



# Eco-conception de centrales géothermiques EGS par la méthodologie ACV

Rapport final

**BRGM/RP-60965-FR**

Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2011 PSP11GTH34

**M. Lacirignola**

**Vérificateur :**

Nom : A. POUX

Date : 12/03/2012

Signature :

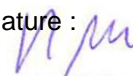


**Approbateur :**

Nom : A. DESPLAN

Date : 14/03/2012

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots-clés** : EGS, Analyse de Cycle de vie, Impact environnemental.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Lacirignola M.** (2011) – Eco-conception des centrales géothermiques EGS par la méthodologie ACV. Rapport final. BRGM/RP-60965-FR. 73 p., 35 fig., 23 tab., 3 ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le développement de systèmes géothermiques stimulés (EGS) suscite un intérêt croissant comme technologie prometteuse pour la production d'électricité à partir des énergies renouvelables. Toutefois, une promotion enthousiaste de ces systèmes est inappropriée sans une évaluation critique de leurs performances environnementales. En fait, malgré les faibles émissions de la phase d'exploitation, de grandes quantités d'énergie et de matériaux sont nécessaires à la construction.

Cette étude présente l'analyse des performances environnementales des systèmes EGS (Enhanced Geothermal System), menée à travers la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV), et focalisée sur dix études de cas.

Une grande variété de facteurs interdépendants, liés soit aux conditions du réservoir soit aux choix techniques, déterminent la taille de l'installation et le montant final d'électricité produite. Ainsi, différentes séries de paramètres sont définies pour identifier dix configurations différentes réalistes pour une centrale EGS en Europe centrale, en considérant : le débit géothermal et sa température, le nombre et la profondeur des forages, la stratégie de réinjection, le risque de sismicité induite et le processus d'alimentation électrique pendant les opérations de forage.

Cette étude montre que le risque sismique est un facteur-clé, car il augmente en relation étroite avec le bénéfice environnemental. Par ailleurs, les résultats soulignent qu'une réduction de l'utilisation de combustibles fossiles lors des opérations de forage permet une amélioration très significative des performances environnementales.

Les résultats montrent que les impacts environnementaux des EGS sont comparables à ceux des autres technologies basées sur les énergies renouvelables et sont nettement inférieurs à ceux des centrales électriques conventionnelles.



## Présentation du stage

Ce rapport présente les principaux résultats d'un stage de recherche réalisé dans le cadre du master spécialisé en Management international de l'énergie « ALEF » (ALternatives Energétiques du Futur), organisé conjointement par Mines-ParisTech et par l'université de Tsinghua (Chine).



Figure 1 - Logo du Master spécialisé « ALEF ».

Le sujet de recherche a été proposé et financé par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Il a été mené de juin à décembre 2011.

Les travaux ont été supervisés par :

- Mlle Adeline Poux, Mme Sylvie Gentier et M. Alain Desplan (BRGM) ;
- Mme Astrid Cardona Maestro et M. Philippe Laplaige (ADEME) ;
- Prof. Francois-Pascal Neirac et Prof. Isabelle Blanc (Mines-ParisTech) ;
- Prof. Xu Ruina (Tsinghua University).

Un soutien technique et scientifique a également été apporté par l'équipe du « G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur » de la centrale de Soultz-sous-Forêts.

L'objectif du stage a été de définir et mettre au point une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux adaptée à la filière EGS et basée sur l'analyse du cycle de vie.

Les documents suivants sont fournis et joints à ce rapport :

- une thèse de Master. Pour plus d'informations sur les hypothèses effectuées dans l'étude ou sur la méthode de calcul, consulter ce document ;
- un article scientifique, soumis à une revue scientifique internationale ;
- des fichiers de calcul excel et SimaPro ;
- un dossier contenant la version électronique des documents rassemblés pendant la veille bibliographique ;
- quatre présentations powerpoint (trois rapports intermédiaires plus une présentation finale).





## Sommaire

<b>1. Contexte .....</b>	<b>11</b>
<b>2. La centrale EGS de Soultz-sous-Forêts .....</b>	<b>13</b>
<b>3. Veille bibliographique.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Phases de l'ACV.....</b>	<b>19</b>
4.1. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE .....	19
4.2. ÉLABORATION DE L'INVENTAIRE.....	20
4.3. ÉVALUATION DE L'IMPACT .....	20
4.4. INTERPRÉTATION.....	20
<b>5. Élaboration de l'inventaire .....</b>	<b>23</b>
5.1. RÉALISATION DES PUIITS.....	23
5.1.1. Combustible pour les opérations de forage.....	23
5.1.2. Boue pour les opérations de forage .....	25
5.1.3. Cuvelage et cimentation .....	25
5.1.4. Fermeture du puits.....	26
5.1.5. Déchets de forage .....	26
5.1.6. Transport des matériaux pour les puits .....	27
5.1.7. Ensemble des données pour la réalisation d'un puits .....	27
5.2. STIMULATION DU PUIITS .....	28
5.2.1. Stimulation hydraulique.....	28
5.2.2. Stimulation chimique.....	29
5.2.3. Résumé des matériaux utilisés lors de la stimulation d'un puits .....	30
5.3. ÉQUIPEMENTS DE SURFACE .....	30
5.3.1. Modèle de calcul.....	30
5.3.2. Hypothèses sur le transport des équipements de surface.....	32
5.3.3. Hypothèses sur la fin de vie des équipements de surface.....	33
5.3.4. Résumé des matériaux pour les équipements de surface.....	33
5.4. INCERTITUDE.....	34
<b>6. Élaboration de scénarios .....</b>	<b>37</b>
<b>7. Résultats .....</b>	<b>41</b>

7.1. VALIDATION DU MODÈLE .....	41
7.2. RÉSULTATS DU CAS DE RÉFÉRENCE .....	43
7.3. RÉSULTATS DES DIX ÉTUDES DE CAS .....	48
7.4. IMPACTS DE LA PROVISION D'ÉLECTRICITÉ SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL.....	54
<b>8. Conclusions .....</b>	<b>57</b>
<b>9. Recommandations pour les études futures .....</b>	<b>59</b>
<b>10. Références.....</b>	<b>61</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Veille bibliographique : publications les plus significatives. ....	16
Tableau 2 - Résultats (veille bibliographique) : consommation de ressources. ....	17
Tableau 3 - Résultats (veille bibliographique) : émissions de gaz à effet serre. ....	17
Tableau 4 - Résultats (veille bibliographique) : acidification.....	18
Tableau 5 - Résultats (veille bibliographique) : eutrophisation.....	18
Tableau 6 - Consommation de combustible pendant le forage : valeurs proposées par différents auteurs.....	24
Tableau 7 - Estimation des composants de la boue.....	25
Tableau 8 - Matériaux pour cuvelage et cimentation.....	26
Tableau 9 - Estimation des matériaux pour la fermeture d'un puits. ....	26
Tableau 10 - Résultats globaux pour la réalisation d'un puits. ....	27
Tableau 11 - Stimulation hydraulique à Soultz-sous-Forêts : GPK-2, GPK-3. ....	28
Tableau 12 - Stimulation hydraulique à Soultz-sous-Forêts : GPK-4.....	28
Tableau 13 - Stimulation hydraulique à Landau : GtLa2. ....	28
Tableau 14 - Quantité de sel pour la stimulation hydraulique. ....	29
Tableau 15 - Quantité de combustible pour la stimulation hydraulique.....	29
Tableau 16 - Stimulation chimique de GPK-2.....	29
Tableau 17 - Stimulation chimique de GPK-2 avec HCl (Nami <i>et al.</i> , 2008). ....	29
Tableau 18 - Matériaux pour la stimulation.....	30
Tableau 19 - Matériels pour les équipements de surface.....	34
Tableau 20 - Estimation du risque de sismicité induite. ....	37
Tableau 21 - Données techniques des dix scénarios. ....	38

Tableau 22 - Résultats : cas de référence. ....	43
Tableau 23 - Résultats des dix études de cas. ....	54

## Liste des figures

Figure 1 - Logo du Mastère spécialisé « ALEF ». ....	5
Figure 2 - Cadre de l'ACV (ISO 14040, ISO 14044). ....	19
Figure 3 - Processus de calcul pour l'estimation de la quantité de combustible.....	24
Figure 4 - Calculs pour les équipements de surface. ....	31
Figure 5 - Schéma simplifié de la centrale (réalisé pour la thèse de Master). ....	32
Figure 6 - Hypothèses sur le transport des équipements de surface. ....	33
Figure 7 - Élaboration des dix scénarios. ....	37
Figure 8 - Création d'inventaire en SimaPro .....	39
Figure 9 - Schéma de calcul.....	39
Figure 10 - Changement climatique. ....	42
Figure 11 - Acidification. ....	42
Figure 12 - Eutrophisation. ....	42
Figure 13 - Ressources. ....	42
Figure 14 - Méthode IMPACT2002+. ....	43
Figure 15 - Résultats : cas de référence. ....	43
Figure 16 - Processus (santé humaine). ....	44
Figure 17 - Processus (qualité des écosystèmes). ....	45
Figure 18 - Processus (changement climatique).....	45
Figure 19 - Processus (ressources). ....	46
Figure 20 - Substances (santé humaine). ....	46
Figure 21 - Substances (qualité des écosystèmes). ....	47
Figure 22 - Substances (changement climatique).....	47
Figure 23 - Substances (ressources). ....	48
Figure 24 - Résultats des dix études de cas : changement climatique. ....	49
Figure 25 - Résultats ACV d'autres technologies (Moomaw <i>et al.</i> , 2011). ....	49
Figure 26 - Résultats des dix études de cas : ressources. ....	50
Figure 27 - Résultats des dix études de cas : santé humaine. ....	50
Figure 28 - Résultats des dix études de cas : qualité des écosystèmes. ....	51
Figure 29 - Résultats des dix études de cas : cas 1, 2, 3. ....	51

Figure 30 - Résultats des dix études de cas : cas 4, 5, 7. ....	52
Figure 31 - Résultats des dix études de cas : cas 8, 9, 10. ....	52
Figure 32 - Impacts de la provision d'électricité sur le réseau électrique national. ....	54
Figure 33 - Impacts de la provision d'électricité sur le réseau électrique national, influence des éléments du système. ....	55
Figure 34 - Impacts de la provision d'électricité sur le réseau électrique national, en considérant le mix énergétique français et allemand. ....	55
Figure 35 - Recommandations pour les études futures. ....	60

## Liste des annexes

Annexe 1 - Schéma de la centrale de Soultz-sous-Forêts. ....	65
Annexe 2 - Carte des températures à 5 km de profondeur en Europe (Hurtig <i>et al.</i> , 1992) .....	69
Annexe 3 - Remerciements. ....	73

# 1. Contexte

Une des plus grandes limites des technologies basées sur les énergies renouvelables est le caractère intermittent des ressources. La géothermie représente une option avantageuse du fait de son fonctionnement en continu et de ses coûts de production souvent très compétitifs.

Dans ce domaine, la France possède une expérience remarquable, surtout dans l'exploitation de l'énergie géothermique avec les réseaux de chaleur urbains (la région parisienne, par exemple, présente la plus grande densité au monde de telles installations).

Cependant, globalement aujourd'hui l'offre française, tant au niveau de l'ingénierie que des industriels, est encore modeste pour concurrencer les marchés internationaux.

Le contexte énergétique mondial est l'objet de grands changements, et la géothermie connaît dans un assez grand nombre de pays un fort regain d'intérêt. En particulier, le marché de la géothermie profonde est l'objet d'une croissante attention.

Dans l'esprit de la création d'une offre française complète et structurée, une réflexion a donc été engagée par l'ADEME et le BRGM. Dans le cadre de l'élaboration des stratégies énergétiques d'avenir, un des points forts pourrait être l'excellence environnementale.

Il est apparu intéressant, comme première étape pour mieux appréhender les contraintes liées aux performances environnementales des systèmes géothermiques, d'engager une étude basée sur la méthodologie ACV (analyse du cycle de vie), en particulier en initiant la démarche sur le volet de la production d'électricité.

À Soultz-sous-Forêts (Alsace), depuis près de vingt ans, des activités de recherche et développement ont été conduites dans le cadre du plus grand projet mondial de géothermie profonde. Ce projet vise à explorer les potentialités de la technologie « EGS » (Enhanced Geothermal System : système géothermique stimulé) qui permet d'exploiter la chaleur de la ressource géothermale à grande profondeur (5 000 m), afin de produire de l'électricité.

Ce stage a été initié pour analyser les performances environnementales de cette technologie, à travers un contact direct avec les acteurs impliqués dans la recherche et le développement de la centrale pilote de Soultz.

La méthodologie ACV étant l'outil le plus approprié pour l'identification des impacts sur l'environnement des technologies de production d'énergie, a été utilisé pour mener à bien les analyses.

Dans le cadre de la collaboration entre le BRGM et l'ADEME, cette étude se place dans le contexte plus large d'une réflexion sur les impacts environnementaux du

secteur de l'énergie géothermique. Cette étude représente un point de départ qui pourrait mener à l'avenir à une analyse environnementale plus poussée sur les EGS ou sur d'autres technologies géothermiques (usages électriques et thermiques).

## 2. La centrale EGS de Soultz-sous-Forêts

L'Europe présente un très fort potentiel pour les applications de géothermie profonde. En particulier, en France, Italie, Serbie et Hongrie, le marché est très prometteur (la carte des températures extrapolées à 5 km de profondeur en Europe est présentée en Annexe 2).

En juin 2008, après plus de deux décennies de recherches, la première centrale géothermique électrique EGS (Enhanced Geothermal System) a été inaugurée à Soultz-sous-Forêts, située à la frontière franco-allemande. Les activités de développement ont été conduites grâce à des financements gouvernementaux français, allemands et européens, et aujourd'hui le site de Soultz représente une opportunité assez unique de suivi d'une des premières installations EGS en exploitation dans le monde.

Le concept EGS consiste simplement à forer au moins deux puits dans des roches présentant d'importantes fractures naturelles, à extraire le fluide chaud depuis un (ou plus) puits de production et à réinjecter le fluide une fois refroidi dans le réservoir fracturé à travers un (ou plus) puits d'injection. Ce circuit, dit « primaire », est un circuit fermé, c'est-à-dire que l'eau produite est complètement réinjectée.

Tout comme la géothermie haute température mise en œuvre sur le site de Bouillante, ce fluide permet l'alimentation d'une centrale électrique. Par contre, contrairement aux réservoirs géothermaux conventionnels, les systèmes EGS nécessitent une stimulation, car la perméabilité des roches à proximité des puits est souvent trop faible. De plus, les EGS sont des systèmes binaires : à cause de la forte teneur en composés corrosifs, l'eau géothermale ne peut être utilisée pour alimenter directement la turbine. La chaleur produite doit être transférée dans un circuit secondaire, ce qui implique l'utilisation d'un autre fluide pour la production électrique (isobutane dans le cas de Soultz). Un schéma de la centrale de Soultz est présenté en Annexe 1.

En surface, l'eau géothermale transmet ses calories, à travers un échangeur de chaleur, à un second fluide caloporteur, qui circule dans le circuit « secondaire » (le circuit de production électrique). Normalement, c'est un fluide organique avec des caractéristiques thermodynamiques appropriées (point d'ébullition bas).

Le fluide organique, vaporisé et sous pression, est injecté dans une turbine, pour produire de l'énergie mécanique puis de l'électricité grâce à un alternateur. La centrale de Soultz est équipée avec une turbine radiale capable de produire une puissance nette de 1,5 MW<sub>el</sub>.

Après détente, il traverse un régénérateur pour un pré refroidissement, puis des aérocondenseurs (neuf ventilateurs). Il est ensuite recompressé, avant de retourner sous forme de liquide, dans l'échangeur. Ce processus est appelé « cycle de Rankine organique » (ORC).

Une analyse détaillée de la centrale de Soultz a été menée, afin de comprendre tous les flux de matériel entrants et sortants d'un système EGS pendant son cycle de vie, et de construire dix études de cas représentatifs.



### 3. Veille bibliographique

Dans la première phase de l'étude, une veille bibliographique des publications existantes concernant les ACV des systèmes géothermiques, et particulièrement des EGS, a été menée. Un nombre important de bases de données a été consulté. Les principales bases de données sont les suivantes :

- Science Direct ;
- Scopus ;
- ISI Web of Science ;
- Réseau documentaire MINES ParisTech: Catalogue, Publications, Theses ;
- Politecnico di Bari – Emeroteca virtuale ;
- US DOE database ;
- WorldWideScience ;
- IEEE explore ;
- SpringerLink ;
- Publications de la World geothermal association (<http://www.geothermal-energy.org>) ;
- Ecoinvent ;
- US LCI database ;
- European Life Cycle Database.

Bien évidemment, une attention particulière a été portée sur les informations disponibles sur les bases de données LCA comme Ecoinvent, US LCI et ELCD. La consultation de nombreuses thèses de recherches réalisées dans des universités de grande renommée telles que l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) ou l'Ecole « School for Renewable Energy Science » (Islande) a été très utile pour avoir une vision générale des connaissances sur le sujet.

Le tableau ci-dessous regroupe certains détails de l'article le plus pertinent sur le sujet :

Ref.	Auteurs	Année	Type de central	Site	Taille de la centrale
[1]	Frick <i>et al.</i>	2010	EGS	Allemagne, cas virtuels	1.75 MW (+ d'autres configurations)
[2]	Bauer <i>et al.</i>	2008	EGS	Centrale de Bale, Suisse	3 MW (2005), 36 MW (2030)
[3]	Bauer <i>et al.</i>	2007	EGS	Centrale de Bale, Suisse	3 MW (2000), 36 MW (2030)
[4]	Huenges	2010	EGS	2 cas virtuels	1.6 MW (2 configurations)
[5]	Pehnt	2005	EGS	Allemagne, cas virtuel	Non spécifié

[6]	Sullivan <i>et al.</i> (Argonne Laboratory, US DOE)	2010	EGS, binaire, flash	Etats Unis, cas virtuels	EGS1: 20 MW, EGS2: 50MW, Binaire: 10 MW, Flash: 50 MW
[7]	Frick <i>et al.</i>	2007	Binaire	Allemagne (3 cas virtuels)	1-3 MW <sub>el</sub> , 2-13 MW <sub>th</sub>
[8]	Rule <i>et al.</i>	2009	Binaire	Centrale de Wairakei, Nouvelle Zelande	162 MW
[9]	Matuszewska (RES University, Iceland)	2011	EGS, Flash	Suisse et Pologne, cas virtuels	Plusieurs puissances
[10]	Ruiz Bern (EPFL)	2010	EGS, Flash	Suisse, cas virtuels	Non spécifié
[11]	Hondo	2004	Flash	Japon, cas virtuel	55 MW
[12]	Karlsdottir <i>et al.</i> (University of Iceland)	2010	Flash CHP	Centrale de Hellisheidi, Islande	300 MW <sub>el</sub> , 400 MW <sub>th</sub>

Ref.	Sources principales	Outil de calcul	Notes	Résultats
[1]	Ecoinvent 2.0, hypothèses, enquête	Non spécifié	Publication de référence	4 indicateurs d'impact (par kWh) + analyse de sensibilité
[2]	Ecoinvent, littérature	SimaPro	Comparaison avec d'autres technologies	Plusieurs indicateurs d'impact (par kWh)
[3]	Ecoinvent, littérature	SimaPro	Comparaison avec d'autres technologies	Plusieurs indicateurs d'impact (par kWh)
[4]	Frick (2010), Heck (2004), Ecoinvent 2.0	Non spécifié	-	4 indicateurs d'impact (par kWh)
[5]	IFEU database (Heidelberg), base de données Umberto, enquêtes	Umberto	+ ACV dynamique	4 indicateurs d'impact (par kWh). Résultats normalisés avec les impacts du mix énergétique
[6]	littérature, NREL, ICARUS output	GREET expanded, ICARUS, GETEM	+ comparaison avec d'autres auteurs	émissions GES, demande de matériel et d'énergie
[7]	littérature	Non spécifié	+ Comparaison avec d'autres technologies. Analyse des réglementations régionales	5 indicateurs d'impact (par kWh)
[8]	Données de la centrale	SimaPro 7	Comparaison avec d'autres technologies	Emissions GES: Importance (%) des équipements
[9]	Ecoinvent, Ruiz Bern (2010)	Valimodeller, OSMOSE, AMPL	Optimisation multicritère (plusieurs logiciels)	impacts (par kWh)
[10]	Ecoinvent, modèle mathématique input/output	Matlab	-	4 indicateurs d'impact (par kWh). Analyse temporelle détaillée
[11]	Publications du gov. Japonais, analyse input/output	Code de calcul	Comparaison avec d'autres technologies	Emissions GES (par kWh)
[12]	Données de la centrale, Ecoinvent	SimaPro 7	-	Emissions GES et consommation ressources (par kWh)

Tableau 1 - Veille bibliographique : publications les plus significatives.

Les résultats de la veille bibliographique sont les suivants :

- il existe peu d'ACV des systèmes géothermiques ;
- la plupart des études sont très récentes (menées dans les trois, quatre dernières années) ;
- la plupart des unités de production analysées sont binaires ;
- peu de catégories d'impact sont analysées (souvent : *émissions de gaz à effet serre (GES) et consommation des ressources*) ;
- dans la plupart des cas, les données d'inventaire ne sont pas présentées ;
- les EGS analysés dans les publications de Frick *et al.* (2010) et Huenges (2010) ont des caractéristiques similaires à la centrale de Soultz. Ainsi une comparaison critique avec les résultats de ces publications sera possible.

L'étude menée par Frick *et al.* est la publication de référence dans ce domaine. Plusieurs configurations EGS (selon la profondeur des puits, les conditions du réservoir, les équipements de surface) sont analysées dans cet article. Le scénario « B 1 », présenté dans cette étude, sera utilisé pour la validation de notre modèle.

Les tableaux suivants montrent que les résultats des ACV récupérés semblent cohérents :

Consommation de ressources [kWh/kWh]			
Auteur	Type de centrale	Capacité installée	Résultats
Frick <i>et al.</i> (2010)	EGS	1,75 MW (cas de réf)	~0,21
Huenges	EGS	1,6 MW	~0,24
Pehnt	EGS	non spécifié.	~0,15
Frick, <i>et al.</i> (2007)	Binaire (3 sites)	1-3 MW	~0,11-0,35
Sullivan <i>et al.</i>	EGS	20 MW et 50 MW	0.05-0.11
Sullivan <i>et al.</i>	Flash	50 MW	~0,03
Karlsdottir <i>et al.</i>	Flash CHP	300MWe 400MWth	0,1-0,2

Tableau 2 - Résultats (veille bibliographique) : consommation de ressources.

Emissions de gaz à effet serre [gCO <sub>2</sub> eq/kWh]			
Auteur	Type de centrale	Capacité installée	Résultats
Frick <i>et al.</i> (2010)	EGS	1,75 MW (cas de réf)	~50
Huenges	EGS	1,6 MW	~55
Bauer <i>et al.</i>	EGS	36 MW	27
Pehnt	EGS	non spécifié	41
Frick, <i>et al.</i> (2007)	Binaire (3 sites)	1-3 MW	25-85
Sullivan <i>et al.</i>	EGS	20 MW et 50 MW	(31,9-18,3)
Sullivan <i>et al.</i>	Flash	50 MW	~100
Karlsdottir <i>et al.</i>	Flash CHP	300MWe 400MWth	35-45
Hondo	Flash	55 MW	15

Tableau 3 - Résultats (veille bibliographique) : émissions de gaz à effet serre.

<b>Acidification [mgSO<sub>2</sub>eq/kWh]</b>			
<b>Auteur</b>	<b>Type de centrale</b>	<b>Capacité installée</b>	<b>Résultats</b>
<b>Frick et al. (2010)</b>	EGS	1,75 MW (cas de réf)	~400
<b>Huenges</b>	EGS	1,6 MW	~460
<b>Pehnt</b>	EGS	non spécifié	190
<b>Frick, et al. (2007)</b>	Binaire (3 sites)	3 MW	~200-670

Tableau 4 - Résultats (veille bibliographique) : acidification.

<b>Eutrophication [mgPO<sub>4</sub>eq/kWh]</b>			
<b>Auteur</b>	<b>Type de centrale</b>	<b>Capacité installée</b>	<b>Résultats</b>
<b>Frick et al. (2010)</b>	EGS	1,75 MW (cas de réf)	~55
<b>Huenges</b>	EGS	1,6 MW	~63
<b>Pehnt</b>	EGS	non spécifié	24,8
<b>Frick et al. (2007)</b>	Binaire (3 sites)	1-3 MW	~13-43

Tableau 5 - Résultats (veille bibliographique) : eutrophisation.

Les résultats de l'analyse de cycle de vie effectuée dans cette étude sont en accord avec ces valeurs (chapitre 7).

## 4. Phases de l'ACV

Comme précisé dans les normes ISO 14040 et 14044, l'étude est constituée de quatre parties : définition des objectifs, élaboration de l'inventaire, évaluation de l'impact et interprétation. Pour plus de détails concernant la méthode d'analyse de cycle de vie appliquée aux études environnementales, consulter le chapitre 2 de la thèse de Master.

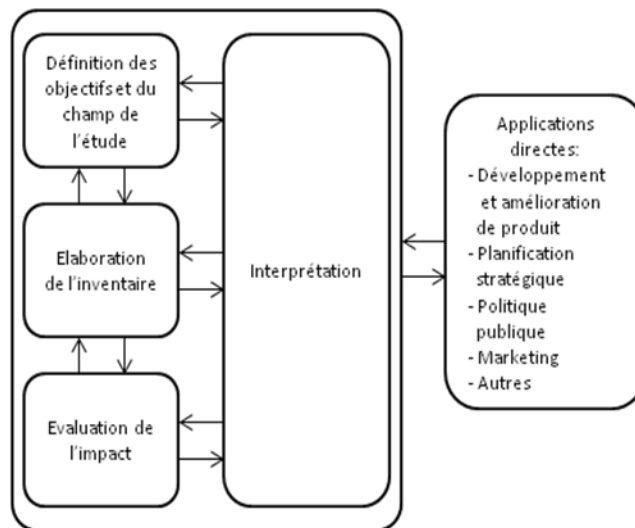


Figure 2 - Cadre de l'ACV (ISO 14040, ISO 14044).

### 4.1. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE

L'objectif de cette recherche est d'évaluer les performances des systèmes EGS à travers l'estimation des émissions de gaz à effet de serre, de la demande en ressources non renouvelables, des conséquences sur la santé humaine et les écosystèmes ainsi que le risque de sismicité induite. D'autre part, l'objectif est aussi de fournir une vue globale des performances environnementales associées à différentes configurations pour une centrale EGS, à travers l'analyse de 10 scénarios.

Récemment les politiques énergétiques encouragent le développement du secteur des énergies renouvelables à travers des initiatives financières (tarifs de rachats, certificats verts, etc.) ; les résultats de cette recherche visent à contribuer au processus d'élaboration de ces stratégies énergétiques.

Les limites du système incluent tous les équipements nécessaires pour une installation EGS : les éléments du cycle organique de Rankine (ORC), l'équipement souterrain relatif à la boucle du fluide géothermique et tous les flux de matériaux et d'énergie liés aux phases de construction, d'opération et de démantèlement. Les hypothèses sont détaillées dans les paragraphes suivants. Il est supposé que les unités EGS analysées sont situées au nord-est de la France.

L'unité fonctionnelle est le kWh d'énergie nette produite sur le cycle de vie. Cela signifie que toutes les émissions calculées dans le cycle de vie font référence à l'unité d'énergie délivrée au réseau électrique national. La puissance nette correspond à la sortie électrique brute de la turbine ORC moins la puissance nécessaire aux auxiliaires de l'ORC (aérocondenseur, etc.) et de la boucle géothermique (pompe de production et de réinjection, etc.).

## 4.2. ÉLABORATION DE L'INVENTAIRE

L'élaboration du « life-cycle inventory » (LCI), comme détaillé dans le chapitre 5, est basé sur la compilation de plusieurs données dites « d'entrée » (matériel, combustibles, ressources, électricité, chaleur) et données dites « de sortie » (émissions, déchets) qui interviennent à différents moments de la vie du produit.

Dans cette recherche, nous avons créé un nouvel inventaire, basé sur la description des processus techniques impliqués dans le cycle de vie de la centrale. La méthode de calcul est expliquée dans le chapitre 5.

## 4.3. ÉVALUATION DE L'IMPACT

Pour l'évaluation de l'impact, une nouvelle méthodologie a été développée, basée sur cinq critères : les quatre catégories d'impact considérées par la méthode IMPACT2002+, plus l'estimation du risque de sismicité induite.

La méthodologie IMPACT2002+, élaborée par Jolliet *et al.* (2003), est basée sur l'identification des catégories suivantes :

- santé humaine [DALY : années équivalentes de vie perdues] ;
- qualité des écosystèmes [ $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{y}$  : fraction d'espèce disparue sur un mètre carré pour une année] ;
- changement climatique [ $\text{gCO}_2\text{eq}$  : émissions de gaz à effet de serre] ;
- ressources [kJ : consommation de ressources énergétiques non renouvelables].

Nous avons ajouté une cinquième catégorie pour l'analyse des centrales EGS : le risque de sismicité induite. Ce facteur a de plus en plus d'importance. Le projet EGS à Bâle (Suisse) a été suspendu (NYTimes, 2009) à cause de la sismicité induite (ML 3.4), et des problèmes ont été rencontrés aussi à Landau (Allemagne) en 2009. Par conséquent, ce risque est considéré comme un paramètre important dans la phase de conception de la centrale, et il est considéré comme une catégorie d'impact supplémentaire dans l'analyse des résultats.

## 4.4. INTERPRÉTATION

Progressivement, les valeurs calculées lors de l'élaboration de l'inventaire ont été comparées avec les références disponibles dans la littérature scientifique. Une fois le modèle global défini, nous avons effectué une validation complète en faisant tout

d'abord une simulation basée sur les paramètres du scénario « B1 » présenté par Frick *et al.* dans son article. Dans un second temps, les impacts ont été analysés en détail pour le cas de référence. Ainsi, les processus et les substances les plus influents ont été déterminés. Puis, les résultats des dix études de cas ont été comparés. En observant et en discutant des différences relatives, nous avons conclu que le risque de sismicité provoquée est un autre point important à considérer dans l'analyse des impacts environnementaux.

Enfin, le choix de la connexion au réseau électrique, ou de l'utilisation des générateurs diesel autonomes pendant les opérations de forage, a été discuté.





## 5. Élaboration de l'inventaire

Toutes les informations (type de matériel, quantités, processus d'approvisionnement) ont été calculées et collectés à partir de :

- rapports techniques (rapports journaliers de forage, rapports finaux des travaux...) ;
- publications scientifiques (Nami *et al.*, Schindler *et al.*) ;
- manuels des équipements (Turboden, Cryostar, Masserenti...) ;
- entretiens (équipe GEIE, Cryostar, experts...).

Des nombreuses hypothèses ont été faites. Nous avons par ailleurs réalisé une analyse détaillée de la centrale EGS pilote de Soutlz-sous-Forêts. Les estimations ont été validées par des experts du monde scientifique, académique et industriel impliqués dans la construction et le contrôle du site.

Les données concernant les procédés basiques tels que l'extraction, le traitement de matières premières, l'approvisionnement en énergie, le transport et le traitement des déchets sont issues de la base de données Ecoinvent 2.2. Les principales hypothèses concernant les procédés décrits dans Ecoinvent sont détaillées dans le paragraphe 4.6.2 de la thèse du Mastère.

La réalisation des puits de production constitue la principale cause des problèmes environnementaux. Par conséquent, nous devons porter une attention particulière à cette phase. Elle est détaillée dans les prochains paragraphes.

### 5.1. RÉALISATION DES PUITES

#### 5.1.1. Combustible pour les opérations de forage

Les informations concernant la quantité de combustible utilisé dans les opérations de forage ont été récupérées dans les documents suivants :

- GPK-3 Daily drilling report, rapport technique, G.E.I.E Exploration minière de la chaleur, 2002 ;
- GPK-4, Rapports journaliers forage de Gandy Inc., G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2004 ;
- GPK-3 Daily mud report, rapport technique, G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2002 ;
- GPK-4 Daily mud report, rapport technique, G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2004 ;
- Bilan des phases de forage et stimulation des puits GPK-3 et GPK-4.

Toutes les données concernant les puits ont été normalisées par la longueur du puits. GPK-3 a été choisi comme puits de référence. Donc, les quantités de matériel pour la réalisation du puits ont été divisées par 5100 (longueur du puits), afin d'obtenir des valeurs en terme d'« unité/mètre ».

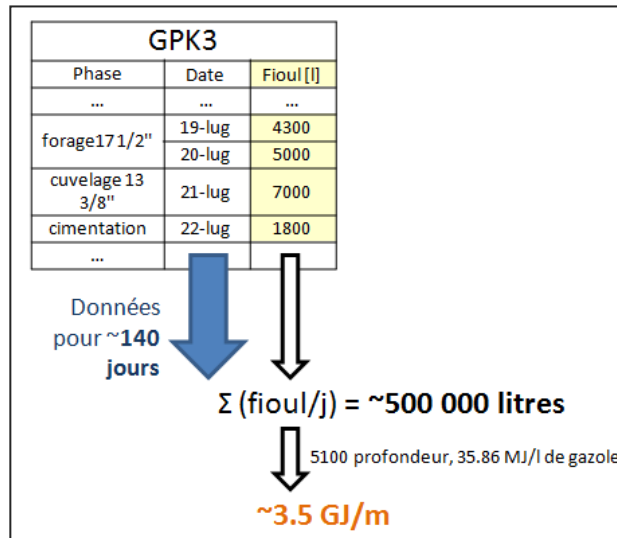


Figure 3 - Processus de calcul pour l'estimation de la quantité de combustible.

Pour GPK-3, une quantité de 500 000 litres (pour les 140 jours de forage) a été obtenue. Donc en considérant la chaleur spécifique du gazole nous estimons une quantité de gazole de 3,5 MJ/m. Cette valeur est confirmée par le calcul à partir du bilan.

Pour GPK-4, une valeur beaucoup plus élevée est obtenue (6,6 GJ/m). Ceci est dû principalement au fait que le puits est beaucoup plus dévié, et la durée du forage a presque doublé (230 jours).

De toute façon, la quantité de gazole pour le forage dépend de plusieurs facteurs ; le tableau suivant résume quelques valeurs proposées par différents auteurs.

Consommation de diesel pour les opérations de forage	GJ/m	Diamètre du puits [cm]	Profondeur [m]	Notes
Frick, 2010	7,5	n/a	4800	EGS
Bauer, 2008	7	20-40	5500	EGS de Bale
Jungbluth, 2004	9	15 – 70	n.s. (<3000)	puits pétrolier
Rogge, 2004	5	n.s.	4500	EGS, géologie pas spécifié
Dones, 2003	1.05	n.s.	2000	Test de Forage
Kayser, 1999	2.01	n.s.	1300–2500	EGS, géologie pas spécifié
Teuber <i>et al.</i> , 1999	4.09	n.s.	3010	puits pétrolier
Cette étude	3,5	21.5-60	5100	Calcul pour GPK-3
Cette étude	6,6	21.5-60	5200	Calcul pour GPK-4

Tableau 6 - Consommation de combustible pendant le forage : valeurs proposées par différents auteurs.

À partir de l'analyse des publications et des calculs effectués, il a été choisi la valeur de 4 GJ/m pour caractériser le forage. Pour plus de détails, voir les commentaires sur le fichier de calcul ou le paragraphe 4.2.1 de la thèse de Master.

### 5.1.2. Boue pour les opérations de forage

Les informations concernant les matériaux pour la boue ont été récupérées dans les mêmes documents utilisés pour le calcul relatif au combustible.

Les éléments principaux utilisés pour la production de la boue pour GPK-3 et GPK-4 sont : eau, sel, soude caustique, bentonite, lubrifiant écologique et un grand nombre d'autres composés chimiques (Mixel 432, Pac UL, tackle, etc.) qui pour ces études ont été additionnés et mentionnés dans les tableaux comme « produits chimiques ».

Il faut noter que la boue utilisée pour le forage de GPK-3 et GPK-4 est essentiellement constituée d'eau et de sel, alors que souvent des quantités plus importantes d'éléments viscosifiants sont utilisées.

Les résultats concernant GPK-3 sont affichés dans le tableau 7. Des valeurs plus élevées ont été calculées pour GPK-4 pour les raisons présentées dans le paragraphe précédent.

Il est très difficile d'estimer la quantité d'eau consommée, puisqu'il y a une recirculation de la boue pendant le forage. La valeur de 1 m<sup>3</sup>/m a été estimée après des discussions avec des ingénieurs de forage.

Éléments de la boue	quantité	unité/m	Frick <i>et al.</i> <sup>1</sup>
Sel	50	kg	
Soude caustique	2,8	Kg	
Lubrifiant écologique	1,5	Kg	
bentonite	5,8	Kg	7,7
carbonate de soude	0,6	kg	
Produits chimiques (génériques)	2,5	kg	6,7
eau	1	m <sup>3</sup>	0,67

Tableau 7 - Estimation des composants de la boue.

### 5.1.3. Cuvelage et cimentation

Les informations concernant le cuvelage et la cimentation ont été extraites des documents suivant :

- GPK-3 Final Report, Technical report for G.E.I.E prepared by Southern International Inc., 2002 ;

<sup>1</sup> Frick *et al.* considèrent également les éléments suivants : Starch (12, kg/m), craie (5, kg/m), carbonate de calcium (6, kg/m)

- GPK-4 Final Report, Technical report for G.E.I.E prepared by Gandy Inc., 2004.

Ces documents sont très détaillés : il a été possible d'extraire les valeurs exactes des matériaux utilisés pour ces opérations. Les données concernant GPK-4 sont très similaires par rapport à ceux de GPK-3.

« Produits chimiques » comprend tous les produits mineurs (inhibiteur de corrosion, lubrifiant, etc.) utilisés pour la cimentation.

Cuvelage et cimentation	Quantité		Frick <i>et al.</i>
Ciment (portland)	33,43	kg/m	23,5
Ciment (haut fourneau)	4,90	kg/m	7 (non spécifié)
Eau	0,10	m <sup>3</sup> /m	0,0169
Produits chimiques	0,25	kg/m	0,4
Bentonite	2,11	kg/m	0,2
Sel	0,49	kg/m	
sable	1,52	kg/m	7
Acier pour le cuvelage	111,3	kg/m	103,1

Tableau 8 - Matériaux pour cuvelage et cimentation.

#### 5.1.4. Fermeture du puits

À la fin de vie de la centrale, les puits sont fermés avec un processus de cimentation. Plusieurs « bouchons » de ciment sont créés à différentes profondeurs (souvent correspondant aux variations de diamètre). Pour cette étude, il a été supposé une cimentation verticale d'environ 1 000 m (repartie en plusieurs bouchons de 100 à 200 m de longueur verticale). Une fois calculé le volume du puits qui doit être cimenté, nous obtenons les valeurs présentées dans le tableau suivant.

Éléments pour la fermeture du puits	Quantité		Frick <i>et al.</i> <sup>2</sup>
Ciment (Portland)	7,25	kg/m	4,9
Bentonite	0,87	kg/m	
Eau	0,007	m <sup>3</sup> /m	
Produits chimiques (générique)	0,06	kg/m	

Tableau 9 - Estimation des matériaux pour la fermeture d'un puits.

#### 5.1.5. Déchets de forage

La quantité de déchets de forage a été estimée à partir du calcul du volume du puits GPK-3 (environ 200 m<sup>3</sup>) et de la densité des roches (2,3 g/cm<sup>3</sup> jusqu'à 1 400 m, et 2,65 g/cm<sup>3</sup> en moyenne pour les autres 3 700 m). Nous obtenons environ 1 500 tonnes au total, donc une valeur moyenne de 0,29 t/m. Frick *et al.* proposent 0,456 t/m.

<sup>2</sup> Frick *et al.* proposent également une quantité de 51,1 kg/m de gravier.

### 5.1.6. Transport des matériaux pour les puits

Pour considérer le transport des matériaux jusqu'au site de forage, les hypothèses suivantes ont été faites :

- transport de 150 km par camion pour tous les éléments ;
- transport additionnel de 1 200 km par train pour les éléments en acier pour le cuvelage (en supposant une importation à partir de l'Europe de l'est).

Pour le calcul d'impact, le transport est exprimé en « tkm », le produit entre le poids du matériel et la distance de transport.

### 5.1.7. Ensemble des données pour la réalisation d'un puits

En additionnant les données présentées précédemment, les valeurs suivantes sont obtenues :

	Élément	Quantité	Unité	Bauer <i>et al.</i> <sup>3</sup>
Forage, cuvelage, cimentation, fermeture (1 puits)	Acier	111,3	kg/m	210
	Ciment (portland)	40,7	kg/m	200
	Ciment (haut fourneau)	4,9	kg/m	
	Eau	1,1	m <sup>3</sup> /m	3,34
	Produits chimiques	2,8	kg/m	42,2
	Bentonite	8,8	kg/m	20
	sel	50,5	kg/m	
	Sable	1,5	kg/m	
	Soude caustique	2,8	kg/m	
	Lubrifiant écologique	1,5	kg/m	
	carbonate de soude	0,6	kg/m	
	Gazole pour le forage	4000	MJ/m	7000
	Elimination des déchets de forage	0,3	t/m	
	transport des éléments (camion)	49	tkm/m	
	transport des éléments (train)	134	tkm/m	

Tableau 10 - Résultats globaux pour la réalisation d'un puits.

La machine de forage et les têtes de forage ne sont pas incluses dans le calcul. La quantité de combustible et ciment pour la préparation du site est négligée.

Il faut noter que Bauer *et al.* utilisent, pour le forage, les données de Jungbluth (2004), qui ont été calculé pour un puits pétrolier. Pour plus de détails concernant la comparaison avec les données proposées par Frick *et al.* et Jungbluth *et al.*, voir le chapitre 4 de la thèse de Master.

<sup>3</sup> Bauer *et al.* considèrent également les éléments suivants : baryte (270 kg/m), produits chimiques (organiques) (9,05 kg/m), lubrifiant (60 kg/m), lignite (0,2 kg/m).

## 5.2. STIMULATION DU PUIT

### 5.2.1. Stimulation hydraulique

Les valeurs concernant la stimulation hydraulique ont été estimées à partir de :

- Schindler *et al.*, Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric Power Production in the Upper Rhine Graben, Central Europe, Proceedings of World Geothermal Congress, Bali, 2010 ;
- Huenges, Geothermal Energy Systems, Wiley-VCH, 2010 ;
- Technical report on the 2003 hydraulic testing and stimulation program, Report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, prepared by Hettkamp *et al.*, 2004.

Stimulation hydraulique à Soultz-sous-Forêts (Huenges, 2010)						
Puits	Durée [d]	Débit [l/s]	Productivité initiale [l/s/bar]	Facteur d'amélioration	Phénomènes sismiques	Volume [m <sup>3</sup> ]
GPK2	6	50	0,02	20	14 000	23 100
GPK3	11	50	0,2	1,5	21 600	34 000
						<b>57 100</b>
						<b>TOT GPK2+GPK3</b>

Tableau 11 - Stimulation hydraulique à Soultz-sous-Forêts : GPK-2, GPK-3.

Stimulation hydraulique à Soultz-sous-Forêts (Huenges 2010)						
Puits	Durée [d]	Débit [l/s]	Productivité initiale [l/s/bar]	Facteur d'amélioration	Phénomènes sismiques	Volume [m <sup>3</sup> ]
GPK4	3,5	30	0,01	20	57 00	9 300
	4	45	0,01		3 000	12 300
						<b>21 600</b>
						<b>TOT GPK4</b>

Tableau 12 - Stimulation hydraulique à Soultz-sous-Forêts : GPK-4.

Stimulation hydraulique à Landau (Schindler <i>et al.</i> , 2010)		
Puits	Débit [l/s]	Volume [m <sup>3</sup> ]
GtLa2	10 - 86	4 600
GtLa2	4 - 190	6 600

**11 200**      **TOT GtLa2**

Tableau 13 - Stimulation hydraulique à Landau : GtLa2.

Frick *et al.* et Bauer *et al.* proposent des valeurs différents : respectivement 260 000 m<sup>3</sup> et 750 m<sup>3</sup> par puits. À partir des données présentées, une estimation de 20 000 m<sup>3</sup> d'eau par puits a été effectuée.

Les informations concernant le sel et le combustible pour la pompe d'injection ont été extraites du bilan. Les choix définitifs sont montrés dans les tableaux suivants.

		GPK2 + GPK3	GPK4	Estimation finale
TOT sel	ton	595,27	398,37	
	t/puits	297,63	398,37	<b>300</b>
	kg/m <sup>3</sup>	10,43	18,44	<b>15</b>

Tableau 14 - Quantité de sel pour la stimulation hydraulique.

		GPK2 + GPK3	GPK4	Estimation finale
TOT gazole	litres	57 941	54 000	<b>39 041</b>
	GJ	2 078	1 936	
	GJ/puits	1 039	1 936	<b>1 400</b>
	GJ/m <sup>3</sup>	0,04	0,09	<b>0,07</b>

Tableau 15 - Quantité de combustible pour la stimulation hydraulique.

### 5.2.2. Stimulation chimique

Les valeurs concernant la stimulation hydraulique ont été estimées à partir de : Nami et al., Chemical stimulation operation for reservoir development of the deep crystalline HDR/EGS system at Soultz-sous-Forêts, proceedings of thirty-second Workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, USA, 2008

Puits	TOT HCl [kg]	conc [g/l]	Durée [h]	débit [l/s]	volume [m <sup>3</sup> ]
GPK-2	1400	1,8	6	30	650
		1,8	10	15	810
		0,9		30	

Tableau 16 - Stimulation chimique de GPK-2.

Pour simplifier le calcul, nous avons seulement considéré la stimulation par HCl. À partir du graphique qui montre la pression de réinjection et le débit d'eau, il a été possible de calculer la quantité totale d'eau et le combustible pour la pompe (en supposant une efficacité de 65 % pour la pompe et de 30 % pour le générateur).

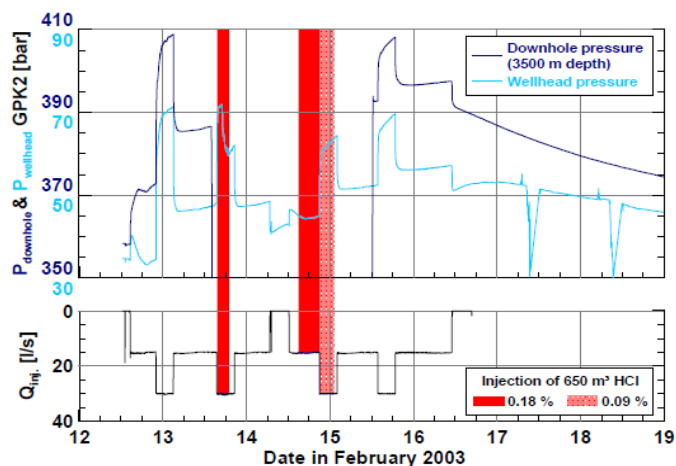


Tableau 17 - Stimulation chimique de GPK-2 avec HCl (Nami et al., 2008).

### 5.2.3. Résumé des matériaux utilisés lors de la stimulation d'un puits

Le tableau suivant résume les matériaux nécessaires à la stimulation.

Stimulation hydraulique	Eau	20000	m <sup>3</sup> /puits
	Sel	300	t/puits
	gazole	1 400	GJ/ puits
Stimulation chimique	Eau	6 000	m <sup>3</sup> /puits
	Gazole	200	GJ/puits
	HCl	1,4	t/puits
	Transport des matériaux pour la stimulation	51233	tkm

Tableau 18 - Matériaux pour la stimulation.

La quantité totale de gazole utilisé lors de la stimulation est de 1 600 GJ par puits. Frick *et al.* proposent 3 000 GJ/puits et Bauer *et al.* supposent 1 820 GJ/puits.

## 5.3. ÉQUIPEMENTS DE SURFACE

### 5.3.1. Modèle de calcul

Pour déterminer l'inventaire des entrants/sortants du système, un modèle simplifié de la centrale EGS a été élaboré.

La définition de la liste des matériaux et processus est basée sur :

- rapports techniques ;
- manuels des équipements (Turboden, Cryostar, Masserenti...) ;
- bons de livraison ;
- entretiens (équipe GEIE, Cryostar, experts...) ;
- hypothèses.

Comme la plupart des données ont été récupérées sur le site de Soultz-sous-Forêts, dans une première phase un inventaire a été élaboré en se référant à une centrale de sa taille (1,5 MW de puissance nette du ORC, environ 2 MW de puissance brute à la turbine). Cet inventaire est présenté dans le tableau 19 et est disponible dans la feuille de calcul « Soultz 2MWgross.xls ». Pour les autres scénarios, selon leur puissance brute à la turbine, d'autres inventaires ont été calculés (la taille différente des équipements a été considéré à travers une extrapolation massique). Ces autres inventaires sont présentés dans les feuilles de calcul : « Soultz 1MWgross », « Soultz 2.8MWgross », « Soultz 4.5MWgross », « Soultz 5.5MWgross ».

On suppose la durée de vie de la centrale à 25 ans.

La procédure de calcul est la suivante :



En considérant un élément « A » de la centrale,

- N est le nombre d'éléments égaux présents dans la centrale ;
- X est la quantité, en tonnes, d'un des matériaux (acier, cuivre, etc) qui composent A ;
- Y est la distance de transport (de l'usine de fabrication au site de la centrale EGS) ;
- Z est la durée de vie de l'élément.

La quantité à considérer pour le transport, en "tkm", est :  $V = N \times X \times Y \times 25/Z$ .

La quantité de matériel sur le cycle de vie est  $T = N \times X \times 25/Z$ .

Elément A	Quantité unitaire				tkm	CV [ans]	Source	Quantité CV	
	Quantité	Quantité	unité	Source				Quantité	unité
	N								
Matériel	X	ton	Réf. 1		Z	Réf. 4	T	ton	
Transport		Y	km	Réf. 2	V				
Fin de vie		T	ton	Réf. 3					

Figure 4 - Calculs pour les équipements de surface.

Cette procédure est répétée pour les éléments suivants :

- pompe de production ;
- pompe de réinjection ;
- turbine et moteur de l'ORC ;
- pompe de circulation de l'ORC ;
- échangeur de chaleur de l'ORC ;
- condensateur de l'ORC ;
- câbles ;
- tuyauterie et valves ;
- filtres ;
- chariot élévateurs ;
- séparateurs de vapeur ;
- transformateur et d'autres équipements électriques ;
- locaux techniques ;
- compresseurs.

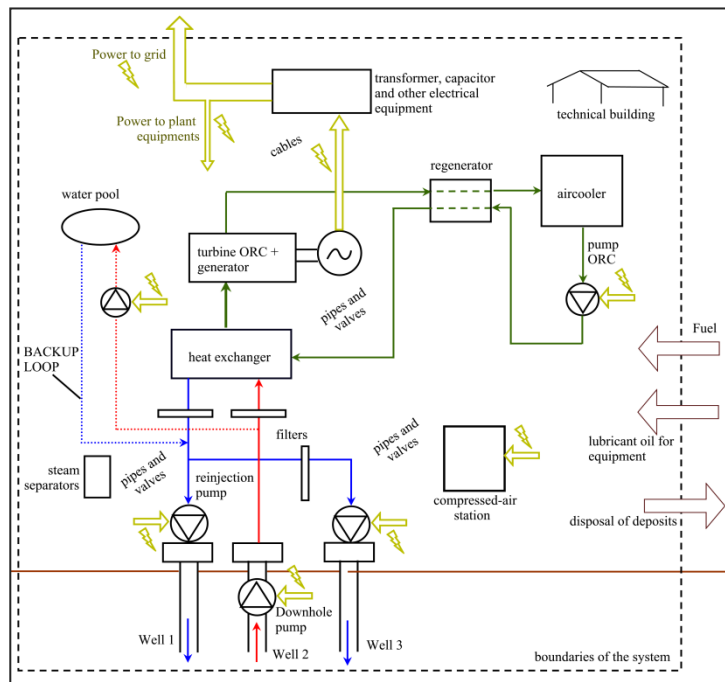


Figure 5 - Schéma simplifié de la centrale (réalisé pour la thèse de Master).

Comme l'isobutane n'est pas disponible dans la base de données Ecoinvent, le calcul a été mené en considérant l'utilisation du butane comme fluide de remplacement (qui peut également être utilisé dans des cycles ORC).

Vue l'influence limitée des équipements de surface sur les impacts environnementaux, des simplifications ont été faites sur la composition des éléments. En ce qui concerne leur fabrication, les données d'Ecoinvent sur la fabrication de produits en acier et cuivre ont donc été utilisées.

### 5.3.2. Hypothèses sur le transport des équipements de surface

Comme spécifié précédemment, on suppose que la centrale EGS est située en Europe centrale. Pour le transport des équipements de surface, les hypothèses suivantes ont été faites sur les distances de transport (production/vente → centrale EGS) :

- pour les matériaux faciles à repérer comme par exemple le gazole ou le lubrifiant : distance de 150 km ;
- pour les éléments du cycle ORC et les autres machines : distance de 600 km (un rayon de 600 km à partir de l'Alsace couvre la plupart de la France, de l'Allemagne et du nord de l'Italie) (voir figure 6) ;
- pour la tuyauterie : distance de 1 200 km, pour considérer les importations à partir de l'Europe de l'est.



Figure 6 - Hypothèses sur le transport des équipements de surface.

### 5.3.3. Hypothèses sur la fin de vie des équipements de surface

Les hypothèses suivantes ont été faites pour évaluer le traitement des matériaux à la fin de la vie de la centrale :

- les matériaux électriques, en acier et en cuivre sont éliminés en sites d'enfouissement pour les matériaux inertes ;
- le lubrifiant est éliminé dans des sites appropriés pour l'élimination des huiles usagées ;
- la tuyauterie, les dépôts des filtres et autres éléments en acier en contact avec des éléments radioactives, sont éliminés dans de sites de stockage pour les matériaux dangereux (une quantité annuelle de dépôts de 4 kg/(l/s) a été supposée) ;
- le fluide organique est substitué tous les 5 ans et éliminé à travers sa combustion ;
- les déchets sont transportés par camion sur une distance de 150 km. Les dépôts radioactifs sont transportés sur une distance 1 200 km, en prenant en compte qu'il faut le traiter avant le stockage. (Ce traitement n'est pas pris en compte, car il n'y a actuellement pas de modules dans Ecoinvent pour décrire ce processus).

### 5.3.4. Résumé des matériaux pour les équipements de surface

Le tableau suivant présente un résumé des matériaux des équipements de surface et de leurs quantités sur le cycle de vie. Pour plus de détails concernant les hypothèses,

voir les commentaires inclus dans le fichier de calcul ou le chapitre 4 de la thèse de Master.

	Élément	Quantité sur le cycle de vie	Unité
Equipements de surface	Acier	222	t
	Acier inoxydable	77	t
	Cuivre	25	t
	Fluide organique	87,5	m <sup>3</sup>
	Lubrifiant	50 000	l
	Matériel isolant	0,5	t
	HCl	25	t
	Composants électriques	4,4	t
	Locaux techniques	400	m <sup>2</sup>
	Gazole (phase d'opération)	75 000	l
	Transport des équipements	270 700	tkm
Fin de vie	Acier (site d'enfouissement)	279	t
	Cuivre (site d'enfouissement)	25	t
	Matériaux dangereux (tuyauterie, filtres)	25	t
	Dépôts radioactifs	4,4	t
	élimination des huiles usagées	50 000	l
	Fluide organique	87,5	m <sup>3</sup>
	Transport des déchets	87 475	tkm

Tableau 19 - Matériels pour les équipements de surface.

## 5.4. INCERTITUDE

Comme expliqué dans les paragraphes précédents, pour cette étude la plupart des données sont collectées à travers l'analyse de l'usine pilote de Soultz-sous-Forêts. Ainsi, l'aspect positif repose sur des mesures de terrain mais elles ne sont cependant pas totalement représentatives pour toutes les installations du centre de l'Europe. Étant donné que les valeurs n'ont pas été calculées à partir des informations pondérées sur un grand nombre de sources, il n'a pas été possible de caractériser l'incertitude avec une distribution statistique.

Toutefois, pour donner une idée de leur niveau de précision, des intervalles d'incertitude peuvent être estimés basés sur une évaluation critique qualitative. Ces intervalles de confiance seront utiles pour l'analyse de Monte-Carlo effectuée pour la validation présentée dans le paragraphe 4.1. Ces intervalles ont été fixés comme :

- $\pm 10$  % pour les données concernant le forage (tubage, cimentation, etc.) car pour un certain diamètre de forage, la variabilité des données est raisonnablement limitée. De plus, ces informations ont été récupérées à partir de rapports très détaillés ;
- $\pm 20$  % pour les données concernant les éléments de surface (et leur élimination), car les résultats proviennent de l'agrégation d'informations provenant de plusieurs sources différentes et plus d'hypothèses ont été faites.  $\pm 20$  % est également

associée aux données sur la consommation de carburant pour le forage (4 GJ / m) en raison de la variété des valeurs proposées par d'autres auteurs (tab. 6) ;

- $\pm 40$  % pour les données relatives à la stimulation hydraulique car ce processus est très dépendant du site et très peu d'informations sont actuellement disponibles sur ce sujet.

Pour le transport, une incertitude supplémentaire de 10 % est prise, puisque pour la valeur en « tkm », il y a une double incertitude, à la fois la quantité et la distance.

Toutefois, l'incertitude liée à toutes les données et les processus venant d'Ecoinvent ont une influence beaucoup plus élevée sur les résultats que les incertitudes décrites dans le présent paragraphe. Pour plus d'informations, voir le chapitre 5 de la thèse de Master.



## 6. Élaboration de scénarios

Pour évaluer les performances environnementales des plusieurs configurations d'une centrale EGS, dix scénarios ont été élaborés, selon les critères suivants :

- numéro de puits : triplet ou doublet ;
- profondeur des puits :
  - 2 500 m : avec une température de production de 145 °C (en tête du puits),
  - 4 000 m : avec une température de production de 165 °C (en tête du puits) ;
- débit de production :
  - à 2 500 m: entre 35 et 70 l/s,
  - à 4 000 m: entre 20 et 40 l/s ;
- débit de réinjection : plus ou moins élevé selon le numéro de puits de réinjection ;
- risque de sismicité induite : fonction (empirique) du débit de réinjection (tab. 22).

Débit de réinjection	Risque de sismicité
20 l/s	Très bas
35-40 l/s	Bas
70 l/s	Élevé
140 l/s	Très élevé

Tableau 20 - Estimation du risque de sismicité induite.

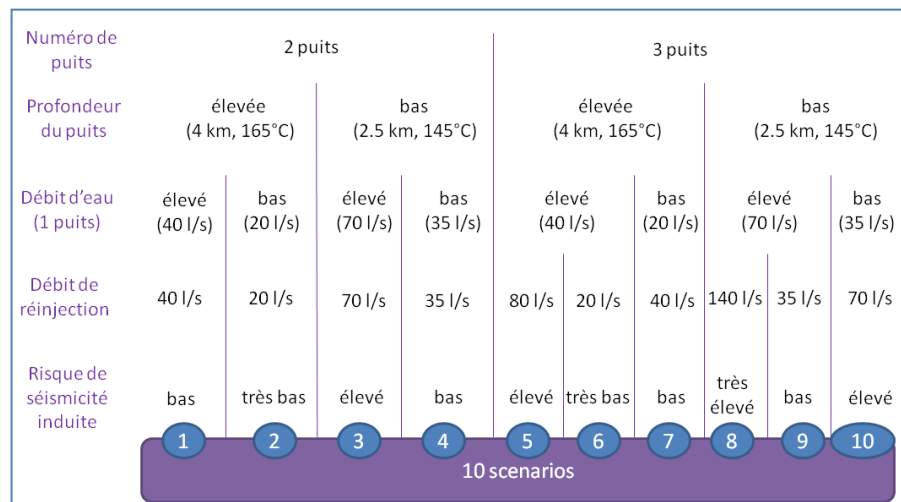


Figure 7 - Élaboration des dix scénarios.

À travers des hypothèses sur le cycle ORC et sur la consommation d'énergie des auxiliaires et des pompes, nous arrivons à calculer la puissance installée pour les 10 scénarios. Le tableau suivant présente les principaux données des dix scénarios.

	Unit	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5
Profondeur des puits	km	4	4	2,5	2,5	4
Température de production	°C	165	165	145	145	165
Température de reinjection	°C	70	70	70	70	70
Débit totale de production	l/s	40	20	70	35	80
Puissance brute (sortie turbine)	MW	2,28	1,14	2,73	1,36	4,56
Puissance auxiliaires	kW	456	228	546	273	912
Efficacité thermique	%	12	12	10,4	10,4	12
Puissance pompe de production	kW	216	108	378	189	432
Puissance pompe de reinjection	kW	144	0	252	126	288
Puissance nette finale	MW	<b>1,46</b>	<b>0,80</b>	<b>1,55</b>	<b>0,78</b>	<b>2,93</b>
Dépôts radioactifs	kg/an	160	80	280	140	320
Production électrique	GWh/an	<b>11,68</b>	<b>6,4</b>	<b>12,4</b>	<b>6,24</b>	<b>23,44</b>
Risque de sismicité induite		Bas	Très bas	Élevé	Bas	élevé

	Unit	cas 6 (référence)	cas 7	cas 8	cas 9	cas 10
Profondeur des puits	km	4	4	2,5	2,5	2,5
Température de production	°C	165	165	145	145	145
Température de reinjection	°C	70	70	70	70	70
Débit totale de production	l/s	40	40	140	70	70
Puissance brute (sortie turbine)	MW	2,28	2,28	5,46	2,73	2,73
Puissance auxiliaires	kW	456	456	1092	546	546
Efficacité thermique	%	12	12	10,4	10,4	10,4
Puissance pompe de production	kW	216	216	756	378	378
Puissance pompe de reinjection	kW	0	144	504	252	252
Puissance nette finale	MW	1,61	1,46	3,11	1,55	1,55
Dépôts radioactifs	kg/y	160	160	560	280	280
Production électrique	GWh/y	12,88	11,68	24,88	12,4	12,4
Risque de sismicité induite		Très bas	Bas	Très élevé	bas	élevé

Tableau 21 - Données techniques des dix scénarios.

Le calcul ACV a été effectué avec le logiciel SimaPro. La figure 8 présente un schéma simplifié du modèle intégré dans le logiciel pour pouvoir introduire les données concernant les matériaux et les processus impliqués dans le cycle de vie de l'EGS.

Comme présenté dans la section précédente, des informations sur le type de matériaux, les quantités, le transport et l'élimination ont été récupéré à travers une série de calculs et d'hypothèses. Une fois introduit ces données dans le modèle montré en fig. 8, d'autres données de « background » (liés aux procédés de fabrication ou d'extraction des matières premières) sont prises de la base de donnéesecoinvent. Par exemple, dans les modules « équipements du ORC », il a été calculé qu'un montant de 222 tonnes est nécessaire pour les équipements de surface au cours du cycle de vie. Puis les données concernant la fabrication, l'extraction des matières premières et tous les autres processus industriels qui sont liés à la disponibilité de tels montants de tonnes sur le site EGS, sont extraites d'Ecoinvent.



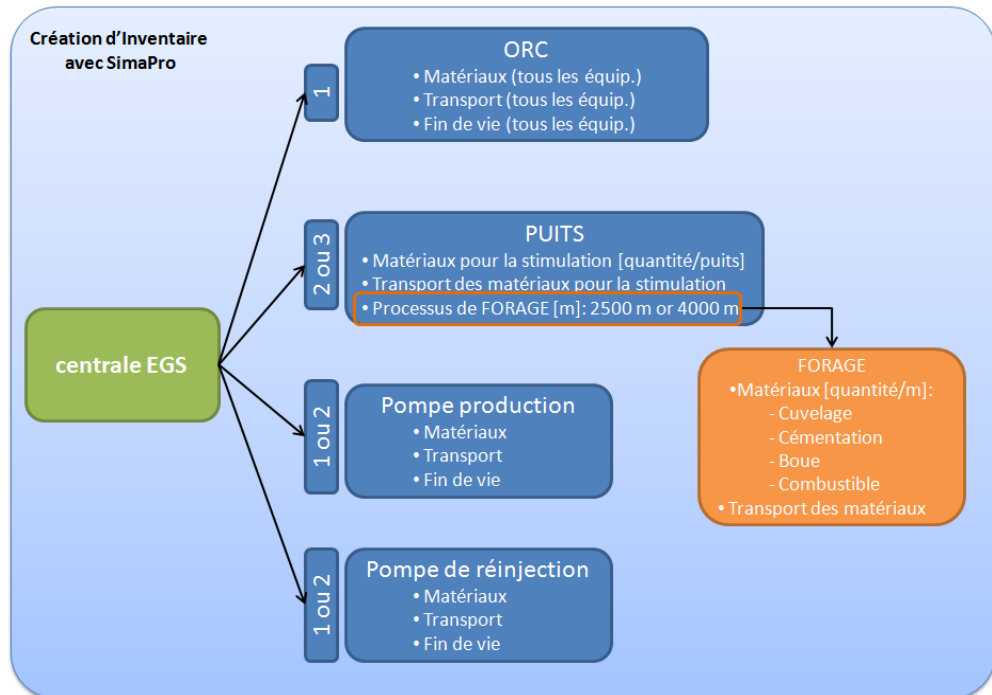


Figure 8 - Création d'inventaire en SimaPro.

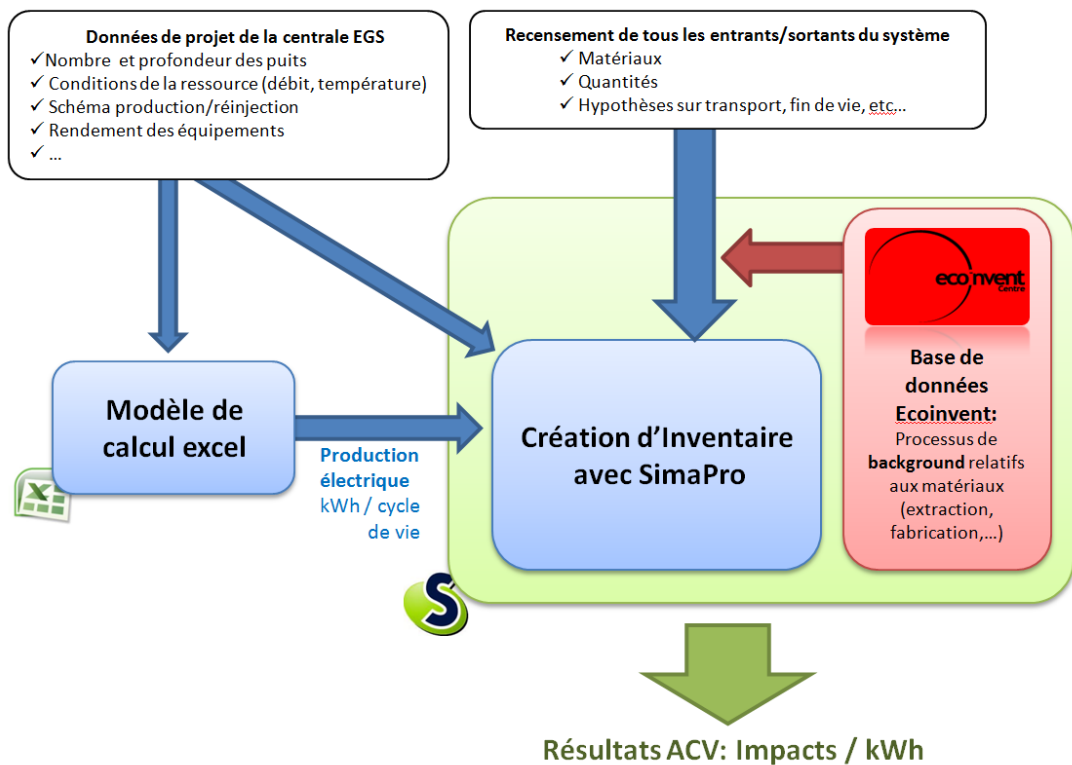


Figure 9 - Schéma de calcul.

La figure 9 montre le schéma global de calcul. Le modèle est flexible et adaptable à d'autres centrales, du moment qu'il est possible de définir plusieurs paramètres d'un projet :

- nombre de puits ;
- profondeur des puits ;
- schéma production/réinjection ;
- durée de vie ;
- conditions de la ressource ;
- production électrique ;
- etc.

## 7. Résultats

### 7.1. VALIDATION DU MODÈLE

La validation de notre nouvel inventaire de cycle de vie est proposée à travers la comparaison avec les résultats de l'ACV d'une des études de cas proposée par Frick *et al.* [1] : le scénario B1. Évidemment, l'analyse des impacts est réalisée en accord avec la méthode utilisée dans cette publication, qui considère quatre catégories d'impact :

- changement climatique :  $\text{gCO}_2\text{eq} / \text{kWh}$  ;
- acidification :  $\text{mgSO}_2\text{eq} / \text{kWh}$  ;
- eutrophisation :  $\text{mgPO}_4^{3-}\text{eq} / \text{kWh}$  ;
- ressources :  $\text{kJ} / \text{kWh}$ .

Comme le montrent<sup>4</sup> les figures 10 à 13, les résultats de notre nouveau modèle (adapté aux conditions du scénario B1) sont dans le même ordre de grandeur et compris dans les intervalles de confiance présentés par l'étude de Frick *et al.* Les différences sont imputables aux légères dissimilitudes dans les hypothèses des LCI.

Nos incertitudes liées aux catégories « acidification » et « eutrophication » peuvent être expliquées par la précision plus faible d'Ecoinvent relative aux émissions associées (essentiellement NOx et PM). Pour plus d'informations, voir la thèse de Master.

Cette comparaison avec des résultats très proches est importante, car elle permet de calibrer le nouveau modèle et d'évaluer sa robustesse. Dans les paragraphes suivants, l'étude est centrée sur les dix scénarios décrits précédemment en évaluant leurs performances environnementales en suivant la méthodologie décrite au paragraphe 4.3. (fig. 14).

---

<sup>4</sup> Représentation avec boîte à moustaches : rectangle coupé par la médiane. Limites du rectangle : premier et troisième quartile. Segments : 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentile.

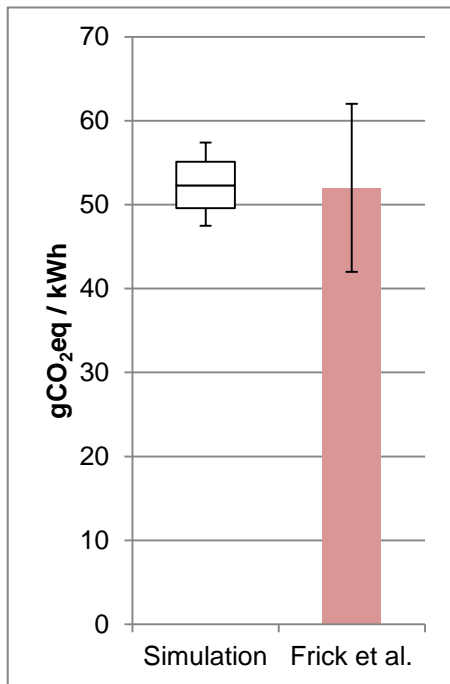


Figure 10 - Changement climatique.

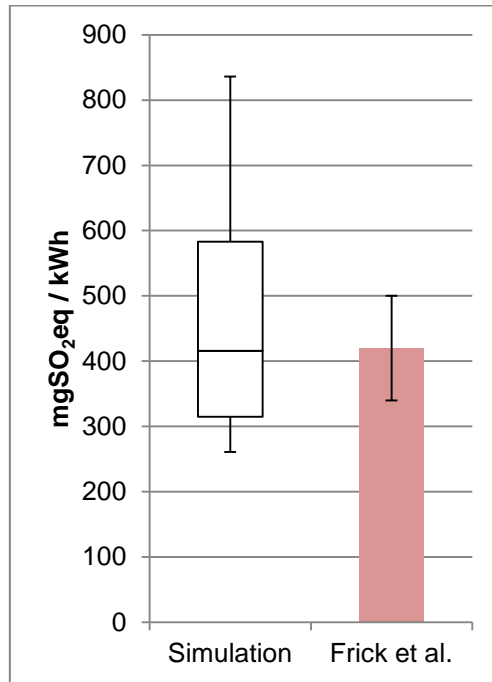


Figure 11 - Acidification.

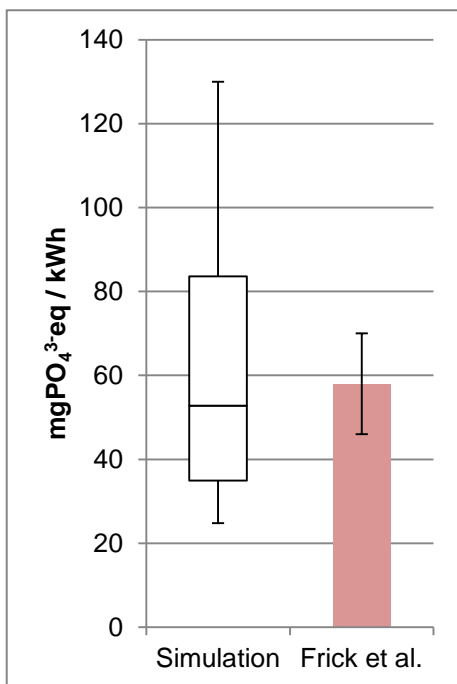


Figure 12 - Eutrophisation.

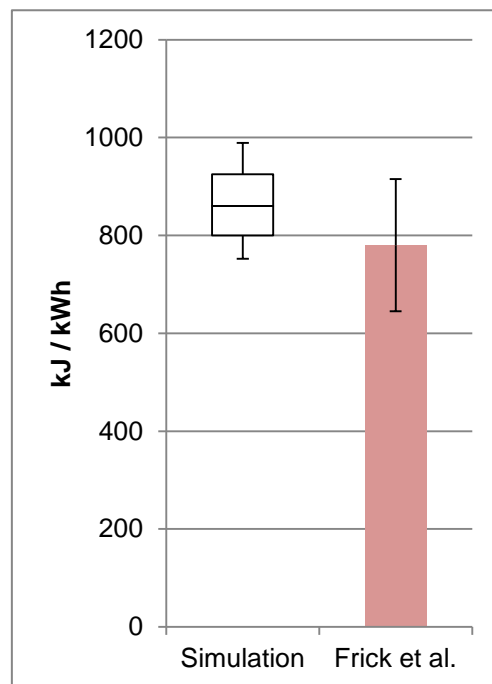


Figure 13 - Ressources.

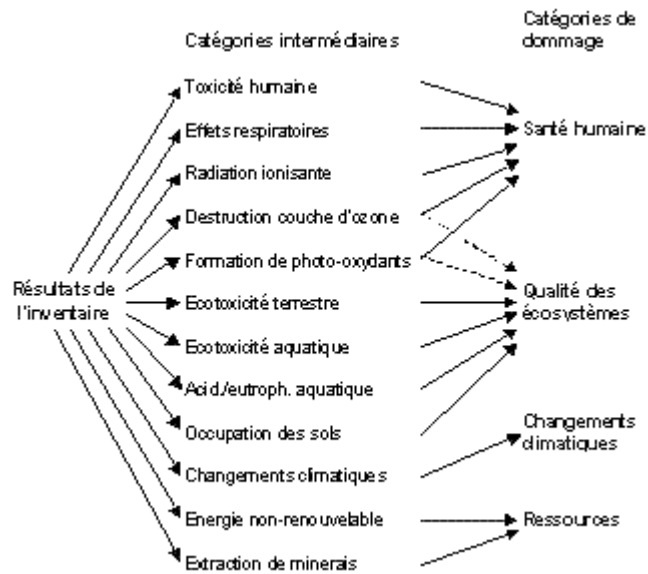


Figure 14 - Méthode IMPACT2002+.

## 7.2. RÉSULTATS DU CAS DE RÉFÉRENCE

Les performances environnementales du cas 6 (pris comme référence, étant donné sa similarité avec la configuration du site de Soultz) sont présentées dans le tableau 22.

Catégorie d'impact	Unité / kWh	
Santé humaine	DALY	6,78E-08
Qualité des écosystèmes	PDF·m <sup>2</sup> ·y	1,17E-02
Changement climatique	gCO <sub>2</sub> eq	36,7
Ressources	kJ	579
Risque de sismicité	très bas	

Tableau 22 - Résultats : cas de référence.

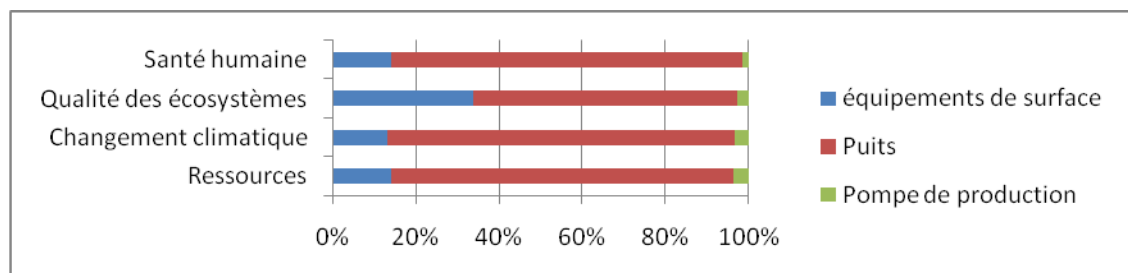


Figure 15 - Résultats : cas de référence.

Avec un forage unique de production (40 l/s) et une double réinjection à débit faible, le risque sismique est considéré comme très faible. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont assez bas comparés à des résultats analogues tirés de la revue de littérature (Frick *et al.*, Huenges) : ceci est dû en particulier à l'hypothèse de

consommation de 4 GJ/m de diesel pour le forage. En effet, l'étape de forage est la plus critique (segment rouge, fig. 15).

Les figures 16 à 23 montrent plus en détails les processus les plus significatifs et les substances influençant le plus les quatre catégories d'impact.

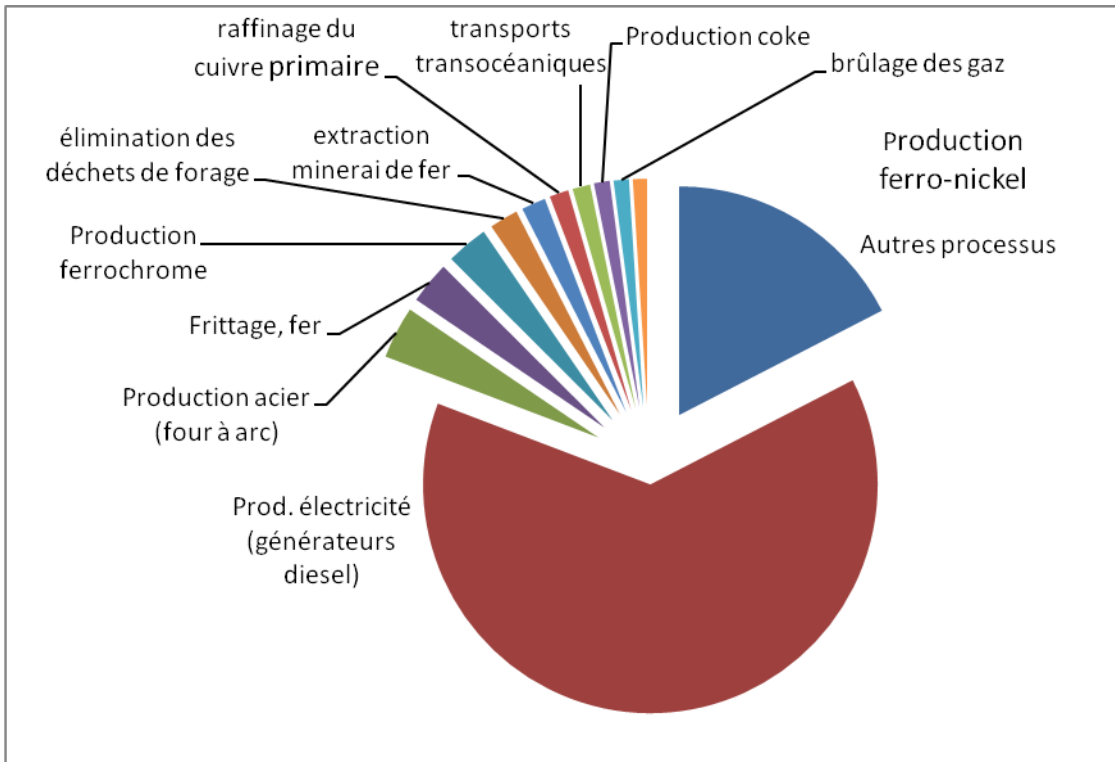


Figure 16 - Processus (santé humaine).

La production d'électricité est le processus ayant le plus d'effet sur la santé et sur le changement climatique (fig. 16 et 18). En ce qui concerne la qualité de l'écosystème (fig. 17), les processus d'explosion pendant l'extraction de matières premières (en particulier pour la production de fer et d'acier) ainsi que l'émission de déchets (élimination des déchets de forage) (pendant la production de pétrole) sont mis en évidence. La production de pétrole onshore et offshore sont les principaux responsables de la demande de ressources énergétiques non renouvelables (fig. 19).

Pour les substances, les résultats soulignent l'importance de l'émission de particules (PM) et de NOx sur la santé (fig. 20). La qualité de l'écosystème est particulièrement influencée, mis à part les oxydes d'azote, par les effets polluants de l'aluminium (émis dans l'atmosphère pendant les opérations d'explosion à ciel ouvert et dans les sols à cause de l'élimination des déchets de forage) et du zinc (lié en particulier à la manufacture dans les fours électriques en arc). Le changement climatique (fig. 22) est particulièrement influencé par l'émission de dioxyde de carbone. La raréfaction des ressources non renouvelables est essentiellement due aux besoins de pétrole, charbon et gaz liés aux processus industriels afférents.

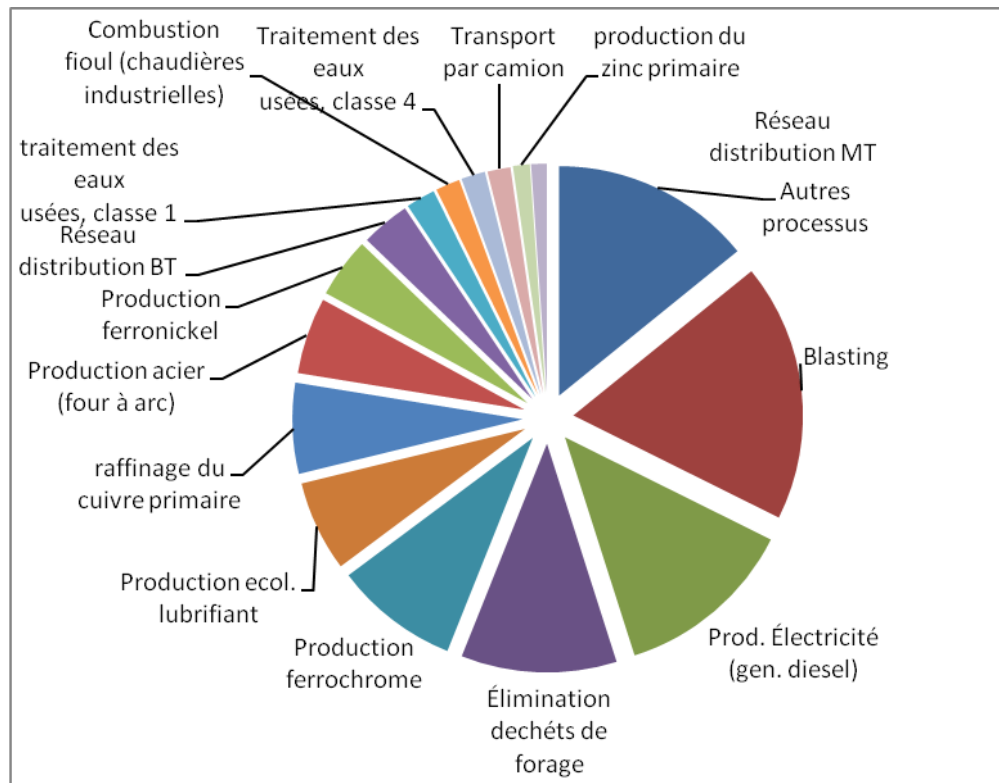


Figure 17 - Processus (qualité des écosystèmes).

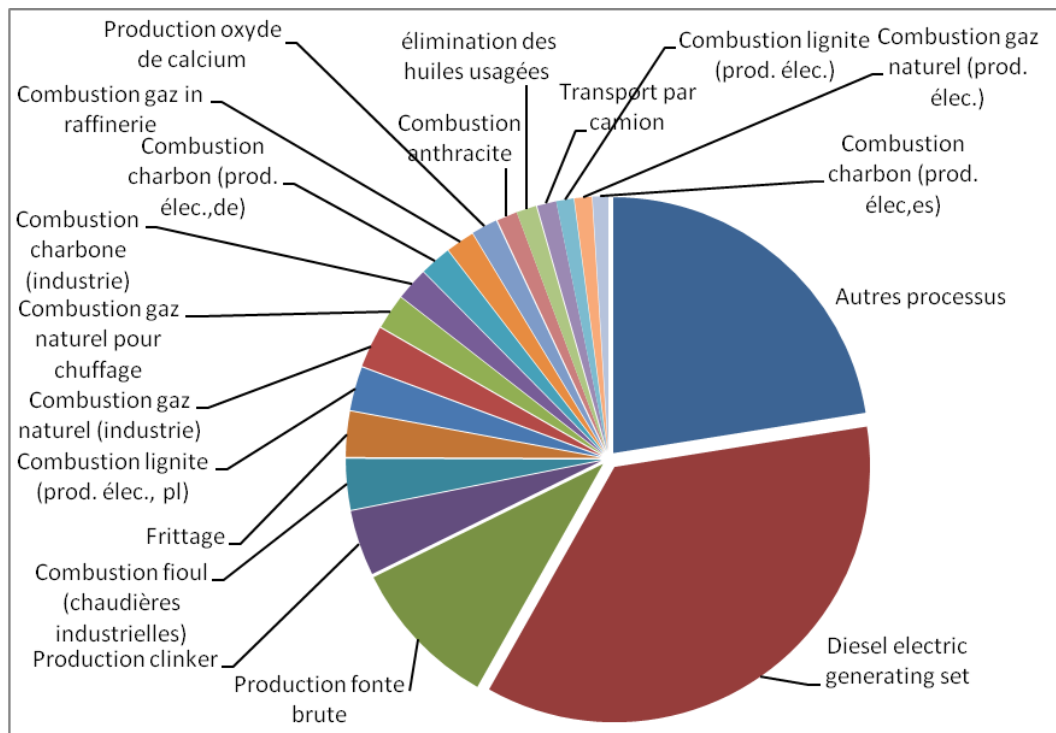


Figure 18 - Processus (changement climatique).

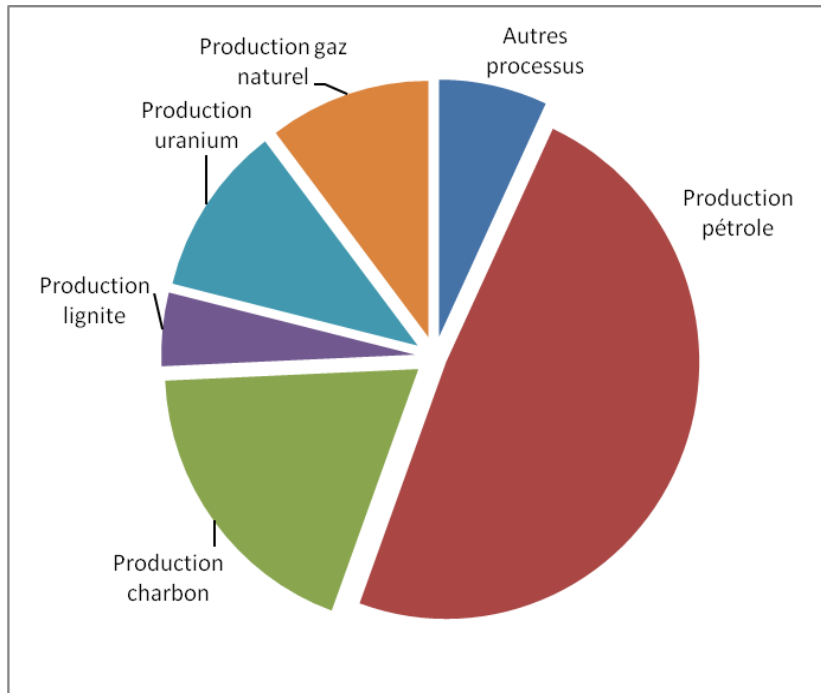


Figure 19 - Processus (ressources).

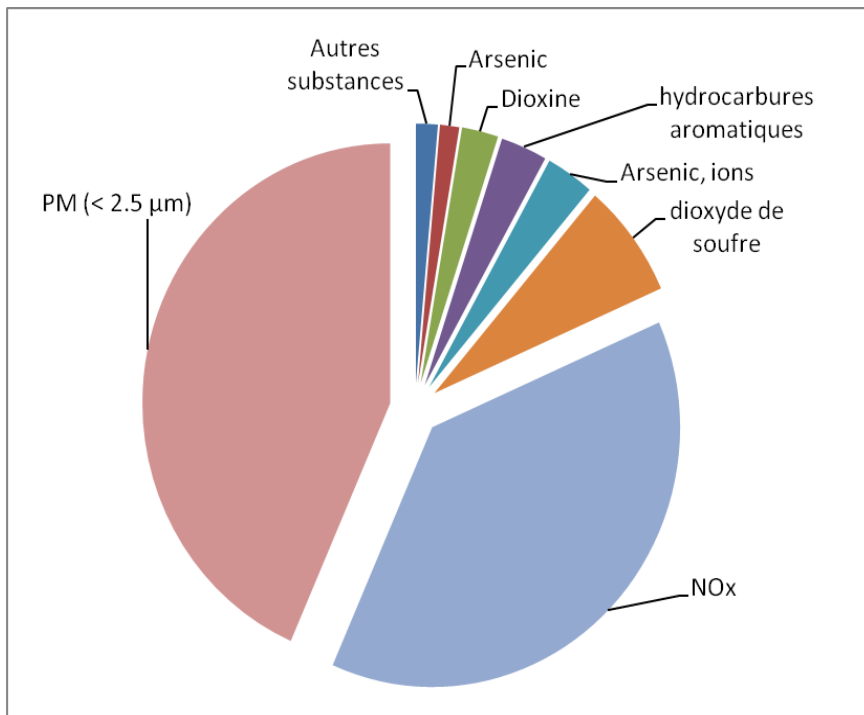


Figure 20 - Substances (santé humaine).



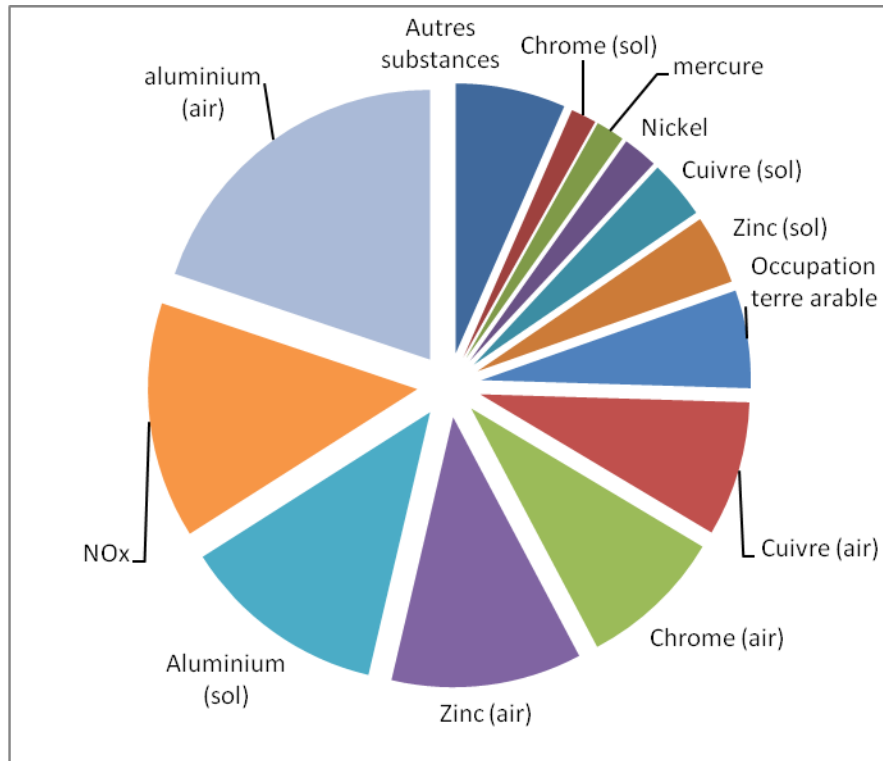


Figure 21 - Substances (qualité des écosystèmes).

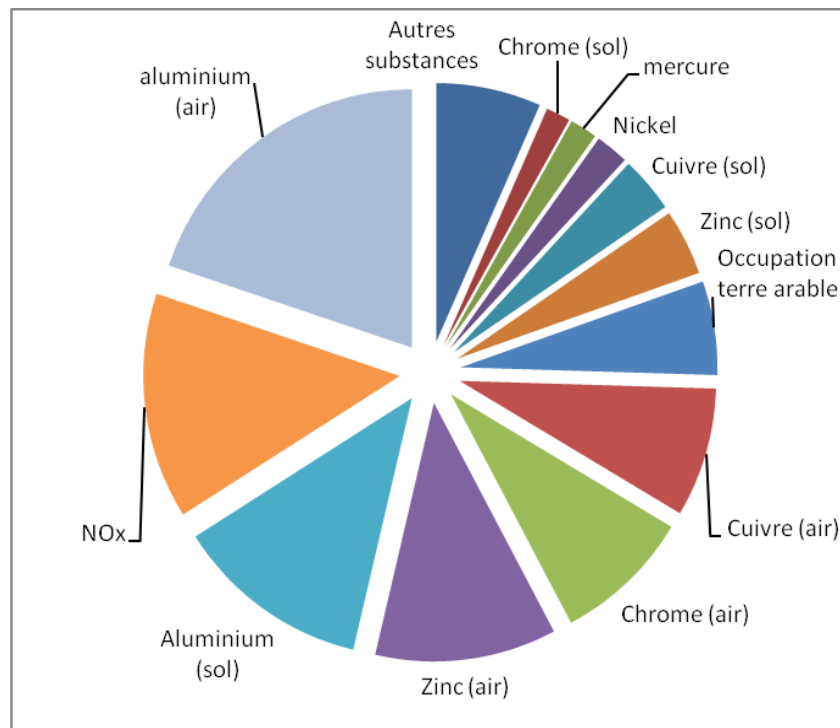


Figure 22 - Substances (changement climatique).

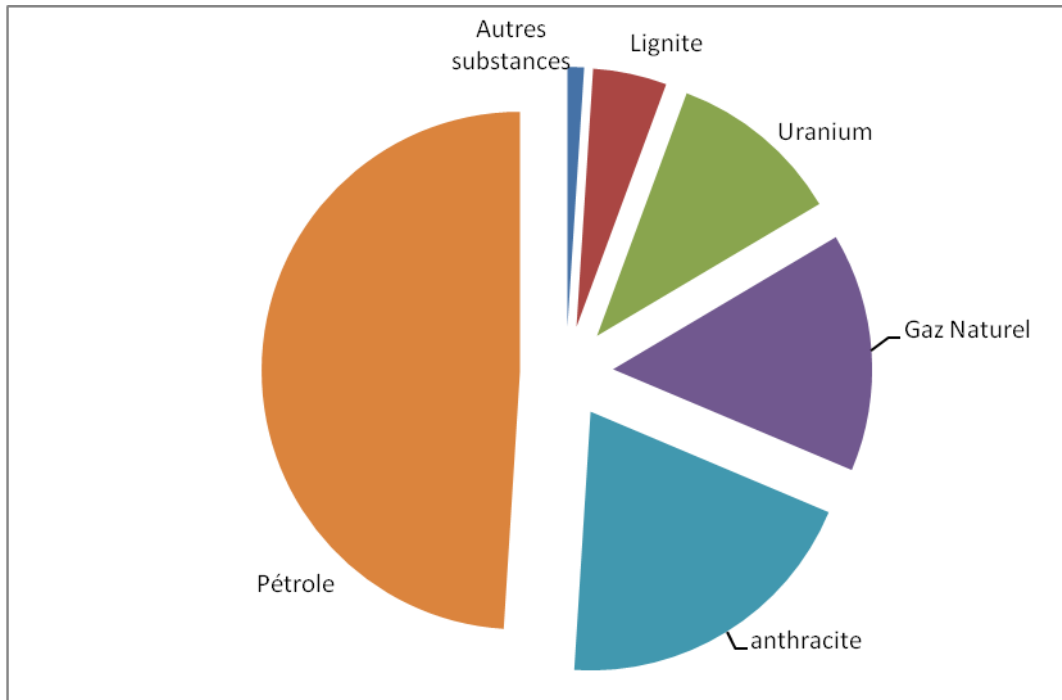


Figure 23 - Substances (ressources).

### 7.3. RÉSULTATS DES DIX ÉTUDES DE CAS

Les figures 24, 26, 27, 28 présentent les résultats de l'ACV des dix études de cas décrites précédemment. Les émissions de GES sont dans un intervalle de 16,9 à 49,8 gCO<sub>2</sub>eq/kWh et la demande d'énergies non renouvelables varie entre 272 et 785 kJ/kWh. Ces résultats sont comparables avec ceux observés lors de la veille bibliographique (fig. 24, 26).

Les performances environnementales sont comparables à celles des autres énergies renouvelables et largement meilleures que celles des technologies traditionnelles (fig. 25).

En outre, les performances environnementales peuvent varier considérablement selon les conditions du réservoir et la conception de la centrale.

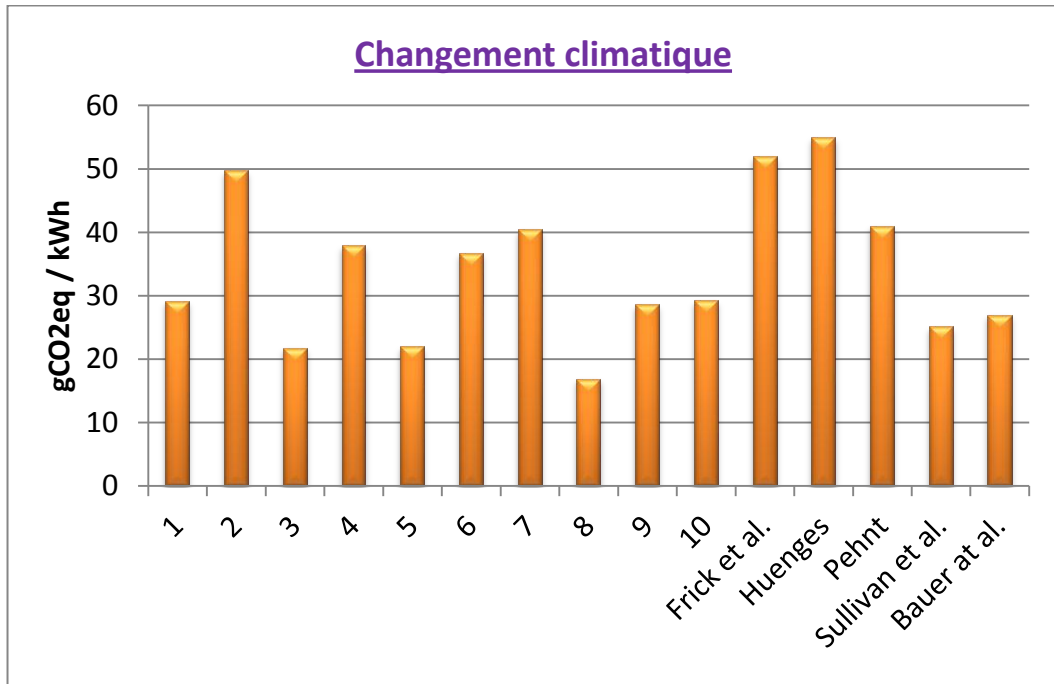


Figure 24 - Résultats des dix études de cas : changement climatique.

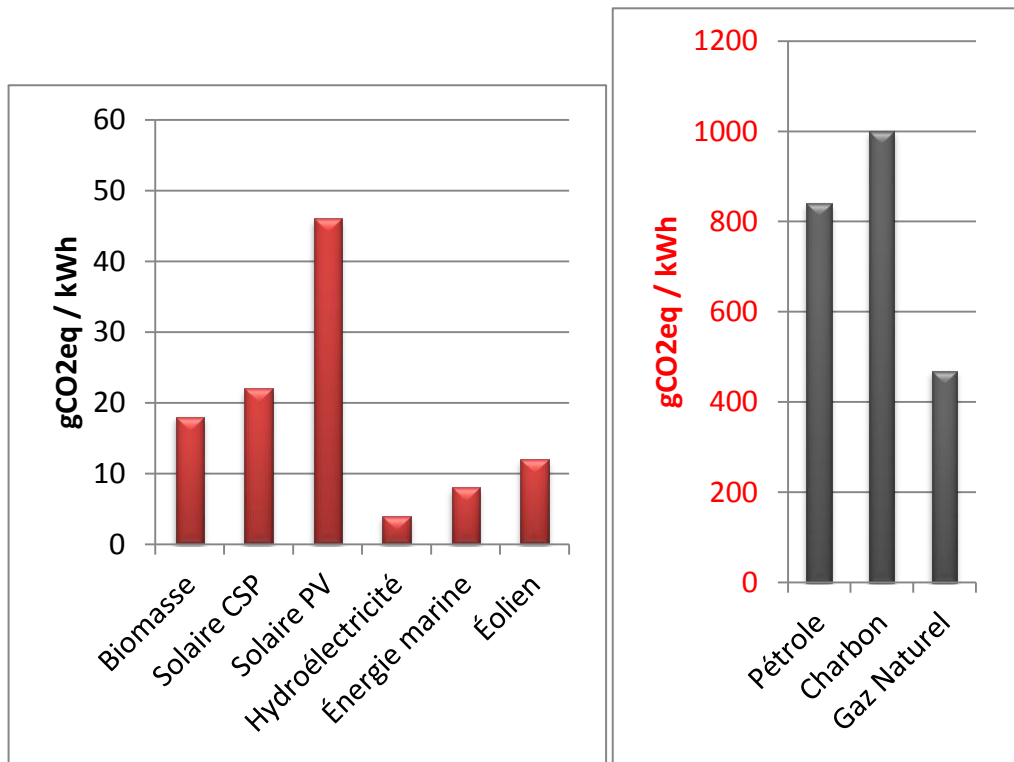


Figure 25 - Résultats ACV d'autres technologies (Moomaw et al., 2011).

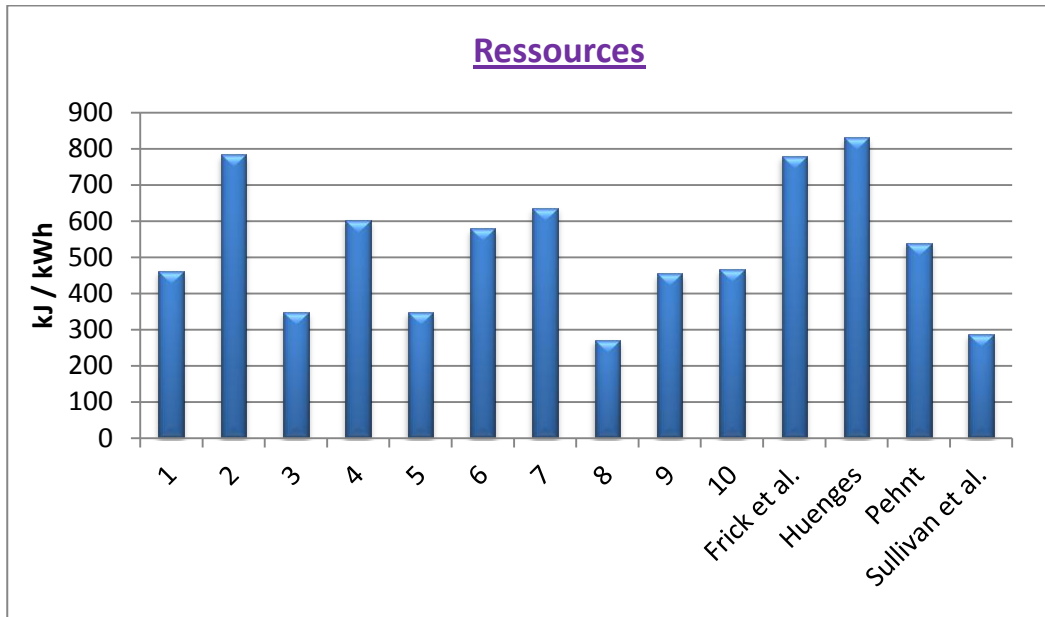


Figure 26 - Résultats des dix études de cas : ressources.

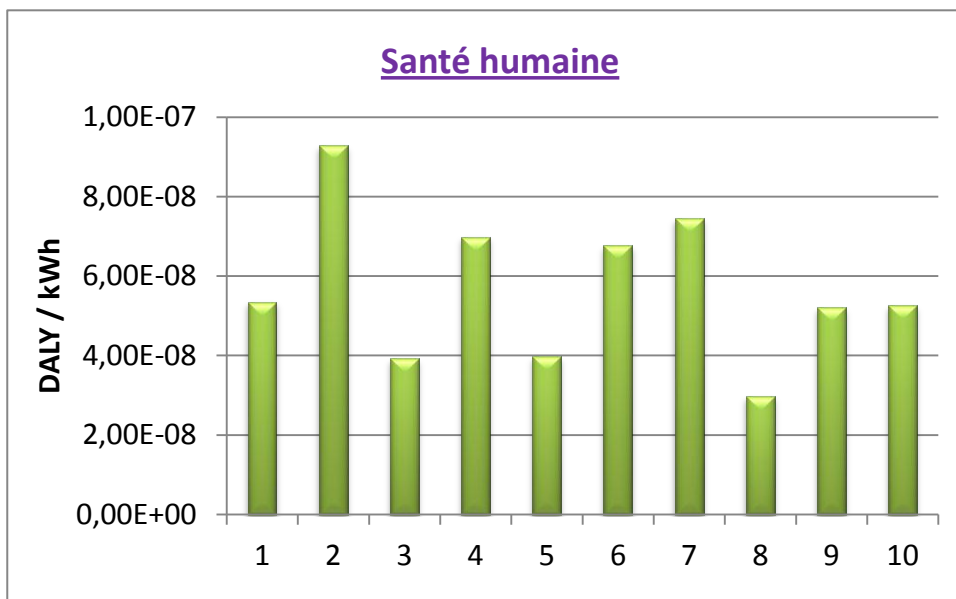


Figure 27 - Résultats des dix études de cas : santé humaine.

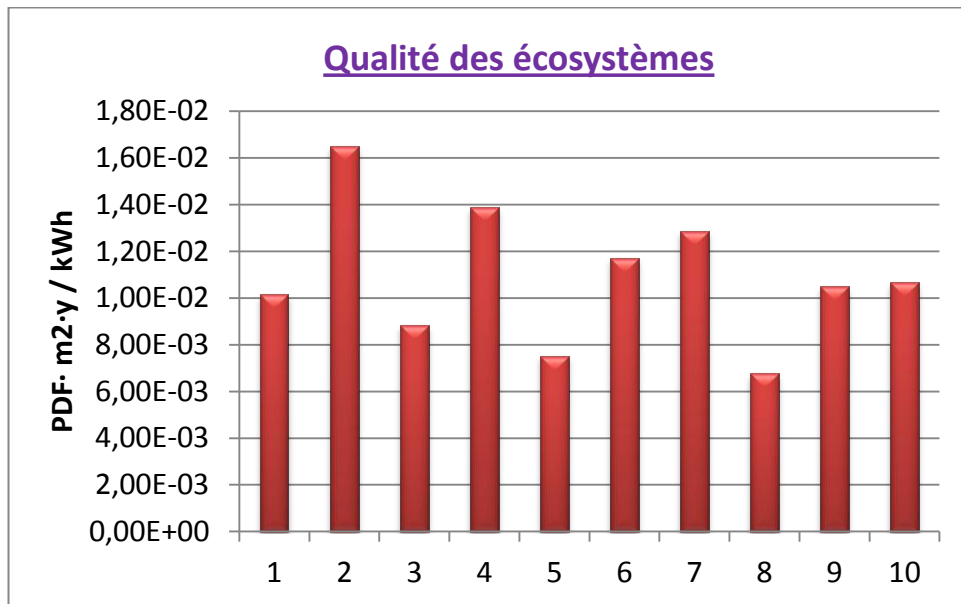


Figure 28 - Résultats des dix études de cas : qualité des écosystèmes.

Les figures 29 à 30 présentent une comparaison graphique entre les études de cas. On fixe pour le cas 6, le cas de référence, ses valeurs à 100 %, alors que les résultats des autres scénarios sont représentés avec des pourcentages relatifs.

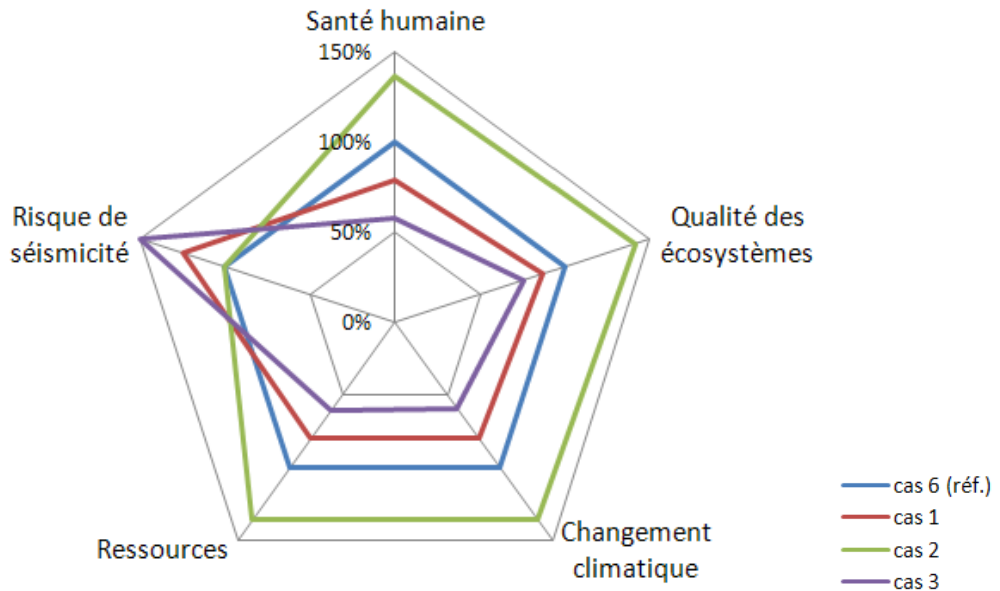


Figure 29 - Résultats des dix études de cas : cas 1, 2, 3.

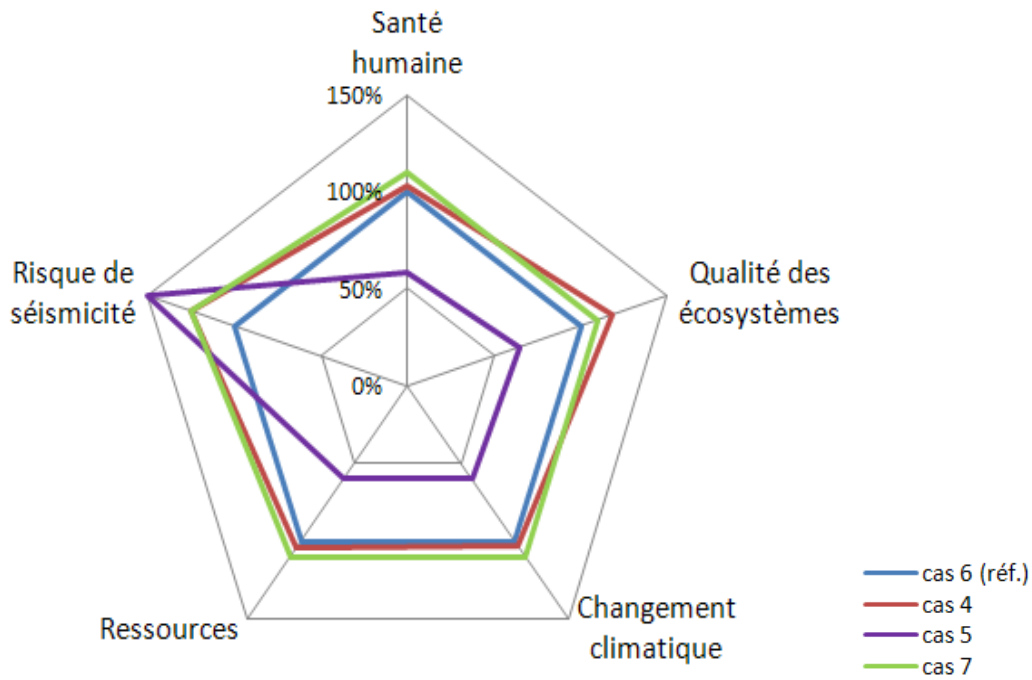


Figure 30 - Résultats des dix études de cas : cas 4, 5, 7.

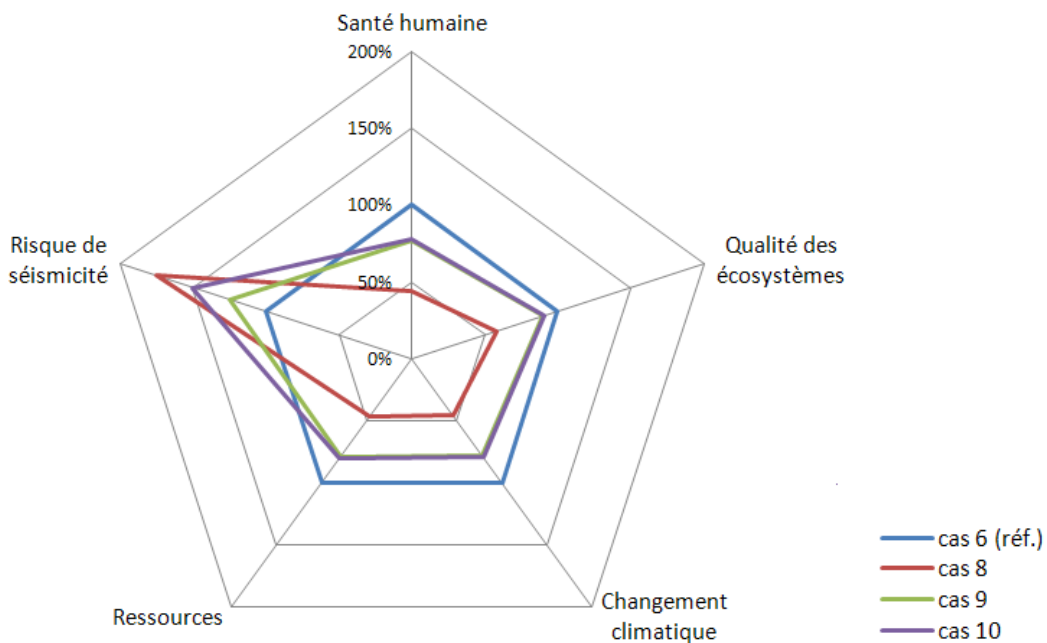


Figure 31 - Résultats des dix études de cas : cas 8, 9, 10.

Le risque sous-jacent de sismicité n'est pas exprimé en valeur numérique. Malgré tout, afin d'être cohérent avec l'échelle utilisée dans la représentation graphique « radar » des résultats, les pourcentages 100 %, 125 %, 150 % et 175 % sont associés

respectivement à l'estimation empirique du très bas, bas, haut et très haut risque (tableau 20).

Les études de cas avec deux forages (cas 1, 2, 3, 4) démontrent une performance environnementale accrue dans le cas de débit fort (1 et 3). Le cas 2 affiche les moins bons résultats, principalement dû aux conditions peu favorables de production.

Pour les études de cas à trois forages (5 à 10), le cas 8 entraîne le moins de dommages dans les quatre catégories de la méthode IMPACT 2002+ ? mais il entraîne un risque sismique accru.

En prenant en considération un réservoir permettant une production de 70l/s par un seul puits, deux stratégies peuvent être appliquées. Afin de prévenir le risque sismique sous-jacent, la construction d'un triplet est requise, afin de consacrer deux puits pour la réinjection (cas 9); dans ce cas, la performance environnementale sera satisfaisante. Au contraire, si on néglige le risque sismique, l'utilisation d'un double forage peut être envisagée (cas 8) : cette solution permet le maximum de production énergétique (24,88 GWh/an) et de meilleures performances sur la santé humaine, la qualité de l'écosystème, le changement climatique et l'utilisation des ressources. Cependant, en se basant sur les expériences EGS contemporaines, la réinjection d'un débit à la hauteur de 140 l/s impliquera quasi-certainement des problèmes sismiques.

Si le débit de production nominal d'un forage atteint environ 40l/s, la construction d'un doublet (cas 1) est préférable que celui d'un triplet (cas 5 et 6), en se fiant aux cinq paramètres environnementaux identifiés dans cette étude. Le risque sismique du cas 1 est accru par rapport au cas de référence, mais toujours acceptable.

En général, l'exploitation d'une ressource géothermique qui permet des débits très faibles de l'ordre de 20 l/s n'est pas recommandable. La construction d'un doublet (cas 2) limite beaucoup la production finale (tout juste 0.8 MW). L'investissement additionnel pour un troisième forage (cas 7) entraîne un accroissement de la production énergétique (l'augmentant jusqu'à 1,46 MW) mais n'implique pas des performances satisfaisantes (moins bonnes que celles du cas de référence) sur les quatre catégories d'impact.

En considérant la sismicité comme un paramètre fondamental et en fixant le risque à très bas comme étant celui acceptable, les cas 1 et 9 sont les scénarii les plus appropriés : ils présentent les impacts environnementaux plus bas parmi les quatre catégories.

En général, le risque sismique augmente en relation étroite avec les bénéfices environnementaux. Des débits plus importants mènent à une importante production énergétique et à de faibles impacts mais impliquent la nécessité de réinjecter une grande quantité d'eau géothermale à haute pression, ce qui augmente les risques. Cependant, si la maximisation de la production électrique peut diminuer le retour sur investissement de l'infrastructure, une suspension du projet à cause de risques sismiques peut avoir des conséquences très néfastes sur la rentabilité.

Même si un triplet paraît souhaitable en terme de production énergétique et d'impacts environnementaux, cette solution présente de hauts coûts de forage ce qui semble être l'obstacle premier de cette solution.

Catégorie d'impact	Unité/kWh	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5
Santé humaine	DALY	5,35E-08	9,28E-08	3,92E-08	6,98E-08	3,98E-08
Qualité des écosystèmes	PDF·m <sup>2</sup> ·y	1,02E-02	1,65E-02	8,82E-03	1,39E-02	7,53E-03
Changement climatique	g CO <sub>2</sub> eq	29,2	49,8	21,8	37,9	22,0
Ressources	kJ	462	785	349	603	349

Catégorie d'impact	Unité/kWh	cas 6 (réf)	cas 7	cas 8	cas 9	cas 10
Santé humaine	DALY	6,78E-08	7,45E-08	2,96E-08	5,21E-08	5,26E-08
Qualité des écosystèmes	PDF·m <sup>2</sup> ·y	1,17E-02	1,29E-02	6,78E-03	1,05E-02	1,07E-02
Changement climatique	g CO <sub>2</sub> eq	36,7	40,4	16,9	28,6	29,3
Ressources	kJ	578,8	636,3	271,5	455,8	466,5

Tableau 23 - Résultats des dix études de cas.

#### 7.4. IMPACTS DE LA PROVISION D'ÉLECTRICITÉ SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL

Il paraît évident que la provision d'électricité sur le réseau engendre des performances environnementales accrues, particulièrement sur la santé. En effet, cette catégorie est particulièrement influencée par l'émission de NOx et de particules, qui sont liées majoritairement à la combustion de ressources fossiles.

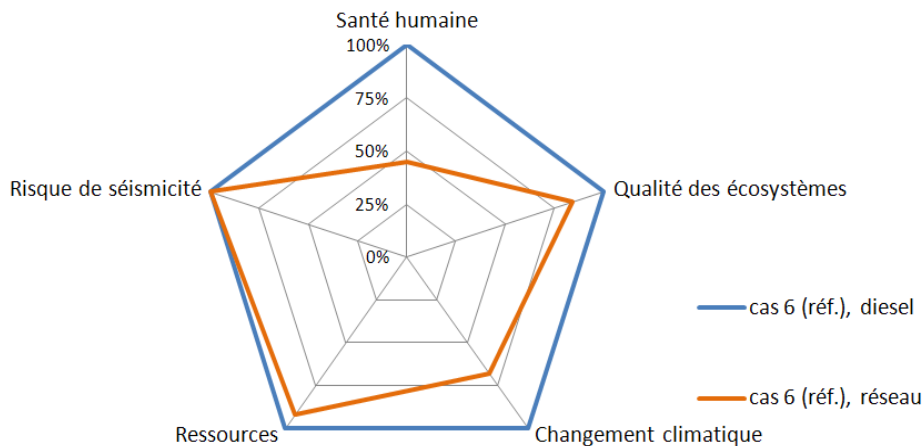


Figure 32 - Impacts de la provision d'électricité sur le réseau électrique national.

L'écosystème est moins influencé mais, comme le montre la figure 33, cette catégorie est celle qui est la moins concernée par les opérations de forage. La demande en ressources énergétiques non renouvelables est toujours importante : ceci est dû au fait



que le mix énergétique français est largement basé sur l'utilisation d'énergie nucléaire qui repose sur une ressource finie en uranium.

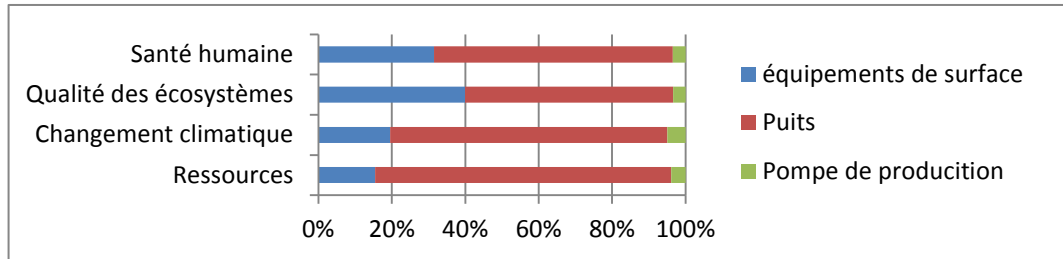


Figure 33 - Impacts de la provision d'électricité sur le réseau électrique national, influence des éléments du système.

Néanmoins, il est nécessaire de souligner qu'en utilisant le mix énergétique d'autres pays moins dépendants de l'énergie nucléaire ou utilisant plus de ressources fossiles, des résultats différents seront attendus (fig. 35).

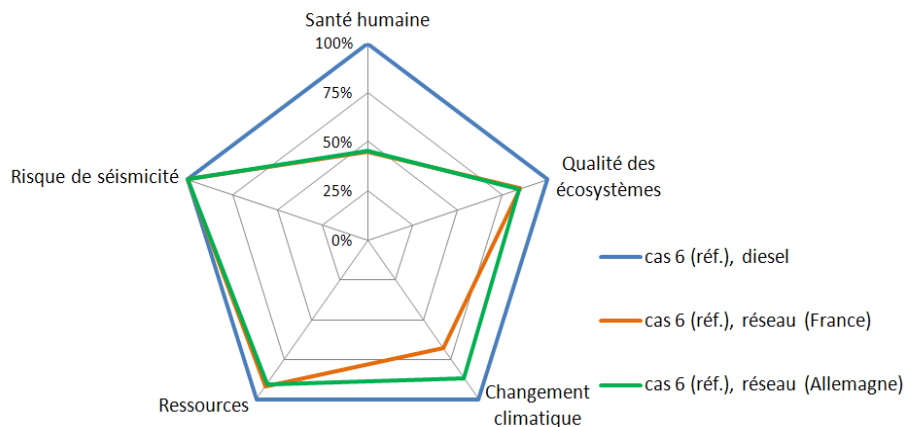


Figure 34 - Impacts de la provision d'électricité sur le réseau électrique national, en considérant le mix énergétique français et allemand.

Pourtant, la connexion au réseau national d'électricité est généralement peu diffuse pour certaines raisons. Parfois le site est trop isolé pour rendre viable économiquement et techniquement le branchement. Plus souvent, même si le réseau est accessible, l'utilisation de groupes électrogènes est privilégiée pour favoriser la continuité de l'alimentation électrique. Une coupure de courant peut entraîner des dommages sur les équipements et créer d'importants problèmes techniques sur la planification de forage. Dans tous les cas, ce problème d'autonomie peut être résolu comme pour d'autres industries (par ex. le secteur hospitalier), afin d'améliorer les performances environnementales de l'infrastructure.



## 8. Conclusions

Cette étude apporte des résultats sur la performance environnementale des systèmes géothermiques EGS en considérant différents scénarios reflétant plusieurs options réalistes de conception. En se basant sur ce travail, quelques conclusions générales peuvent être tirées :

- Les EGS, malgré le haut besoin d'énergie et de matériau requis pour la construction des infrastructures, montrent des performances environnementales comparables à celles des autres énergies renouvelables sur leur cycle de vie.
- Comme anticipé, le forage est le processus ayant le plus d'impact, principalement dû à l'utilisation de ressources fossiles pendant cette opération. Ainsi, l'utilisation de solutions alternatives d'alimentation électrique pendant cette phase, comme la connexion au réseau électrique, pourrait produire d'importantes améliorations au niveau des performances environnementales.
- Le risque sous-jacent de sismicité est un facteur capital à prendre en compte lors de la phase de conception. Si une stratégie appropriée de réinjection n'est pas mise en place, la sismicité augmente aussi avec les bénéfices environnementaux. Ainsi, pendant la phase de conception, il est nécessaire de trouver de bons compromis pour limiter ce risque.
- La performance environnementale peut varier considérablement en relation avec les conditions du réservoir et la conception de l'infrastructure. Par exemple, les émissions de GES du cas 8 sont trois fois inférieures à celles du cas 2.
- La méthodologie basée sur les cinq indicateurs d'impact considérés dans cette étude est un outil très utile afin d'obtenir une vue globale des performances environnementales des systèmes géothermiques avancés et peut être répliqué pour l'évaluation d'autres infrastructures EGS adoptant de nouvelles options de conception.
- Cette méthodologie basée sur des outils de calculs modulaires (un outil pour l'estimation de la production électrique (excel) plus un modèle de calcul environnemental (SimaPro) peut être répliquée pour l'évaluation d'autres centrales géothermiques.

Le secteur de l'EGS est supposé connaître une croissance importante dans les prochaines années. Ainsi, si la conception des nouvelles infrastructures est appuyée sur une analyse appropriée des impacts environnementaux, des effets positifs sur l'environnement peuvent être atteints.



## 9. Recommandations pour les études futures

Afin de continuer l'exploration de la performance environnementale des systèmes géothermiques avancés avec les analyses de cycle de vie, des propositions d'extension de cette recherche sont proposées :

1. Approfondir le modèle de calcul de production d'énergie (en caractérisant plus précisément la demande d'énergie des équipements auxiliaires, leur efficacité, etc.).
2. Affiner la description technique des données; par exemple en incluant d'autres matériaux marginaux dont les équipements sont constitués, ou en calculant leurs quantités en se basant sur un nombre plus important de données et en caractérisant plus précisément les incertitudes.
3. Explorer d'autres solutions techniques : par exemple, inclure l'utilisation d'agents anticalcaires et d'inhibiteurs à corrosion, des scénarios de recyclage, des substances chimiques particulières pour la stimulation, la source d'électricité venant de mix énergétiques étrangers, etc.
4. Réaliser des modifications ad-hoc sur les sous-processus liés à la base de données Ecoinvent pendant les calculs. En effet, certains de ceux-ci contiennent des données approximatives ou incomplètes : en allant dans le détail dans l'étude de ces processus, il sera possible de modifier et d'intégrer ces données afin d'obtenir un niveau plus élevé de détail dans ces résultats.
5. Au cas par cas, réaliser des analyses de sensibilité sur des paramètres uniques afin d'explorer en détail leurs effets sur les impacts (par exemple en variant la durée de vie de certains équipements, ou leur efficacité).
6. Appliquer la procédure présentée dans ces travaux avec des adaptations à l'analyse des performances environnementales d'autres systèmes géothermiques.

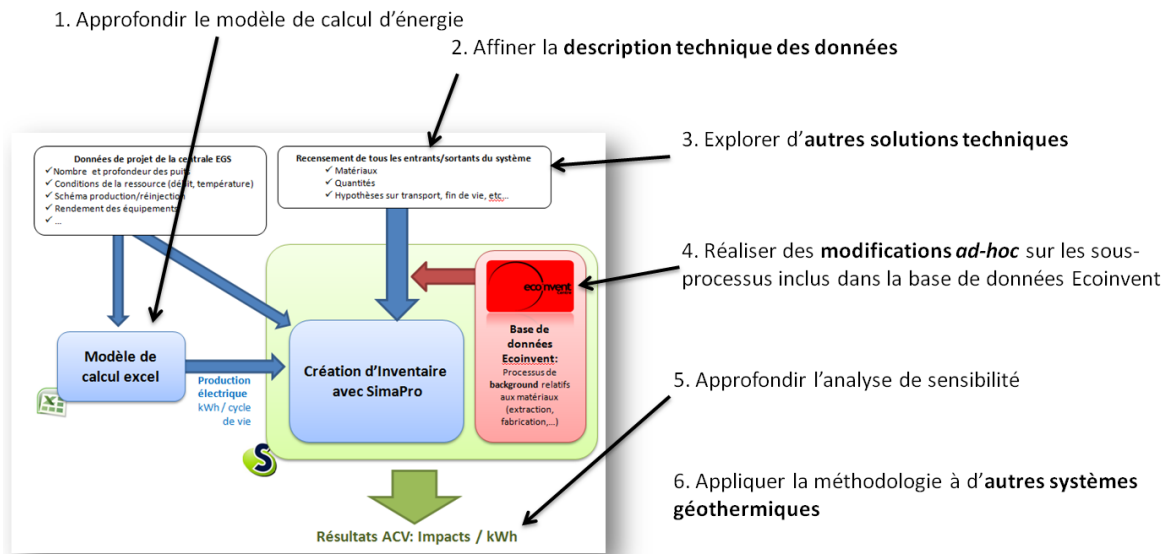


Figure 35 - Recommandations pour les études futures.

## 10. Références

**Bauer C., Dones R., Heck T., Hirschberg S.** (2008) - Environmental assessment of current and future Swiss electricity supply options, International Conference on the Physics of Reactors “Nuclear Power: A Sustainable Resource”, Casino-Kursaal Conference Center, Interlaken, Switzerland; 2008.

**Bauer C., Dones R., Heck T., Hirschberg S.** (2007) - “Comparative environmental assessment of current and future electricity supply technologies for Switzerland”. Proceedings available on CD. 3<sup>rd</sup> International Conference on Life Cycle Management, Zurich, Switzerland, 2007.

Ecoinvent centre, ecoinvent data v2.2., ecoinvent reports No.1-25, in, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, available at <http://www.ecoinvent.org>; 2010.

**Frick S., Kaltschmitt M., Schroeder G.** (2010) - Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs, *Energy* 2010;35:2281-2294.

**Frick S., Lohse C., Kaltschmitt M.** (2007) - Environmental Impacts through Geothermal Power Generation in Germany, ENGINE Workshop 6, Athens, Greece; 2007.

**Hondo H.** (2005) - Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case, *Energy* 2005; 30: p. 2042-2056.

<http://www.geothermie-soultz.fr/>, [consulté en Juin 2011]

**Huenges E.** (2010) - Geothermal Energy Systems: Exploration, Development and Utilization, Wiley-VCH; 2010.

**Hurtig E., Cermak V., Zui V.** (1992) - Geothermal Atlas of Europe, Hermann Haack, Gotha; 1992.

ISO 14040:2006 International Standard, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework; 2006.

ISO 14044:2006 International Standard, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines; 2006.

**Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R.** (2002) - IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology, *Int J LCA* 2003;8:324-330.

**Jungbluth N.** (2007) - Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von

Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Switzerland, 2007.

**Karlsdottir M.R., Pálsson O.P., Pálsson H.** (2010) - Factors for Primary Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emission of Geothermal Power Production, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia; 2010.

**Kulich N., Glanz J.** (2009) - German Geothermal Project Leads to Second Thoughts After the Earth Rumbles, The New York Times, September 10, 2009, available at <http://www.nytimes.com/2009/09/11/science/earth/11quake.htm>, [consulté en Octobre 2011].

**Lacirignola M.** (2011) - Life cycle assessment of enhanced geothermal systems, Master thesis, Tsinghua University, China, 2011

**Matuszewska D.** (2011) - Environomic optimal design of geothermal energy conversion systems using life cycle assessment, Master thesis, The School for Renewable Energy Science, Iceland, 2011

**Meunier B., Tournaye D.** (2009) - Perspectives d'exportation de biens et services français en matière de géothermie appliquée au chauffage ou à la production d'électricité, ADEME, CFG services, France; 2009 [in French].

**Moomaw W., Burgherr P., Heath G., Lenzen M., Nyboer J., Verbruggen A.** (2011) - Annex II: Methodology, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.; 2011.

**Nami P., Schellschmidt R., Schindler M., Tischner T.** (2008) - Chemical stimulation operation for reservoir development of the deep crystalline HDR/EGS system at Soultz-sous-Forêts (France). Thirty-second Workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, USA; 2008.

**Pehnt M.** (2006) - Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies, *Renewable Energy* 2006; 31: p. 55-71.

**Ruiz Dern A.M.** (2010) - Life cycle assessment of geothermal energy conversion systems, Master thesis, Industrial Energy Laboratory of the Swiss Technology Institute of Lausanne, Switzerland, 2010.

**Rule B.M., Worth Z.J., Boyle C.A.** (2009) - Comparison of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions and Embodied Energy in Four Renewable Electricity Generation Technologies in New Zealand, *Environmental Science & Technology* 2009;43: p. 6406-6413.

**Schindler M., Baumgärtner J., Gandy T., Hauffe P., Hettkamp T., Menzel H., Penzkofer P., Teza D., Tischner T., Wahll G.** (2010) - Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric Power Production in the Upper Rhine Graben, Central Europe, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia; 2010.



**Sullivan J.L., Clark C.E., Han M.W.J. (2010) - Life-Cycle Analysis Results of Geothermal Systems in Comparison to Other Power Systems, Argonne National laboratory, Energy Systems Division, US Department of Energy; 2010.**

*Pour la liste complète des références utilisées pour cette étude, voir les références de la thèse de Master*

### **Rapports techniques**

GPk-2 Daily drilling report, technical report, HDR-Soultz, 1995

GPk-2 Final report, technical report for HDR-Soultz, prepared by Southern International Inc., 1995

GPk-3 Daily drilling report, technical report, G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2002

GPk-3 Daily mud report, technical report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2002

GPk-3 Final Report, Technical report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, prepared by Southern International Inc., 2002

GPk-4 Daily mud report, technical report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2004

GPk-4 Final Report, Technical report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur prepared by Gandy Inc., 2004

GPk-4, Rapports journaliers forage de Gandy Inc., technical report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, 2004

Rapport sommaire de fin de forage, report for G.E.I.E Exploration minière de la chaleur, 2002

Re-entry & deepening of GPk2, technical report, HDR-Soultz, 1999

Technical report on the 2003 hydraulic testing and stimulation program, technical report for G.E.I.E. Exploration minière de la chaleur, prepared by Hettkamp D., Teza D., Michelet S., Baumgartner J., Baria R., 2004

Bilan des phases de forage et stimulation des puits GPk-3 et GPk-4

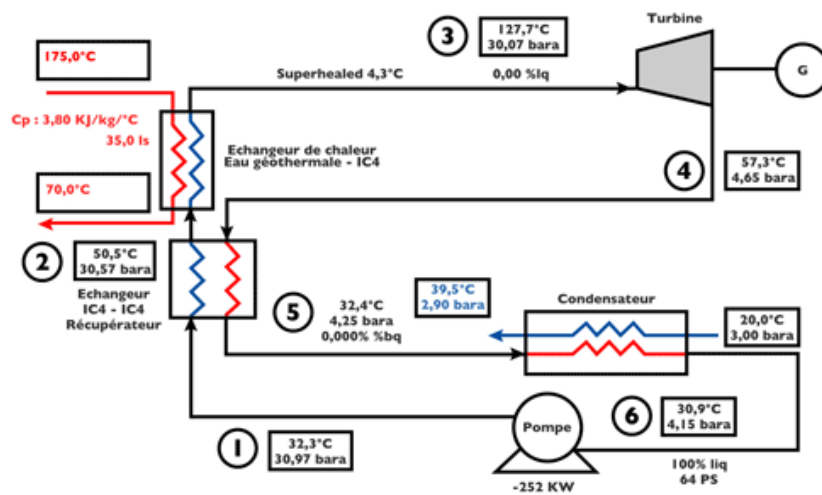
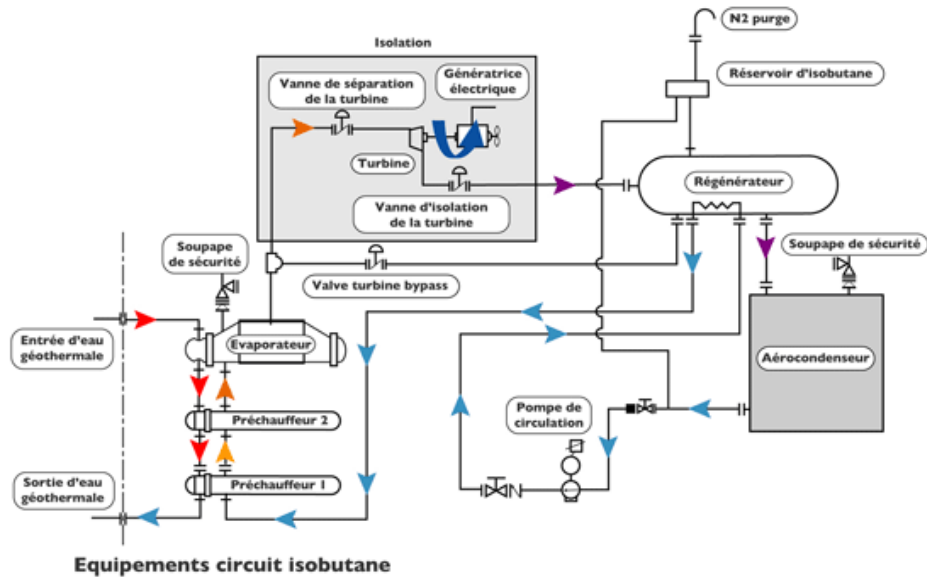


## **Annexe 1**

# **Schéma de la centrale de Soultz-sous-Forêts**



**Principe de la production : cycle de Rankine ou ORC**



**Circuit isobutane : pressions et températures**

Fig. A- 1 - Schéma de la centrale de Soultz-sous-Forêts.

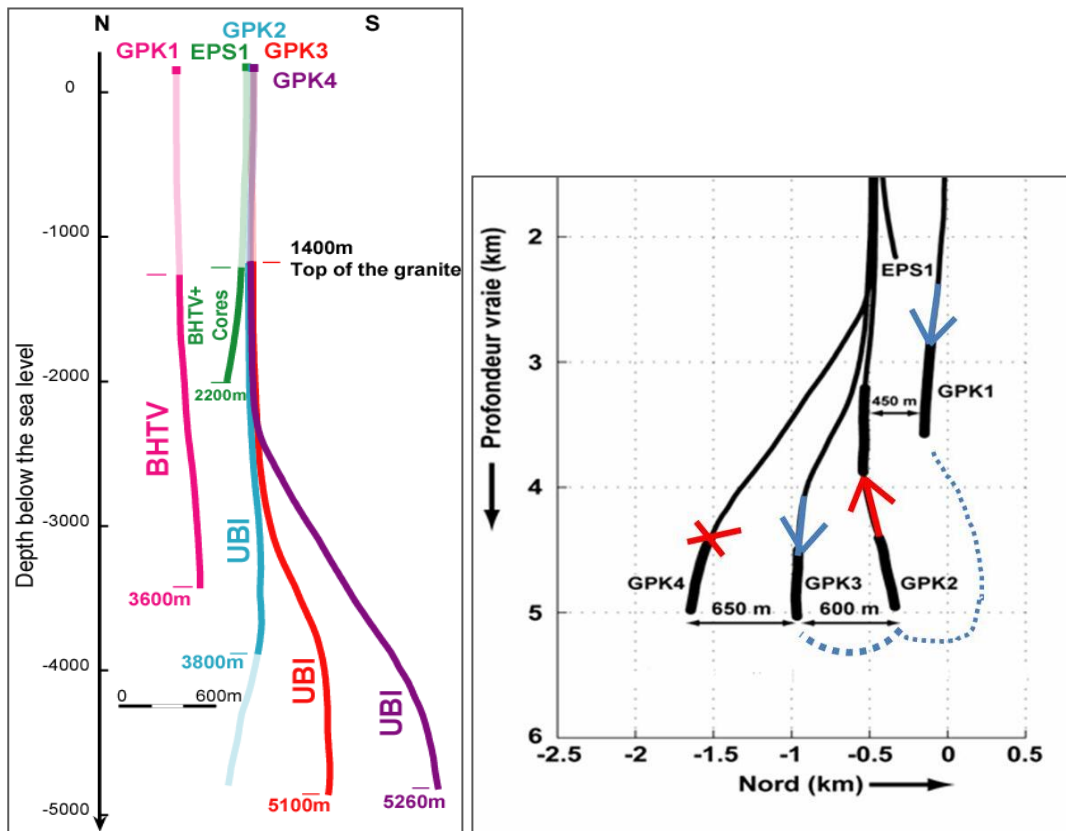


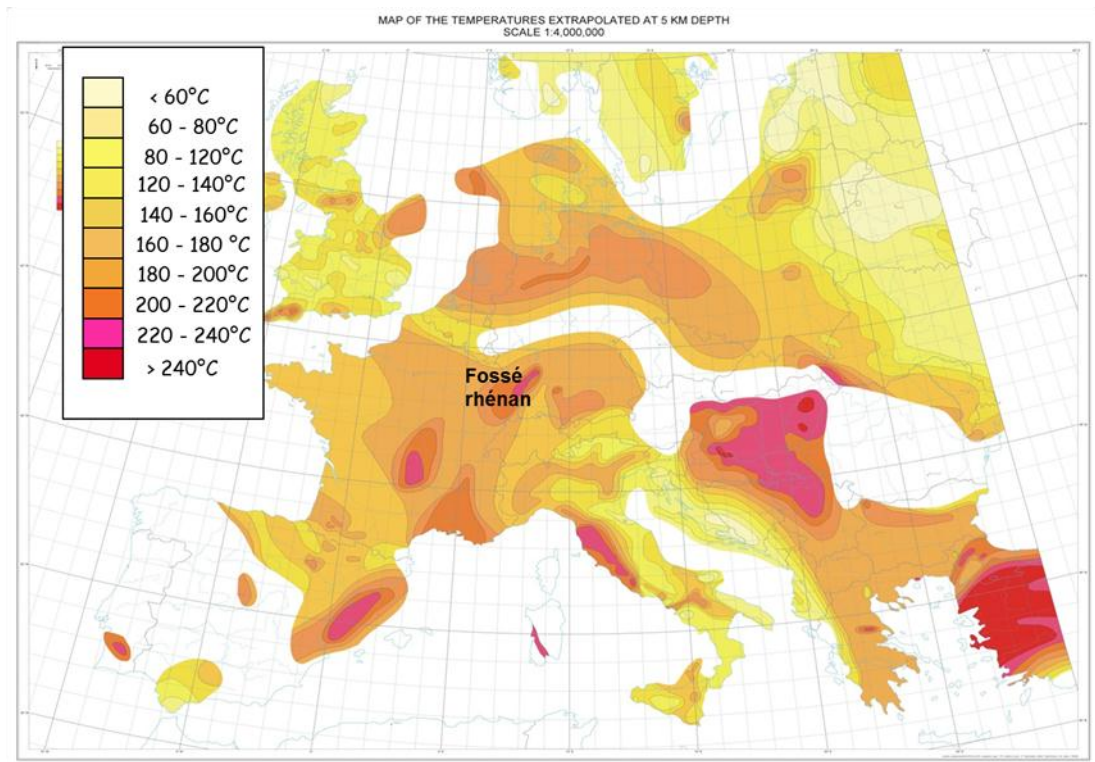
Fig. A- 2 Forages réalisés à Soutz-sous-Forêts et conditions hydrauliques actuelles.

## **Annexe 2**

### **Carte des températures à 5 km de profondeur en Europe (Hurtig *et al.*, 1992)**









## **Annexe 3**

### **Remerciements**

Je souhaite remercier mes superviseurs M. Cardona Maestro et M. Laplaige (ADEME), ainsi que Mlle Poux, Mme Gentier, M. Desplan (BRGM) pour leur investissement dans le projet, leur collaboration et leur support.

Je tiens par ailleurs à remercier aussi Albert Genter, Nicolas Cuenot, Xavier Goerke et toute l'équipe du GEIE pour leur aide précieuse.

Merci aussi à Isabelle Blanc et Didier Beloin-Saint-Pierre pour leur expertise en analyse environnementale et à leur support tout au long de cette étude.



**Centre scientifique et technique**  
**Département Géothermie**  
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34