

ACVs ENERGIES COMPARAISON D'APPROCHE ACV DES SYSTEMES ENERGETIQUES

Rapport final

RAPPORT D'ETUDE / RECHERCHE



EXPERTISES

Oct.
2020

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien de l'ADEME. Les résultats n'engagent pas l'ADEME. Cette étude fait référence à des résultats précédents, en particulier issus de la chaire Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, ParisTech en association avec VINCI.

CITATION DE CE RAPPORT

Peuportier B., Roux C., Assoumou E., Frapin M., Sénégas J.-L. 2020. ACVs Energies – Rapport final. 31 pages

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1705C0037

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Bruno Peuportier (ARMINES-CES), Charlotte Roux (EIVP), Edi Assoumou (ARMINES - CMA) et Jean-Louis Sénégas (IZUBA Energies)

Projet de recherche coordonné par : Bruno Peuportier (ARMINES-CES)
Appel à projet de recherche : « Energie durable 2017 »

Coordination technique : Marie Payeur puis Marie Sauze
Direction : Productions et Energies Durables

SOMMAIRE

1. Objectifs.....	4
2. Déroulement du projet	6
3. Résultats obtenus	7
3.1 Etat de l’art et revue des choix méthodologiques	7
3.2 Modélisation du système électrique.....	7
3.3 Elaboration de scénarios prospectifs	9
3.4 Développement d'un prototype logiciel.....	12
3.5 Etudes de cas	15
4. Travaux réalisés et publications.....	19
5. Conclusions et perspectives	21
6. Références bibliographiques	24

1. Objectifs

Le projet se base sur le constat suivant. Le secteur du bâtiment représente à lui seul près de la moitié de la consommation totale d'énergie en France, et les deux tiers de la consommation d'électricité. L'ensemble des scénarios de transition énergétique place la rénovation du parc parmi les leviers d'action prioritaires. Le choix des sources d'énergie (faut-il privilégier les réseaux de chaleur ?), le niveau de performance des bâtiments (faut-il aller jusqu'à l'énergie positive ?), les stratégies de gestion (réduction des pointes de demande, stockage) donnent lieu à des débats où les argumentaires sont d'ordre économique mais aussi environnemental. Améliorer la précision et la pertinence de l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments correspond ainsi à un enjeu réel, en termes de politiques publiques (réglementation, labellisation) mais aussi de décisions (mise en œuvre de la transition énergétique et choix de systèmes, conception architecturale et urbaine, techniques constructives, réhabilitation...) et de stratégies de gestion pour une meilleure intégration entre bâtiments et réseaux (smart grids...).

L'évaluation des impacts environnementaux liés aux usages de l'énergie est généralement effectuée au moyen de l'analyse de cycle de vie (ACV), dans l'objectif d'éviter le déplacement de pollution :

- Dans le temps, par la prise en compte des différentes étapes du cycle de vie, depuis la construction des infrastructures énergétiques jusqu'à leur fin de vie,
- Dans l'espace, car les processus énergétiques ne sont pas forcément localisés sur les lieux de consommation,
- D'un impact à l'autre, grâce au caractère multicritères de l'analyse.

La plupart des outils d'ACV et des études basées sur cette méthode considèrent des impacts moyens par kWh d'énergie finale consommée. Le référentiel PEBN (Performance Environnementale des Bâtiments Neufs) sur lequel est basée la future réglementation énergétique des bâtiments neufs (RE2020) les différencie par usage en ce qui concerne l'électricité, mais la méthodologie correspondante est peu explicite. Quelques travaux ont été menés sur la variation temporelle des impacts, des scénarios prospectifs sont proposés mais aucun croisement de ces différentes options n'a encore été tenté.

Il est alors utile de recenser les choix méthodologiques possibles, et de proposer des méthodes adaptées aux objectifs des études ACV, en particulier dans le secteur du bâtiment.

Pour répondre à la problématique posée ci-dessus, le projet ACVs Energies a pour objet de développer une méthodologie, mise ensuite en œuvre dans un outil logiciel largement diffusé, en comparant plusieurs options méthodologiques. Ces options, applicables à une production d'électricité ou de chauffage urbain, sont par exemple :

- ACV attributionnelle (impacts moyens) ou conséquentielle (impacts marginaux),
- ACV statique (impacts constants correspondant à une moyenne annuelle) ou dynamique (impacts variables selon la saison, le jour de la semaine, l'heure de la journée),
- Impacts globaux ou différenciés par usage (chauffage, eau chaude sanitaire...),
- Impacts basés sur des données historiques (années passées), des modèles (année type) ou des scénarios prospectifs (avec différentes lois de variation sur le long terme),
- Prise en compte d'une production locale d'électricité exportée vers le réseau (prorata ou substitution).

Il est bien sûr envisageable de croiser ces différentes approches.

Clarifier les différentes options de calcul, les mettre en œuvre dans un même outil pour évaluer les conséquences de ces choix méthodologiques sur les résultats d'une ACV appliquée à des cas concrets permettra de mieux cerner l'adéquation de ces méthodes à différents objectifs possibles des ACV : vérification d'une exigence réglementaire, aide à la conception, etc. Les études de cas envisagées concernent des logements et bureaux anciens, neufs basse consommation, et à énergie positive. La pertinence des différentes options méthodologiques sera évaluée en prenant en compte l'incidence de ces options sur les incertitudes en sortie des modèles. Afin d'assurer la cohérence entre les données d'ICV concernant l'énergie, les matériaux de construction et d'autres procédés (eau, déchets, transports...), une base unique sera utilisée. Cette base, Ecoinvent, constitue une référence internationale et présente un certain nombre d'avantages, en particulier en termes de nombre de flux d'inventaire, de revue critique et de documentation.

Les résultats obtenus ont été partagés au sein d'un groupe d'acteurs extérieurs au projet, incluant en particulier des spécialistes en ACV, des fournisseurs d'énergie, des responsables de politiques publiques, des utilisateurs des outils d'ACV de bâtiments, et toute autre personne ou organisme concerné via un séminaire d'échange annuel.

Au-delà d'une simple diffusion des résultats, le développement d'un prototype logiciel permet à court terme une exploitation des résultats dans un outil largement diffusé. A plus long terme, les résultats de l'étude pourraient faire évoluer les référentiels de calcul considérés par certains organismes de labellisation ou de certification, voire de réglementation.

2. Déroulement du projet

Il s'agit dans cette partie de présenter le calendrier des travaux, et les modalités de travail qui ont été mises en œuvre dans le cadre de ce projet, en vue de deux objectifs principaux :

- articuler efficacement les contributions des différents partenaires du consortium (recherches sur le système électrique, les autres énergies, les aspects de prospective, implémentation logicielle, études de cas),
- construire une méthodologie appropriée pour répondre aux enjeux de notre projet, en lien avec des utilisateurs potentiels et des acteurs extérieurs au projet.

Compte tenu des échanges lors de la réunion de lancement entre les membres du consortium et l'ADEME (cf. le compte rendu en annexe 3), il est apparu important d'identifier rapidement les experts et futurs utilisateurs externes à mobiliser pour orienter et évaluer les travaux menés dans le projet. Un séminaire du projet a ainsi été organisé en juin 2018 afin de présenter l'état de l'art et d'échanger sur le programme de travail. Il a été décidé de poursuivre ce séminaire par une réunion à mi-parcours (septembre 2019) puis en fin de projet (automne 2020). L'ordre du jour et les comptes rendus du séminaire sont fournis en annexes 1 et 2.

Un état de l'art a été élaboré par l'ensemble des partenaires. Les tâches de modélisation ont été menées (lots 2 et 3) et les livrables sont finalisés. Les calculs ont été intégrés dans un outil d'ACV des bâtiments, ce qui a permis d'effectuer les études de cas sur un échantillon de bâtiments : maison individuelle, logements collectifs et bureaux neufs et anciens. Chaque contribution a été examinée dans le cadre d'une démarche qualité.

Le planning prévisionnel des travaux était le suivant :

ACVs Energies	Année 1	Année 2	Année 3
Lot 1 : Etat de l'art et revue des choix méthodologiques	■		
Lot 2 : Modélisation du système électrique		■	
Lot 3 : Production de scénarios prospectifs		■	
Lot 4 : Mise en œuvre des modèles dans un outil d'ACV Bâtiment			■
Lot 5 : Etudes de cas			■
Lot 6 : Interprétation des résultats et diffusion			■

Le lot 3 a duré plus longtemps que prévu, mais les résultats ont été transmis au fur et à mesure ce qui a facilité l'intégration en parallèle dans l'outil d'ACV et l'ensemble des travaux n'a ainsi pas pris de retard.

3. Résultats obtenus

3.1 Etat de l'art et revue des choix méthodologiques

Il s'agit de partager dans cet état de l'art une base commune de connaissances sur les différents choix méthodologiques envisageables ; le critère de réussite est lié à la validation de l'état de l'art et de la liste de choix possibles par des acteurs externes au projet (en particulier des experts en ACV).

L'état de l'art porte sur :

a) L'ACV du système électrique et les principaux choix méthodologiques (EIVP) :

- ACV attributionnelle (impacts moyens) ou conséquentielle (impacts marginaux),
- ACV statique (impacts constants correspondant à une moyenne annuelle) ou dynamique (impacts variables selon la saison, le jour de la semaine, l'heure de la journée),
- impacts globaux ou différenciés par usage (chauffage, eau chaude sanitaire...),
- impacts basés sur des données historiques (années passées), des modèles ou des scénarios prospectifs (avec différentes lois de variation sur le long terme),
- prise en compte d'une production locale d'électricité exportée vers le réseau (prorata ou substitution).

b) La prise en compte des évolutions de long terme (ARMINES-CMA)

Elaboration de scénarios prospectifs et liens avec l'ACV.

c) L'ACV des réseaux de chaleur et les données d'ICV, en particulier sur les autres systèmes énergétiques - chauffage par combustibles, bois énergie, solaire thermique et photovoltaïque- (ARMINES-CES).

Cet état de l'art constitue le livrable 1 du projet. Il a été diffusé auprès des participants au séminaire et a donné lieu à un échange aboutissant à une version 2.

Les principales options de modélisation ont ainsi été identifiées, ce qui a permis de proposer une orientation des travaux à mener dans les deux tâches de modélisation, concernant le système électrique et la prise en compte d'éléments de prospective.

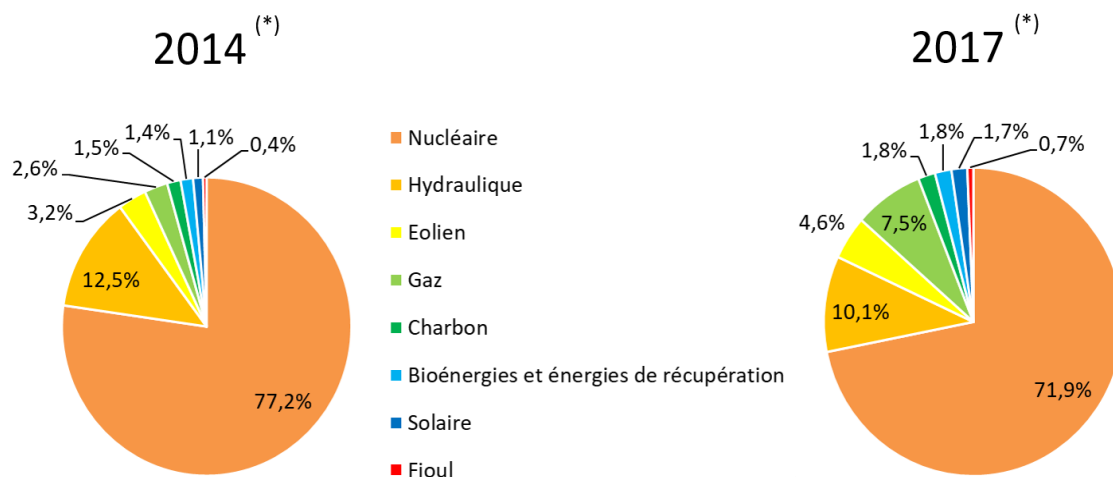
3.2 Modélisation du système électrique

Ces travaux, correspondant au lot 2, peuvent être décomposés en trois axes de recherche qui sont les suivants :

- La validation du modèle pour l'année 2017 ;
- La mise à jour du modèle pour une année de référence ;
- L'amélioration du modèle.

Premièrement, la validation du modèle permet de vérifier l'évolution des performances de ce dernier entre 2014 (date de la dernière validation) et 2017 (année sélectionnée pour la nouvelle validation¹). Entre ces deux dates, la part du nucléaire dans le mix électrique reste majoritaire, cependant elle tend à diminuer au profit d'autres moyens de production tels que les énergies renouvelables (éolien, solaire, bioénergies et énergies de récupération) ou le gaz (cf.figure ci-dessous). Le travail de validation a pour objectif de récupérer et de traiter les données nécessaires au modèle de manière à évaluer l'évolution de ses performances depuis sa création. Ensuite, la mise à jour permet, à partir des résultats observés dans la phase de validation, d'actualiser le modèle de manière à le faire correspondre à une année de référence assimilable à un futur proche. Enfin, une phase d'amélioration du modèle a été menée.

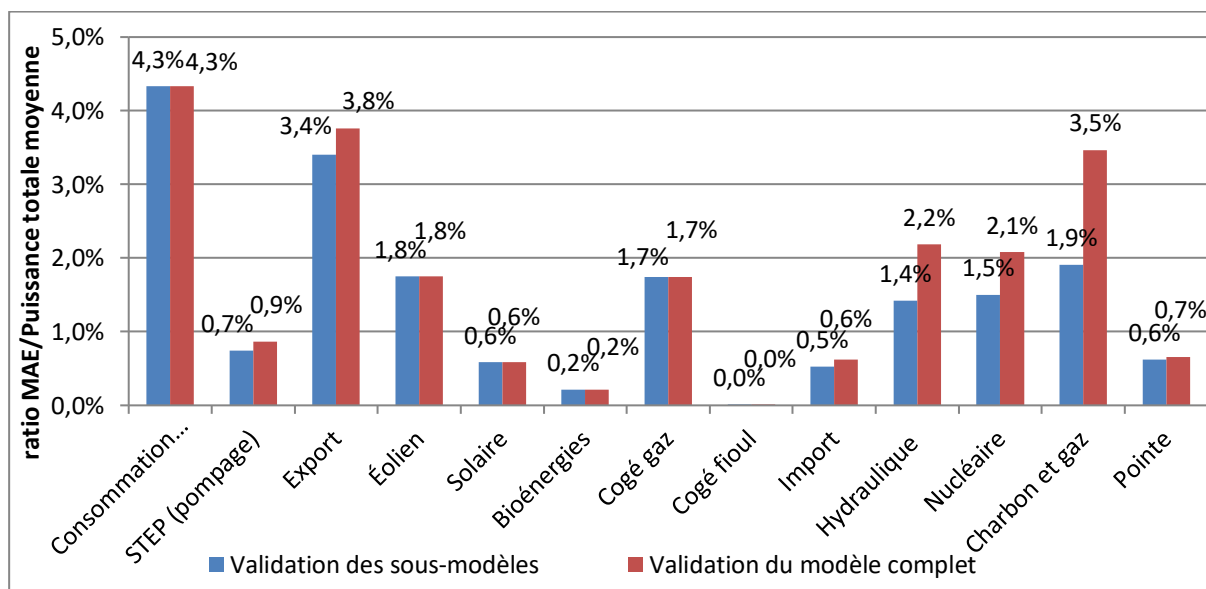
¹ Les données de l'année 2018 n'étant pas intégralement disponibles lorsque la phase de validation a été entamée.



(*) Source : RTE (eco2mix), hors import/export (import 2017 <1 %)

Évolution du mix de production électrique depuis la dernière mise à jour du modèle.

Globalement, les performances du modèle sur l'année 2017 sont proches de celles obtenues sur 2014. La figure ci-dessous présente les ratios entre la MAE (erreur moyenne en valeur absolue, « mean absolute error ») et la puissance totale moyenne dans le cas de la validation à l'échelle des sous-modèles et de la validation du modèle complet de manière à visualiser la propagation de l'erreur sur les performances de chaque sous-modèle. Les ratios correspondant à la consommation nationale et aux productions fatales sont inchangés quelle que soit la validation (à l'échelle des sous-modèles ou à l'échelle du modèle complet) puisque les deux sous-modèles en question sont indépendants des autres sous-modèles. Les productions modulables sont les plus impactées par les erreurs réalisées sur les sous-modèles précédents et plus particulièrement le charbon et le gaz dont le ratio est presque doublé.



Ratios MAE/puissance totale moyenne des validations à l'échelle des sous-modèles et du modèle complet

Le modèle a ensuite été mis à jour de manière à déterminer le mix de production électrique dans le cadre d'une année « type » correspondant à un futur proche.

Pour assurer la correspondance avec la simulation thermique des bâtiments, les données « types » de températures et de vitesses du vent de la RT 2012 sont utilisées. Aucune mise à jour de ces données météorologiques n'est donc réalisée. Les autres données d'entrées (capacités installée et profils de disponibilité) ont été actualisées à partir des dernières données disponibles et des prévisions de RTE.

Les facteurs de charge correspondent à des profils moyens basés sur des données historiques. A l'époque de la mise en place du modèle, le nombre d'années sur lesquelles étaient basés ces profils était dans le meilleur des cas limité à deux (2012 et 2013). Ces profils moyens ont été enrichis avec les nouvelles données disponibles depuis la création du modèle.

Compte tenu des résultats de la validation, la mise à jour de la base de données pour le calcul de la production éolienne et le réentraînement du réseau de neurones pour le calcul des échanges aux frontières ont été effectués. L'évolution de la base de données pour l'éolien n'a eu que peu d'effets sur les performances globales du modèle, le réentraînement du réseau de neurone est plus significatif.

Des axes d'amélioration du modèle de mix ont ensuite été explorés. Parmi les différents axes de travail possibles, deux ont été retenus et validés comme amélioration du modèle. D'abord, l'analyse des données de production au gaz décentralisée entre 2013 et 2017 met en évidence une corrélation entre la production et la température nationale. Ce lien a été formalisé par une modulation linéaire de la production de gaz décentralisée. Ensuite, des informations supplémentaires peuvent être fournies au réseau de neurones sur lequel est basé le calcul des échanges aux frontières. L'intégration d'éléments de calendrier (jour-mois et saison), et notamment la distinction jour de semaine et week-end a permis d'améliorer les performances de ce sous-modèle.

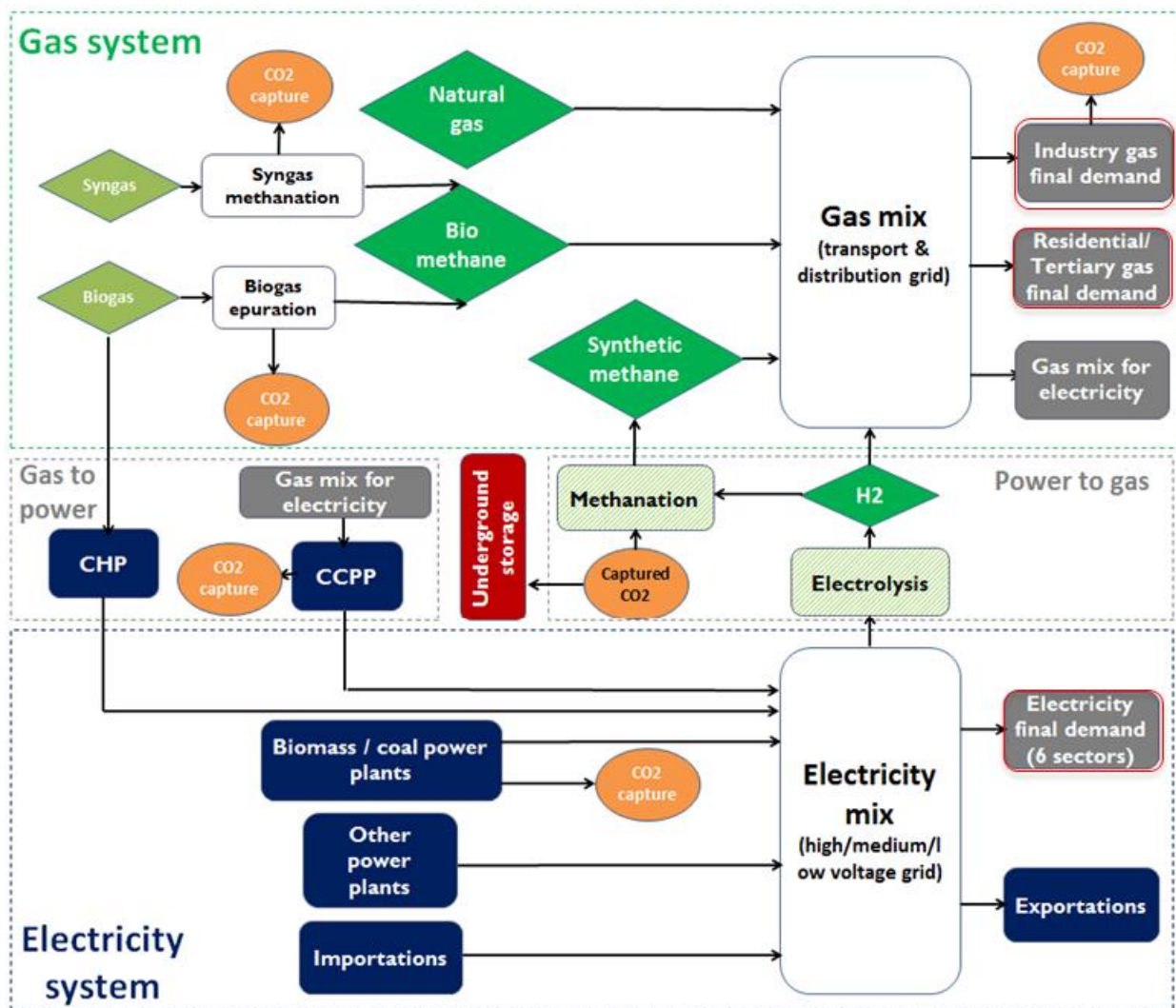
3.3 Elaboration de scénarios prospectifs

Du point de vue de l'ACV des bâtiments, la caractérisation de l'évolution des systèmes énergétiques sur plusieurs décennies a pour intérêt une amélioration des hypothèses retenues pour l'estimation des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie. Cependant réaliser cette articulation soulève plusieurs questionnements auxquels l'approche méthodologique du projet ACV énergies propose des éléments de réponse.

L'approche de modélisation MARKAL-TIMES a été développée et est maintenue dans le cadre d'un accord cadre de l'Agence Internationale de l'Energie. Elle a pour caractéristiques principales une représentation explicite des choix technologiques dans les systèmes énergétiques et un paradigme d'optimisation permettant, dans une vision normative, de proposer une configuration optimale.

Au sens de TIMES, un système énergétique est en effet modélisé comme une topologie linéaire dont les technologies et les flux de commodités constituent les objets élémentaires qui sont décrits par leurs caractéristiques technico-économiques (rendements, CAPEX, OPEX, facteur de disponibilité, coûts d'importation, taxe). L'articulation de toutes les technologies et commodités modélisées va alors définir l'ensemble des chemins technologiques éligibles. L'étape suivante est alors la détermination d'une solution optimale obtenue en minimisant le coût total actualisé du système pour différents jeux d'hypothèses et de contraintes. C'est ce mécanisme qui permet de modéliser de manière souple, des systèmes énergétiques variés.

Le modèle TIMES-FR-GAZEL mobilisé pour cette étude est un modèle développé au Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech. Il étend des travaux antérieurs de modélisation du système électrique Français à une modélisation des filières gazières en France (Figure ci-dessous).



Principe du modèle TIMES-FR-GAZEL

L'un des effets d'une prise en compte des transformations des mix énergétiques sur le long terme dans une analyse ACV dédiée aux ensembles bâtis est de complexifier la description du système d'arrière-plan. En effet, les évolutions les plus significatives de l'impact par kWh peuvent alors dépendre de paramètres principalement liés à la compétitivité des filières énergétiques. Afin de limiter le niveau de complexité additionnel pour les acteurs du bâtiment, nous avons choisi de définir plusieurs scénarios qui permettront d'explorer sélectivement les effets de deux dimensions structurantes : la politique environnementale et l'univers technologique considéré. Ces dimensions permettent de couvrir un spectre assez large de mix futurs et soutiendront la proposition méthodologique pour l'ACV qui est le cœur du projet ACVs Energies.

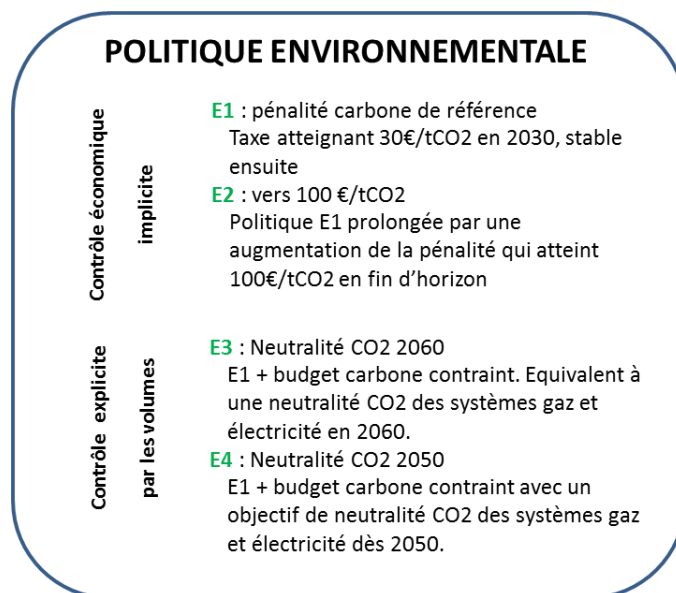
Politiques environnementales

A travers cette dimension, nous explorons l'effet de mesures de contrôle des émissions directes de CO₂ imposées simultanément aux systèmes gaz et électricité. Quatre formulations sont proposées pour décrire les mesures environnementales. Elles sont d'intensité croissante.

La première suppose un contrôle modéré par les prix dans un marché de type ETS (emissions trading system). La pénalité carbone évolue alors de 7€/tCO₂ aujourd'hui à 30€/tCO₂ en 2030. Elle est ensuite maintenue constante sur le reste de l'horizon. La seconde suppose une pénalité plus ambitieuse après 2030 : 50€/tCO₂ en 2040 puis 100€/tCO₂ en 2060. Cette évolution suit le profil retenu pour le scénario de référence de l'UE.

Ces deux premières formulations garantissent un niveau d'effort consenti mais ne garantissent pas l'atteinte des objectifs d'émission. La troisième formulation impose alors directement un contrôle des quantités de CO₂ émises dans l'optique d'une neutralité carbone à l'horizon 2060. La contrainte est imposée sous la forme d'un budget carbone de 2,22 GtCO₂ pour toute la période. Ce budget est défini

par les émissions cumulées que générerait une baisse linéaire de 90% des émissions à l'horizon 2050 puis de 100% en 2060. Ce choix permet au modèle de déterminer de manière endogène le profil d'émission adéquat en fonction des possibilités techniques. Enfin une quatrième formulation permet de simuler une neutralité plus volontariste avec une anticipation à 2050 de l'horizon pour atteindre la neutralité carbone.



Synthèse des politiques environnementales retenues

Univers technologique

Cette seconde dimension considère des hypothèses contrastées de disponibilité des différentes options technologiques. Elle permet de quantifier, pour chaque politique environnementale, l'effet de l'optimisme technique sur la composition des mix gaz et électricité. Pour les systèmes d'offre, trois hypothèses d'acceptabilité technologique sont définies :

- La première reflète un univers « technophile » sans contraintes additionnelles sur la disponibilité des diverses filières alternatives ;
- La seconde considère une filière CCS (carbon capture and storage) qui peine à déployer des pilotes et donc à se matérialiser : la capacité de stockage souterrain de CO₂ est nulle ;
- La troisième étend les limites d'acceptabilité au déploiement de l'EPR. Dans ce contexte il n'y a pas de construction de nouveaux réacteurs nucléaires au-delà du prolongement des réacteurs actuels et de l'EPR de Flamanville.

Pour ce qui est des options de flexibilité de la demande, deux alternatives sont définies :

- La première suppose, à l'instar de l'offre, une acceptabilité forte des options de flexibilité de la demande. Le gisement de pilotage de la demande est alors fixé à 26 GW pour le diffus, à 3,9 GW pour le pilotage industriel journalier et à 4,3 GW pour le pilotage de moyen terme;
- La seconde suppose à l'inverse une acceptabilité plus faible du pilotage de la demande chez les ménages qui se traduit par un potentiel plus limité. Nous avons supposé pour illustrer cette contrainte, un potentiel de « demand-response » diffus similaire au gisement retenu pour l'industrie : 3,9GW. Les options de pilotages pour l'industrie ne sont pas affectées.

UNIVERS TECHNOLOGIQUE

Offre

- **O1** : « Technophile »
Nucléaire, CCS, stockage largement disponibles.
- **O2** : Acceptabilité CCS
Pas de séquestration géologique. Les questions d'acceptabilité conduisent à chercher d'autres voies.
- **O3** : O2 + acceptabilité EPR
Les enjeux d'acceptabilité s'étendent au nucléaire. Malgré son rôle historique, pas de nouveaux réacteurs.

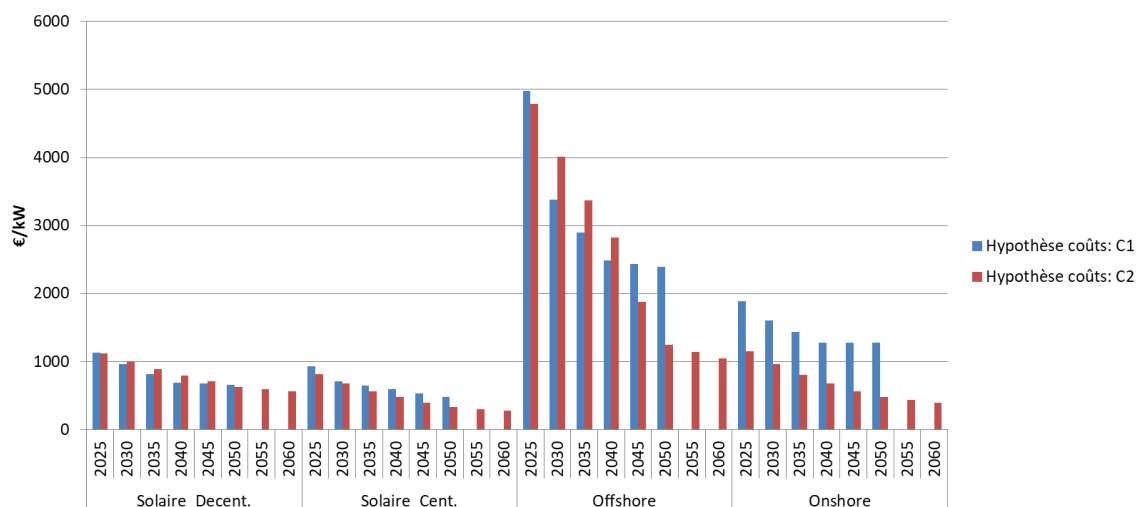
Demande

- **D1** : Large diffusion des technologies de pilotage de la demande qui ne rencontrent pas de problèmes d'adoption. Le potentiel de DR est élevé.
- **D2** : Développement plus controversé de la DR qui se traduit par un potentiel maximal plus faible pour les usages non industriels.

Synthèse des univers techniques décrits

La combinaison de ces deux dimensions permet alors de définir un ensemble de 24 scénarios identifiables par la combinaison des indices des options retenues. Le scénario **E1O1D1** est ainsi le moins contraint tandis que le scénario **E4O3D2** fait référence à l'une des combinaisons les plus contraintes.

Dans un deuxième temps, une autre série de 24 scénarios, correspondant à des hypothèses identiques, a été élaborée en considérant toutefois une baisse plus importante du coût des énergies renouvelables.



Hypothèse de baisse plus forte du CAPEX éolien et solaire

Les résultats du modèle pour ces variables constituent une base de données qui sert d'inputs aux autres étapes du projet. Cette base de données est utilisée comme entrée de l'outil d'ACV des bâtiments, qui intègre des données environnementales sur les différents moyens de production.

3.4 Développement d'un prototype logiciel

La base de données environnementale basée sur ecoinvent 3.4 a été intégrée au logiciel Pleiades ACV, on y retrouve 33 indicateurs d'impacts et les sources d'énergie nécessaires aux calculs.

Ces données peuvent être utilisées pour renseigner toutes les composantes de production d'énergie de manière statique ou bien dynamique avec une évolution horaire annuelle (au moyen d'un fichier externe dans ce dernier cas).

L'utilisateur saisit un mix statique, ou choisit une option (mix dynamique, prospectif, choix du scénario...). Le nombre des possibilités offertes par les différentes hypothèses d'évolution des composantes de production électrique étant important, il a fallu transformer l'interface du logiciel et, afin de conserver une interface conviviale, trouver un système de choix qui soit le plus simple possible.

Mix de production électrique constant

Mix de production dynamique

Mix de production électrique historique

Mix de production électrique prospectif

ADOME

Centre de Mathématiques Appliquées

Coût des EnR : Coût moyen

Coût des EnR : Coût élevé

Mix de production moyen

Mix de production marginal

Environnement politique : Taxe carbone 30€/tCO2 en 2030

Environnement politique : Taxe carbone 100€/tCO2 en 2030

Environnement technologique : Technophile

Environnement technologique : Pas de séquestration géologique du CO2

Production d'électricité de base

Pertes réseau électrique 9 %

Caractéristiques simplifiées Besoins/consommations

Réinitialiser

Type d'énergie

Type d'énergie pour le chauffage Electricité

Type d'énergie pour l'eau chaude sanitaire Electricité

Caractéristiques des équipements

PAC chauffage COP 4

PAC ECS COP 4

Visualisation du détail des énergies du bâtiment

Utilisation des informations de composition horaire du mix de production de l'électricité en France

Production d'électricité de base

Pertes réseau électrique 9 %

Ajouter une ressource au mix

Nucléaire	72 %	Hydraulique	21 %	Charbon	3.5 %	Gaz	3.5 %
-----------	------	-------------	------	---------	-------	-----	-------

Caractéristiques simplifiées Besoins/consommations

Réinitialiser

Type d'énergie

Type d'énergie pour le chauffage Réseau urbain

Type d'énergie pour l'eau chaude sanitaire Réseau urbain

Caractéristiques des équipements

Climatisation 0 EER

Réseau de chaleur urbain

Pertes réseau de chaleur urbain 10 %

Les parts des différentes énergies sont très variables d'un réseau à l'autre, vous devez les adapter au contexte local

Production de chauffage

Ajouter une ressource au mix

Bois	54 %	Gaz	46 %
------	------	-----	------

Production d'eau chaude sanitaire

Ajouter une ressource au mix

Bois	54 %	Gaz	46 %
------	------	-----	------

Il a fallu compiler tous les fichiers d'évolutions des mixes par hypothèse et tranche de temps et les référencer afin de les lier aux choix de l'utilisateur puis faire évoluer le moteur de calcul des impacts liés à l'utilisation de l'électricité.

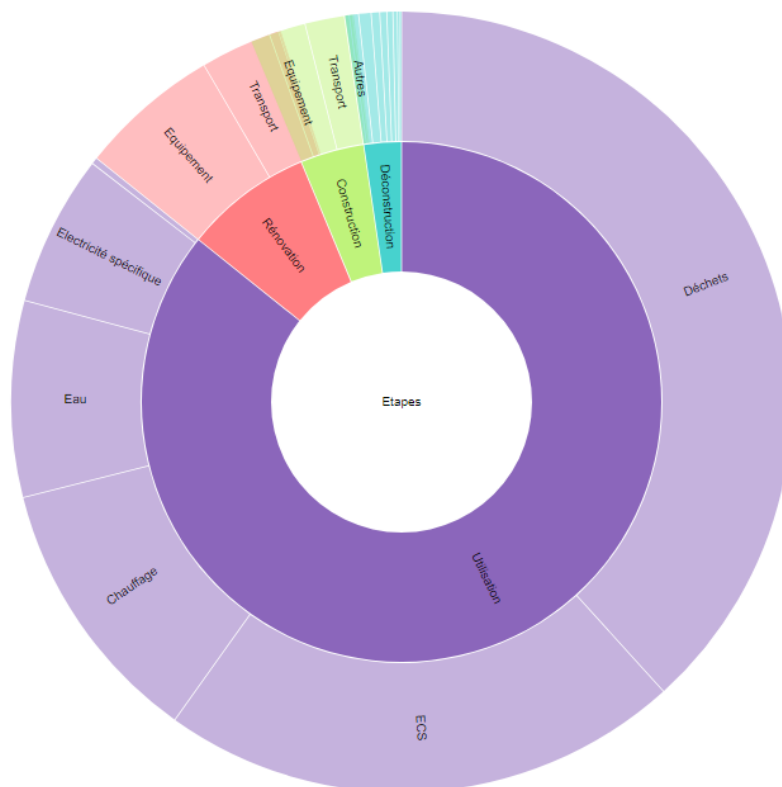
Dans le cas d'un mix de composantes de production électrique dynamique il a fallu prévoir la prise en compte d'une évolution des composantes de mix qui ne soit plus annuelle mais à l'échelle de la période à évaluer avec des composantes de mix qui ne soit pas constantes sur l'ensemble du cycle de vie, des sources de production ayant vocation à disparaître alors que d'autres, négligeables au départ, prennent une importance significative.

La prise en compte de ces informations a amené un allongement important du temps de calcul et une phase d'optimisation est encore nécessaire.

L'intérêt d'effectuer de tels calculs n'apparaît que si les moyens d'analyser les résultats sont suffisants ; la présentation des résultats a donc également évolué.

Ainsi, une fois les calculs effectués le résultat permet d'obtenir le détail par utilisation de manière assez détaillée :

- au niveau global du bâtiment,
- pour chacune des zones,
- pour une étape du cycle de vie,
- sur des graphiques interactifs sur lesquels on peut cliquer pour zoomer pour un indicateur d'impact,



- sur un graphique interactif global pour voir d'un coup d'œil où sont les contributions les plus importantes.

Toutes ces informations peuvent être obtenues à n'importe quel niveau du projet et les projets ou éléments de projet peuvent également être comparés entre eux.

3.5 Etudes de cas

L'objectif de cette tâche est d'évaluer les conséquences des choix méthodologiques listés dans le lot 1 sur les résultats d'une ACV appliquée à des cas concrets : logements et bureaux anciens, neufs basse consommation, et à énergie positive. Critère de réussite : nombre de cas traités, cohérence des résultats.

Les deux outils issus des lots 2 et 3 ont été conjointement mobilisés pour l'évaluation des impacts environnementaux liés à la consommation d'électricité des bâtiments. Le modèle de simulation (lot 2) permet une évaluation attributionnelle ou conséquentielle mais ne tient compte que du court-terme. Le modèle de prospective (lot 3) permet une évaluation attributionnelle long-terme mais pas une évaluation conséquentielle spécifique au projet étudié.

Le CMA propose 24 scénarios de base obtenus à partir d'une combinaison de choix portant sur la nature de la politique environnementale et l'univers technologique (cf. le § précédent). 24 scénarios plus ambitieux sur l'évolution du coût des Énergies Renouvelables (EnR) ont été ajoutés aux 24 scénarios initialement présentés dans le lot 3. Dans la suite de ce rapport, le premier jeu de 24 scénarios est nommé « CMA C1 » et celui des 24 scénarios supplémentaires « CMA C2 ».

En complément, le scénario de référence de l'ADEME² et un mix correspondant au bilan prévisionnel de RTE pour les années 2020-2025³ puis constant ensuite ont été modélisés.

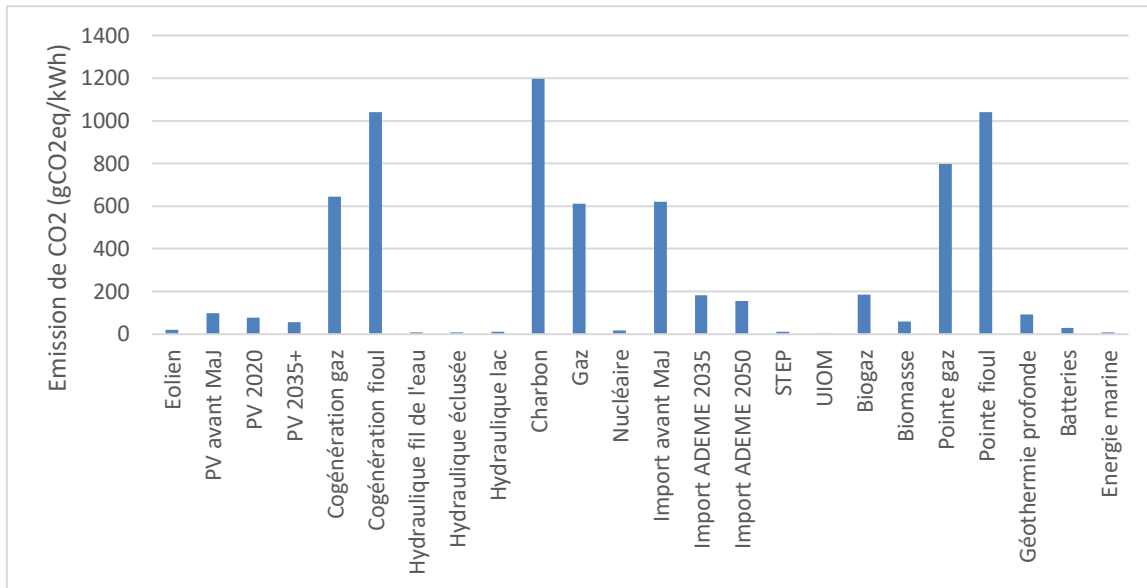
A partir de cette analyse, les limites de l'approche ont été définies, ainsi que des recommandations pour l'utilisation des scénarios de prospective énergétique pour l'écoconception des bâtiments et des quartiers.

Le mix de production d'électricité étant variable selon les saisons, les jours de la semaine et les heures, les impacts des consommations dépendent des usages (chauffage, climatisation, production d'eau chaude sanitaire, usages spécifiques), et du type de bâtiment (logements, bureaux...). D'autre part les besoins thermiques dépendent de caractéristiques du bâti et du climat. Un échantillon de bâtiments a alors été constitué et est présenté dans le livrable 5. Il s'agit de trois bâtiments de bureaux (énergie positive et deux variantes non isolées en zones climatiques H3 et H1c) et de trois bâtiments résidentiels se distinguant par leur performance énergétique et leur localisation (Hausmannien en zone H1a, collectif BBC en H1c et maison à énergie positive en H1a).

Les émissions de GES des différentes filières de production, issues de la base ecoinvent (v3.4) sont rappelées dans la figure ci-dessous.

² <https://www.ademe.fr/trajec-toires-devolution-mix-electrique-a-horizon-2020-2060>

³ https://www.rte-france.com/sites/default/files/bp2019_rapport_complet_1.pdf

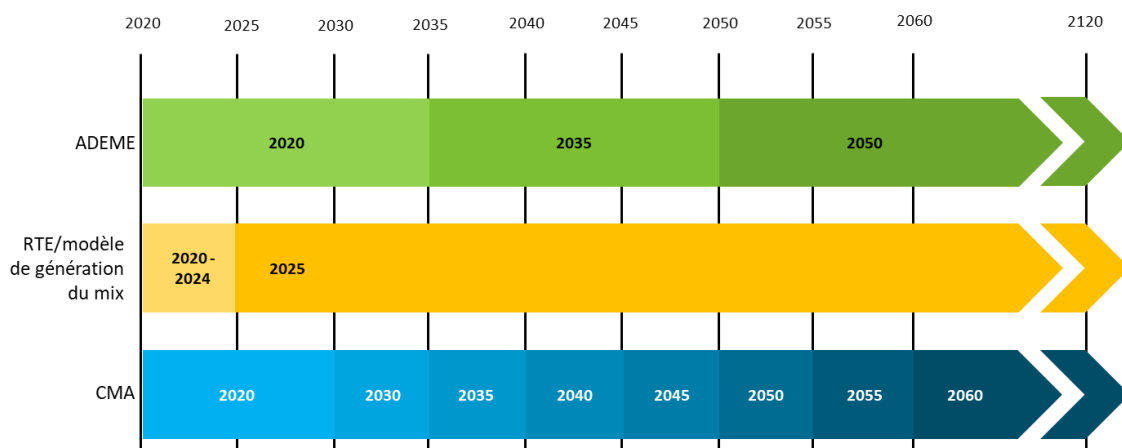


Récapitulatif des émissions de GES par kWh selon la filière de production

L'ACV par trajectoire consiste à tenir compte de l'évolution du mix électrique suivant le scénario sélectionné (scénario du CMA, scénario de référence de l'ADEME ou mix RTE du futur proche) quelle que soit l'approche considérée (attributionnelle ou conséquentielle). La figure ci-dessous présente les trajectoires qui sont considérées dans le cadre de cette étude. Concernant la trajectoire de l'ADEME, les mix horaires étant disponibles pour les années 2035 et 2050, on suppose que le mix entre 2020 et 2035 correspond à celui obtenu avec le modèle de génération du mix électrique avec les données du bilan prévisionnel de RTE pour l'année 2020. Le mix de 2035 est utilisé pour les 15 années séparant 2035 de 2050 et enfin, le mix de 2050 est utilisé à partir de 2050 jusqu'à la fin de la durée de vie du bâtiment (100 ans est considéré).

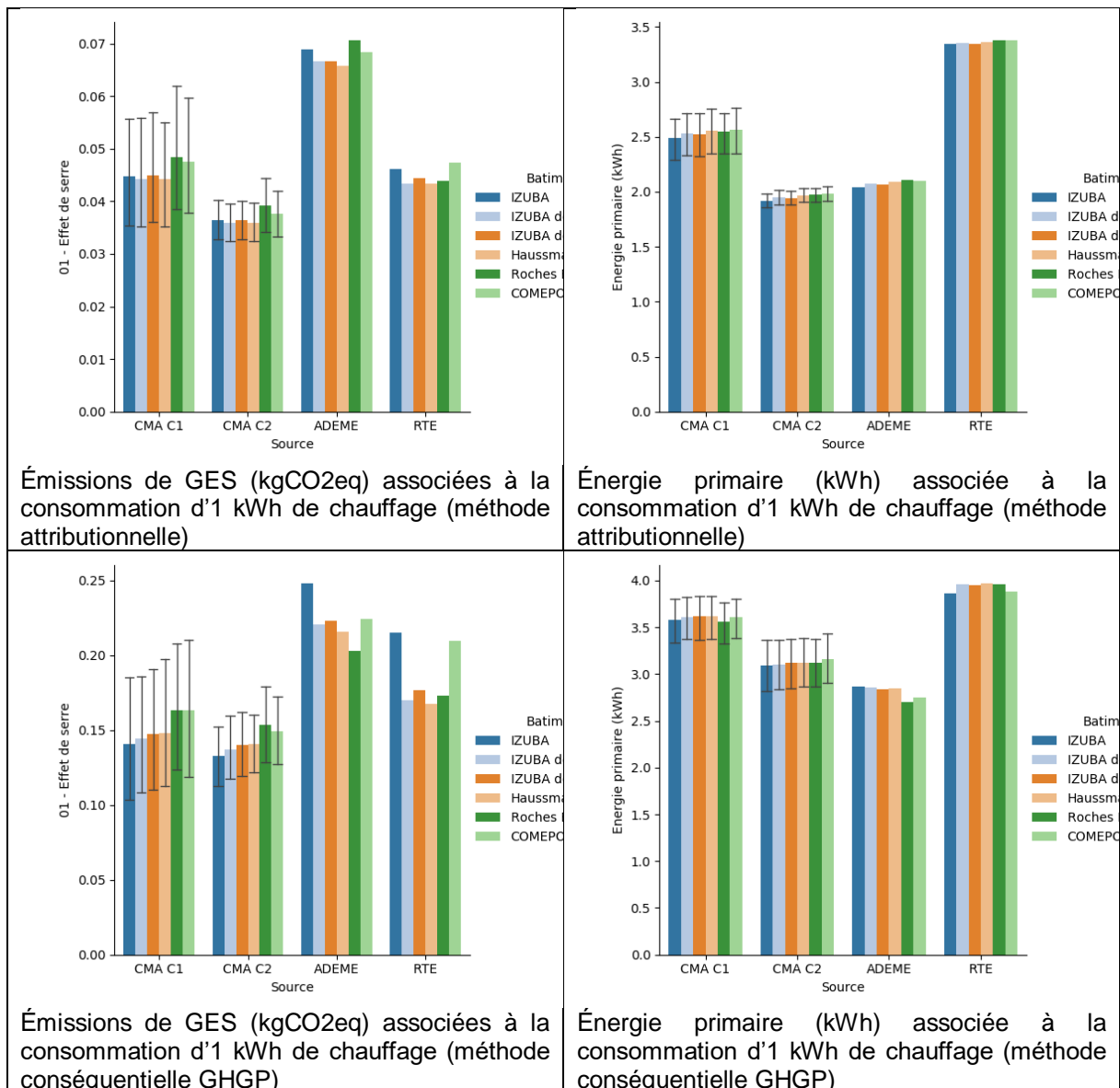
En ce qui concerne la trajectoire en jaune, il s'agit de considérer le mix d'un futur proche pour l'ensemble de la durée de vie du bâtiment.

Enfin, concernant la trajectoire du CMA, le mix de 2020 est utilisé pour 10 ans, celui de 2030 pour 5 ans et ainsi de suite jusqu'au mix de 2060 qui est utilisé pour le restant de la durée de vie du bâtiment.



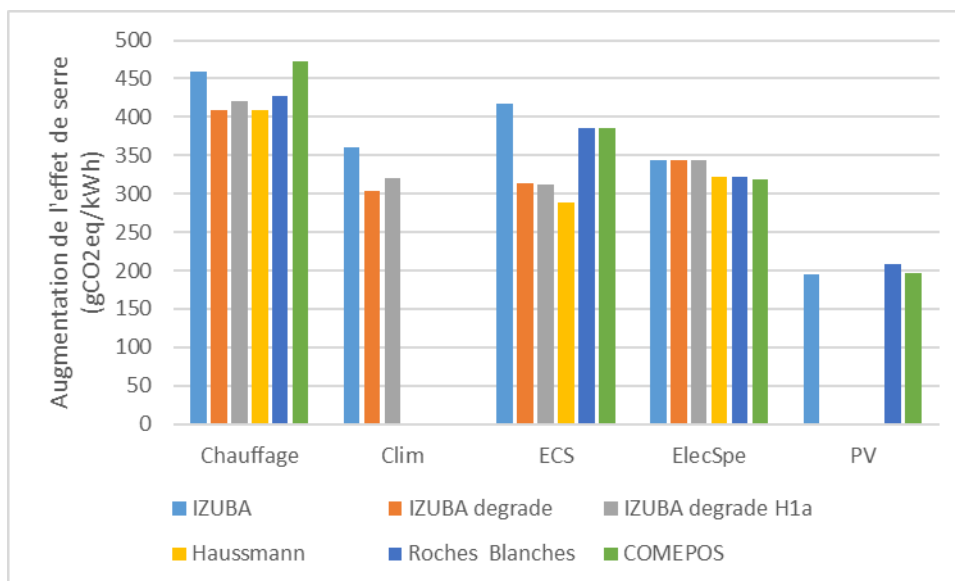
Trajectoires considérées dans le cadre de l'étude

La figure ci-dessous montre quelques exemples de résultats. Les barres d'incertitude correspondent aux différents scénarios issus de l'outil prospectif du CMA (min et max sur 24 scénarios). En ce qui concerne la production photovoltaïque, il s'agit des émissions évitées lors de l'export d'électricité sur le réseau. La méthode conséquentielle est dans un premier temps basée sur l'approche du Greenhouse gas protocol (noté GHGP dans la suite).



Exemple de résultat : émissions de GES et énergie primaire par kWh pour l'usage chauffage selon les méthodes attributionnelle (en haut) et conséquentielle GHGP (en bas)

Dans un deuxième temps, la méthode marginale dérivée a été mise en œuvre à partir du modèle de génération du mix électrique en utilisant les données du bilan prévisionnel de RTE. Les résultats pour les différents usages et les différents bâtiments sont présentés à la figure ci-dessous. Les émissions de GES obtenues avec la méthode marginale dérivée sont deux à trois fois plus élevées qu'avec la méthode GHGP mais il y a une conservation de la tendance avec des émissions ramenées à la consommation d'1kWh des applications thermiques plus élevées dans le cas des bâtiments performants (IZUBA, Roches Blanches et COMEPOS) du fait de la réduction de la saison de chauffe et de l'usage du solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire, et des valeurs stables pour l'électricité spécifique et la production PV.



Emissions de GES équivalent suivant l'usage et le bâtiment avec la méthode marginale dérivée

En complément, une étude de cas a été menée pour comparer différentes méthodes de prise en compte de l'export d'électricité produite dans un bâtiment par un système photovoltaïque. La réduction d'impact apportée par un système PV de 3 kWc (environ 23,5 m² de modules) sur une maison individuelle de 100 m² de surface habitable a été évaluée en considérant les données d'ecoinvent (v3.4), 30 ans de durée de vie pour les modules PV, des émissions de GES de 0.1 kg CO₂ eq. par kWh d'électricité du réseau, une production de 130 kWh par m² de module et par an et 35% d'autoconsommation. Si la totalité de la fabrication des modules et des impacts évités par l'export d'électricité sont pris en compte, le système PV permet de réduire de 0.48 kg CO₂ eq/m² SHAB (surface habitable).an les émissions de GES de la maison. Si par contre on ne considère que la part des modules dédiée à l'autoconsommation et que l'électricité exportée n'est pas prise en compte, la réduction n'est que de 0.17 kg CO₂ eq/m² SHAB.an. L'écart entre les méthodes est donc important, et peut avoir des conséquences sur les choix de conception si différentes options sont comparées.

4. Travaux réalisés et publications

Un séminaire s'est déroulé sur l'ensemble du projet, avec trois séances : un premier échange en début de projet concernant l'orientation des travaux, une séance pour faire le point à mi-parcours et la présentation finale des travaux. Les participants sont variés : fournisseurs d'énergie (EDF, Engie, Enercoop ayant été contacté), gestionnaires de réseaux (RTE, ENEDIS, GRDF, Amorce ayant été contacté), organismes en charge de la réglementation ou certification (DHUP, CSTB, DGEC et CERQUAL ayant été contactés), et des consultants spécialisés en ACV (Solinnen, Icare, RDC Environnement, Quantis ayant été contacté). L'ordre du jour des trois sessions est donné en annexe 1.

L'approche a par ailleurs été communiquée dans le cadre de l'annexe 72 Assessing life cycle related environmental impacts caused by buildings, organisée au sein du programme Energy in Buildings and Communities de l'Agence Internationale de l'Energie.

L'abstract ci-dessous a été proposé pour la conférence Sustainable Building 2021 à Bruges. Cet abstract a été accepté, et la communication doit être envoyée en janvier 2021.

Title of contribution: Dynamic LCA of buildings using prospective scenarios for the French electric system

Co-authors : Marie Frapin, Edi Assoumou, Charlotte Roux, Bruno Peuportier

Aim and approach (max 200 words):

The building sector accounts for almost half of total energy consumption in France and two-thirds of electricity consumption. The choice of energy sources, the level of performance of buildings and the control strategies strongly influence the electric system and its related environmental impacts. In order to better manage this complex interaction, improving the accuracy and relevance of the assessment of the environmental impacts of buildings is a real challenge regarding public policies (regulations, labelling), building decisions (systems, design, construction and rehabilitation techniques) and management strategies. The assessment of environmental impacts related to energy consumption is generally carried out using Life Cycle Assessment (LCA) whose objective is to avoid the displacement of pollution in time, space and from one impact to another. The aim of this study consists in accounting for a temporal variation of environmental impacts based on prospective trajectories of the electricity production mix. Two LCA dynamic methods are considered in the study: attributional and consequential i.e. considering marginal electricity production processes.

Scientific innovation and relevance (max 200 words):

Most LCA tools and studies based on this method consider average impacts per kWh of final energy for all energy uses. Some studies account for temporal variation of impacts in order to integrate the variability of uses over a year. Indeed, buildings electricity consumption depends of the season (heating in winter, cooling in summer), the day of the week (professional or domestic uses) and the time of day (domestic hot water, lighting, domestic and professional uses). Other studies have focus on prospective trajectories of the electricity mix. The innovation of this study lies in the combined use of dynamic LCA methods and the use of prospective scenarios regarding the evolution of the electricity mix.

For the purposes of the study, 48 prospective trajectories of the electricity mix were considered. These scenarios were constructed using the model TIMES-FR-GAZEL.V2 (developed by the Centre for Applied Mathematics (CMA) at Mines ParisTech) based on different assumptions such as environmental policies (introduction of carbon taxes, carbon neutrality objectives), technological acceptability (European Pressurized Reactor (EPR) development, carbon capture and storage, renewable energy development) and the potential of demand response. The trajectory horizon extends to 2060.

Preliminary results and conclusion (max 200 words):

Both attributional and marginal dynamic methods were applied on a panel of six buildings using the 48 trajectories. The panel is made of three office buildings and three residential buildings identified by their energy performance (from low-performance to positive energy buildings) and location (north and south of France). Dynamic thermal simulations were performed using reference year weather data and the Pleaides+COMFIE software. 12 impact indicators regarding e.g. greenhouse gases (GHG), primary energy, human health and nuclear waste were computed for each energy use. For each impact, a comparison was made between different buildings, uses (heating, cooling, domestic hot water, specific electricity) and LCA methods. For example, 1 kWh of heating consumption corresponds to 40 g CO₂eq

in average for all 6 buildings according to the attributional dynamic method. This value reaches 150 gCO₂eq/kWh using the marginal dynamic method. With both methods, the variation from the mean value reaches around 25% depending on prospective scenarios. GHG emissions due to heating can reach up to 450 gCO₂eq/kWh using a marginal dynamic method identifying a marginal process at each hour. Transparency on methods and uncertainties is therefore essential when evaluating energy and environmental performance of long lasting systems like buildings.

Main references (200 words):

Herfray G. and Peuportier B., Evaluation of electricity related impacts using a dynamic LCA model, International Symposium Life Cycle Assessment and Construction, Nantes, July 2012

Roux C., Patrick S., and Bruno P. « Development of an Electricity System Model Allowing Dynamic and Marginal Approaches in LCA—tested in the French Context of Space Heating in Buildings ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, December 2016.

Roux C. et Peuportier B., Considering temporal variation in the life cycle assessment of buildings, application to electricity consumption and production, Sustainable building conference, Barcelona, october 2014

Roux C. and Peuportier B., Evaluation of the environmental performance of buildings using dynamic life cycle simulation, Building simulation 2013 Conference, Chambéry, August 2013

Peuportier B., Thiers S. and Guiavarch A., Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment, Journal of cleaner production, Volume 39, Pages 73-78, January 2013

Topic : development in simulations, Heating, HVAC, Zero Energy Building

Key words: dynamic LCA, consequential LCA, electricity mix, residential building, tertiary building

Un article dans une revue internationale à comité de lecture est en préparation.

5. Conclusions et perspectives

Après un état de l'art présentant les différentes approches permettant d'évaluer les impacts environnementaux liés aux consommations d'électricité dans les bâtiments sur une durée de vie de plusieurs décennies, le projet a consisté à actualiser et améliorer un modèle de système électrique ayant pour but de fournir des valeurs horaires de mix de production sur une année de référence. Un modèle de prospective technico-économique associant les systèmes électrique et gazier a ensuite été utilisé pour générer deux séries de 24 scénarios d'évolution de long terme en fonction de plusieurs paramètres concernant les politiques environnementales, la demande, l'acceptabilité des technologies et le coût des énergies renouvelables. L'association de ces deux développements a été mise en œuvre dans un logiciel d'ACV des bâtiments. Une étude de cas portant sur 6 bâtiments (bureaux à énergie positive ou mal isolés dans deux climats, haussmannien, immeuble BBC et maison à énergie positive) a permis d'appliquer la méthode dans des configurations variées. Une durée de vie de 100 ans est considérée afin de correspondre à une approche d'écoconception évitant l'obsolescence programmée.

Selon une approche d'ACV attributionnelle et en moyenne sur une période de 100 ans, les émissions de GES s'élèvent entre 30 et 120 g CO₂ eq/kWh d'électricité consommée. Sauf cas particulier, il y a assez peu de différence selon les usages et les bâtiments. On note un écart entre la climatisation et le chauffage (par exemple de 30 à 50 g CO₂ eq/kWh pour le futur proche 2020-2025 basé sur le bilan prévisionnel 2019 de RTE, entre 50 et 70 pour les scénarios de l'ADEME) mais la majeure partie de la variabilité est liée aux scénarios de long terme (entre 20 et 120 g CO₂ eq/kWh pour les scénarios du CMA, cet intervalle étant moins étendu dans le cas d'une baisse plus importante des coûts des ENR : entre 20 et 70 g CO₂ eq/kWh).

Le coefficient d'équivalence en énergie primaire varie de 2 à 3,5 kWh e.p./kWh final essentiellement en fonction des scénarios : il est moins élevé dans le cas des scénarios à forte pénétration de renouvelables (de l'ordre de 2 pour ADEME et CMA C2) que dans le cas d'un mix constant correspondant au futur proche (de l'ordre de 3,5 pour RTE 2020-2025).

Selon une approche conséquentielle basée sur le GreenHouse Gas Protocol (les procédés marginaux correspondent au top 10% du merit order), les émissions de GES varient entre 50 et 400 g CO₂ eq/kWh essentiellement en fonction des scénarios mais avec des variations plus marquées en fonction des usages et des bâtiments (par exemple dans le cas du scénario ADEME, de 100 g CO₂ eq/kWh pour la climatisation à 250 pour le chauffage, et de 50 g CO₂ eq/kWh pour la climatisation à 200 pour le chauffage pour le futur proche RTE). Ici également, la variation très importante selon les scénarios du CMA (de 50 à 450 g CO₂ eq/kWh) diminue si le coût des systèmes ENR baisse (de 50 à 250 g CO₂ eq/kWh).

Dans le cas des scénarios issus du modèle macroéconomique, le mix est encore relativement carboné à 23h au moment où démarre la production d'eau chaude sanitaire, ce qui induit des émissions assez élevées pour cet usage. Il serait sans doute pertinent de retarder le démarrage des ballons électriques dans les simulations. Le coefficient d'équivalence en énergie primaire varie de 2,5 à 4 kWh e.p./kWh final, essentiellement en fonction des scénarios. La variation est faible en fonction des bâtiments et des usages, le coefficient étant de l'ordre de 3 pour le scénario ADEME et de l'ordre de 4 pour le futur proche RTE.

Selon l'approche conséquentielle marginale dérivée, consistant à évaluer les impacts par différence entre ceux obtenus avec et sans le bâtiment étudié, les émissions de GES sont plus élevées : entre 300 (eau chaude sanitaire et climatisation) et 450 (chauffage) g CO₂ eq/kWh. Les variations du coefficient d'équivalence en énergie primaire sont faibles, entre 3,5 et 4 kWh e.p./kWh final. Cette approche n'a pu être menée que dans le cas du mix constant correspondant au futur proche, car elle nécessite de simuler la réaction du système de production d'électricité dans le cas d'une demande marginale correspondant au bâtiment étudié. Le modèle de génération de mix n'est pas un modèle de prospective et il ne reste valide que dans la mesure où le parc de production évolue peu (donc le comportement des technologies de production reste semblable). Il est plus précis que le modèle de prospective pour le futur proche mais c'est au prix d'un manque de flexibilité dans la modélisation des différentes technologies.

Cette étude a nécessité un important travail de modélisation pour reconstituer un mix électrique horaire, et élaborer des scénarios d'évolution sur le long terme. Pour réaliser l'étude de cas, un échantillon de 6

bâtiments x 50 scénarios sur des trajectoires de 100 ans a été étudié de manière à mieux cerner les tendances concernant les impacts des consommations d'électricité liées à différents usages. Il reste cependant des éléments à approfondir, en particulier :

- En ACV attributionnelle, un mix horaire identique a été considéré pour tous les usages à une heure donnée. Mais en fait si le mix est plus carboné en hiver c'est essentiellement du fait du chauffage et non par exemple de la production d'eau chaude sanitaire, peu variable sur l'année. En ACV conséquentielle, un mix marginal identique est considéré pour tous les usages à une heure donnée. Or un usage saisonnalisé comme le chauffage induit un plus fort besoin de capacités de pointe qu'un usage plus constant comme la production d'ECS. Ces approches ont ainsi réduit la variation des impacts selon les usages,
- En sus de l'utilisation cloisonnée des deux outils (simulation d'un bâtiment et optimisation technico-économique), une étude croisée serait intéressante : les caractéristiques du système électrique futur obtenues par l'utilisation du modèle de prospective (lot 3), pourraient être intégrées comme données d'entrée dans le modèle de simulation (Capacités installées, demande annuelle totale en électricité, volume des échanges aux frontières). Cette étude rendrait possible une approche conséquentielle long-terme pour l'évaluation environnementale des bâtiments. Cette option serait généralisable dans un outil d'écoconception des bâtiments et des quartiers. Mais elle ne permettrait pas d'évaluer l'effet d'une demande marginale sur les investissements en nouvelles capacités. Elle néglige également les effets structurels des différents usages de l'électricité, comme le surdimensionnement du parc nécessaire pour faire face à la pointe hivernale, lié aux usages thermosensibles.
- Il serait alors intéressant d'étendre la demande marginale en électricité du cas d'étude à l'échelle d'un parc de bâtiment (plusieurs milliers de bâtiments, différentes zones géographiques) et de l'intégrer comme demande marginale dans le modèle de prospective. En effet la méthode actuelle ne permet pas d'évaluer l'effet d'une demande marginale sur les investissements en nouvelles capacités. La comparaison des deux options permettrait d'évaluer si cet effet est important ou s'il peut être négligé.
- la politique énergétique envisage aujourd'hui la neutralité carbone du système énergétique sur le seul périmètre des émissions directes en France. Il serait alors opportun d'étendre ce périmètre aux émissions sur l'ensemble du cycle de vie des moyens de production pour plus de cohérence avec les efforts faits pour l'ACV des bâtiments.

Le choix entre méthode statique ou dynamique, attributionnelle ou conséquentielle, et entre différents scénarios est proposé aux utilisateurs d'un outil d'ACV des bâtiments ce qui permet de diffuser les résultats de ce projet, au-delà des publications scientifiques.

S'il reste difficile de recommander une approche méthodologique sur une base scientifique, cette étude fait apparaître des incertitudes importantes concernant les impacts environnementaux liés aux différents usages de l'électricité dans les bâtiments, en particulier en ce qui concerne le changement climatique (entre 40 et 450 g CO₂ eq./kWh selon les méthodes, les scénarios et les usages), ce qui devrait inciter, par précaution, à concevoir des bâtiments économes.

Si l'objectif de l'ACV est d'étudier l'évolution du parc de production dans son ensemble, une approche attributionnelle peut être appropriée. Par contre l'approche conséquentielle est plus adaptée pour évaluer l'impact d'une hausse (nouvelles constructions) ou d'une baisse (réhabilitations thermiques) de consommation. Le choix des procédés marginaux peut être différent pour une approche réglementaire, où la méthode GHGP est plus opérationnelle car elle s'applique de la même manière à tous les scénarios. La méthode marginale dérivée s'adapte plus finement au cas par cas ce qui peut améliorer la précision en écoconception, mais demanderait d'étendre le domaine de validité du modèle actuel pour prendre en compte des variations importantes de capacités installées. La comparaison entre méthodes montre sur les cas étudiés que la méthode GHGP s'approche de la méthode marginale dérivée quand les procédés marginaux correspondent à 2% du merit order.

Une hypothèse de réduction d'impact induite par la transition énergétique pourrait inciter à consommer davantage d'énergie dans les bâtiments, ce qui en retour rend cette transition énergétique potentiellement plus difficile en particulier pour le système électrique. Le principe de précaution pourrait consister à considérer un scénario de futur proche, actualisé régulièrement de manière à minimiser le risque (dans une approche de type réglementaire par exemple), ou à évaluer des incertitudes (en écoconception). Une extension du travail de recherche proposé ici permettrait d'intégrer certaines de ces interactions complexes.

Dans cette étude, le terme d'ACV dynamique correspond à la prise en compte des variations temporelles à court terme (variations au cours d'une année) et à long terme (scénarios prospectifs). Ce terme est utilisé dans une autre acception dans le projet de réglementation environnementale des bâtiments : il s'agit de faire varier les facteurs de caractérisation liés à l'indicateur de changement climatique. Par exemple l'émission d'un kg de CO₂ dans 50 ans n'équivaut qu'à 0.575 kg de CO₂ émis aujourd'hui. Ce choix est défavorable aux technologies d'économie d'énergie ou de production renouvelable, qui nécessitent un investissement environnemental en fabrication, rentabilisé au cours du temps. Même si on peut comprendre la nécessité de répondre à une situation d'urgence climatique, il faudra veiller à ce que cette méthode ne conduise pas à déplacer les impacts dans le temps, ce qui ne correspond pas au principe de développement durable, surtout si –comme c'est le cas- une limite est imposée sur les émissions liées uniquement aux produits sans tenir compte de leur performance énergétique à l'étape d'utilisation.

L'approche GHGP (Greenhouse Gases Protocol) propose un compromis intéressant : elle peut être appliquée sur des simulations de mix émanant d'outils différents (notamment les outils de prospective énergétique), le niveau de marginalité peut être ajusté, elle demande très peu de puissance de calcul (contrairement à la méthode marginale dérivée ou à l'utilisation directe d'un modèle de prospective). Elle rend possible l'intégration d'une approche conséquentielle dans la réglementation par exemple, ce qui renforcerait l'incitation à construire des bâtiments économes.

6. Références bibliographiques

- ADEME, 2018. L'exercice de prospective de l'ADEME - « Vision 2030-2050 » - www.ademe.fr/connaître/priorités-stratégiques-missions/scenarios-2030-2050
- Alsema, E. and M. de Wild-Scholten. 2005. Environmental Impact of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. in Material Research Society Fall Meeting, Symposium G: Life Cycle Analysis Tools for “Green” Materials and Process Selection, Boston, MA.
- ANCRE, Scénario de l'ANCRE pour la transition énergétique – Rapport 2013 - www.allianceenergie.fr/presentation-des-scenarios-energetiques-de-l-ancre.aspx
- Arena, U., Mastellone, M.L., Perugini, F., 2003. The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study. *Chem. Eng. J.* 96, 207–222.
- Assoumou, E. « Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français », THESE, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006
- Astrup, T., Mosbæk, H., Christensen, T.H., 2006. Assessment of long-term leaching from waste incineration air-pollution-control residues. *Waste Manage.* 26, 803–814.
- Astrup, T., Møller, J., Fruergaard, T., 2009. Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Manage. Res.* 27, 789–799.
- Astrup, T., Riber, C., Pedersen, A.J., 2011. Incinerator performance: effects of changes in waste input and furnace operation on air emissions and residues. *Waste Manage. Res.* 29, 57–68.
- Astrup, T.F., Tonini, D., Turconi, R., Boldrin, A., 2015. Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: review and recommendations. *Waste Manage.* 37, 104–115.
- Bates, J., 2009. Impacts of managing residual municipal waste. In: Patel, N. (Ed.), *Accomplishments from IEA Bioenergy Task 36: integrating energy recovery into solid waste management systems (2007–2009)*. International Energy Agency, Paris, France.
- Bauer, C., 2012. System Characterisation, English version of the ecoinvent report No. 6-IX “Holzenergie“, Chapter 5, Paul Scherrer Institut, Villigen & Duebendorf, Suisse.
- Beccali, M., Cellura, M., Longo, S., Finocchiaro, P., Selke, T., 2014. Final Deliverable Report on Life cycle analysis, Agence Internationale de l'Energie, programme "Solar Heating and Cooling", Task 48
- Boesch, M.E., Vadenbo, C., Saner, D., Huter, C., Hellweg, S., 2014. An LCA model for waste incineration enhanced with new technologies for metal recovery and application to the case of Switzerland. *Waste Manage.* 34, 378–389.
- Boubault, Antoine, Seungwoo Kang, and Nadia Maïzi. 2018. “Closing the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR) Raw Materials Gap with Life Cycle Inventories.” *Journal of Industrial Ecology* 0 (0). <https://doi.org/10.1111/jiec.12780>.
- Burnley, S., Coleman, T., Peirce, A., 2015. Factors influencing the life cycle burdens of the recovery of energy from residual municipal waste. *Waste Manage.* 39, 295–304.
- Clavreul, J., Guyonnet, D., Christensen, T.H., 2012. Quantifying uncertainty in LCAm modelling of waste management systems. *Waste Manage.* 32, 2482–2495.
- Commission Européenne, Roadmap 2050 – A practical guide to a prosperous low-carbon Europe – European Climate Foundation – Study for the European Commission – 2011 – roadmap2050.eu

- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V. et Leahy, M. « A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems », *Appl. Energy*, vol. 87, no 4, p. 1059-1082, avr. 2010.
- Curran, M. A., Mann, M. et Norris, G. « The international workshop on electricity data for life cycle inventories », *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no 8, p. 853-862, juin 2005.
- Dale, A. T., Khanna, V., Vidic, R. D. and Bilec, M. M., 2013. Process Based Life-Cycle Assessment of Natural Gas from the Marcellus Shale. *Environmental Science & Technology* 47, 5459–5466.
- Damgaard, A., Riber, C., Fruergaard, T., Hulgaard, T., Christensen, T.H., 2010. Life cycle assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. *Waste Manage.* 30, 1244–1250.
- Dandres, T., Gaudreault, C., Tirado-Seco, P. et Samson, R. « Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005–2025 European Union bioenergy policy using the GTAP model and life cycle assessment », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no 2, p. 1180-1192, févr. 2012
- de Wild-Scholten, M. and E. Alsema. 2005. Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. in Material Research Society Fall Meeting, Symposium G: Life Cycle Analysis Tools for “Green” Materials and Process Selection, Boston, MA.
- DGEMP, Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France DGEMP-OE(2004) – Direction générale de l'énergie et des matières premières – Observatoire de l'énergie
- Diao, Z.-W. and Shi, L. 2011. Life Cycle Assessment of Photovoltaic Panels in China. In: *Research of Environmental Sciences* 24(5), pp. 571-579.
- Dones, R., Ménard, M. et Gantner, U. « Choice of electricity-mix for different LCA applications », Brussels Belg., 1998
- E-Cube consultant, 2013. Vers un système gazier 100% décarboné – Etude technico-économique des conditions de développement d'un réseau de gaz décarboné en France, Etude pour GRTgaz
- Edjabou, M.E., Jensen, M.B., Götze, R., Pivnenko, K., Petersen, C., Scheutz, C., Astrup, T.F., 2015. Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. *Waste Manage.* 36, 12–23.
- Eriksson, O., Finnveden, G., Ekvall, T., Björklund, A., Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion, *Energy Policy* 35 (2007) 1346–1362
- EuroHeat, Heat Roadmap Europe 2050 – Second pre-study for the EU27 – Alborg University, Halmstad University, Ecofys Germany GmbH, PlanEnergi for Euroheat and Power – 2013 - <http://www.heatroadmap.eu/publications.php>
- Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., 2015. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, IEA PVPS Task 12, Subtask 2.0, LCA Report IEA-PVPS 12-04
- Frischknecht, R., Stucki, M. Scope-dependant modelling of electricity supply in life cycle assessments. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Springer. Volume 15 – Number 8- September 2010 (p806- 816)
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hirschler R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., et Wernet G., Overview and Methodology: ecoinvent report No. 1. , www.ecoinvent.ch, Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007
- Frischknecht, R., M. Tuchschnid, M. Faist-Emmenegger, et C. Bauer. 2007. « Strommix und Stromnetz, Data v2. 0 (2007) ». Ecoinvent report No. 6/Teil XVI, Uster.

Fröling, M., Bengtsson, H. and Ramnäs, O., Environmental performance of district heating in suburban areas compared to heat pump and pellets furnace, 10th international symposium on district heating and cooling, Hannover, September 2006

Fruergaard, T., Astrup, T., 2011. Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Manage.* 31, 572–582.

Fruergaard, T., Christensen, T.H., Astrup, T., 2010. Energy recovery from waste incineration: assessing the importance of district heating networks. *Waste Manage.* 30, 1264–1272.

García-Gusano, Diego, Daniel Garraín, and Javier Dufour. 2017. “Prospective Life Cycle Assessment of the Spanish Electricity Production.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (August): 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.045>.

Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Bi, X. and Melin, S., 2011. Life cycle assessment of base-load heat sources for district heating system options, *Int J Life Cycle Assess* 16:212–223

Gentil, E.C., Damgaard, A., Hauschild, M., Finnveden, G., Eriksson, O., Thorneloe, S., Kaplan, P.O., Barlaz, M., Muller, O., Matsui, Y., Li, R., Christensen, T.H., 2010. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. *Waste Manage.* 30, 2636–2648.

Giugliano, M., Cernuschi, S., Grosso, M., Rigamonti, L., 2011. Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. *Waste Manage.* 31, 2092–2101.

Gondal I. A. et Sahir M. H., « Review of Modelling Tools for Integrated Renewable Hydrogen Systems », in Proceedings of International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST 2011), 2011. Guiavarch A. and Peuportier B., improving the environmental balance of building integrated photovoltaic systems, ISES Conference; Goteborg, juin 2003

GRDF, 2018. Objectif facteur 4 – Le rôle du réseau de gaz dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 - GRDF, http://bibliotheque.grdf.fr/fileadmin/user_upload/pdf/Collectivites_Territoriales/Scenario_facteur4_BAT.pdf

GRTgaz, Vers un système gazier 100% décarboné – Etude technico-économique des conditions de développement d'un réseau de gaz décarboné en France – 2013 – ECube consultant pour GRTgaz

Guiavarch A. and Peuportier B., Environmental assessment of building integrated solar components, development of a simulation tool, PLEA Conference, Toulouse, juillet 2002

Guiavarch A. and Peuportier B., Development of a Simulation and Life Cycle Assessment Tool for Solar Buildings, Eurosun Conference, Bologna, juin 2002

Guinée J. B., (final editor), Gorrae M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H., Weidema B. P. : Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, 2001

Hawkes, A. D. 2014. “Long-Run Marginal CO2 Emissions Factors in National Electricity Systems.” *Applied Energy* 125 (July): 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.060>.

Hellweg, S., Hofstetter, T.B., Hungerbühler, K., 2001. Modeling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland. *Environ. Model. Assess.* 6, 219–235.

Herfray, G. and Peuportier, B. 2012. Evaluation of electricity related impacts using a dynamic LCA model, International Symposium Life Cycle Assessment and Construction, Nantes, France.

Hong, Sanghyun, Corey J. A. Bradshaw, and Barry W. Brook. 2013. "Evaluating Options for the Future Energy Mix of Japan after the Fukushima Nuclear Crisis." *Energy Policy* 56 (May): 418–24. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.002>.

Hou, G. and Zhao, Y. 2014. Life Cycle CO₂ Emissions of Grid-Connected Electricity for Crystalline Silicon Photovoltaic Systems in China. Institute of Photoelectronics, University of Nankai, Nan-kai, Tianjin, Chine.

ILCD, Main guidance document for all applications and scope situations (DRAFT), 22 may 2008

ILCD, Requirement for impact assessment models for LCIA WORKING DRAFT version 0.7, 2008

Jones, Christopher, and Paul Gilbert. 2018. "Determining the Consequential Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Increased Rooftop Photovoltaic Deployment." *Journal of Cleaner Production* 184 (May): 211–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.140>.

Jungbluth, N., et al. 2012. Life Cycle Inventories of Photovoltaics, ESU-services Ltd.: Uster, Suisse

Karlsdottir, M. R., Lew, J. B., Palsson H. P. and Palsson O. P., Geothermal district heating system in Iceland: a life cycle perspective with focus on primary energy efficiency and CO₂ emissions, 14th International Symposium on District Heating and Cooling, 2014, Stockholm

Korre, A., Nie, Z., Durucan, S., 2012. Life Cycle Assessment of the natural gas supply chain and power generation options with CO₂ capture and storage: Assessment of Qatar natural gas production, LNG transport and power generation in the UK, Sustainable Technologies, Systems and Policies 2012 Carbon Capture and Storage Workshop

Krakowski, Vincent, Edi Assoumou, Vincent Mazauric, and Nadia Maïzi. 2016. "Feasible Path toward 40–100% Renewable Energy Shares for Power Supply in France by 2050: A Prospective Analysis." *Applied Energy* 171 (June): 501–22. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.094>.

Lausselet, C., Cherubini, F., del Alamo Serrano, G., Becidan, M., Hammer Strømman, A., Life-cycle assessment of a Waste-to-Energy plant in central Norway: Current situation and effects of changes in waste fraction composition, *Waste Management* 58 (2016) 191–201

Lund, Henrik, Brian Mathiesen, Per Christensen, et Jannick Schmidt. 2010. « Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (3): 260-271. doi:10.1007/s11367-010-0164-7.

Maïzi, Nadia, and Edi Assoumou. 2014. "Future Prospects for Nuclear Power in France." *Applied Energy* 136: 849–59.

Marchand, M., Blanc, I., Marquand, A., Beylot, A., Bezelgues-Courtade, S., Traineau, H., 2015. Life Cycle Assessment of High Temperature Geothermal Energy Systems, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia

Mathiesen, B. V., Münster, M. et Fruergaard, T. « Energy system analyses of the marginal energy technology in life cycle assessments », 2007.

Mathiesen, B. V., Münster, M. et Fruergaard, T. 2009. « Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments ». *Journal of Cleaner Production* 17 (15) (octobre): 1331-1338. doi:10.1016/j.jclepro.2009.04.009.

Matuszewska, D., Environomic optimal design of geothermal energy conversion systems using life cycle assessment, Master's Thesis, 2011, Akureyri, Iceland

Merrild, H., Larsen, A.W., Christensen, T.H., 2012. Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: the importance of efficient energy recovery and transport distances. *Waste Manage.* 32 (5), 1009–1018.

Negawatt, Scénarios Negawatt – 2011-2050 – Hypothèses et méthodes – Negawatt - www.negawatt.org/rapport-technique-p131.html

Ning, S.-K., Chang, N.-B., Hung, M.-C., 2013. Comparative streamlined life cycle assessment for two types of municipal solid waste incinerator. *J. Clean. Prod.* 53, 56–66.

Parajuli a, R., Løkke, S., Alberg Østergaard, P., Trydeman Knudsen, M., Schmidt, J. H., Dalgaard, T., 2014. Life Cycle Assessment of district heat production in a straw fired CHP plant, *Biomass and bioenergy* 68, 115-134.

Passarini, F., Nicoletti, M., Ciacci, L., Vassura, I., Morselli, L., 2014. Environmental impact assessment of a WtE plant after structural upgrade measures. *Waste Manage.* 34, 753–762.

Pehnt, M. « Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies », *Renew. Energy*, vol. 31, no 1, p. 55-71, janv. 2006 R. H. Crawford, G. J. Treloar, R. J. Fuller, et M. Bazilian, « Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no 6, p. 559-575, déc. 2006

Pehnt, Martin, Michael Oeser, and Derk J. Swider. 2008. "Consequential Environmental System Analysis of Expected Offshore Wind Electricity Production in Germany." *Energy* 33 (5): 747–59. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.01.007>.

Peuportier B., Eco-conception des bâtiments et des quartiers, Presses de l'Ecole des Mines, 336p, novembre 2008

Peuportier B., The life cycle simulation method EQUER applied to building components, CIB Conference : Construction and the environment, Gävle (Sweden), juin 1998

Peuportier B., Polster B. and Blanc Sommereux I., Development of an object oriented model for the assessment of the environmental quality of buildings, First International Conference "Buildings and the environment", CIB, Watford, mai 1994

Polster B., Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de doctorat, MINES ParisTech, décembre 1995

Popovici E. and Peuportier B., Using life cycle assessment as decision support in the design of settlements, PLEA Conference, Eindhoven, septembre 2004

Portugal-Pereira, Joana, Alexandre C. Köberle, Rafael Soria, André F. P. Lucena, Alexandre Szklo, and Roberto Schaeffer. 2016. "Overlooked Impacts of Electricity Expansion Optimisation Modelling: The Life Cycle Side of the Story." *Energy, Towards low carbon energy systems: engineering and economic perspectives*, 115 (November): 1424–35. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.062>.

RAC, Prospective et stratégie régionale pour l'énergie – Réseau Action Climat France – 2014 - www.rac-f.org/IMG/pdf/PROSPECTIVE_version_longue_17-dec-2014.pdf

Rentizelas, Athanasios, and Dimitrios Georgakellos. 2014. "Incorporating Life Cycle External Cost in Optimization of the Electricity Generation Mix." *Energy Policy* 65 (February): 134–49. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.023>.

Riber, C., Bhandar, G.S., Christensen, T.H., 2008. Environmental assessment of waste incineration in a life-cycle-perspective (EASEWASTE). *Waste Manage. Res.* 26, 96–103.

Riva, A., D'Angelosante, S., Trebeschi, C., 2006. Natural gas and the environmental results of life cycle assessment. *Energy* 31, 138–148.

RTE, Bilan Prévisionnel - www.rte-france.com/fr/article/bilan-previsionnel

Salomon T., Mikolasek R., Bedel S. et Peuportier B., PLEIADES + COMFIE, logiciel de simulation thermique dynamique couplé avec EQUER, outil d'analyse d'impact environnemental, Conférence IBPSA France, Toulouse, octobre 2004

- Scipioni, A., Mazzi, A., Niero, M., Boatto, T., 2009. LCA to choose among alternative design solutions: the case study of a new Italian incineration line. *Waste Manage.* 29, 2462–2474.
- Shmelev, Stanislav E., and Jeroen C. J. M. van den Bergh. 2016. “Optimal Diversity of Renewable Energy Alternatives under Multiple Criteria: An Application to the UK.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (July): 679–91. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.100>.
- SNCU, Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid – Restitution des statistiques portant sur l’année 2014 – SNCU pour le compte du SOeS
- SOeS, Bilan énergétique de la France pour 2015, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2016/datalab-bilan-energetique-de-la-france-pour-2015-novembre2016.pdf (accès janvier 2018)
- Soimakallio, S., Kiviluoma, J. et Saikku, L. « The complexity and challenges of determining GHG (greenhouse gas) emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA (life cycle assessment) – A methodological review », *Energy*, vol. 36, no 12, p. 6705-6713, déc. 2011.
- Sovacool, B. K. « Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey », *Energy Policy*, vol. 36, no 8, p. 2950-2963, août 2008
- Tabasová, A., Kropáč, J., Kermes, V., Nemet, A., Stehlík, P., 2012. Waste-to-energy technologies: impact on environment. *Energy* 44, 146–155.
- Tagliaferri, C., Clift, R., Lettieri, P. and Chapman, C., 2017. Liquefied natural gas for the UK: a life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 22, 1944–1956.
- Thiers S. and Peuportier B., Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger, *Solar Energy* vol 82 n°9, pp 820-831, septembre 2008
- Thiers, S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de l’Ecole des Mines de Paris, 2008, 254 p
- Thiers S., Peuportier B., Life Cycle Assessment of a Positive Energy House in France, CISBAT 2009, Lausanne, septembre 2009
- Tunesi, S., 2011. LCA of local strategies for energy recovery from waste in England, applied to a large municipal flow. *Waste Manage.* 31, 561–571.
- Turconi, R., Butera, S., Boldrin, A., Grosso, M., Rigamonti, L., Astrup, T., 2011. Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models. *Waste Manage. Res.* 29, 78–90.
- Turconi, R., Boldrin, A. et Astrup, T. « Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, p. 555-565, déc. 2013
- Volkart, Kathrin, Nicolas Weidmann, Christian Bauer, and Stefan Hirschberg. 2017. “Multi-Criteria Decision Analysis of Energy System Transformation Pathways: A Case Study for Switzerland.” *Energy Policy* 106 (July): 155–68. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.026>.
- Wang, S., 2014. Current PV Markets and Energy Pay-Back Study. Energy Research Institute (ERI) of the National Development and Reform Commissions (NDRC), Beijing, Chine.
- Wiser, Ryan, Dev Millstein, Trieu Mai, Jordan Macknick, Alberta Carpenter, Stuart Cohen, Wesley Cole, Bethany Frew, and Garvin Heath. 2016. “The Environmental and Public Health Benefits of Achieving High Penetrations of Solar Energy in the United States.” *Energy* 113 (October): 472–86. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.068>.
- World Energy Council, Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment, London, 2004

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



EXPERTISES

ACVs ENERGIES COMPARAISON D'APPROCHE ACV DES SYSTEMES ENERGETIQUES

