en compte correspond à la production locale d'agrocarburants, et n'est donc pas stricto sensu la biomasse primaire dont ils sont issus. De même le biogaz correspond à la production nette en sortie des digesteurs et non à la sensu la biomasse primaire dont il est issu. Ces choix de comptabilisation ont été déterminés notamment par les grandeurs usuellement disponibles dans les statistiques.

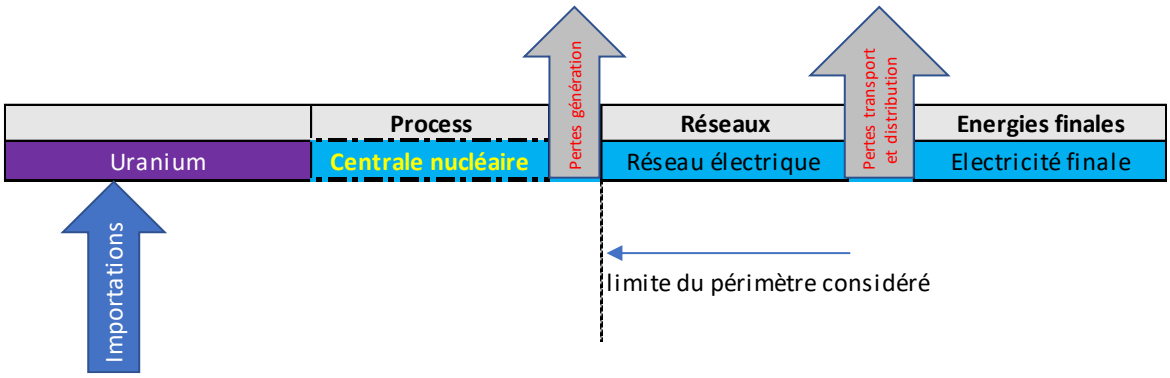
7.1. Organisation générale

Les schémas des paragraphes ci-dessous illustrent les bilans énergétiques des différentes énergies, en schématisant les liens entre énergies primaires (ou dérivées de celles-ci) et finales à travers les réseaux. Les pertes de génération ou de transformation (pyro-gazéification, électrolyse, méthanisation), qui apparaissent dans ces schémas, sont calculées en introduisant des rendements dans le modèle (variation annuelle possible).

L'outil permet, si l'utilisateur le souhaite, de prendre en compte les consommations non énergétiques dans les bilans en énergie primaire.

7.2. Energies primaires

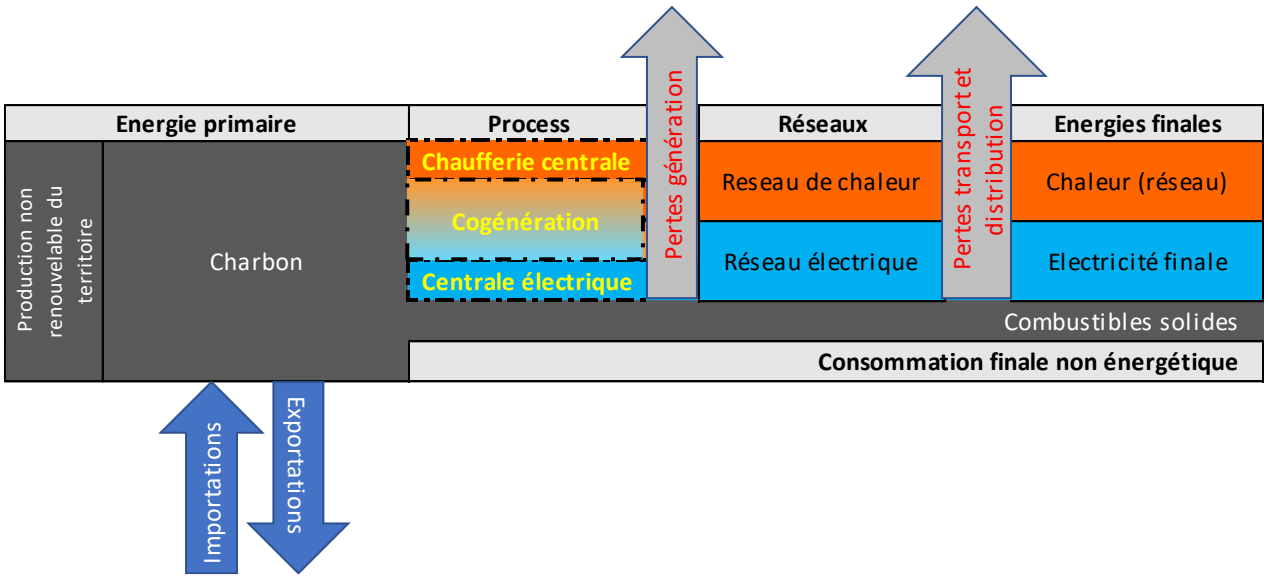
7.2.1. Uranium



Cette énergie est présentée de manière différente de la plupart des autres énergies (fossiles, renouvelables électriques) : le bilan fait apparaitre seulement l'électricité primaire produite par les centrales nucléaires, selon la définition explicitée au paragraphe 0, et non la consommation primaire d'uranium correspondantes.

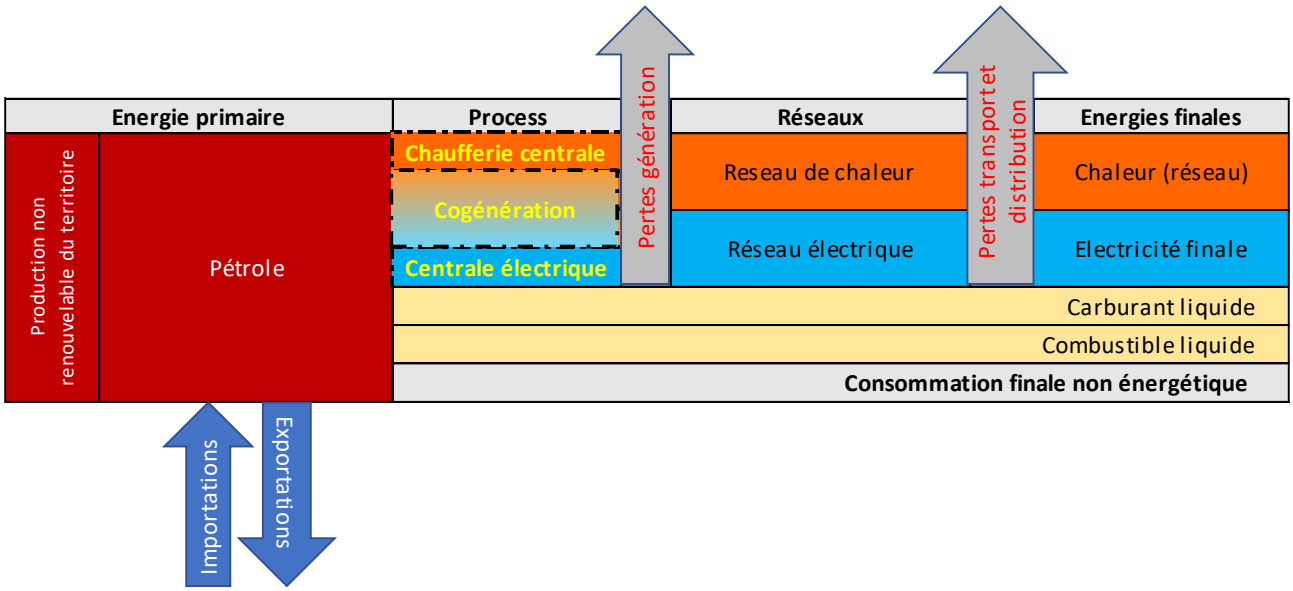
7.2.2. Charbon

Le charbon peut être utilisé pour la production centralisée d'électricité et/ou de chaleur, et également comme combustible dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industrie et agriculture.



7.2.3. Pétrole

Le pétrole a des utilisations similaires à celles du charbon (production centralisée d'électricité et/ou de chaleur, combustible dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industrie et agriculture), auxquelles viennent s'ajouter les usages carburant.



7.2.4. Gaz naturel

Il est difficile de représenter le bilan du gaz naturel sans montrer l'ensemble du réseau de gaz, schématisé au paragraphe 0, ainsi que les autres productions de méthane renouvelable qui peuvent être injectées dans le réseau.

Les utilisations sont similaires à celles du pétrole : production centralisée d'électricité et/ou de chaleur, combustible et carburant.

7.2.5. ENR électrique

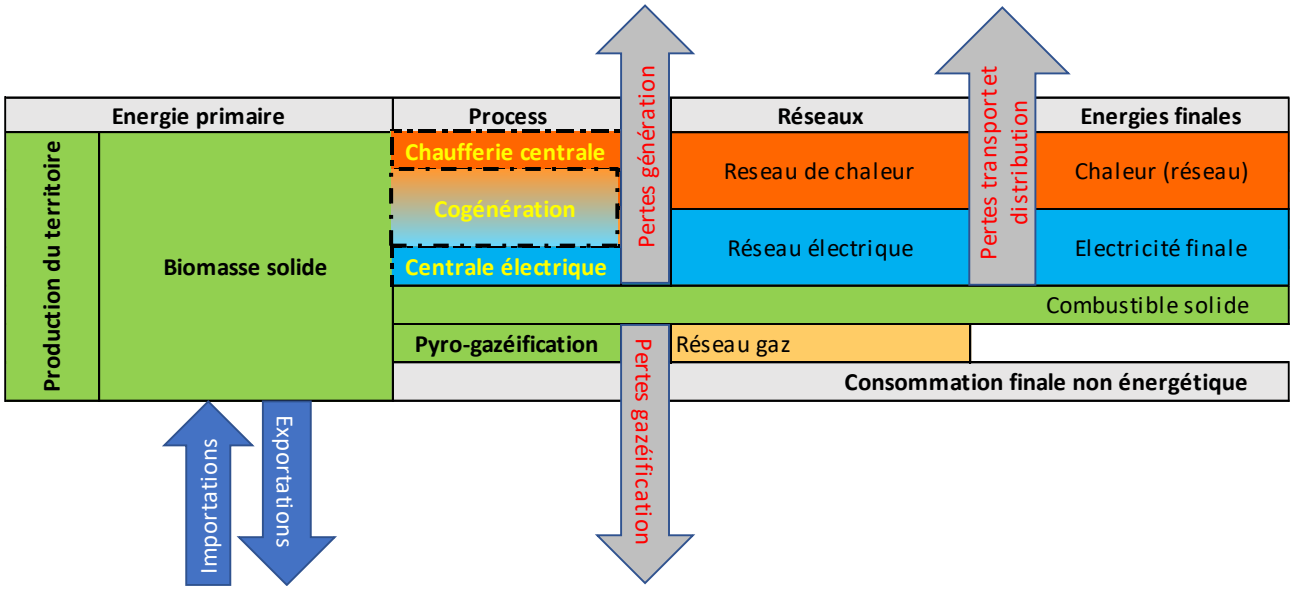
Les productions directes d'électricité renouvelable peuvent provenir de géothermie haute température, d'hydraulique, d'énergies marines, d'éolien et de photovoltaïque.

Dans la modélisation simplifiée utilisée dans l'outil, toutes sont productions sont considérées comme étant injectées intégralement dans le réseau électrique.

Pour le photovoltaïque, l'énergie produite peut être aussi consommée directement sur le lieu de production, sans passage par le réseau (autoconsommation), seul l'excédent de production étant injecté dans le réseau. Mais d'un point de vue bilan énergétique, c'est quasiment équivalent, aux pertes près, de le comptabiliser comme si elle transitait par le réseau.

7.2.6. Biomasse solide

La biomasse solide, comme combustible solide, a des utilisations similaires à celles du charbon, auxquelles vient s'ajouter la pyro-gazéification qui permet de transformer la biomasse en gaz pouvant être injecté dans le réseau de gaz.



7.2.7. Biogaz

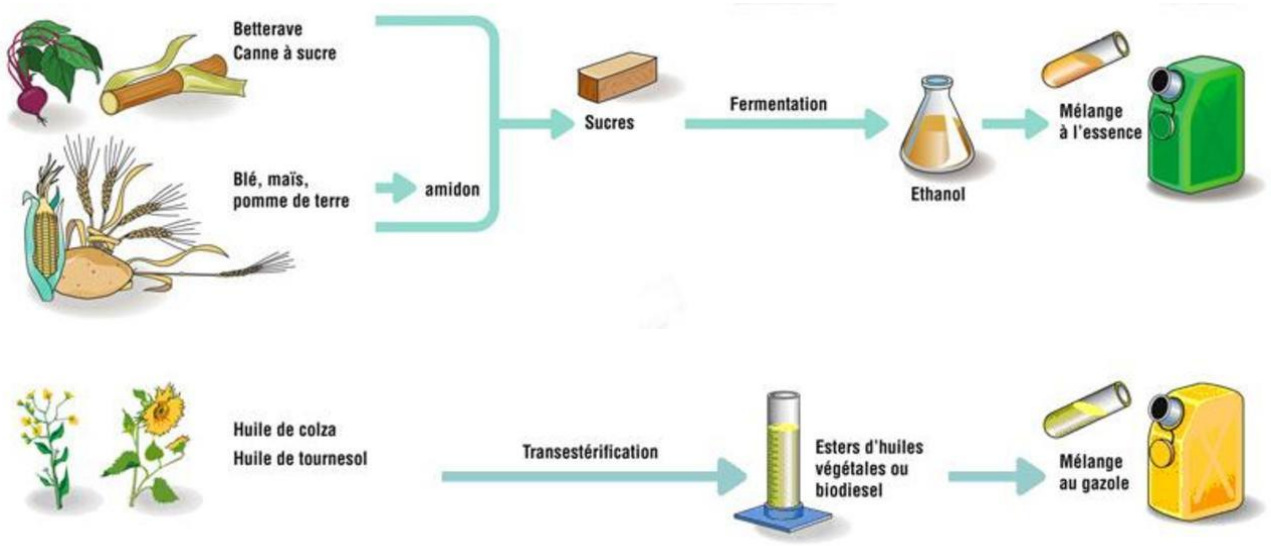
Dans la modélisation simplifiée présentée ici, le biogaz est considéré comme étant injecté en totalité dans le réseau gaz. La représentation se trouve au paragraphe 0.

Le biogaz peut être aussi consommé directement sur le lieu de production, sans passage par le réseau. Mais d'un point de vue bilan énergétique, c'est quasiment équivalent, aux pertes près, de le comptabiliser comme s'il transitait par le réseau.

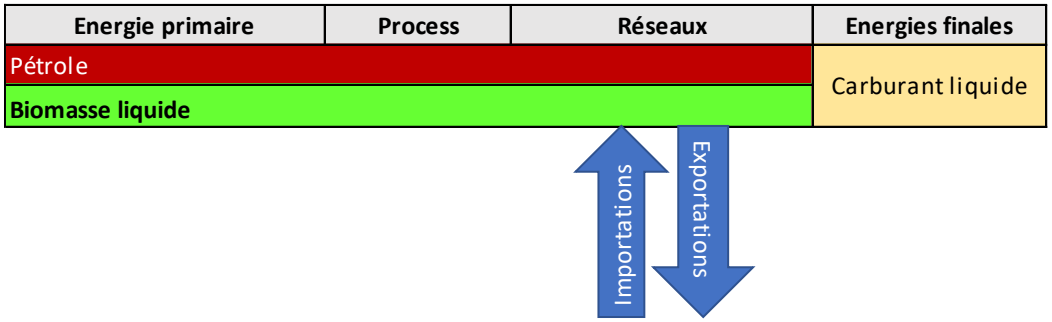
7.2.9. Agrocarburants

Seuls sont considérés ici les agrocarburants (alcools et esters) les plus courants utilisés en mélange avec les carburants classiques[25]

[25] Source : https://www.lci.fr/sciences/les-biocarburants-a-l-ethanol-au-colza-ou-a-l-huile-de-palme-c-est-bon-ou-c-est-mauvais-pour-l-environnement-2090105.html



Par souci de simplicité, l'utilisation d'agrocarburants purs dans les véhicules n'est pas modélisée ici, car le bilan global ne serait pas modifié.



7.2.10. Solaire thermique et chaleur environnement

Comme indiqué au paragraphe 0, deux énergies viennent compléter le bilan énergétique. Il s'agit du solaire thermique, utilisé directement au niveau des différents secteurs, et de la chaleur prise par les pompes à chaleur sur leur source froide.

Pour le solaire thermique, nous n'avons pas intégré dans le modèle de production centralisée qui serait raccordée sur des réseaux de chaleur, cette technique étant pour l'instant complètement marginale, en tout cas en France.

Les sources froides fournissant la majeure partie de l'énergie délivrée par les pompes à chaleur peuvent être l'air extérieur (aérothermie), des nappes d'eau souterraines ou directement la chaleur du sol (appelée abusivement « géothermie » très basse énergie)

Pour la bonne complétude du bilan énergétique, ces deux sources sont également comptabilisées dans le bilan primaire.

7.3. Réseaux

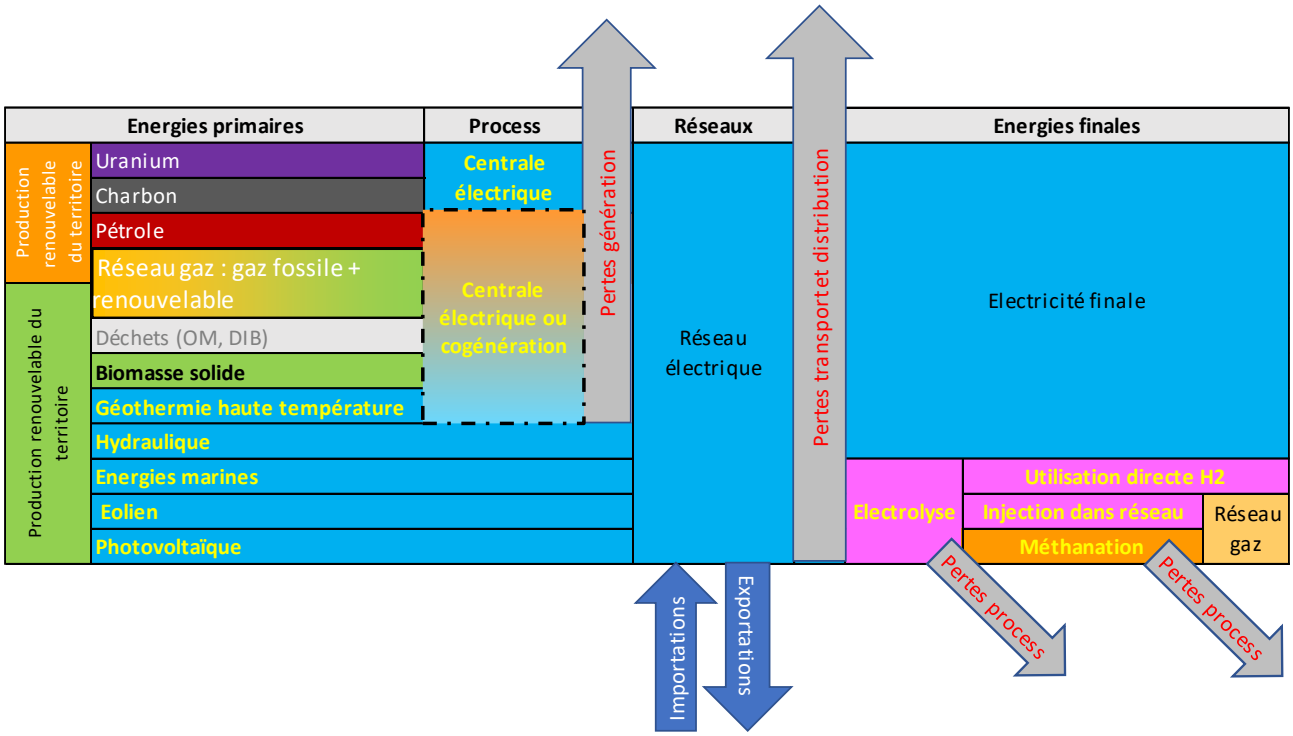
Les réseaux occupent une place centrale dans la transition énergétique, permettant la mutualisation des productions entre les différents usages et les différents usagers. Ces réseaux ne sont pas indépendants, mais interconnectés à travers des transformations énergétiques.

7.3.1. Réseau électrique

Le réseau électrique reçoit de l'énergie provenant de centrales électriques ou de cogénérations alimentées par des énergies renouvelables ou non présentes sur le territoire, ainsi que les productions renouvelables directes du territoire (les 5 dernières sur le schéma suivant).

L'électricité est utilisée soit directement au niveau final, soit est utilisée (particulièrement les excédents de productions renouvelables) pour produire de l'hydrogène par électrolyse, dont une partie peut être utilisée directement par exemple dans l'industrie ou dans les transports, et le reste est transformé en méthane par le procédé de la méthanation pour être injecté dans le réseau gaz.

L'équilibre du système est obtenu par des échanges imports/exports avec les territoires voisins.



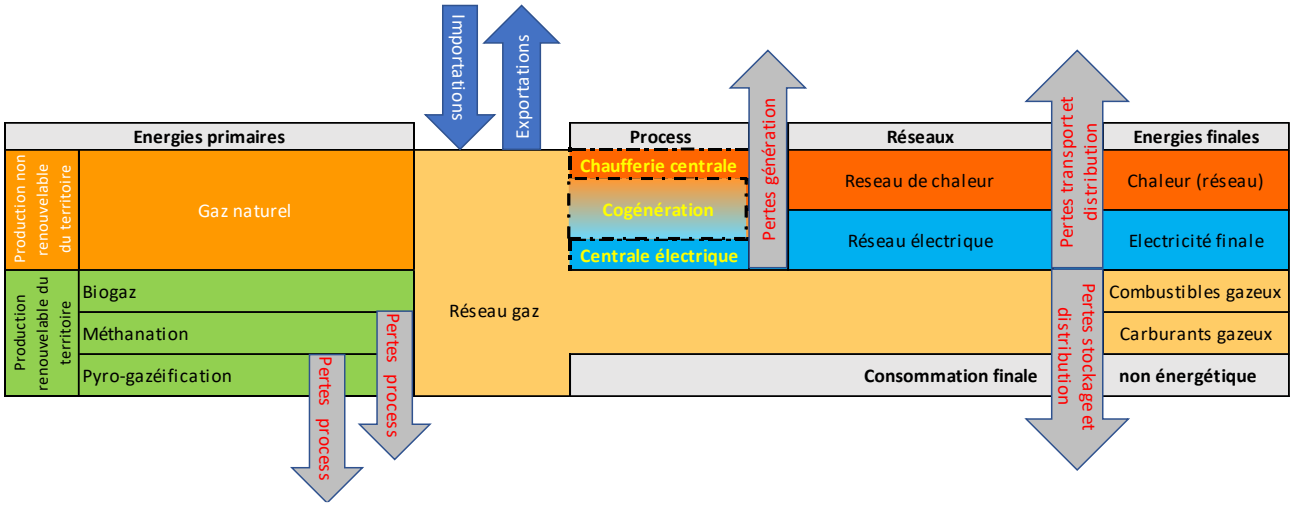
On applique, pour chacune des sources du territoire, le prorata de l'équilibre électrique national, en fonction du rapport de sa consommation d'électricité à la consommation totale de la France

7.3.2. Réseau gaz

Le réseau gaz reçoit de l'énergie provenant de 3 sources renouvelables (biogaz, méthanation et pyro-gazéification), ainsi que d'une éventuelle production locale.

Le gaz du réseau peut être utilisé pour la production centralisée d'électricité et/ou de chaleur, comme combustible dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industrie et agriculture, et comme carburant dans le secteur des transports.

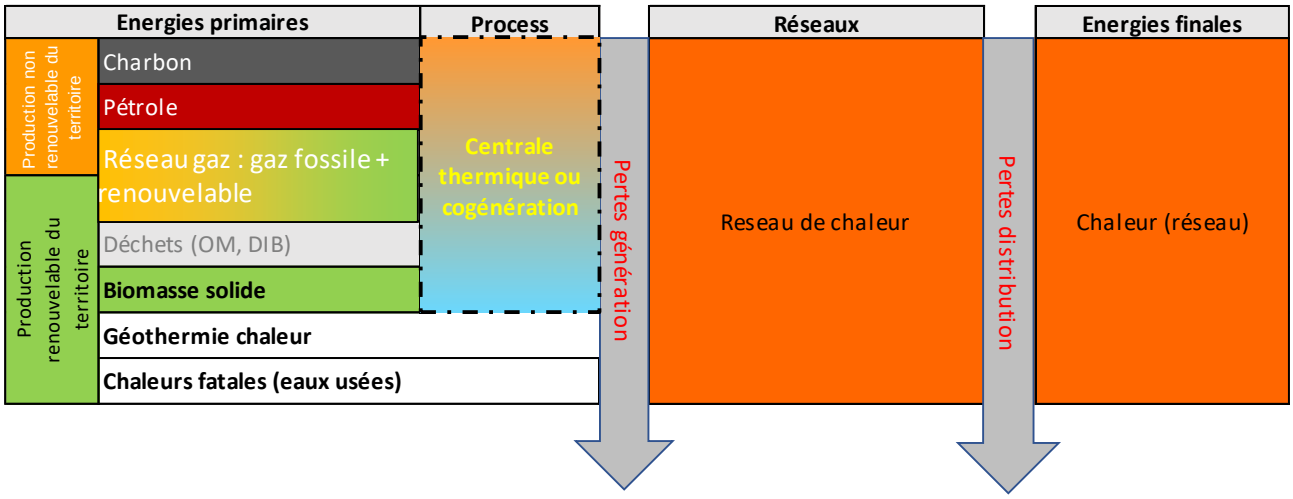
L'équilibre du système est obtenu par des échanges imports/exports avec les territoires voisins.



7.3.3. Réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur peuvent être alimentés à partir de différentes sources renouvelables ou non, décrites dans le schéma suivant. Par convention, la moitié des déchets est considérée comme renouvelable, et l'autre non.

Les réseaux de chaleur étant territorialisés, on considère en première approximation qu'il n'y a pas d'échanges de chaleur avec les territoires voisins.



7.4. Périmètres des secteurs

Au niveau des usages de l'énergie, six grands secteurs sont considérés :

- Résidentiel
- Tertiaire
- Industrie
- Transport
- Agriculture (et pêche)
- Industrie de l'énergie

Optionnellement, les consommations non énergétiques de l'industrie peuvent être intégrées dans le bilan.

L'outil ne calcule pas la demande de ces secteurs sur les différents vecteurs énergétiques, c'est à l'utilisateur de renseigner les tableaux correspondants.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Energies utilisées dans le secteur industriel 10
Tableau 2 : Utilisation de l'énergie dans le secteur industriel 10
Tableau 3 : Secteurs industriels 11
Tableau 4 : Objectifs du GIEC 13
Tableau 5 : Objectifs européens pour la France 13
Tableau 6 : Objectifs de la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte 14
Tableau 7 : Différents niveaux de détail possible pour une modélisation 25
Tableau 8 : Segmentation proposée pour le bilan énergétique 28
Tableau 9 : Exemples de paramètres physiques 29
Tableau 10 : Détail des secteurs 30
Tableau 11 : Détail des vecteurs 31
Tableau 12 : Détail des énergies primaires 32
Tableau 13 : Croisement vecteurs / secteurs 33
Tableau 14 : Synoptique des transformations énergétiques 34
Tableau 15 : Exemple d'équilibre énergétique territorial 35
Tableau 16 : Rapport PCS/PCI pour différents combustibles 36

Liste des figures

Figure 1 : Les différents stades de l'énergie 7
Figure 2 : Augmentation de la température à la fin du siècle 13
Figure 3 : Périmètre du calcul des émissions de GES 16
Figure 4 : Périmètre du calcul de la consommation finale 17
Figure 5 : Périmètre du calcul de la consommation d'énergie primaire 18
Figure 6 : Périmètre du calcul de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute 19
Figure 7 : Périmètre du taux d'indépendance énergétique « officiel » 20
Figure 8 : Périmètre du taux d'indépendance énergétique « réel » 20
Figure 9 : Modes de calcul des émissions polluantes pour les transports 24
Figure 10 : Exemple de diagramme de Sankey 27