

Impacts environnementaux des énergies

septembre 2013

Auteur : Manfred AMOUREUX

Contact : <http://manfred.amoureux.free.fr/>

1 GÉNÉRALITÉS

1.1 NOTION D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Les installations de production d'énergie ont des impacts environnementaux directs, liés à l'activité sur le site de production, mais aussi indirects si l'on considère l'ensemble du cycle de vie des installations (ex : extraction minière de terres rares ou de métaux, recyclage en fin de vie, ..).

Les impacts environnementaux peuvent se classer suivant différentes catégories :

- Les **émissions de gaz à effet de serre** (GES) qui dans la production d'énergie sont essentiellement CO₂, CH₄, NO_x, exprimées en équivalent gramme de CO₂.
- Les **impacts directs sur les écosystèmes** : dégâts sur la faune et la flore¹, occupation ou contamination des terrains, réversibles ou non², rejets et contaminations toxiques des sols, nappes phréatiques ou de l'atmosphère, effet d'eutrophisation, réduction de la couche d'ozone, turbinage des eaux.
- **L'utilisation des ressources naturelles**, renouvelables ou non, de matières premières ou d'énergie (dont eau, métaux, occupation des terres, consommation de sources d'énergie non-renouvelable), en prenant garde à la pertinence des comparaisons³.
- Les **impacts sur la santé humaine** liés essentiellement aux contaminations de l'air et de l'eau, mais aussi les rayonnements ionisants.
- Les **nuisances acoustiques, visuelles, olfactives**, lumineuses, électromagnétiques.

Notons aussi que le terme *impact* recouvre toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique⁴. Par ailleurs, l'impact se définit aussi en fonction du milieu récepteur et de sa sensibilité⁵, et qu'il est nécessaire de différencier les situations de routine et accidentelles⁶, en se basant sur des scénarios.

Concernant l'utilisation des ressources naturelles, il est intéressant de considérer en particulier le **coût d'investissement énergétique** (CIE) de l'installation, qui rapporte l'énergie qu'il aura fallu investir dans celle-ci⁷ à l'énergie totale qu'elle produira durant son cycle de vie, exprimé comme un pourcentage de celle-ci.

Les émissions de GES et les CIE sont les seuls indicateurs chiffrés pour lesquels on dispose de valeurs pour quasiment toutes les technologies – malgré des variations parfois importantes d'un cas étudié à un autre. Néanmoins, ils sont insuffisants comme éléments de décision car la majorité des impacts environnementaux ne sont pas couverts par ces deux seuls indicateurs et sont de natures difficilement comparables d'une technologie à une autre.

¹ Morts d'animaux, destructions/perturbations des habitats, ruptures de continuité des écosystèmes, etc ..

² Ex : la perte de terres agricoles, qui peut être réversible ou non suivant le type d'installation et les méthodes constructives employées

³ Certaines ressources sont renouvelables et/ou recyclables, d'autres non, et ce avec des différences suivant les usages.

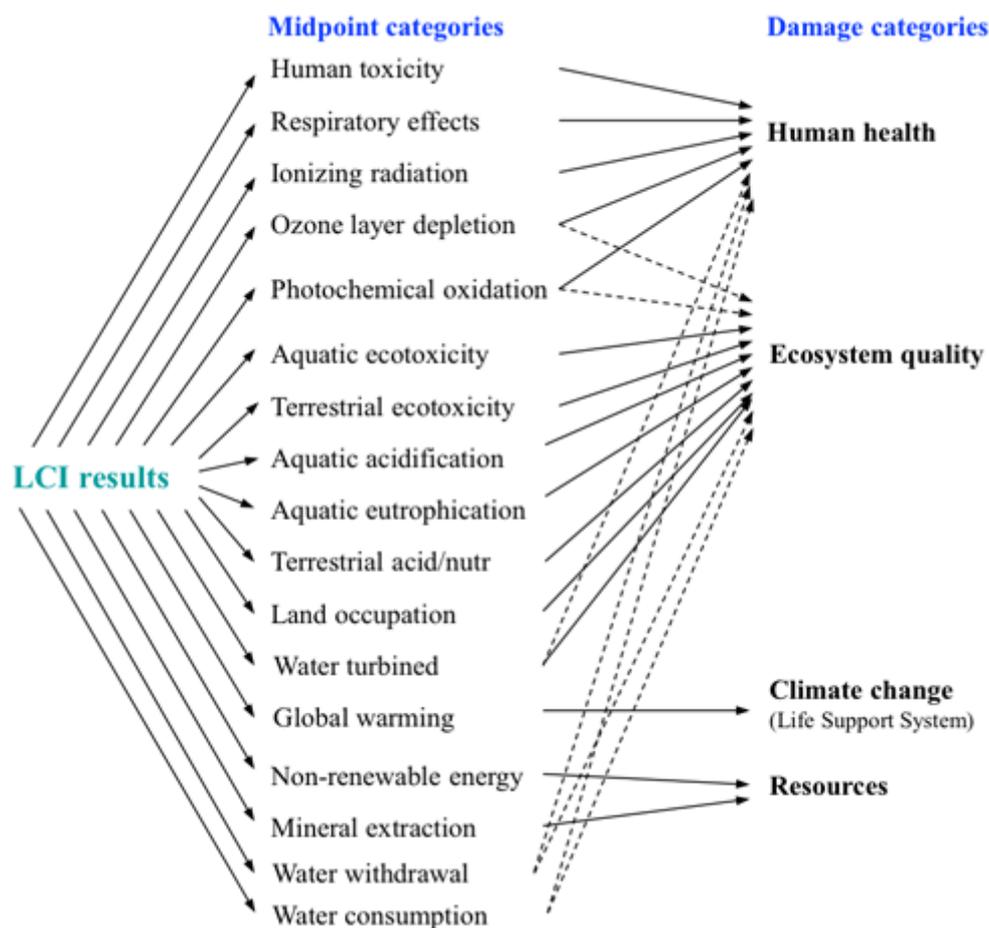
⁴ Par exemples, certaines technologies peuvent avoir un effet de « piège de carbone » pour les GES ou bien avoir un impact bénéfique sur les écosystèmes.

⁵ Ex : le bruit émis par une installation sera perceptible ou non en fonction du bruit ambiant.

⁶ Exemple par excellence : les installations nucléaires.

⁷ Pour sa fabrication, son exploitation (dont l'approvisionnement en combustibles et fournitures) et son démantèlement en fin de vie.

1.2 LIMITATIONS DES ANALYSES DE CYCLE DE VIE (ACV) ET DES INDICATEURS CHIFFRÉS



Classification des impacts environnementaux suivants la méthode d'analyse de cycle de vie IMPACT 2002+

Les méthodes d'ACV tentent de prendre en compte les principaux impacts environnementaux (voir graphe ci-dessus). Toutefois, elles ont plusieurs limitations principales :

- Les types d'impacts retenus ne peuvent qu'être limités en nombre et peuvent donc laisser de côté certains impacts, qui si pour la technologie étudiée, a une importance relative non-négligeable. C'est par exemple le cas des nuisances (acoustiques, visuelles, ..) dans l'exemple de la méthode IMPACT 2002 ci-dessus.
- Même différents types d'impacts pris en compte (« midpoint catégories ») sont agrégés ensemble dans un nombre plus réduit d'indicateurs (« damage categories »), ce qui ne permet pas de les distinguer dans les résultats finaux.
- L'appréciation des impacts par une unique valeur chiffrée (« midpoint catégories » ou « damage categories ») ne permet pas d'analyse qualitative⁸.
- Ces méthodes ne permettent pas toujours de prendre en compte le milieu récepteur et les stratégies de contention et d'atténuation des impacts qui peuvent être mises en place.

⁸ Par exemple, pour la toxicité aquatique, il est légitime de se demander quelles sont les substances toxiques émises exactes, pour quels organismes des écosystèmes touchés sont-elles toxiques, quels sont les répercussions indirectes sur les autres organismes des écosystèmes, quelle est la latence de cette toxicité, sa portée géographique, comment la traiter, etc ... A ce titre, l'exemple des émissions de GES est un classique : les différents GES ont en effet des pouvoirs d'effet de serre mais aussi des durées de vie différentes.

1.3 DISTINCTION ENTRE PRODUCTION D'ÉNERGIE ET FOURNITURE D'UN SERVICE ÉNERGÉTIQUE

Pour effectuer une comparaison pertinente, il faut considérer le même service énergétique final, et non pas seulement une production/livraison de kWh. En effet, les différents modes de production impliquent des impacts indirects différents liés à la transformation de l'énergie vers le service final attendu⁹.

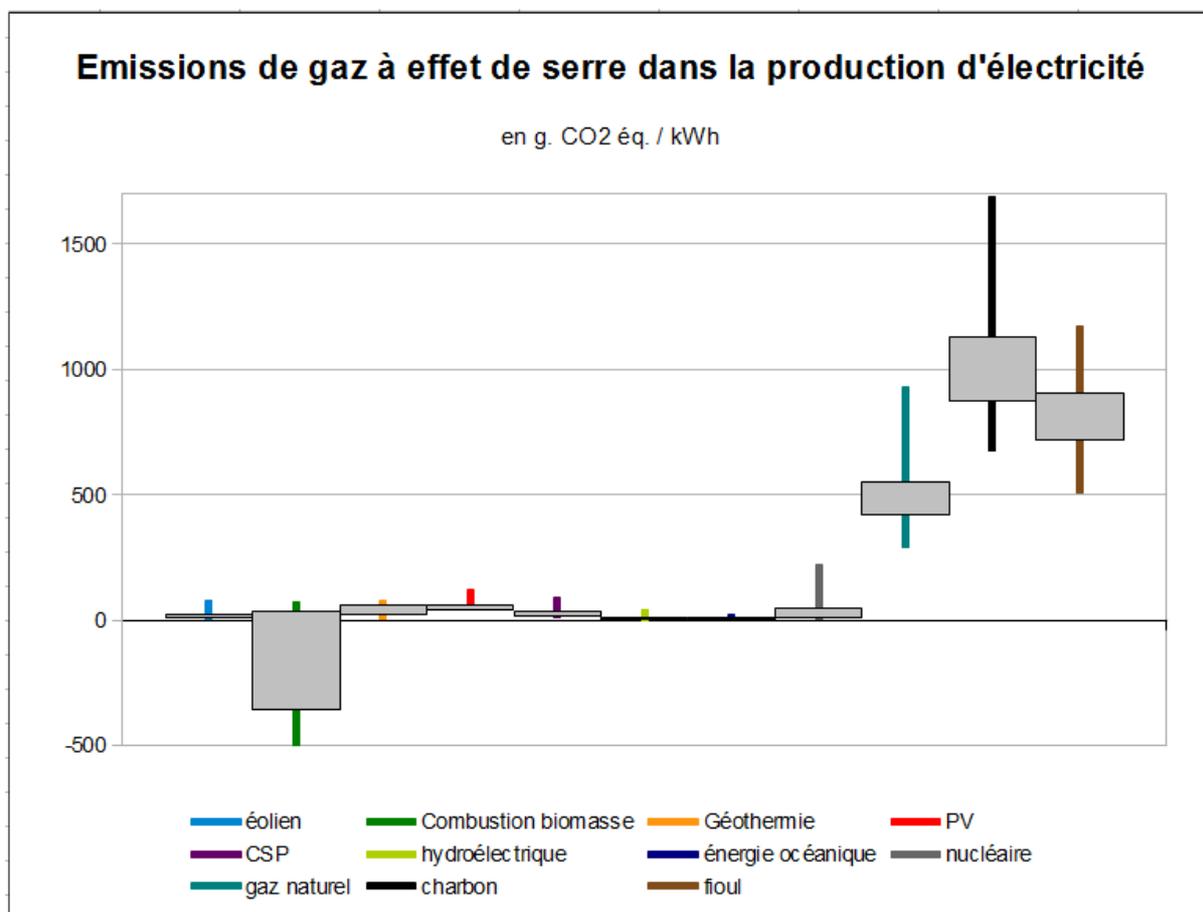
Dans le présent document, nous n'avons pas pu prendre en compte pour l'électricité les impacts liés à l'approvisionnement via les réseaux de transport et distribution, ceux-ci étant en effet dépendants de l'ensemble du système électrique et non pas de la technologie étudiée. Par contre, pour la chaleur, on compare un kWh de chaleur fournie par l'installation.

2 PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

2.1 COMPARAISONS

2.1.1 Émissions de gaz à effets de serre¹⁰

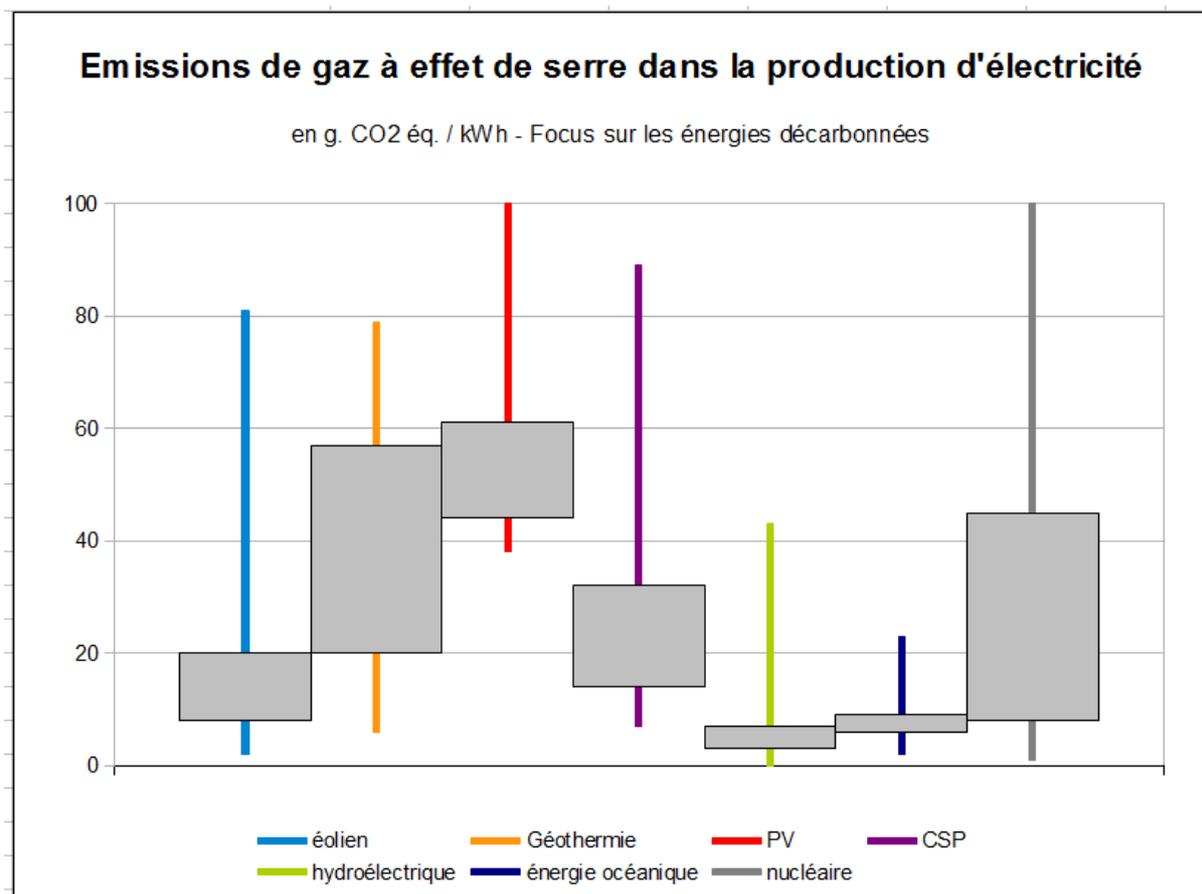
Les lignes verticales colorées représentent la fourchette complète des différentes estimations. Les blocs gris, la moitié médiane des estimations (2^e et 3^e quarts).



En zoomant sur les « énergies décarbonées » :

⁹ Exemple : les dégagements atmosphériques des combustibles pour chauffer, qui ne sont pas les mêmes pour un kWh de gaz naturel, de charbon ou de bois.

¹⁰ Sources : GIEC – *Special Report on Renewable Energy sources and climate mitigation* – Annex II (<http://srren.org>), sauf pour le photovoltaïque : études ADEME ESPACE-PV (2007-2009, <http://www.espace-pv.org/>), complétée par *Comparaison des options de production d'électricité avec ACV* – Luc Gagnon (2003)



A noter que pour le nucléaire, plus de 60 % des émissions de GES sont liés à l'approvisionnement en combustible¹¹.

D'une manière générale, on est dans un ordre de grandeur 10 à 50 fois moindre qu'avec les sources fossiles. On peut considérer que, du point de vue des émissions de GE, **l'enjeu en France d'utiliser une ou l'autre des ces sources d'énergie « décarbonnée » est de d'importance mineure face aux contributions des transports, de l'agriculture et du secteur résidentiel.**

Il est à noter que pour les EnR, une partie importante des émissions de GES sont liées au mix d'approvisionnement énergétique utilisé pour la fabrication des installations. On peut donc supposer que l'augmentation du taux de pénétration des EnR dans le mix énergétique aura un effet de « cercle vertueux » : plus il y aura d'EnR installées, plus les nouvelles installations EnR auront des émissions faibles.

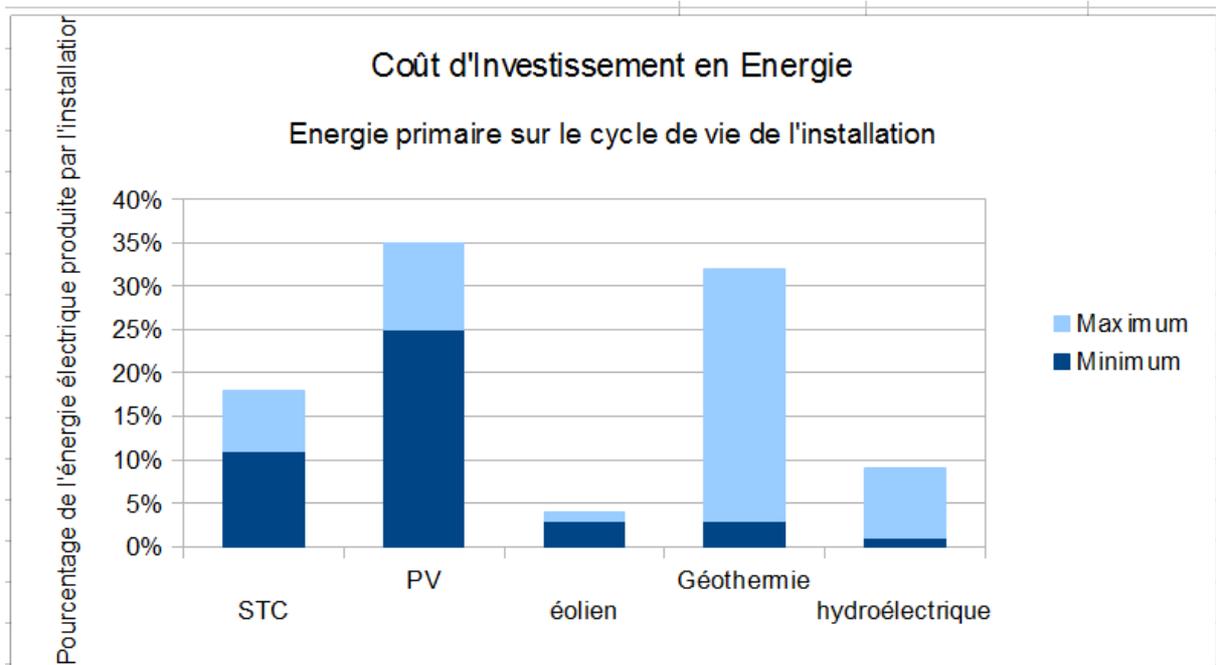
2.1.2 Coût d'investissement énergétique¹⁰

Le CIE est ici la fraction d'énergie primaire¹² investie rapportée à la production d'électricité.

Pour les énergies renouvelables :

¹¹ Source : *Life-cycle energy cost of wind, gas turbines and fission* - White, Radcliffe and Kulcinski (2010) et *Birth to death analysis of the payback ratio and CO2 gas emissions rates from Coal, Fission, Wind and Fusion* - White and Kulcinski (1998, rev. 1999)

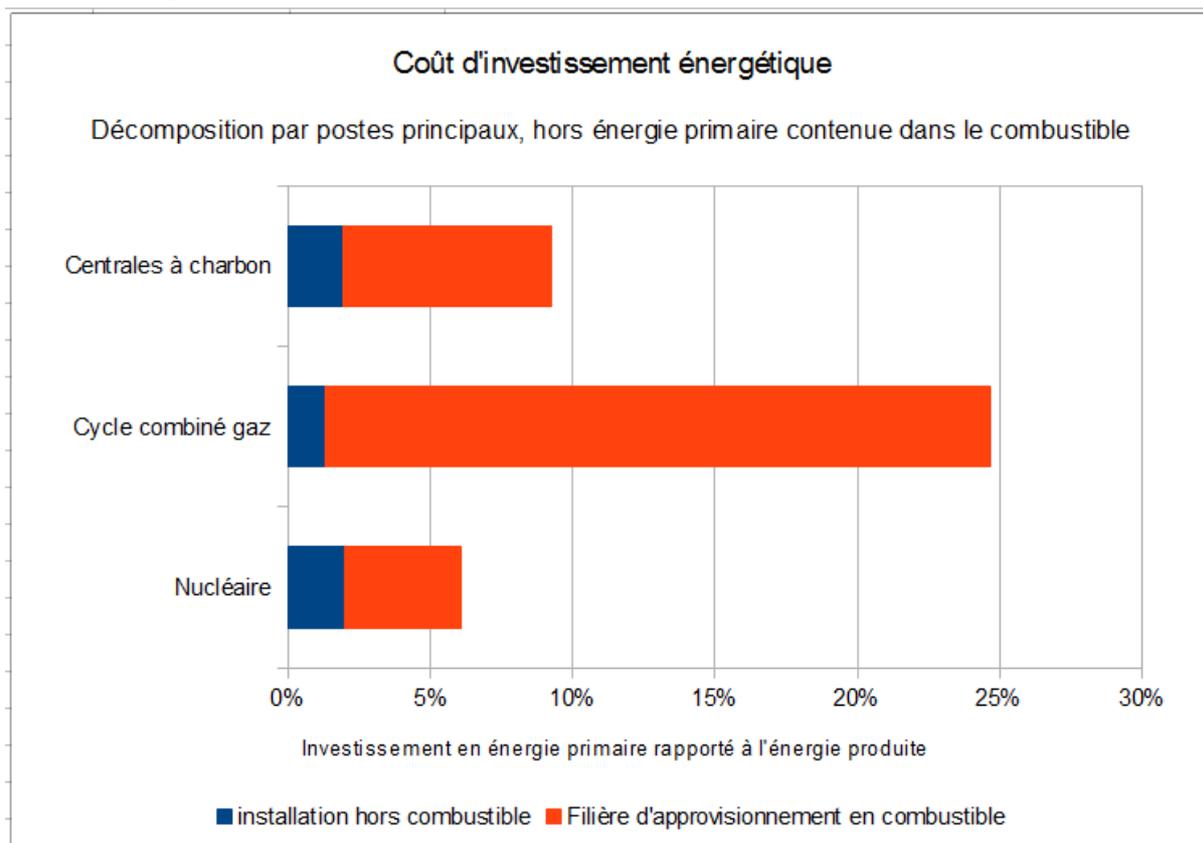
¹² L'énergie renouvelable primaire nécessaire à l'alimentation des installations (soleil, vent, hydroélectricité) n'est pas prise en compte : étant en effet *captée* par l'installation, il ne s'agit pas d'un *investissement*.



Note : d'importantes réductions du CIE sont attendues pour le photovoltaïque dans les 15 ans à venir (voir aussi 2.2.1), qui devraient s'accompagner de réductions des émissions de GES.

Quand on parle *d'investissement* énergétique, pour les modes de production ayant besoin d'un combustible (fossiles, nucléaire), il faut prendre en compte la filière d'approvisionnement de celui-ci. On constate alors qu'elle représente la majeure partie du CIE, y-compris pour le nucléaire.

Pour les énergies conventionnelles ¹³ :



Les CIE du charbon et du nucléaire sont donc comparables à ceux de l'éolien, mais inférieurs à ceux du PV *actuel*. Pour le gaz, on notera le poids très important de l'approvisionnement, lié essentiellement à la production et la transmission, qui tous les deux requièrent des efforts de pompages / compression.

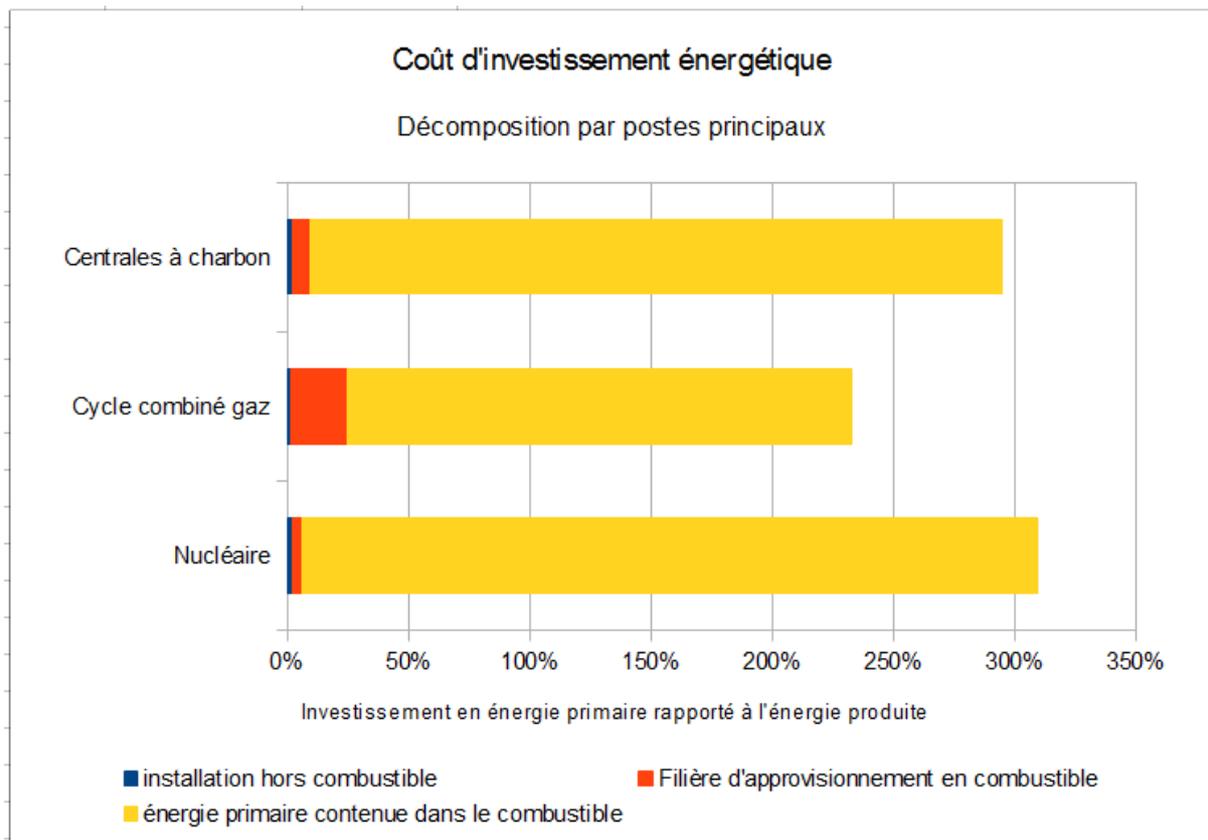
On peut parfois lire des raisonnements en « substitution électrique » : toutes les technologies nécessitent un investissement énergétique sous forme de combustibles utilisés dans le cycle de vie, ne serait-ce que la fabrication des équipements, parfois qualifié « d'énergie primaire non-renouvelable ». On comptabilise alors comme investissement énergétique, non pas la quantité d'énergie primaire, mais la quantité d'électricité qu'on pourrait produire avec cette énergie primaire, puisque le but de l'installation est de produire de l'électricité. Les chiffres obtenus sont alors 3 fois moindres¹⁴.

Cette méthode n'a pas été retenue ici. Il faut alors, pour comparer l'investissement énergétique des technologies renouvelables à celles des technologies conventionnelles, aussi prendre en compte l'énergie primaire contenue dans le combustible. Celle-ci représente alors de loin la majeure partie de l'énergie primaire utilisée et les chiffres obtenus sont beaucoup plus haut que la fourchette 5%-35 % des EnR. Vocablement parlant, cette énergie est en fait *consommée* plutôt qu'*investie*. La logique de ce raisonnement est que cette quantité d'énergie primaire non-renouvelable est disponible en quantité finie et pourrait être utilisée ailleurs (par exemple pour du chauffage). C'est vrai pour les combustibles fossiles, mais pas pour le nucléaire¹⁵.

¹³ Source : *Life-cycle energy cost of wind, gas turbines and fission* - White, Radcliffe and Kulcinski (2010) ; *Birth to death analysis of the payback ratio and CO2 gas emissions rates from Coal, Fission, Wind and Fusion* - White and Kulcinski (1998, rev. 1999) ; *Net energy payback and CO2 emissions for He-3 fusion and Wind electrical power plants* - Scott White (1998) ; *Life-Cycle Energy Cost and Greenhouse Gas Emissions for Gas Turbine Power* - Meier et Kulcinski (2000).

¹⁴ Correspondant à un rendement moyen de 33 % de conversion de cette énergie primaire en électricité, ce qui correspond à peu près aux chiffres pour le charbon (cf. graphe suivant).

¹⁵ À part pour faire des bombes atomiques, ce qui n'est pas une grosse perte pour l'humanité.



On constate alors que les ordres de grandeur sont 7 à 70 fois plus importants que pour les technologies des EnR.

2.1.3 Consommation d'eau en exploitation¹⁶

Les productions d'électricité par éolien, photovoltaïque, énergies marines, hydroélectricité et turbines à gaz naturel consomment très peu d'eau durant la phase d'exploitation.

Pour les technologies à base de production de vapeur (nucléaire, charbon, cycles combinés gaz, solaire thermodynamique, biomasse), la consommation varie suivant le type de refroidissement (cycle ouvert, cycle fermé avec refroidissement « sec » ou refroidissement « humide ») et peut être importante (> 3 Litres / kWh produit pour une turbine à vapeur en cycle ouvert).

2.2 PHOTOVOLTAÏQUE

2.2.1 Production des équipements

La production des modules PV reste fortement consommatrice d'énergie, même si le bilan global du cycle de vie reste positif. Cette consommation d'énergie étant un important poste de dépenses des fabricants, une partie de leur recherche vise à développer des procédés moins énergivores¹⁷. Avec ces progrès, la part relative des autres composants (onduleurs, câbles ..) dans l'impact environnemental devient plus importante.

Le recyclage des panneaux solaires est devenu une obligation et la filière s'organise en ce sens¹⁸.

¹⁶ Source : *Life Cycle Assessment of a Parabolic Trough CSP Plant and the Impacts of Key Design Alternatives* - NREL (2011)

¹⁷ Par exemple, pour le multicristallin, entre 2 études sous convention ARMINES-ADEME en 2001 et 2007, le CIE est passé de 46 % à 35 % (en énergie primaire).

¹⁸ Organisations CERES et PV-Cycle notamment.

2.2.2 Intégré au bâti¹⁹

L'appréciation esthétique est une notion subjective. Par contre, l'intégration visuelle à architecture et au paysage doit se faire en France suivant des règles. Les Architectes de France sont consultés en cas de proximité d'un ouvrage classé²⁰. Les travaux sont soumis a minima à déclaration préalable de travaux, ce qui laisse la possibilité aux riverains d'un recours.

Les méthodes d'intégration au bâti permettant de bénéficier des tarifs bonifiés²¹ présentent toutes un impact environnemental faible comparé à la fabrication des composants électriques²².

A noter que la simple surimposition des modules à la toiture est la méthode présentant les moindres impacts environnementaux.

Le fait de stocker l'électricité produite par une installation PV dans des batteries pour l'autoconsommer plus tard augmente le CIE de l'ordre de 8 à 20 % et les émissions de GES de 20 à 80 g éq. CO₂/ kWh²³. L'autoconsommation directe (sans stockage intermédiaire) est donc à favoriser.

2.2.3 Centrales au sol

D'une manière générale, les centrales au sol ont un impact environnemental supérieur à celui des installations intégrées au bâti²⁴.

Les **centrales au sol** peuvent entrer en compétition avec l'agriculture et l'élevage pour l'**utilisation des terres agricoles** ; c'est pourquoi en France cette solution est défavorisée au profit de l'utilisation des friches industrielles. Toutefois, des méthodes ont montré permettre avec succès de **combiner sur un même terrain photovoltaïque et activité agricole** (pâturage, maraîchage, serres ...). En outre, en pratique, les autres causes de réduction de la surface agricole sont nettement prépondérantes : 500 MW de centrales au sol représente l'équivalent de 1 % de la surface agricole perdue chaque année pour cause d'urbanisation, d'abandon de l'agriculture, reboisement, achat de terrains pour résidences privées ou infrastructures²⁵... Si des méthodes constructives adéquates sont choisies et mises en œuvre correctement, le terrain pourra être rendu à un son usage agricole d'origine après le démantèlement de la centrale.

2.3 ÉOLIEN

2.3.1 Terrestre

Tous les aspects ci-dessous font partie de l'étude d'impact environnemental (EIE) préalable à la demande d'un permis de construire.

La **nuisance acoustique** d'un parc éolien pour les riverains est possible dans certaines conditions de distance (< 500m) et de vent²⁶. Les fabricants d'éoliennes ont fait des progrès pour limiter les émissions sonores de leurs turbines²⁷ et les modèles récents sont plus silencieux que ceux installés il y a 10 ans.

Concernant les **impacts sur la faune volante**, on constate un taux d'évitement des éoliennes élevé. Les oiseaux sont moins affectés que les chauves-souris, qui n'évitent les éoliennes qu'au dernier

¹⁹ Source : projet ESPACE de l'ADEME <http://www.espace-pv.org/>

²⁰ Jusqu'à 500 m de distance.

²¹ Tarifs d'intégration « simplifiée » ou non.

²² Modules, onduleurs, câbles, etc ..

²³ Calcul simplifié effectué à partir de *A Review of Battery LCA - State of Knowledge and Critical Needs* - Sullivan et Gaines - Argonne Laboratory (2010), en ne prenant en compte que les émissions de CO₂ et CH₄ (pas les autres GES).

²⁴ En particulier, à cause des structures de support, généralement en aluminium, très énergivore à la production, et de l'occupation des terrains.

²⁵ Pour comparaison, avec 1220 ha, la surface du projet d'aéroport de Notre-Dame-des-Landes correspond à 500 MW de centrales photovoltaïques au sol.

²⁶ Si le vent est faible, les éoliennes sont à l'arrêt et ne font pas de bruit. Si le vent est fort, il couvre le bruit des éoliennes. Celles-ci sont donc éventuellement audibles lorsque le vent est modéré.

²⁷ Notamment dans l'isolation phonique de la nacelle, le design aérodynamique des pales (jusqu'à -12 dB) et la capacité des éoliennes à fonctionner à vitesse variable et donc à plus faible vitesse par vents modérés.

moment sont plus souvent blessées ou tuées par barotraumatisme. Cela a mené des entreprises à développer des systèmes de prédiction et de détection de la présence de chauves-souris sur les parcs éoliens, afin d'arrêter alors les éoliennes²⁸. Les premiers résultats sont très encourageants et on doit pouvoir réduire à terme la mortalité de plus de 90 %.

Les études paysagères qui font partie de l'EIE visent à réduire l'**impact visuel** des éoliennes – qui est corrélé à la nuisance sonore²⁹ –, en jouant sur la disposition des éoliennes par rapport au point de vue des riverains. La perception de la présence des éoliennes peut varier beaucoup suivant que l'observateur est partie prenante au projet (éolien participatif) ou le vit comme lui étant imposé de l'extérieur, par une entreprise en recherche de profit.

L'emprise au sol reste réduite³⁰ et les parcs éoliens cohabitent très bien avec l'agriculture plein champ.

De par leur mouvement, les éoliennes génèrent sur les radars un bruit et une signature disproportionnée à leur taille. Divers projets sont en cours de développement pour les réduire³¹.

2.3.2 Marin (posé)³²

Tous les aspects ci-dessous font aussi partie de l'EIE préalable à la demande d'un permis de construire.

Comparé à l'éolien terrestre, l'éloignement entre les installations et les côtes fait que les impacts visuels et acoustiques sont des enjeux plus réduits pour les riverains.

L'**impact sur les écosystèmes** fait l'objet de plus d'attention en particulier celui du remaniement des fonds marins, lié aux travaux des fondations, dont l'ampleur dépend des techniques utilisées, et dont l'impact dépend de la sensibilité des peuplements. Les études en cours sur les parcs existants dans les autres pays semblent indiquer que les « récifs » créés par la présence des éoliennes seraient favorables pour certains peuplements, qui re-colonisent la zone une fois les travaux finis : organismes benthiques, mollusques, mammifères marins, poissons. Les oiseaux, suivant les espèces, évitent la zone, la fréquentent plus qu'auparavant (s'ils peuvent se reposer sur les éoliennes et se nourrir à proximité) ou bien ne semblent pas affectés.

L'eau porte le **bruit** de manière bien plus efficace que l'air. Pendant les travaux, suivant les techniques³³ on peut craindre des dégâts sur les espèces locales. Des techniques de contention sont en expérimentation³⁴. Le bruit ne semble pas poser de problèmes durant la phase d'exploitation des parcs.

Les champs électromagnétiques dûs aux câbles sous-marins semblent affecter la faune sous-marine, mais il est pour l'instant impossible de conclure de manière positive ou négative en l'état des connaissances.

La cohabitation avec les autres usages des espaces maritimes, dont la pêche, peut être un problème, spécialement durant la phase de travaux : au-delà de leur emprise « au sol », la navigation impose le respect de distances de sécurité pour les navires, ce qui par ailleurs crée un effet de « réserve naturelle » pour la faune et la flore sur le site en phase d'exploitation.

²⁸ Exemple : le système *Chirotech* de l'entreprise Biotope. Les chauve-souris ne sortent en effet chasser que dans des conditions spécifiques d'heure de la nuit et de climat.

²⁹ On remarque plus facilement le bruit d'un parc éolien dont la présence visuelle vous irrite. Cf. rapport de l'AFFSET *Impacts sanitaires du bruit généré par les éoliennes* (2008).

³⁰ 20 à 50 fois moins qu'une centrale photovoltaïque au sol.

³¹ Par traitement du signal, par conception des pales (matériaux, traitement de surface), voire par conception du radar.

³² Sources : *Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens en mer* et projet NSW-EMP de suivi de l'impact environnemental du parc éolien marin néerlandais Egmond aan Zee (<http://www.noordzeewind.nl/en/knowledge/reportsdata/>)

³³ Exemple : le battage de pieux, qui crée des ondes de choc importantes, d'un niveau sonore comparable aux sonars militaires.

³⁴ Exemples : faire fuir les animaux de la zone avant les travaux ; utiliser un « rideau à bulles » qui amortit les ondes acoustiques.

2.4 ÉNERGIES MARINES

2.4.1 Hydroliennes et éolien flottant³⁵

La plupart des problématiques concernant l'éolien marin posé se posent aussi aux hydroliennes et à l'éolien flottant.

L'éolien flottant est destiné à être déployé encore plus loin des côtes, ce qui en réduit encore les impacts visuel et acoustique.

Les hydroliennes n'ont pas d'impact visuel ou acoustique pour les riverains. Leur présence pourrait apporter des modifications de l'hydrodynamisme local en aval, ainsi qu'une signature acoustique. Le risque de collision avec les pales par les animaux semble limité. Vu que la filière est encore loin de la maturité, ces sujets doivent encore faire l'objet de recherches pour être qualifiés. Il est probable que la conception des hydroliennes sera un facteur important d'atténuation.

Comparées à l'éolien marin posé, ces technologies font appel à des techniques de fondations différentes, potentiellement plus légères.

2.4.2 Marémotrice³⁶

Le seul cas existant au monde est l'usine de la Rance. On a constaté un changement de l'écosystème et des espèces qui vivent dans l'estuaire, qualitatif et quantitatif : il reste 30 % de la population de poissons d'avant barrage, mais il y semble y avoir plus de variétés de crustacés. L'absence de données précises d'avant la construction empêche de savoir si le nouvel écosystème est plus riche que l'ancien ou moins.

La perturbation des courants locaux a conduit à un envasement de l'estuaire, qui impacte entre autres le barrage lui-même.

2.5 HYDROÉLECTRICITÉ

2.5.1 Barrages

La construction des barrages a d'importants impacts liés aux travaux et l'inondation d'une zone souvent vaste.

Les barrages coupent en deux les écosystèmes fluviaux : l'amont et l'aval. Les poissons ne peuvent pas remonter en amont, alors que cela est normalement nécessaire au cycle reproducteur de certains. Des systèmes de « passes à poissons » existent et permettent ces migrations, quoique au prix d'efforts supplémentaires pour les poissons. La migration vers l'aval est aussi un problème car la mortalité de poissons lors du passage dans les turbines est très haute. Des modèles de turbine ichtyocompatibles³⁷ sont développés.

La modification de l'hydrodynamisme en amont et en aval du barrage peut aussi avoir des effets sur les écosystèmes locaux.

2.5.2 Au fil de l'eau

Comparé aux barrages, les centrales au fil de l'eau ont un faible impact : les installations sont beaucoup plus réduites en taille et ne nécessitent pas de noyer de vastes zones ; la flore n'est affecté que localement par la modification de l'hydrologie au niveau de la centrale. L'effet d'interruption de la continuité écologique existe cependant, similairement au cas des barrages

Notons que ces bénéfices se font au détriment du service de stockage de l'énergie apporté par les barrages, important pour la régulation du système électrique.

³⁵ Source : *Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables*, Egis Eau pour le MEDD (2012)

³⁶ Source : Département de géographie de l'Ecole Normale Supérieure (<http://geographie.ens.fr/-Les-consequences-environnementales-.html>)

³⁷ Turbines « Fish-friendly » : vis d'Archimède, Alden, VLH, à tourbillons.

2.6 SOLAIRE THERMODYNAMIQUE À CONCENTRATION (STC)

Les centrales STC sont installées au sol, et peuvent donc entrer en compétition pour l'utilisation de terres agricoles, comme les centrales PV au sol (voir 2.2.3). Là aussi, des méthodes de cohabitation avec une activité agricole existent, l'ombre portée par les réflecteurs sur le terrain pouvant être bénéfique, car les conditions de forte irradiation solaire qu'elles requièrent font qu'il s'agit souvent de terres arides.

Les installations elle-mêmes sont essentiellement composées d'acier et de verre, matériaux à impact environnemental direct faible et hautement recyclés.

2.7 GÉOTHERMIE

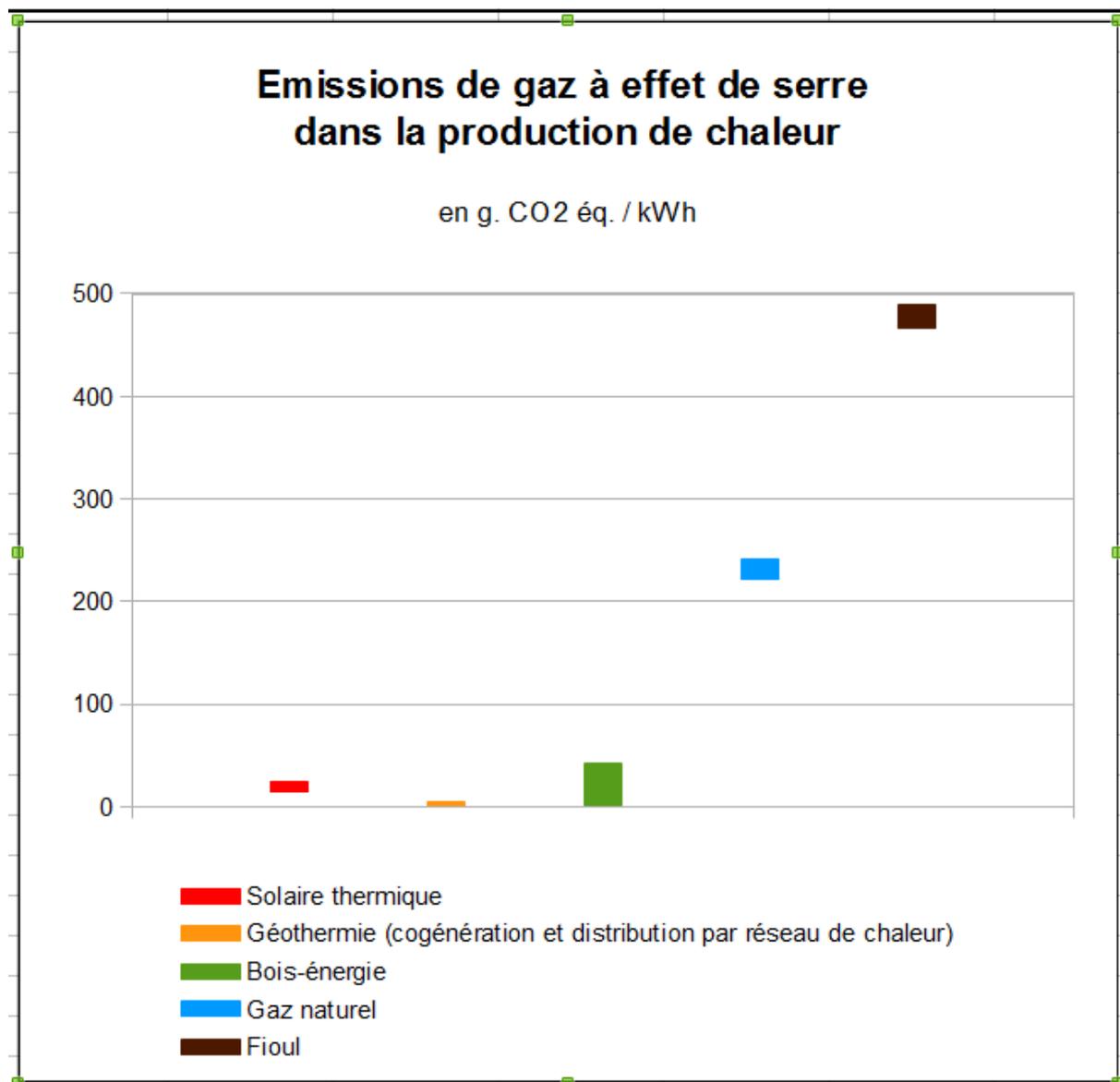
En phase d'exploitation, les installations géothermiques de production d'électricité nécessitent un refroidissement. Celui-ci peut être fait soit par eau, auquel cas il faut prendre en compte le réchauffement du plan ou cours d'eau utilisé, soit par air, auquel cas le bruit peut être une nuisance pour les riverains. Des dégagements de H₂S (odeur d'oeuf pourri) sont possibles, suivant l'aquifère considéré, mais des traitements existent.

Voir aussi la partie 3.3 dans la section *Production de chaleur*.

2.8 BIOMASSE

L'ADEME ne recommande pas l'utilisation de biomasse pour la génération d'électricité seule, sans cogénération de chaleur, sauf exception, une grande partie de l'énergie disponible n'étant en effet pas valorisée. Voir donc dans la partie 3 - *Production de chaleur*.

3.1 COMPARAISONS

3.1.1 Émissions de gaz à effets de serre³⁸

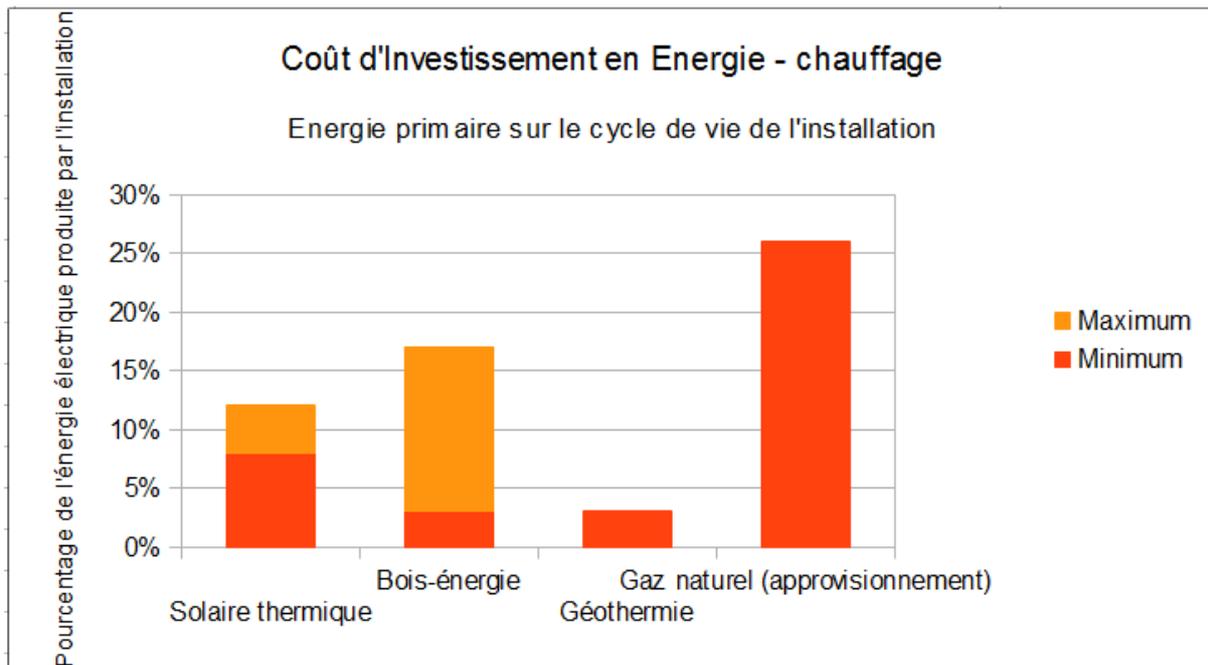
Pour le gaz naturel, l'approvisionnement en gaz jusqu'à la centrale est responsable de 30 % des émissions ; pour le fioul l'approvisionnement représente 15 %³⁹.

3.1.2 Coût d'investissement énergétique

On distingue l'énergie primaire contenue dans l'éventuel combustible et celle dépensée pour l'approvisionnement en combustible. L'énergie primaire nécessaire à l'installation (fabrication, maintenance et exploitation, démantèlement), est ici négligée et considérée comme équivalente entre les technologies, sauf pour le solaire thermique et la géothermie puisqu'il n'y a pas de combustible – cette simplification étant bien sûr au détriment de ces 2 dernières.

³⁸ Sources : études ADEME d'analyse de cycle de vie du bois pour le chauffage domestique et collectif (2005), projet ADEME ESTHACE II d'analyse du cycle de vie du solaire thermique (2011, <http://www.esthace.com/>) et *Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs* – Frick et al. (2010).

³⁹ Source : *Bilan énergétique et des émissions de GES au long du cycle de vie du gaz naturel et du mazout* - RDC (2005).



La filière d'approvisionnement du gaz naturel représente un important CIE, ainsi que déjà vu en 2.1.2. Le CIE indiqué ici pour le solaire thermique correspond à la partie purement solaire de l'installation, sans prendre en compte l'appoint (gaz ou autre).

L'écart important de la fourchette pour le bois-énergie est dû à 2 paramètres : la forme du bois (copeaux, bûches, granulés, plaquettes ..) et la filière d'approvisionnement (distance).

3.2 SOLAIRE THERMIQUE

Le solaire thermique a peu d'impacts durant sa phase d'exploitation, comparable en cela au photovoltaïque intégré au bâti. Par contre, contrairement à ce dernier, l'absence d'incitation tarifaire à satisfaire des exigences particulières d'intégration au bâti laisse plus facilement les promoteurs choisir la solution optimale technico-économiquement, généralement avec de moindres impacts environnementaux en termes de cycle de vie⁴⁰.

3.3 GÉOTHERMIE

Qu'elles soient petites ou grandes, les installations géothermiques n'ont que de faibles impacts environnementaux. Une fois la période de travaux finie, l'installation a une emprise au sol limitée à quelques bâtiments et fonctionne quasiment sans bruit et sans odeurs. En phase d'exploitation, le circuit d'eau puisé du forage fonctionne en cycle fermé et n'induit pas de pollution des nappes phréatiques. La réinjection de l'eau puisée doit aussi suivre des règles pour éviter l'éventuelle précipitation de minéraux.

Il faut toutefois s'assurer que le forage soit fait suivant les règles de l'art (c'est à dire : conformément à la réglementation) pour éviter une contamination de nappes phréatiques entre elles ou leur écoulement vers des couches inférieures.

Un guide méthodologique est en préparation au Service Réseaux et Énergies Renouvelables de l'ADEME et devrait être disponible fin 2014.

3.4 BIOMASSE SÈCHE (BOIS-ÉNERGIE)

Le bilan environnemental du bois-énergie est fortement dépendant du transport, de par sa densité énergétique, plus faible que pour les sources fossiles.

La combustion s'accompagne de dégagements atmosphériques (composés organiques volatiles, particules, ..), dont l'intensité dépend de la qualité de la combustion⁴¹. Les installations de plus

⁴⁰ Comme indiqué en section 2.2.2, la simple surimposition est la solution avec les moindres impacts.

⁴¹ Mauvaise chaudière = plus de fumées

grande puissance sont généralement plus performantes⁴². Plus la densité urbaine augmente, plus cette pollution risque de poser problème par effet cumulé.

Ce type de chauffage est donc à privilégier en zone rurale ou péri-rurale à proximité de boisements exploités de manière pérenne.

4 REMERCIEMENTS

Relectures :

- Jean-Baptiste Brette

5 ANNEXES

Voir le tableur regroupant les chiffres et détaillant les sources, ainsi que les articles dont ils sont tirés.

⁴² Températures internes plus élevées, entretien plus professionnel