

Analyse du Cycle de Vie de solutions de chauffage et d'ECS pour des maisons individuelles RT 2012

SYNTHESE DE L'ETUDE

Décembre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *BIO by Deloitte*

Auteurs :

Augustin Chanoine	BIO by Deloitte
Frédéric Croison	BIO by Deloitte
Yannick Le Guern	BIO by Deloitte



185, avenue Charles-de-Gaulle
92200 Neuilly-sur-Seine

Téléphone : +33 (0)1 55 61 63 03
E-mail : sustainabilityservices@bio.deloitte.fr
Site internet : www.bio.deloitte.fr

Coordination technique : Anne Lefranc – **Direction\Service** : Service Bâtiment



Synthèse

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 la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre 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.

1. Contexte et objectifs

A l'heure où la Réglementation Thermique 2012 (RT 2012) est entrée en vigueur et impose des solutions énergétiques et thermiques plus performantes, l'impact environnemental du cycle de vie de systèmes de production de chaleur et/ou d'eau chaude sanitaire reste à optimiser. A ce jour, même si les performances environnementales et énergétiques de ces systèmes en phase d'utilisation commencent à être bien connues, très peu d'études de recherche visent à évaluer leurs impacts sur l'environnement tout au long de leur cycle de vie.

Dans le cadre de ses missions, l'ADEME a souhaité évaluer la performance environnementale, tout au long de leur cycle de vie, de cinq solutions d'équipements énergétiques couplant une solution de chauffage et une solution de production d'eau chaude sanitaire (ECS), les plus représentatives du marché de la maison individuelle neuve en France répondant aux critères de la réglementation thermique « RT 2012 ».

L'objectif principal de cette étude a été d'étudier les impacts environnementaux de chaque solution tout au long de son cycle de vie. Les résultats présentés dans cette synthèse sont les répartitions des impacts environnementaux sur les différentes étapes du cycle de vie des différentes solutions, en proportion relative des impacts totaux de chaque solution. Par conséquent, ils ne peuvent pas être utilisés pour une comparaison des solutions entre elles.

Par ailleurs, les résultats (notamment les proportions relatives par phase du cycle de vie) sont associés à une performance du bâti donnée et identique. Une analyse de sensibilité spécifique a été menée pour étudier l'influence de la variation de performance du bâti sur les répartitions des impacts environnementaux par étape du cycle de vie.

L'ADEME a mené cette mission en collaboration avec les acteurs principaux du secteur de l'énergie et du secteur des équipements énergétiques en mettant en place un groupe de suivi de l'étude¹.

A plus long terme, cette étude vise à contribuer aux objectifs suivants :

- apporter aux acteurs de la filière (industriels, maîtres d'ouvrage) une information fiable et objective sur les principales sources d'impacts des solutions de chauffage et d'ECS et leurs axes d'amélioration ;
- aider les industriels du secteur à orienter leur choix en phase de conception, en tenant compte, en plus de la performance énergétique, de l'ensemble des impacts sur le cycle de vie des équipements ;
- sensibiliser les maîtres d'ouvrage et les habitants aux impacts environnementaux des systèmes de chauffage et de production d'ECS et aux conséquences de leur utilisation.

Afin de répondre à ces objectifs, les bilans environnementaux réalisés dans cette étude ont été établis selon la méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV), conformément aux normes NF EN ISO 14 040 : 2006 et NF EN ISO 14 044 : 2006. En complément, le guide des bonnes pratiques pour l'application de ces normes (ILCD Handbook) rédigé par le Joint Research Centre de la Commission Européenne a également été suivi.

La conformité de l'étude avec la série des normes ISO 14040 a été validée par une revue critique réalisée par les experts indépendants suivants :

- Philippe OSSET, Président de la société Solinnen (Société spécialisée dans les applications de l'Analyse du Cycle de Vie) et président du Comité de Revue Critique ;
- Dr. Bruno PEUPOURTIER, responsable scientifique au CES (Centre Efficacité Énergétique des Systèmes) de l'ENSM (École des Mines de Paris), et professeur à l'ENPC (École des Ponts et Chaussées) ;
- Dr. Sébastien LASVAUX, ingénieur de recherche de la division Environnement et ingénierie du cycle de vie, en collaboration avec Jean Baptiste VIDEAU, ingénieur de recherche de la division Performance énergétique du Bâtiment du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

La présente synthèse, publiée par l'ADEME, a été validée par l'ensemble des participants au groupe de suivi de l'étude¹.

2. Principaux éléments méthodologiques

2.1. Description générale de la méthode de calcul

Cette étude a mis en œuvre le couplage de calculs thermiques suivant la méthode Th-BCE RT2012 et des études d'ACV proprement dites conduites conformément aux normes en vigueur. La première étape a consisté à définir le bâti dans lequel les solutions étudiées allaient s'intégrer, afin de permettre le dimensionnement des besoins en chauffage et production d'ECS. Dans un deuxième temps, les solutions de chauffage et d'ECS ont été dimensionnées pour répondre aux besoins ainsi définis, et les calculs thermiques ont permis de contrôler que, pour ce bâti, les solutions énergétiques sélectionnées répondaient aux besoins en chauffage et ECS, de vérifier si les solutions respectaient les exigences de la RT 2012, ainsi que de fournir la consommation d'énergie primaire annuelle de chaque appareil (Cep). Dans un troisième temps, l'ACV a permis, notamment à partir de ces résultats, de quantifier la performance environnementale des cinq solutions de chauffage et d'ECS retenues.

Le bâti commun à toutes les solutions étudiées ayant été défini pour le scénario de référence est une maison individuelle de plain-pied de 83,68 m² de surface habitable (SHAB) de type T4 et située en zone climatique H2b correspondant à un niveau de consommation maximal d'énergie primaire (Cep_{max}) de 50 kWhEP/m²/an tel que défini par la RT 2012.

Le scénario de chauffage (horaires et températures de chauffage) utilisé pour la définition des besoins en chauffage a été le scénario conventionnel RT 2012, et la quantité d'ECS à 40°C au point de puisage a été calculée selon la méthode de calcul Th-BCE 2012.

Comme mentionné précédemment, un bâti commun a été défini pour toutes les solutions : le couple {bâti ; solution de chauffage/ECS} n'a pas été optimisé spécifiquement pour chaque solution, à l'exception d'un scénario alternatif visant à analyser l'influence sur la performance environnementale d'une optimisation du couple {bâti ; solution de chauffage/ECS} d'un point de vue économique (voir point 3 du §4.2.1²).

Contrairement aux autres solutions retenues, les résultats des calculs thermiques pour la solution « 100% effet Joule » ne sont pas conformes à la RT 2012 dans le bâti commun à toutes les solutions dans le sens où le Cep de cette solution dépasse le Cep_{max}. Cependant, dans le cadre limité du projet, et ce dernier ayant un caractère exploratoire, la solution « 100% effet Joule » a été analysée en conservant le bâti commun même si la conformité à la RT 2012 n'est pas respectée dans ce cas sur le critère du Cep.

2.2. Définition des systèmes étudiés

Les solutions les plus représentatives du futur marché de la maison individuelle RT 2012 ont été définies en concertation avec les experts membres du groupe de suivi de l'étude. Les systèmes étudiés comprennent chacun :

¹ Liste des participants au groupe de suivi : Groupe Atlantic, Campa (groupe Muller), CIAT, EDF, e.l.m. leblanc, GDF-Suez, Groupement Interprofessionnel des Fabricants d'Appareils d'Équipement Ménager (GIFAM), GrDF, SUPRA SA, Syndicat des Energies Renouvelables (SER), Syndicat des Industries Thermiques, Aéronautiques et Frigorifiques (UNICLIMA)

²La RT 2012 vise à promouvoir le dimensionnement conjoint du bâti et des solutions de chauffage/ECS avec une exigence sur l'énergie primaire. En vue d'optimiser le système global du point de vue économique, chaque couple {bâti ; solution de chauffage/ECS} peut être dimensionné afin d'avoir un gain au sens de la RT 2012 (c'est-à-dire un écart entre le Cep et le Cep_{max}) réduit. L'influence qu'aurait la recherche d'un tel optimum sur la performance environnementale des systèmes a été étudiée dans le cadre du scénario alternatif évoqué au point 3 du §4.2.1.

- une solution de chauffage de l'air intérieur, composée d'une unité de production de chaleur ainsi que des systèmes assurant la régulation de la température de chauffage, la distribution et l'émission ;
- une solution de production d'ECS, composée d'une unité de production de chaleur ainsi que des systèmes assurant la régulation de la température de l'ECS générée, la distribution et la diffusion.

Le bâti (fondations, dalles, murs, isolants, etc.) a été exclu du périmètre de l'étude, à l'exception d'un différentiel d'isolant inclus dans le périmètre pris en compte pour le scénario alternatif mentionné au point 3 du §4.2.1 et ayant visé à étudier l'influence de l'optimisation du couple bâti/solution énergétique sur la performance environnementale des solutions de chauffage / ECS.

Les solutions sélectionnées³ sont décrites dans le tableau suivant.

Tableau 1 - Sélection des solutions couplées de chauffage et production d'ECS

	Génération		Distribution/émission de chauffage	Distribution/diffusion d'ECS
	Chauffage	Production d'ECS		
1	Pompe à chaleur air/eau ; sèche-serviettes dans la salle de bain	Chauffe-Eau Thermodynamique (CET) sur air extérieur avec appoint effet joule	Plancher chauffant	Tuyauterie et robinetterie
2	Chaudière gaz à condensation ; sèche-serviettes dans la salle de bain	Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) optimisé avec appoint gaz instantané	Plancher chauffant	
3a	Poêle à bois granulés en chauffage principal et panneaux rayonnants dans les chambres ; sèche-serviettes dans la salle de bain	Chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur avec appoint effet joule	<i>Emission directe par les générateurs</i>	
3c	Panneaux rayonnants ; sèche-serviettes dans la salle de bain	Chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur avec appoint effet joule	<i>Emission directe par les générateurs</i>	
4	Pompe à chaleur hybride : système combiné {PAC air/eau ; chaudière gaz à condensation} ; sèche-serviettes dans la salle de bain		Plancher chauffant	

Les principales caractéristiques techniques des solutions énergétiques sélectionnées sont présentées dans le tableau ci-dessous.

³ Au démarrage de l'étude, trois alternatives de la solution 3 ont été envisagées : la solution 3a {poêle à granulés + panneaux rayonnants ; chauffe-eau thermodynamique}, la solution 3b {poêle à bûches + panneaux rayonnants ; chauffe-eau thermodynamique} et la solution 3c « 100% effet joule » {panneaux rayonnants ; chauffe-eau thermodynamique}. Seules les solutions 3a et 3c ont été retenues pour la suite de l'étude.

Tableau 2 – Principales caractéristiques techniques des solutions étudiées

	Chauffage	Production d'ECS
Solution 1	PAC air/eau <ul style="list-style-type: none"> - Poids total à charge : 83,25 kg, dont charge en R410A de 1,25 kg - Groupe extérieur + module hydraulique dans le cellier - Puissance à -7°C ext / +35°C eau plancher = 4,71 kW - COP certifié pour +7°C/+35°C = 4,5 	Chauffe-eau thermodynamique <ul style="list-style-type: none"> - Poids total à charge : 91,28 kg, dont charge en R134A de 1,28 kg - Ballon 200l avec appoint intégré 2500 W situé dans le cellier et gainé sur air extérieur - pertes thermiques : 1,75 W/K - COP certifié pour +7°C/+45°C = 2,68 - chauffage de nuit
Solution 2	CESI / Chaudière à condensation <ul style="list-style-type: none"> - Poids total à charge : 100 kg, dont charge en propylène glycol de 6,3 kg - Chaudière gaz à condensation murale ; - La chaudière est utilisée à la fois pour le chauffage et l'appoint de production d'ECS ; - Puissance chaudière de 29 kW ; - Rendement sur PCI à Pu100 % / Pu30 % de 97,2 % / 108,80 % ; - Panneau solaire avec une superficie d'entrée de 1,9 m² ; - Ballon de 145 L avec capacité échangeur solaire de 5 L ; 	
Solution 3a	Poêle à granulés <ul style="list-style-type: none"> - Masse : 147 kg - Puissance de 5.5 kW ; - Rendement sur PCI selon EN 14785 : 90 % ; - Part de chaleur convective : 70 % ; - Puissance auxiliaires : 50 W ; - Régulation par thermostat d'ambiance et programmation horaire ; - Air comburant gainé, raccordement en ventouse possible ; - Flamme verte 5 étoiles : émission de CO : 0.02 % à 13 % d'O₂ Panneaux rayonnants (dans les chambres) <ul style="list-style-type: none"> - Masse individuelle : 4,4 kg - Classe B3 ; - Variation temporelle : 0,20°C. 	Chauffe-eau thermodynamique <i>Mêmes caractéristiques que le CET de la solution 1</i>
Solution 3c	Panneaux rayonnants (toutes les pièces) <i>Même caractéristiques que les panneaux rayonnants de la solution 3a</i>	Chauffe-eau thermodynamique <i>Mêmes caractéristiques que le CET de la solution 1</i>
Solution 4	Pompe à chaleur hybride (PAC électrique / chaudière gaz) <ul style="list-style-type: none"> - Poids total à charge : 78,7 kg, dont charge en R134A de 0,5 kg - La PAC est prioritaire en chauffage et en production d'ECS. - La chaudière assure la relève de la production d'ECS et vient en appoint du chauffage. - Chauffage PAC : <ul style="list-style-type: none"> o Pu (+7°C/+35°C) = 1,86 kW o COP = 3,65 - Chauffage chaudière : <ul style="list-style-type: none"> o Pu max = 22.8 kW o Rendements sur PCI à Pu100 % / Pu30 % = 97.3 % / 108.6 % o Puissances auxiliaires = 36 W + 34 W - ECS : <ul style="list-style-type: none"> o Ballon de 150 L o Masse : 65 kg 	

2.3. Unité Fonctionnelle (UF)

Pour interpréter les résultats, il est nécessaire de définir une référence servant à exprimer le bilan matière/énergie du cycle de vie de chaque système : c'est l'Unité Fonctionnelle (UF) du bilan environnemental. L'UF permet de quantifier les résultats d'une étude ACV par rapport à une « unité » de service rendu. Pour les solutions énergétiques étudiées, la fonction est de maintenir un certain niveau de température dans les pièces de la maison individuelle et de produire et diffuser une certaine quantité annuelle d'ECS à une certaine température. L'UF retenue dans cette étude est la suivante.

« Chauffer les pièces incluses dans la SHAB du bâti à une température de consigne comprise entre 16 et 19°C conformément au scénario de chauffage RT 2012, et couvrir les besoins de 1,85 adulte équivalent en eau chaude sanitaire à équivalence 40°C au point de puisage pendant 1 an, en conformité avec la RT 2012 »

A noter : cette UF est valable pour le scénario de référence et pour toutes les solutions, à l'exception de la solution 3c (panneaux rayonnants + CET) pour laquelle la conformité aux critères de la RT 2012 n'est pas respectée dans le bâti commun à toute les solutions.

2.4. Frontière des systèmes

Pour évaluer les impacts environnementaux des 4 solutions énergétiques, les étapes suivantes du cycle de vie ont été prises en compte :

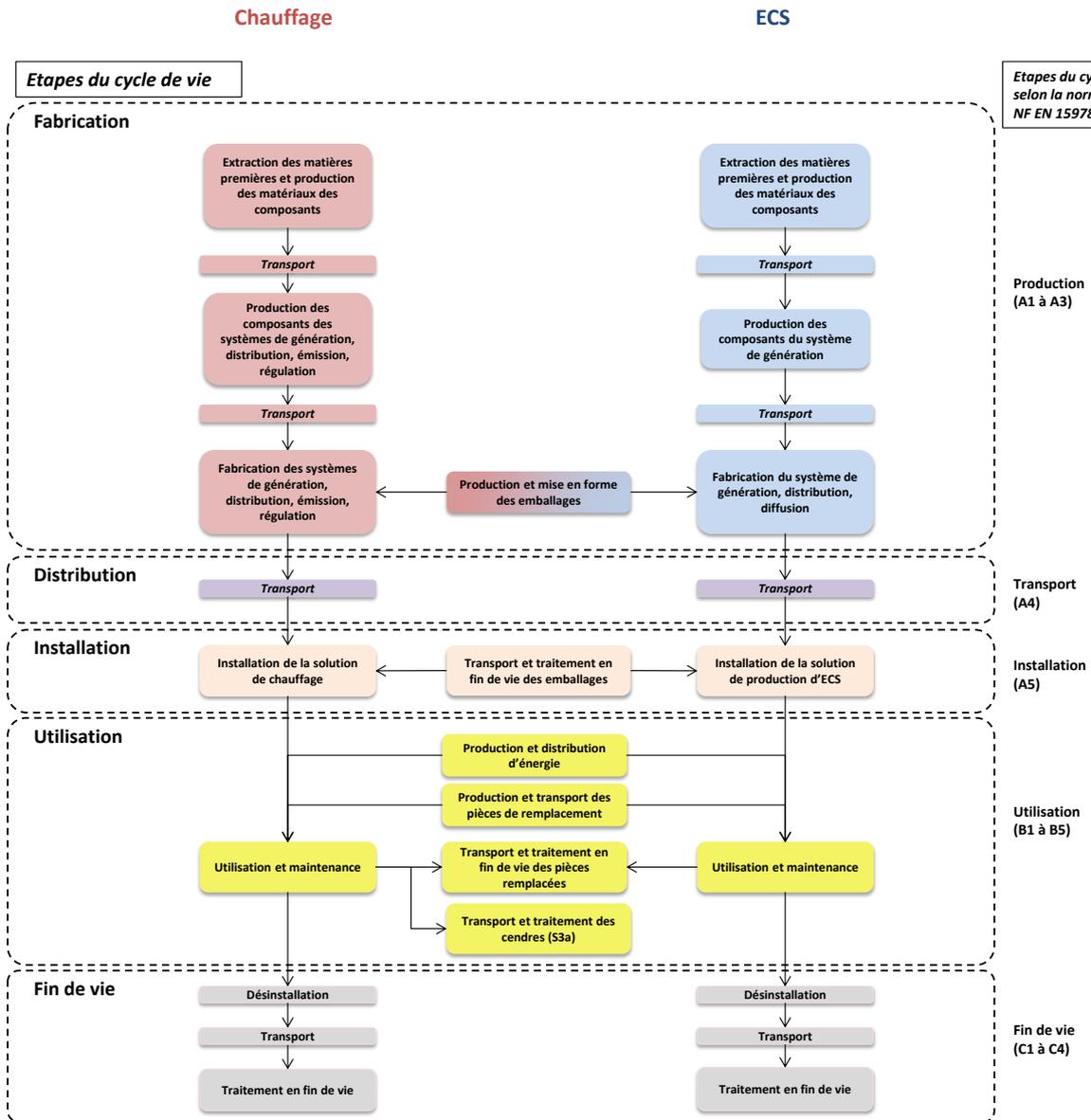


Figure 1 - Frontières des systèmes étudiés

2.5. Enjeux environnementaux et indicateurs d'impacts associés

Les catégories d'impact prises en compte dans l'étude doivent couvrir l'ensemble des enjeux environnementaux du cycle de vie des systèmes considérés. Dans le cadre de cette étude, 13 catégories d'impact ont été sélectionnées et appréhendées par les indicateurs environnementaux recommandés par le JRC. Les catégories d'impact et indicateurs correspondants ont été sélectionnés d'une part afin de couvrir les enjeux environnementaux majeurs des solutions, et d'autre part en sélectionnant les indicateurs considérés comme les plus robustes par le JRC (niveau I et II). Les catégories d'impact et méthodes de caractérisation associées sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 - Indicateurs d'impact et méthodes de caractérisation considérés

Catégorie d'impact	Indicateur d'impact	Unité	Méthode de caractérisation
Changement climatique	Potentiel de Réchauffement Global	kg éq. CO ₂	IPCC 2007 (AR4), modèle de base sur 100 ans
Déplétion de la couche d'ozone	Potentiel de déplétion de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	WMO 1999, steady-state
Toxicité Humaine, effets cancérogènes	Potentiel de toxicité humaine, effets cancérogènes	CTUh	USEtox
Toxicité Humaine, effets non-cancérogènes	Potentiel de toxicité humaine, effets non-cancérogènes	CTUh ¹⁸	USEtox
Emission de particules	Troubles respiratoires dûs à l'inhalation de particules inorganiques	kg éq. PM2.5	RiskPoll model (Rabl and Spadaro, 2004) and (Greco et al., 2007)
Radiations ionisantes, santé humaine	Potentiel de Radiations Ionisantes, santé humaine	kg éq. U ²³⁵	(Frischknecht et al., 2000), tel que dans ReCiPe 2008
Formation d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone photochimique	kg éq. COVNM	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al., 2008), tel que dans ReCiPe 2008
Acidification	Potentiel d'acidification	mole H+ émis	Accumulated Exceedance
Eutrophisation terrestre	Potentiel d'eutrophisation terrestre	mole éq. N	Accumulated Exceedance
Eutrophisation aquatique des eaux douces	Potentiel d'eutrophisation aquatique des eaux douces	kg éq. P	ReCiPe 2008
Eutrophisation aquatique marine	Potentiel d'eutrophisation aquatique marine	kg éq. N	ReCiPe 2008
Ecotoxicité en eau douce	Potentiel d'écotoxicité en eau douce	CTUe	USEtox
Déplétion des ressources minérales et fossiles	Potentiel de déplétion des ressources abiotiques (minérales et fossiles)	kg éq. Sb	CML 2002, avec les facteurs "reserve base" de (Van Oers et al., 2002)

De plus, les systèmes considérés étant des appareils consommateurs d'énergie en phase d'utilisation, la consommation d'énergie est donc un enjeu majeur de l'étude.

Par conséquent, la **consommation d'énergie primaire** a également été calculée pour chaque système, via l'indicateur de **demande cumulée en énergie** (indicateur classiquement utilisé en ACV).

3. Données et hypothèses

3.1. Principales sources des données

Lorsque cela était possible, des données brutes spécifiques sur certains systèmes ont été collectées auprès de constructeurs. Les données manquantes pour les autres systèmes ont été collectées grâce à une phase de recherche bibliographique. Dans les deux cas, un processus de validation des données a été suivi, comprenant d'une part un contrôle systématique des données spécifiques collectées auprès des constructeurs (contrôle de complétude, de cohérence, de périmètre) et d'autre part une vérification et une validation par les membres du groupe de suivi des données issues de la bibliographie.

Les données d'inventaire de cycle de vie utilisées pour calculer les impacts environnementaux des systèmes sont soit directement extraites de la base de données ecoinvent v.2.2, soit basées sur des données d'inventaire de la base de données ecoinvent v2.2 et adaptées au contexte spécifique de l'étude.

3.2. Principales hypothèses du scénario de référence

Les principales hypothèses qui ont été retenues pour la construction du scénario de référence sont décrites ci-dessous :

- Les caractéristiques (notamment la masse) des références constructeur sélectionnées ont été utilisées, dès que cela était nécessaire, pour adapter au cas de l'étude des données génériques jugées non suffisamment représentatives des systèmes considérés.
- La durée de vie de l'ensemble des appareils de chauffage et production d'ECS a été fixée à 15 ans.
- La durée de vie des constituants du plancher (dalle flottante, isolation sous-couche, tubes pour la circulation de l'eau chaude,...), dans les situations avec plancher chauffant a été supposée identique à la durée de vie estimée du bâti, soit à 50 ans.
- Pour les procédés consommateurs d'électricité qui ont lieu en France, principalement la phase d'utilisation des solutions, le mix électrique moyen français a été considéré. Ce mix est fondé sur les données de production nationale⁴ et d'imports d'électricité en France métropolitaine⁵ fournies pour l'année 2008.

Les tableaux suivant fournissent, pour chaque générateur de chauffage / ECS et chaque étape de son cycle de vie, les principales caractéristiques de la modélisation adoptée pour calculer l'inventaire de cycle de vie du système. Les cellules colorées en vert indiquent que les données utilisées pour modéliser l'équipement ou le procédé en question sont des données spécifiques transmises par le constructeur.

⁴ *Evaluation du contenu en dioxyde de carbone (CO2) des différents usages de l'électricité distribuée en France métropolitaine entre 2008 et 2010*, Rapport méthodologique, ADEME, 2011

⁵ *Le bilan électrique français 2008*, Dossier de presse, RTE, 14 janvier 2009

Étape du cycle de vie	Sous-étape niveau 1	PAC Air/eau	CET	Panneau rayonnant	Chaudière gaz condensation	Poêle à granulés
Production	Production matières premières et des composants	Composition en matériaux basée sur des données bibliographiques (étude préparatoire Ecodesign) rapportée à la masse de la référence constructeur retenue et affinée à partir de données constructeur d'une référence de PAC monobloc.	Composition en matériaux basée sur des données bibliographiques, rapportée à la masse de la référence constructeur retenue	Composition en matériaux basée sur la fiche PEP ecopassport® d'un panneau rayonnant d'une puissance de 1000W	Composition en matériaux basée sur les données d'un produit équivalent transmises par un constructeur, rapportée à la masse de la référence constructeur retenue	Composition en matériaux basée sur les données spécifiques de la référence retenue
	Production de l'emballage	Données extrapolées à partir de données d'1 autre appareil				Données constructeur
	Fabrication / assemblage	Données extrapolées à partir de données d'1 autre appareil				Données constructeur
Distribution		1000 km -> distributeur + 60 km -> site (scénario PEP ecopassport®) ⁶				
Installation		Prise en compte de la fin de vie des emballages				
Utilisation	Consommations énergie finale	Calculs thermiques RT 2012 + Données ADEME / EDF / RTE pour mix électrique moyen France			Calculs thermiques RT 2012 + Production du gaz Ecoinvent 'Natural gas, high pressure, at consumer/FR'.	Calculs thermiques RT 2012 + ICV prod granulés construit sur la base de données ADEME (2005)
	Éléments spécifiques	Emissions fugitives de fluide réfrigérant à l'utilisation prises en compte : 2 % de la charge totale en fluide/an.			Emissions dans l'air : ICV 'Natural gas, burned in boiler condensing modulating <100kW' adapté	Emissions dans l'air : ecoinvent ('Pellets, mixed, burned in furnace 15kW/CH U') combustion granulés. Emissions sol cendres génériques
	Maintenance, remplacement	Production de la recharge en fluide réfrigérant (scénario intra-départemental) + Transport d'un technicien en camionnette pour une visite annuelle			Transport d'un technicien en camionnette pour une visite annuelle pour poêle et chaudière + Transport d'un technicien en camionnette pour 1 ramonage annuel du conduit de la chaudière et du poêle	
Fin de vie		<ul style="list-style-type: none"> • Traitement en filière D3E⁷ dite « organisée » : dépollution des appareils (circuits électroniques, fluide frigorigène le cas échéant, et recyclage des principaux matériaux) • Collecte : hypothèse 100 % en filière « organisée » • Métaux : recyclage (90 %), enfouissement (4 %) et incinération (6 %) • Composants électroniques : recyclage (95 % des métaux), enfouissement et incinération • Autres matériaux : enfouissement et incinération 			Idem	

⁶ Le PCR, ou Règles de définition des Catégories de Produits, est un document développé dans le cadre du programme PEP ecopassport® qui définit les spécifications méthodologiques à suivre pour la réalisation de Profils Environnementaux Produits (PEP) conformes à la norme ISO 14025 « Marquage et déclarations environnementaux, Déclarations environnementales de type III – Principes et modes opératoires » et constituent le PCR du programme. Lien : <http://www.pep-ecopassport.org/fr/creer-un-pep/faire-une-acv/>

⁷ D3E = Déchet d'équipement électrique et électronique

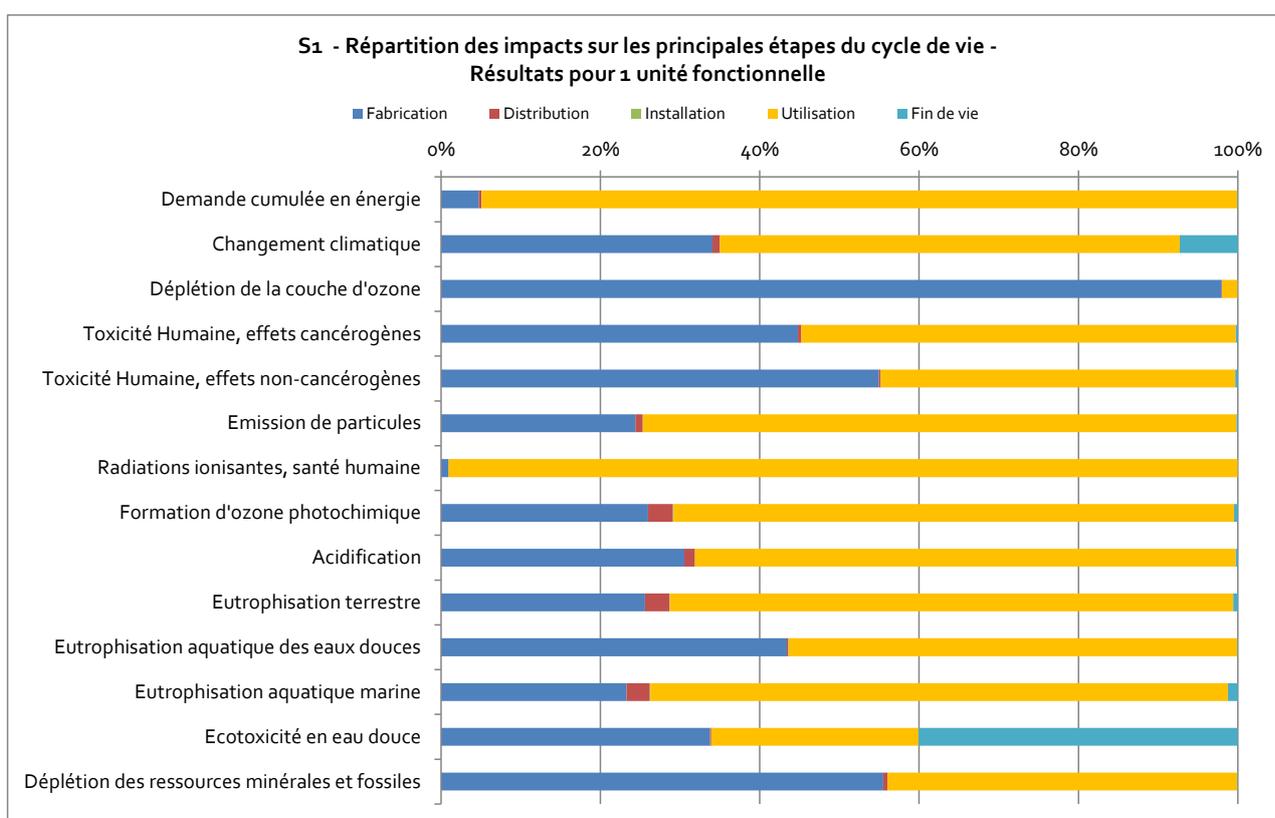
Etape du cycle de vie	Sous-étape niveau 1	Chauffe-eau solaire individuel	Chaudière-PAC hybride	Sèche-serviette	Plancher chauffant	Distribution + diffusion de l'ECS
Production	Production matières premières et des composants	Composition en matériaux et mise en forme des matériaux obtenues à partir de l'ICV ecoinvent 'Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH' adapté	Composition en matériaux fournie par le constructeur de la référence retenue et modélisation du ballon de stockage d'ECS d'après des données issues d'Ecoinvent et adaptées pour les besoins de l'étude	Composition en matériaux établie à partir d'hypothèses BIO IS, soumises à validation par un constructeur	Données issues : - Des hypothèses utilisées dans les calculs thermiques RT 2012 - De la bibliographie.	
	Production de l'emballage	Données extrapolées à partir de données constructeur	Données constructeur	Données extrapolées à partir de données constructeur		
	Fabrication / assemblage	Données extrapolées à partir de données d'1 autre appareil	Données constructeur	Données extrapolées à partir de données d'1 autre appareil	Données qualitatives tirées des hypothèses utilisées dans les calculs thermiques RT 2012 et données quantitatives estimées par BIO IS sur la mise en forme	
Distribution		1000 km -> distributeur + 60 km -> site (scénario PEP ecopassport®) ⁶				
Installation		Prise en compte de la fin de vie des emballages				
Utilisation	Consommations énergie finale	Calculs thermiques RT 2012 + Données ADEME / EDF / RTE pour mix électrique moyen France	Production du gaz Ecoinvent 'Natural gas, high pressure, at consumer/FR'.	Calculs thermiques RT 2012 + Données ADEME / EDF / RTE pour mix électrique moyen France		
	Emissions spécifiques		Emissions dans l'air : ICV 'Natural gas, burned in boiler condensing modulating <100kW' adapté			
	Maintenance, remplacement	Transport d'un technicien en camionnette pour une visite annuelle pour CESI et PAC hybride + Transport d'un technicien en camionnette pour 1 ramonage annuel du conduit de la chaudière				
Fin de vie		Idem			Scénario de fin de vie 'distribution de chauffage' fondé sur hypothèses BIO IS	Scénario de fin de vie 'distribution d'ECS' + fondé sur hypothèses BIO IS

4. Résultats

Les résultats de ce chapitre sont affichés en valeurs relatives : chaque valeur d'impact est ramenée à 100% et on analyse uniquement la contribution relative des différentes étapes. Ces résultats ne peuvent donc pas être comparés d'une solution à une autre.

4.1. Résultats obtenus pour le scénario de référence

4.1.1. Solution 1 : Pompe à chaleur à chaleur air/eau + chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur avec appoint effet joule



L'interprétation des résultats du bilan environnemental a abouti aux conclusions suivantes.

Les étapes de **fabrication et d'utilisation** des systèmes sont les plus contributrices aux impacts : elles représentent plus de 90 % des impacts sur le cycle de vie, sauf pour l'écotoxicité en eau douce, pour laquelle l'étape de fin de vie contribue à hauteur de 40 % (émissions de cuivre dans les eaux souterraines dues à l'enfouissement des résidus des fractions incinérées en cuivre de la PAC et du CET).

Concernant la **demande cumulée en énergie** et les **radiations ionisantes** (effets sur la santé humaine), la **phase d'utilisation** est fortement prépondérante :

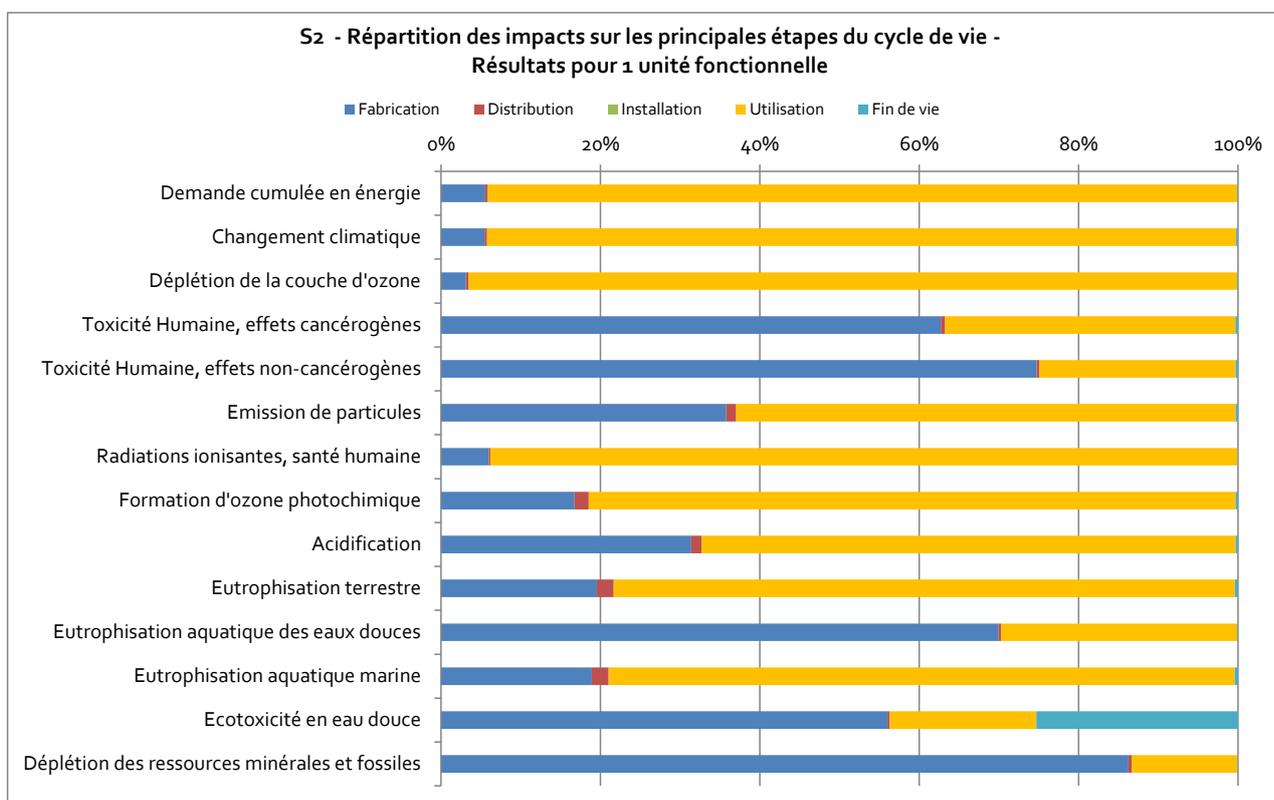
- pour la demande cumulée en énergie, cet impact s'explique par la consommation d'électricité de la PAC et du CET ;
- pour les radiations ionisantes (effets sur la santé humaine), l'impact est dû à la production d'électricité d'origine nucléaire.

Pour la **déplétion de la couche d'ozone**, la **toxicité humaine (effets non-cancérogènes)** et la **déplétion des ressources minérales et fossiles**, la phase de **fabrication** est prépondérante (contribution supérieure à 50 % sur le cycle de vie) :

- Déplétion de la couche d'ozone : émissions fugitives de CFC-113 à la production de R134a, fluide frigorigène du CET ;
- Toxicité humaine, effets non-cancérogènes : émissions de zinc dans les eaux souterraines (long terme) lors de la production du cuivre primaire de la PAC et du CET ;
- Déplétion des ressources minérales et fossiles : consommation de cuivre pour la fabrication des composants de la PAC et le CET.

La **fin de vie** de la solution contribue à 40 % du potentiel **d'écotoxicité en eau douce** et à 7 % du **potentiel de réchauffement global**, en raison de l'émission de HFC125 (l'un des 2 composants du R410a utilisé comme fluide frigorigène dans la PAC) dans l'air lors du traitement en fin de vie du fluide frigorigène (il est supposé que 90 % du fluide est capté, les 10 % restants partant dans l'atmosphère).

4.1.2. Solution 2 : chaudière gaz à condensation + CESI optimisé avec appoint gaz instantané



L'interprétation des résultats du bilan environnemental a abouti aux conclusions suivantes.

Les étapes principalement contributrices sont les étapes de **fabrication et d'utilisation** des systèmes : à elles deux, ces étapes constituent plus de 97 % des impacts sur le cycle de vie de la solution S2 excepté pour l'écotoxicité en eau douce pour laquelle la phase de fin de vie contribue à hauteur de 25 %.

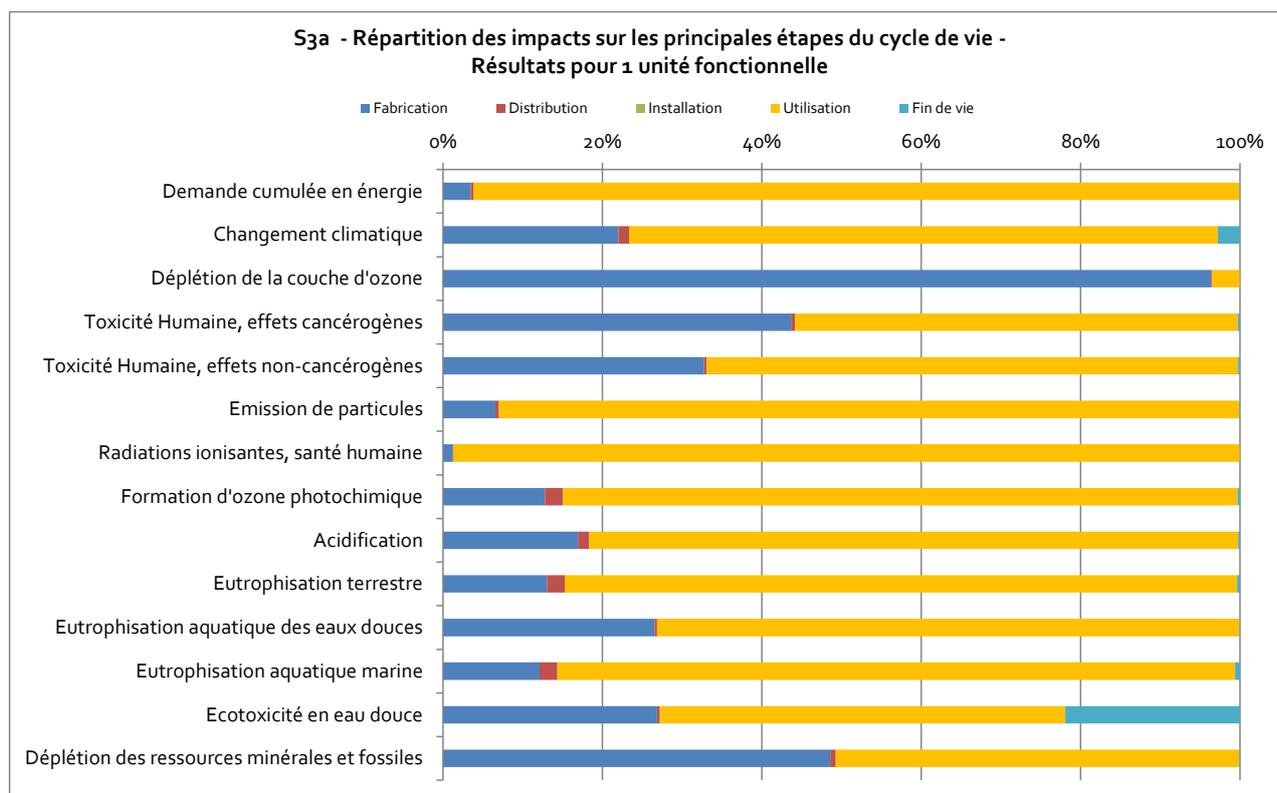
Pour la **demande cumulée en énergie (DCE)**, le **changement climatique**, la **déplétion de la couche d'ozone** et les **radiations ionisantes** (effets sur la santé humaine), la **phase d'utilisation est largement prépondérante**. Les impacts sont dus :

- à la consommation d'électricité des auxiliaires du CESI et à la consommation de gaz naturel par la chaudière pour la demande cumulée en énergie ;

- à la consommation de gaz naturel, son transport et sa combustion pour le changement climatique et la déplétion de la couche d'ozone ;
- à la consommation d'électricité d'origine nucléaire des auxiliaires du CESI pour les radiations ionisantes (effet sur la santé humaine).

Pour la **toxicité humaine**, l'**écotoxicité en eau douce**, l'**eutrophisation aquatique des eaux douces** et la **déplétion des ressources abiotiques**, la phase de fabrication est majoritaire : ces impacts sont liés à la production d'acier et de cuivre entrant dans la composition du CESI et, pour la déplétion des ressources abiotiques, la consommation de tantale des condensateurs de la carte électronique de la chaudière.

4.1.3. Solution 3a : poêle à granulés + panneaux rayonnant + chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur avec appoint effet joule



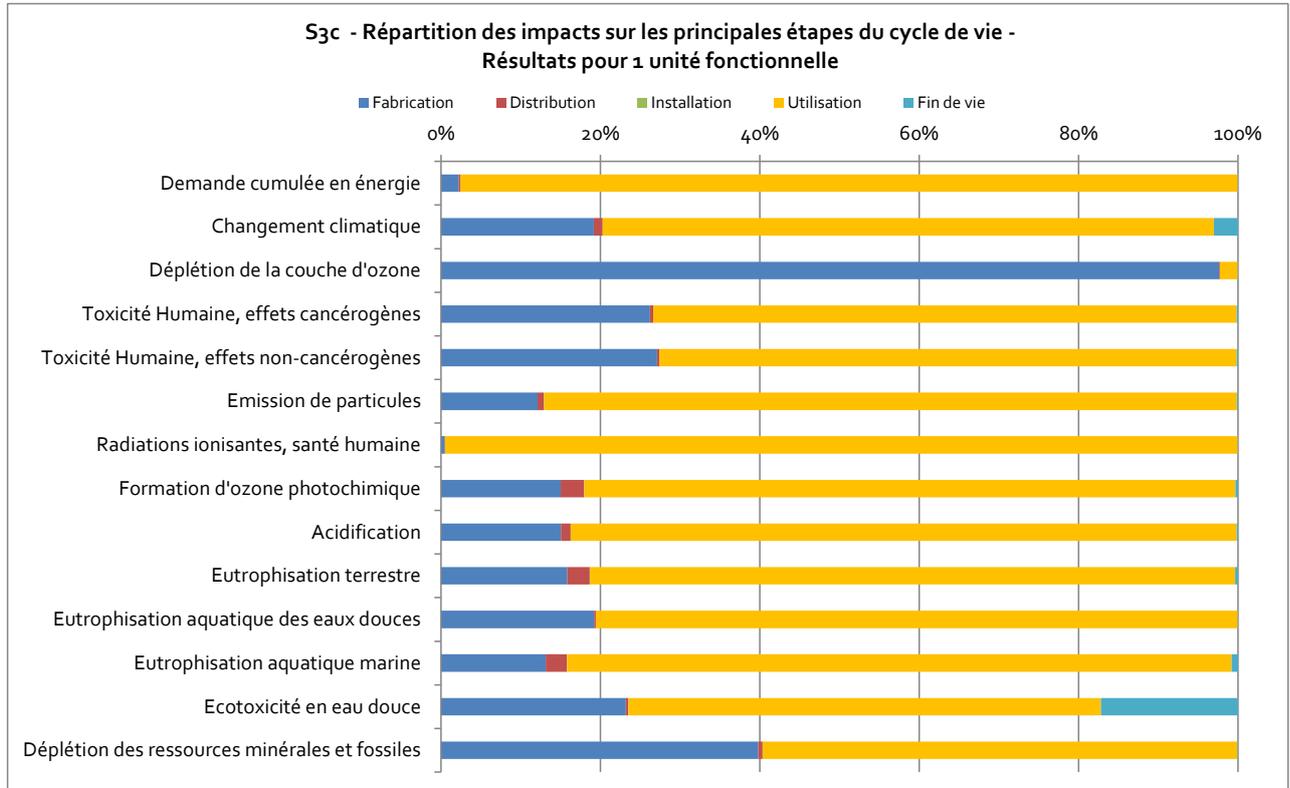
L'interprétation des résultats du bilan environnemental a abouti aux conclusions suivantes.

Les étapes de **fabrication** et d'**utilisation** des systèmes contribuent à plus de 95 % des impacts de vie de la solution S3a, excepté pour l'écotoxicité en eau douce pour laquelle la fin de vie représente 22% de l'impact, en raison de l'enfouissement du cuivre de la part non recyclée des équipements.

La phase d'**utilisation** est largement prépondérante sur les impacts de **demande cumulée en énergie**, **émissions de particules** et **radiations ionisantes**, en raison de la consommation de bois du poêle à granulés et de la consommation d'électricité des panneaux rayonnants.

La phase de **fabrication** contribue à plus de 40 % aux impacts de **déplétion de la couche d'ozone** (émissions de CFC-113 dans l'air à la production du R134a, fluide frigorigène du CET), de **toxicité humaine - effets cancérogènes** et de **déplétion des ressources abiotiques**. Pour ces deux dernières catégories, c'est la production d'acier du poêle et du CET qui ressort comme principalement responsable.

4.1.4. Solution 3c : panneaux rayonnants + chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur avec appoint effet joule



L'interprétation des résultats du bilan environnemental a abouti aux conclusions suivantes.

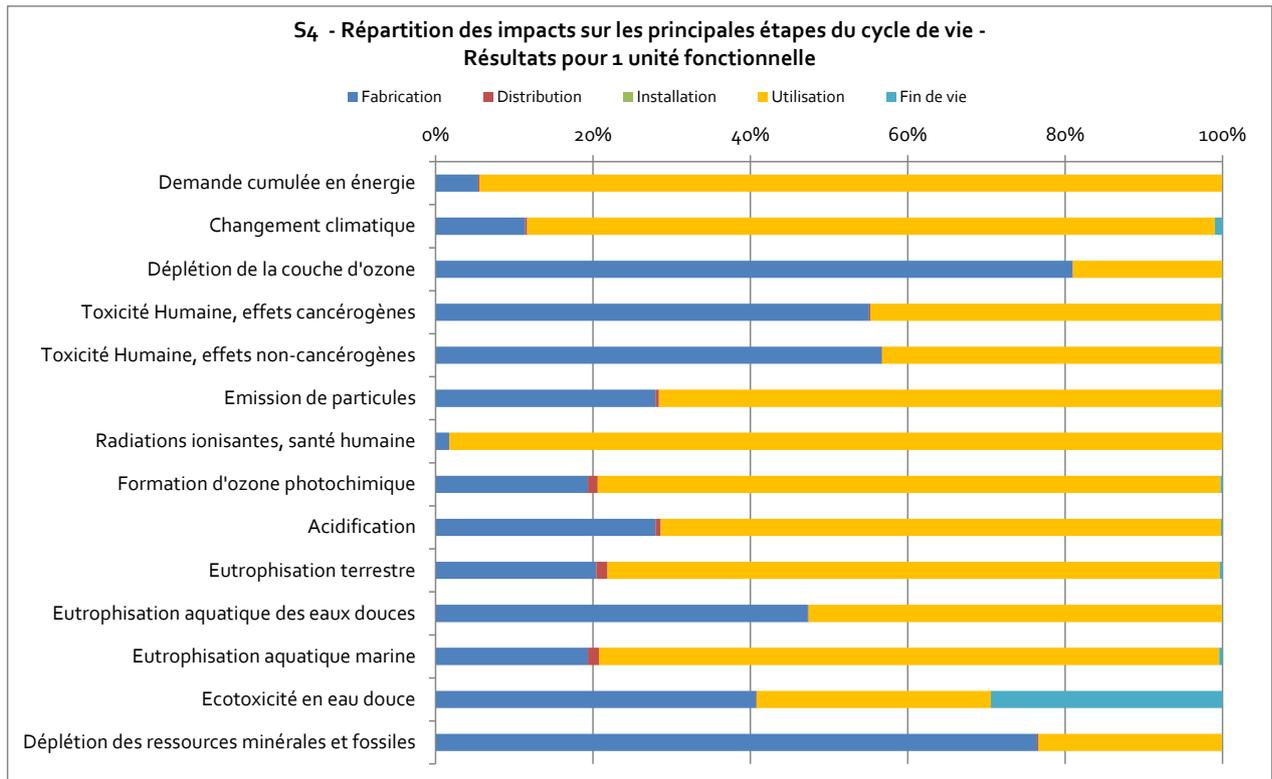
La **fabrication** et l'**utilisation** des équipements de la solution 3c **contribuent à plus de 95 % des impacts** sur le cycle de vie, sauf pour l'écotoxicité en eau douce pour laquelle l'étape de fin de vie contribue à hauteur de 22 %.

Pour la **demande cumulée en énergie** et les **radiations ionisantes (effets sur la santé humaine)**, la **phase d'utilisation est largement prépondérante** (contribution supérieure à 95 %) :

- pour la demande cumulée en énergie, cet impact s'explique par la consommation d'électricité de la PAC et du CET ;
- pour les radiations ionisantes (effets sur la santé humaine), l'impact est dû à la production d'électricité d'origine nucléaire.

C'est uniquement sur la **déplétion de la couche d'ozone** que la phase de **fabrication est majoritaire** (contribution supérieure à 50 % sur le cycle de vie). Cette contribution est due aux émissions fugitives de CFC-113 à la production de R134a, fluide frigorigène du CET.

4.1.5. Solution 4 : solution hybride {PAC air/eau ; chaudière gaz à condensation}



L'interprétation des résultats du bilan environnemental a abouti aux conclusions suivantes.

Les **phases de fabrication et d'utilisation** représentent plus de 98% des impacts sur le cycle de vie de S4 pour tous les indicateurs, excepté pour l'écotoxicité en eau douce pour laquelle la fin de vie contribue à hauteur de 30 %.

Pour la **demande cumulée en énergie** et les **radiations ionisantes (effets sur la santé humaine)**, la **phase d'utilisation est prépondérante**. Les impacts sont dus :

- à la consommation d'électricité et de gaz naturel par la solution hybride pour la demande cumulée en énergie ;
- à la consommation d'électricité d'origine nucléaire pour les radiations ionisantes (effet sur la santé humaine).

Concernant la **déplétion de la couche d'ozone**, les impacts de **toxicité humaine** et la **déplétion des ressources abiotiques**, la phase de fabrication est majoritaire (contribution supérieure à 50 % sur le cycle de vie), ces impacts provenant :

- Pour la déplétion de la couche d'ozone, des émissions fugitives de CFC-113 à la production de R134a, fluide frigorigène de la PAC hybride.
- Pour la toxicité humaine, effets cancérogènes, des émissions de Cr-VI dans les eaux souterraines liées à l'enfouissement des scories générées lors de la production de l'acier du ballon.
- Pour la toxicité humaine, effets non-cancérogènes : des émissions dans les eaux souterraines d'ions zinc et d'arsenic dues à l'enfouissement de stériles sulfurés issus de la phase de concentration du minerai de cuivre (utilisé pour le système de distribution d'ECS).
- Pour la déplétion des ressources abiotiques, de la consommation de nickel pour la production d'acier (utilisé dans le système hybride et la distribution d'ECS) et de la consommation de tantale utilisé dans les condensateurs de la carte électronique du système hybride.

4.2. Résultats obtenus pour les scénarios alternatifs et les analyses de sensibilité

4.2.1. Description des analyses de scénarios alternatifs et de sensibilité réalisées

En plus du scénario de référence décrit précédemment, cinq analyses de scénario alternatif et de sensibilité des résultats à certains paramètres-clés du modèle ACV ont été réalisées. Les scénarios et paramètres analysés sont les suivants :

1. Influence sur le bilan environnemental des solutions de l'**implantation du bâti dans des zones climatiques différentes** (zone H1b, plus froide et zone H3, plus chaude) de celle du scénario de référence, à solutions constantes (mêmes équipements que pour le scénario de référence) et à bâti constant.
2. Prise en compte d'un **mix énergétique à horizon 2030** : on s'est ici intéressé à caractériser l'influence de la variation des impacts environnementaux de la production, du transport et de la distribution du gaz et de l'électricité d'ici à 2030 sur le bilan environnemental des solutions étudiées. Parmi l'ensemble des scénarios de prospective disponibles concernant le mix électrique et gaz à horizon 2030, le scénario ADEME 2030 a été choisi pour modéliser le mix électrique et le mix gaz prospectifs 2030 utilisés pour cette analyse (données ADEME⁸ et RTE⁹). Le mix électrique prospectif se caractérise par une part de nucléaire d'environ 50% et une augmentation de la part des énergies renouvelables à environ 45%. Le mix gaz prospectif est constitué à 85% de gaz naturel et 15% de biogaz.
3. Influence de l'optimisation du couple bâti/solution énergétique sur le bilan environnemental, en considérant un **écart minimal entre Cep¹⁰ et Cep_{max}¹¹**. En effet, la recherche d'un coût d'investissement réduit peut conduire, tout en respectant les contraintes de la RT 2012, à adapter l'enveloppe et les solutions de chauffage/ECS : des systèmes de chauffage/ECS performants peuvent être intégrés à une enveloppe moins performante que pour des solutions de chauffage/ECS plus consommatrices d'énergie. L'objectif de cette analyse a donc été de faire varier le couple bâti/solution afin de se placer à un optimum économique pour identifier dans quelle mesure cette approche "optimum économique" a une influence sur la performance environnementale des systèmes : on a cherché à analyser l'influence sur le bilan environnemental du fait de se placer à un gain (écart entre Cep et Cep_{max}) minimal.
4. La **saisonnalité des usages de l'électricité** : le mix électrique moyen France utilisé dans le scénario de référence ne tient pas compte de la saisonnalité de certains usages de l'électricité, comme le chauffage domestique. Or, les filières de production d'électricité sollicitées varient selon les saisons. Cette analyse de sensibilité a pour objectif de comprendre dans quelle mesure le bilan environnemental des solutions étudiées varie si l'on tient compte de mix électriques différents selon les usages. Le mix « saisonnalisé » se caractérise par une plus forte sollicitation des filières fossiles (charbon, fioul, gaz), leur contribution s'élevant à environ 19% contre 3% pour le mix « base ». Du point de vue des usages, on considère que 100% des consommations liées au chauffage et aux auxiliaires de distribution de chauffage et 9% des consommations liées à la production d'ECS et aux auxiliaires du CESI sont saisonnalisées, le restant consommant du mix « base ». Il en résulte que les impacts du mix « chauffage » sont à minima deux fois supérieurs aux impacts du mix moyen et les impacts du mix « ECS » sont de 30 à 50% inférieurs à ceux du mix moyen.
5. La prise en compte des **benefices du recyclage et de la valorisation énergétique des matériaux** composant les appareils (dans le scénario de référence, la méthode dite « des stocks » a été considérée).

⁸ *L'exercice de prospective de l'ADEME. Vision "2030-2050"*, Document technique, ADEME, 2012

⁹ *Le bilan électrique français 2008*, Dossier de presse, RTE, 14 janvier 2009

¹⁰ Cep : consommation conventionnelle d'énergie d'un bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage artificiel des locaux, les auxiliaires de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire et de ventilation, déduction faite de l'électricité produite à demeure. Coefficient exprimé en kWh/(m².an) d'énergie primaire. Ce coefficient Cep est calculé, sur une année, en utilisant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone climatique, selon les modalités définies par la méthode de calcul Th-BCE 2012 approuvée par un arrêté du ministre chargé de la construction et de l'habitation et du ministre chargé de l'énergie.

¹¹ Cep_{max} : consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire du bâtiment

4.2.2. Interprétation des résultats obtenus pour les scénarios alternatifs et les analyses de sensibilité

Quelle est l'influence sur la performance environnementale des solutions ...

... De l'implantation du bâti dans des zones climatiques différentes (zone H1b plus froide et zone H3 plus chaude) ?

De manière générale une implantation en zone plus froide (H1b) entraîne une augmentation de la contribution relative aux impacts de la phase d'utilisation, et une implantation en zone plus chaude (H3) entraîne une diminution de la contribution relative de cette phase. Selon les catégories d'impacts, ces variations se situent dans une fourchette allant de +/- 30 % à +/- 50 %.

... De la prise en compte de mix prospectifs d'approvisionnement énergétique (électrique et gaz) à horizon 2030 ?

Les solutions ont un impact plus faible en considérant des mix énergétiques prospectifs à horizon 2030 pour toutes les catégories d'impact, à l'exception de la déplétion des ressources abiotiques pour toutes les solutions, et de l'eutrophisation terrestre et l'écotoxicité aquatique (en eau douce) pour la solution 2.

Les solutions qui consomment uniquement de l'électricité en phase d'utilisation (solution 1 et 3c) sont les plus sensibles à la prise en compte de mix prospectifs, car pour l'électricité le mix prospectif 2030 est plus contrasté par rapport au mix du scénario de référence que ça n'est le cas pour le gaz. Les écarts entre le scénario de référence et le scénario prospectif peuvent aller jusqu'à -40% pour S1 et -50% pour S3c selon les catégories d'impact, à l'exception de la déplétion des ressources abiotiques : pour cette dernière, l'écart entre le scénario de référence et le scénario prospectif s'élève à +190% pour S1 et +270% pour S3c.

... Du niveau d'isolation, modifié de manière à optimiser le couple bâti/système d'un point de vue économique (réduction de la marge entre la consommation d'énergie primaire et la consommation d'énergie primaire maximale autorisée par la RT 2012) ?

On constate que de manière générale, pour toutes les solutions, passer à un bâti mieux isolé n'entraîne pas d'augmentation significative des impacts environnementaux :

- Dans certains cas, l'impact de la production et du traitement en fin de vie de l'isolant compense juste le bénéfice environnemental dû aux économies d'énergie en phase d'utilisation (l'écart d'impact entre les deux scénarios n'est pas significatif). C'est par exemple le cas pour la solution 1 sur la déplétion de la couche d'ozone, pour la solution 2 sur les émissions de particules ou la déplétion des ressources abiotiques, pour la solution 3c sur la déplétion de la couche d'ozone, et pour la solution 4 sur la déplétion de la couche d'ozone et la déplétion des ressources abiotiques.
- Dans les autres cas, mieux isoler le bâti permet de diminuer les impacts environnementaux des solutions de chauffage/ECS (c'est le cas, par exemple, pour la demande cumulée en énergie, pour toutes les solutions). Cette diminution atteint jusqu'à 40% (cas de S2 sur la demande cumulée en énergie).

Pour toutes les solutions, on constate que le profil environnemental général n'est pas modifié.

... De la prise en compte de mix électriques « par usage » (usage chauffage et usage ECS différenciés) ?

Pour rappel, les impacts du mix « chauffage » sont a minima deux fois supérieurs aux impacts du mix moyen et les impacts du mix « ECS » sont de 30 à 50% inférieurs à ceux du mix moyen. L'analyse de sensibilité effectuée montre que la prise en compte de mix électriques différenciés par usage influence

significativement les impacts pour toutes les solutions (20% à 70% d'augmentation selon l'indicateur et la solution considérés) sauf pour S2 (chaudière gaz à condensation + CESI optimisé) dont les impacts ne varient pas significativement. Cela est dû au fait que l'électricité consommée pour le chauffage est supérieure à la consommation d'électricité pour l'ECS pour toutes les solutions sauf pour S2.

Cependant la prise en compte des mix électriques par usage ne change pas la dominance de l'étape de fabrication ou d'utilisation. Pour les solutions 1, 3a, 3c et 4, seuls les impacts de la phase d'utilisation augmentent de 1% à 70% environ selon les catégories d'impact et les solutions, les impacts des autres étapes restant constants.

... De la prise en compte des bénéfices environnementaux ou des impacts liés au recyclage et à la valorisation énergétique des matériaux des systèmes ?

La prise en compte du recyclage et de la valorisation énergétique aboutit à des bénéfices nets représentant jusqu'à 20 % des impacts du cycle de vie des solutions. Ces bénéfices sont quasi-exclusivement dus au recyclage des métaux, et donc visibles sur les indicateurs reflétant l'utilisation de métaux dans les systèmes.

4.3. Analyse de la qualité des données

La qualité des données brutes et des données d'inventaires de cycle de vie utilisées pour construire le modèle ACV conditionne fortement la robustesse des résultats et leur interprétation. Une évaluation de la qualité des données a donc été réalisée, permettant de mettre en lumière les points forts et limites du modèle.

Cette évaluation a été analysée en utilisant la méthode recommandée par le JRC dans l'ILCD Handbook¹² et adaptée aux besoins de l'étude. Un ensemble de critères recouvrant l'ensemble des aspects influençant le niveau de qualité des données a été analysé et mis en regard de leur niveau de contribution aux impacts : en effet, plus une donnée intervient dans un procédé contribuant fortement aux impacts, plus son niveau de qualité est important. Les critères de qualité des données brutes sont la représentativité temporelle, technologique et géographique, la précision et la complétude. Les critères de qualité des données d'inventaire évalués dans le cadre de cette étude sont la représentativité temporelle, technologique et géographique.

5. Limites

Concernant la **qualité des données**, la représentativité technologique des éléments suivants pourrait être améliorée :

- Les facteurs d'émission du poêle à granulés, de la chaudière gaz condensation et du système hybride sont des données génériques non spécifiques aux technologies considérées, ici les plus récents appareils de chauffage pour maison individuelle.
- Les données utilisées pour modéliser la production du R410a (fluide frigorigène du CET) sont représentatives de la production d'un autre fluide.
- Les données d'assemblage et de mise en forme des matériaux ne sont pas spécifiques aux systèmes étudiés (à l'exception des données d'assemblage pour le poêle à granulés et la chaudière hybride). Cela étant, ces procédés contribuent peu aux impacts du cycle de vie des systèmes étudiés.

Le **cadre de modélisation** retenu pour cette étude comporte également certaines limites :

¹² L'*International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* est un guide des bonnes pratiques pour l'application des normes ISO régissant la réalisation d'ACV rédigé par le Joint Research Centre de la Commission Européenne.

- Concernant le type de modèle d'ACV utilisé dans le cadre de cette étude (ACV dite « attributionnelle »¹³), il est important de rappeler que, dans la mesure où les systèmes étudiés peuvent être amenés à être déployés à grande échelle au niveau national, une ACV conséquentielle¹⁴ apporterait une information pertinente sur les enjeux environnementaux de ces systèmes en tenant compte des conséquences de ce déploiement sur les procédés d'arrière-plan, via les mécanismes économiques de substitution d'approvisionnement ou d'usage. Par exemple, le déploiement de technologies telles que les poêles à granulés pourrait modifier substantiellement les filières d'approvisionnement en combustible bois, et par conséquent les impacts environnementaux associés. C'est aussi le cas pour les filières énergétiques (électricité et gaz naturel), dont le développement des usages pourrait solliciter d'autres filières d'approvisionnement que celles utilisées pour l'ACV attributionnelle.
- Contrairement aux autres solutions étudiées, les résultats des calculs thermiques pour la solution « 100% effet Joule » ne sont pas conformes à la RT 2012 dans le bâti commun à toutes les solutions sur le critère du $C_{ep,max}$. Cependant, dans le cadre limité de ce projet, et ce dernier ayant un caractère exploratoire, la solution 3c a été analysée en conservant le bâti commun.
- Les scénarios de chauffage et de consommation (et donc production) d'ECS sont les scénarios conventionnels de la réglementation thermique (RT 2012). Ces scénarios sont théoriques et ne reflètent pas les usages particuliers de certains utilisateurs (ex : maintien de la température du domicile à 21°C même en cas d'absence).
- En se restreignant aux systèmes de chauffage/ECS, on ne peut pas analyser le bénéfice apporté par une modification du bâti, comme une modification de l'inertie thermique via, par exemple, l'utilisation de bois d'œuvre, ou une variation des apports solaires via un taux de vitrage différent. Cette limite est également valable pour l'étude de l'implantation dans une zone climatique différente : le bâti devrait être adapté à chaque zone climatique étudiée.

6. Perspectives

Les axes de travail futur suivants peuvent être dégagés :

- **Amélioration de la qualité du jeu de données** : il semble prioritaire de travailler sur les facteurs d'émission à la combustion du poêle à granulés et des chaudières gaz.
- **Analyser l'évolution des résultats avec la prise en compte de scénarios d'usage plus proches de la réalité** : par exemple, comment évoluent les résultats lorsque l'on passe de 16°C à 19°C hors période d'occupation de la maison ? Comment évoluent-ils lorsque l'on passe à 21°C en période d'occupation ? Cela permettrait de dégager des chiffres concrets et actualisés pour la diffusion de bonnes pratiques d'utilisation de chauffage et d'ECS. Dans le même ordre d'idée, les variations spatiales et temporelles des appareils prises en compte dans les calculs RT 2012 étant conventionnelles, il serait intéressant d'étudier l'évolution des résultats d'impact lorsque ces paramètres varient, en analyse de sensibilité.
- **Etudier l'influence des caractéristiques principales des bâtiments (inertie thermique, solarisation, ...) sur la performance des solutions de chauffage et d'ECS** et plus globalement sur la performance environnementale à l'échelle du bâtiment entier.
- **Etudier l'influence sur les résultats de la prise en compte d'un modèle ACV de type conséquentiel** afin de tenir compte du fait qu'à terme, les technologies étudiées peuvent être déployées de manière assez large à l'échelle nationale pour influencer les filières d'approvisionnement énergétique, par exemple, et donc l'impact environnemental des biens et services fournis par ces filières. En effet, les filières d'approvisionnement énergétique de l'électricité et du bois peuvent varier fortement entre une méthodologie « attributionnelle » et « conséquentielle ». L'approche ACV de type « conséquentielle » est intéressante pour rendre compte des impacts environnementaux liés au déploiement à grande échelle de solutions de chauffage et ECS, par exemple suite à une décision politique ou réglementaire. La méthodologie d'ACV « conséquentielle » permettrait donc d'analyser les conséquences à moyen terme de choix

¹³ Analyse de Cycle de Vie (ACV) attributionnelle : l'ACV attributionnelle consiste à attribuer à un système de produit les impacts qui sont directement liés à son cycle de vie, ramenés à l'unité fonctionnelle.

¹⁴ ACV conséquentielle : l'ACV conséquentielle consiste à évaluer les impacts d'une décision politique sur l'ensemble des processus affectés par cette décision.

faits aujourd'hui et pourrait éclairer les décisions prises dans le cadre de l'élaboration et de l'application des futures réglementations.

- **Etudier les bénéfices environnementaux apportés par la maintenance des systèmes**, en comparant le scénario étudié dans le cadre de ce projet (maintenance annuelle permettant d'assurer le maintien de la performance des systèmes sur toute la durée d'utilisation) à un scénario sans maintenance annuelle, entraînant une dégradation progressive de la performance des systèmes.
- **Analyser la sensibilité des résultats d'impact à la sélection de méthodes de caractérisation différentes** : dans le cadre de cette étude, il a été choisi de retenir les méthodes de caractérisation préconisées par le JRC¹⁵. D'autres méthodes, caractérisant d'autres mécanismes d'impact, pourraient aboutir à des résultats différents. C'est particulièrement le cas de la déplétion des ressources abiotiques, pour laquelle il existe différentes méthodes ayant des perspectives différentes sur le problème et aboutissant de ce fait à des résultats différents.
- **Intégrer un ou plusieurs indicateurs « déchets »** : il serait par exemple pertinent d'étudier la quantité de déchets non recyclés (enfouissement, incinération) produite par chaque système, ainsi que la ventilation sur les différentes catégories de déchets : déchets radioactifs, dangereux, non dangereux et inertes.
- **Analyser un ou plusieurs indicateurs de dommage** : en effet les indicateurs de dommage abordent l'enjeu sociétal d'atteinte des aires de protection que sont les écosystèmes, les ressources et la santé humaine, et lèvent en partie la limite d'interprétation et d'utilisation des résultats d'ACV multicritères.
- **Réaliser une analyse d'incertitude globale** : cela permettrait de compléter l'analyse de la qualité des données et fournirait une information utile sur la robustesse globale des résultats.

7. Conclusion générale

L'amélioration des performances énergétiques mises en œuvre en France depuis 40 ans après le premier choc pétrolier a permis de modifier considérablement la conception et les modes d'utilisation des équipements de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Le niveau des performances atteint est maintenant très élevé, allant jusqu'à permettre la réalisation de bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire produisant plus d'énergie qu'ils n'en consomment¹⁶.

Cependant, les améliorations successives des dernières décennies ont été effectuées sous l'angle de l'optimisation énergétique et non sous l'angle de l'optimisation environnementale (multicritère).

Un nouveau chantier s'est ouvert dans le secteur du bâtiment visant à faire « converger », la haute performance énergétique et la haute performance environnementale. L'analyse du cycle de vie constitue l'outil essentiel pour ces optimisations.

Cette étude entre dans ce cadre et vise à contribuer à cet objectif de convergence à terme.

¹⁵ Le Joint Research Centre (JRC) est le centre de recherche scientifique et technique de la Commission Européenne.

¹⁶ Il n'existe pas de définition officielle par les Pouvoirs Publics du concept de bâtiment à énergie positive. La définition proposée ici est donc celle qui est communément admise à l'heure actuelle.

Cette page est laissée intentionnellement blanche.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr