



HAL
open science

Le solaire à concentration comme brique élémentaire d'une société pérenne ? Réduction directe d'oxyde de fer par l'hydrogène et l'ammoniac et analyse de cycle de vie d'une parabole solaire pour la transformation alimentaire.

Bastien Sanglard

► **To cite this version:**

Bastien Sanglard. Le solaire à concentration comme brique élémentaire d'une société pérenne ? Réduction directe d'oxyde de fer par l'hydrogène et l'ammoniac et analyse de cycle de vie d'une parabole solaire pour la transformation alimentaire.. Matériaux. INSA de Toulouse, 2023. Français. NNT : 2023ISAT0066 . tel-04651887

HAL Id: tel-04651887

<https://theses.hal.science/tel-04651887>

Submitted on 17 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de
Toulouse**

**Présentée et soutenue par
Bastien SANGLARD**

Le 8 décembre 2023

**Le solaire à concentration comme brique élémentaire
d'une société pérenne ?**

**Réduction directe d'oxyde de fer par
l'hydrogène et l'ammoniac et analyse de cycle de vie d'une
parabole solaire pour la transformation alimentaire.**

Ecole doctorale : **SDM - SCIENCES DE LA MATIERE - Toulouse**

Spécialité : **Sciences et Génie des Matériaux**

Unité de recherche :

LPCNO - Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets

Thèse dirigée par

Julian CARREY et Sébastien LACHAIZE

Jury

M. Michel PEREZ, Rapporteur

Mme Natacha GONDRAN, Rapporteur

M. Mathieu SPERANDIO, Examineur

M. Régis OLIVES, Examineur

M. Julian CARREY, Directeur de thèse

M. Sébastien LACHAIZE, Co-directeur de thèse

Remerciements

Après tout ce temps, il est temps pour moi de rédiger les fameux remerciements de la thèse.

Je voudrais d'abord en profiter pour remercier à nouveau Mathieu Sperandio, Natacha Gondran, Michel Pérez et Régis Olives, les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail et qui se sont déplacés pour ma soutenance. Je voudrais aussi avoir un mot pour ma marraine de thèse Claire Vialle qui m'a suivi durant mon doctorat. Je remercie aussi l'école doctorale SDM, l'INSA de Toulouse et l'ANR qui ont tous les trois permis la réalisation ma thèse d'un point de vue administratif ou financier. Par ailleurs, je voudrais dire merci à Bertrand Huneau qui m'a beaucoup aidé pendant la réalisation de différentes expériences et analyses.

Je continue tout naturellement avec mes deux directeurs de thèse : Julian et Sébastien. Les deux personnes sans qui je n'aurais pas pris part à cette aventure qu'est le doctorat. Je tiens à sincèrement les remercier de m'avoir fait confiance il y a un peu plus de trois ans après le stage de fin d'études bien que je n'aie pas reçu la formation la plus adéquate aux missions du doctorat. Au-delà d'être deux directeurs de thèse de qualité qui ont mis à ma disposition tout ce dont j'avais besoin pour réussir mon doctorat (temps, matériel, etc), ils sont aussi deux personnes avec des qualités humaines hors du commun. Ils ont toujours pris le temps d'avoir des discussions sur tout sujet lié ou non à la thèse. Grâce à eux j'ai beaucoup appris sur tout ce qui gravite autour de la transition écologique et sociale que nous avons à traverser actuellement. Grâce à eux, je suis non seulement devenu docteur en science et génie des matériaux mais j'ai aussi beaucoup appris humainement et sur un mode de vie bien plus respectueux de l'environnement. Je me suis rendu compte qu'il était possible de bien vivre, de manière bien plus respectueuse de l'environnement, non sans sacrifice et sans effort mais avec un retour sur investissement en termes de bien être qui me semble en valoir le coût. Je les remercie donc chaleureusement pour le temps et l'énergie qu'ils ont consacré à ma réussite et sans lesquels mon doctorat ne se serait pas déroulé dans une atmosphère aussi chaleureuse et bienveillante. Merci !

Je remercie aussi beaucoup mon encadrante de thèse Ligia, sans qui une des deux parties de ce travail n'aurait pas pu être réalisée puisqu'elle m'a tout appris sur l'ACV. Merci pour ta disponibilité malgré ton emploi du temps chargé, pour ta gentillesse et pour ta pédagogie. Merci de m'avoir permis de suivre les cours et les tp et de m'avoir fait confiance pour faire de l'enseignement. J'ai découvert et appris un tout nouveau domaine passionnant bien que difficile. L'ACV c'est super utile mais c'est fastidieux et long à faire.

Je suis aussi dans l'obligation absolue de remercier mes compagnons de bureau et camarades néo docteur Lionel et Ilona. Nous avons partagé beaucoup d'émotions de tous types durant cette aventure malgré le COVID et toutes les difficultés que nous avons traversées chacun de notre côté et ensemble. Je tenais à vous remercier pour votre gentillesse et votre soutien sans faille durant toute la thèse. Vous êtes tous deux des personnes d'une gentillesse rare et d'une force à toute épreuve. Je vous félicite aussi sincèrement pour la réussite respective de votre doctorat que vous avez mené avec rigueur et professionnalisme durant ces 3 ans. Je vous souhaite le meilleur du fond du cœur pour la suite bien que je ne doute pas que nous

continuerons de nous voir et de partager des moments ensembles. Mention spéciale à Ilona pour la mise en place du rendez-vous gâteaux hebdomadaire.

Je tiens aussi à remercier tout le reste de l'équipe Nano-magnétisme : Benjamin, Thomas, Tom, Géraldine, Touati et tous les autres membres qui sont arrivés en cours de chemin : Abraao, Danny, Maryam etc ainsi que Lise-Marie dans l'équipe NCO. Je vous remercie pour votre soutien, votre bonne humeur et votre aide durant toute la durée de mon doctorat. Je voudrais aussi remercier particulièrement Simon, Angélique, François, Steph, Francis, Cathy, Brice et Lucie sans qui mon doctorat n'aurait pas pu être mené à bien. Je remercie aussi tous les autres membres du LPCNO pour leur gentillesse et leur aide.

Enfin, je voudrais remercier tout les copains et copines doctorant/doctorante/postdoc que je me suis fait durant ces années : Ilona, Lionel, Fabio, Clémence, Irene, Thibault, Dorian, Jules, Tom, Sébastien, Kerwan, Gaëtan qui ont rendu les pauses café bien plus agréables et avec qui on a bien rigolé. Je souhaite bon courage a celles et ceux qui n'ont pas encore terminé leurs doctorats, ne vous inquiétez pas, ça va aller.

Comment faire des remerciements sans citer mes chers et tendres colocs. Durant toute la durée de ma thèse j'ai eu la chance d'être soutenu par mes colocs : Elsa, Tonio, Tristan, Paul, Martin et Rémi, certains pendant plus longtemps que d'autres et tous de manière différente. Je tiens à vous remercier du fond du cœur de m'avoir soutenu en ne me reprochant jamais de moins participer aux tâches ménagères de la coloc surtout durant la fin du doctorat. Merci pour votre bonne humeur et la joie que vous m'avez toujours apporté, je n'oublierai jamais. Vous avez grandement participé à la réussite de cette thèse.

Après mes colocs, j'ai deux amis à remercier spécifiquement. Le premier est Laurent, je te remercie de m'avoir montré dès le premier jour la voie pour réaliser mon doctorat dans de bonnes conditions et en conciliation avec une vie sociale. Je te félicite aussi d'avoir obtenu ton titre de docteur malgré les bonnes galères que tu as connues. Ensuite, je voudrais remercier et féliciter Quentin. On a bien géré mon gars, merci pour ton soutien et toutes les discussions qu'on a eu à propos de nos thèses respectives. Bravo d'avoir aussi bien réussi ta thèse et d'avoir tenu jusqu'au bout, je suis fier de toi.

Bien sûr, il a un très grand nombre de copains qui m'ont soutenu et accompagné durant ce doctorat et avant. Je voulais tous vous citer mais vous êtes nombreux alors pour être un peu original et pour que vous bossiez aussi un peu, j'ai fait la petite grille de mot-mélés qui suit où se trouve vos prénoms ou surnoms. Je vous remercie pour votre présence de plus ou moins loin depuis des années.

Petit paragraphe special pour mes amis d'enfance avec qui j'ai grandi à Chamonix. Je vois mal ce qui pourrait nous séparer maintenant que ça fait plus de 20 ans qu'on se connaît et qu'on ne s'est toujours pas perdu de vue. Je profite de ce moment pour vous remercier de votre présance et vous souhaiter un maximum de bonheur à tous.

C	Q	J	B	M	A	E	L	Y	J	R	O	S	I	E	M	A	N	O	U
M	U	O	L	Y	A	N	I	S	J	U	L	I	E	T	T	E	S	Y	
D	L	W	N	X	E	L	O	I	S	E	X	S	I	M	O	N	Q	O	
L	U	I	X	A	B	C	Y	R	I	L	E	Ç	R	L	R	G	L	Ç	A
A	C	E	L	E	N	A	N	N	E	Y	S	E	E	A	P	W	O	K	N
U	I	J	Ç	L	N	A	B	I	R	S	P	U	M	U	R	E	U	J	H
R	E	C	Ç	F	I	O	A	S	R	O	L	G	I	R	G	N	I	Ç	Z
I	J	L	Z	T	C	O	P	A	U	L	A	I	M	E	E	V	S	L	O
E	D	E	E	G	O	F	G	Q	K	E	O	G	A	N	T	O	I	N	E
W	S	M	L	G	L	A	H	I	A	N	R	A	U	C	S	C	A	A	H
S	A	E	E	V	A	L	I	Ç	I	E	A	W	L	E	F	Ç	N	L	C
J	M	N	R	J	S	B	C	E	L	A	N	F	A	M	J	I	E	O	E
U	F	C	I	E	A	A	H	L	L	E	N	G	N	M	U	M	A	Y	Y
B	L	E	C	R	A	N	E	S	O	L	E	I	A	A	M	A	U	S	O
Y	O	V	U	O	M	V	M	A	U	L	S	B	I	Z	O	R	Z	R	U
X	U	A	Ç	M	E	D	X	C	X	I	R	N	S	A	U	C	I	E	R
Y	I	X	G	E	L	D	F	Q	L	O	R	E	T	T	E	O	T	A	I
L	S	C	D	J	I	S	A	A	C	T	W	Z	P	P	T	Ç	H	O	H
P	E	J	A	V	A	L	E	N	T	I	N	L	E	A	T	Y	E	Y	I
D	E	U	L	S	E	M	A	R	I	E	P	A	U	L	E	P	O	A	U

Bien sûr, je me dois de remercier mes parents qui me soutiennent depuis bien plus longtemps que le début du doctorat. Je ne vous remercierai sûrement jamais assez d'avoir toujours été disponible et d'avoir toujours tout mis à disposition pour que je puisse réussir tout au long de ma vie. En plus de ma réussite scolaire, je vous remercie des valeurs que vous m'avez transmises et de l'éducation que vous m'avez donnée dont je suis fier. En effet, si j'en suis là dans la vie c'est en très grande partie grâce à vous, vous avez toujours su être à mon écoute et m'encourager quand c'était nécessaire. Je pense que beaucoup de personnes rêveraient d'avoir des parents comme vous, je vous aime.

Mes parents ne sont pas les seuls membres de ma famille que je dois remercier. Je remercie aussi mes trois frères Arnaud, Florent et Thomas de toujours m'avoir soutenu durant cette thèse et durant toutes ces années d'études. Je vous remercie de toujours avoir été curieux à propos de mes études et d'avoir toujours cru en moi. J'en profite aussi pour vous dire que je suis fier de vous trois, de ce que vous avez fait de vos vies et des trois adultes que vous êtes devenus. Je vous aime.

Je tiens aussi à avoir un petit mot pour tout le reste de ma famille et plus spécialement pour ma grand-mère. Merci pour ta patience, ton soutien et ton amour. Je t'aime.

Marion, Marion, Marion que dire... Amie, co-bureau, collègue et partenaire, tu as endossé de très nombreux rôles depuis notre rencontre il y a environ 2 ans. Je te remercie énormément pour tout le soutien psychologique et affectif que tu m'as apporté avec tes mots, ton sourire et ton regard malgré tout le temps que je passais à travailler. Je te remercie d'avoir su être disponible, attentive et chaleureuse durant ces deux années. Tu peux être certaine que ce travail n'aurait pas été le même si tu n'avais pas été là. Je dois cette réussite en grande

partie à toi. Je t'aime. C'est à ton tour maintenant de rentrer dans la longue dernière ligne droite de ta thèse. Je sais pertinemment que grâce à ta rigueur, ta force et ton courage tu vas y arriver, j'ai complètement confiance en toi.

« Tu me dis, j'oublie. Tu m'enseignes, je me souviens. Tu m'impliques, j'apprends »

Benjamin Franklin

A mes parents.

Le solaire à concentration comme brique élémentaire d'une société pérenne ?

~

Réduction directe d'oxyde de fer par l'hydrogène et l'ammoniac et analyse de cycle de vie d'une parabole solaire pour la transformation alimentaire.

Résumé

L'impact de l'humain sur l'environnement n'est plus à prouver : les activités humaines étant majoritairement basées sur l'utilisation de ressources fossiles et minérales, de grandes quantités de gaz à effet de serre sont rejetées dans l'atmosphère, ainsi que des substances toxiques pour les écosystèmes et les êtres vivants. Les émissions anthropogéniques sont dues à de nombreux secteurs qui, pour certains, nécessitent de l'énergie thermique. Cette dernière est par exemple utilisée pour la production d'électricité ou pour des procédés industriels et agro-alimentaires. Afin de réduire ces émissions, il est donc important de se pencher sur la question de l'énergie thermique durable. Le solaire à concentration est une technique basée sur une énergie renouvelable et disponible sur la totalité du globe. Le principe est de concentrer les rayons du soleil sur une ligne, un point ou dans un volume. Ceci permet une large gamme de températures allant d'environ 100°C à plus de 2000 °C, ce qui en fait une source de chaleur potentielle pour un grand nombre de procédés thermiques. La question se pose donc de savoir dans quelle mesure le solaire à concentration peut faire partie des briques techniques élémentaires d'une société durable. Ce travail a pour but d'apporter des éléments de réponse à cette question grâce à une approche par deux angles : i) l'impact écologique d'un procédé solaire basse-température (la cuisson) grâce à l'analyse de cycle de vie et ii) la faisabilité d'un procédé haute-température (la réduction de minerai de fer) sous flux lumineux concentré.

Nos études basées sur la montée en température de 2 L d'eau montrent que les cuiseurs solaires paraboliques offrent un réel avantage écologique comparés aux appareils de cuisson conventionnels, notamment grâce à l'absence d'impact pendant l'utilisation. Nos résultats détaillent la contribution de chaque phase du cycle de vie ainsi que la contribution respective des procédés de production des appareils et de l'énergie utilisée. L'étude a pris en compte différents matériaux de construction des cuiseurs solaires ainsi que différents scénarios d'utilisation des appareils. L'influence de l'intensité carbone du mix électrique pour l'utilisation des appareils électriques est aussi analysée.

Dans un second temps, nos expérimentations de réduction directe de pellets de minerai de fer sous hydrogène et ammoniac montrent que ce procédé thermo-chimique à haute température est réalisable grâce au solaire à concentration. En effet, des taux de réduction de 96% sont atteints en 12 et 16 min sous hydrogène et ammoniac respectivement, ce qui respecte les exigences de l'industrie. Par ailleurs, comme l'irradiation solaire est orientée, le passage d'un pellet à un disque extrait de ce dernier permet une distribution plus efficace de la chaleur et améliore ainsi la vitesse de réduction. Les impacts environnementaux de ce procédé ne sont pas calculés ici et il s'agit d'une perspective importante de ce travail.

Résumé

Nous montrons que la parabole solaire nécessite pour sa construction une plus grande quantité de matière première que les autres appareils. Néanmoins, une fois toutes les phases du cycle de vie considérées, l'impact induit à la construction est largement compensé grâce à l'utilisation directe de l'énergie solaire. Nous avons montré que le solaire à concentration est tout aussi performant pour un procédé à haute température, comme la réduction de minerai de fer. Pour autant, il est nécessaire d'évaluer dans ce cas aussi les impacts de la construction d'unités de production de ce nouveau genre. Il est donc important de réfléchir en termes de cycle de vie pour évaluer sa réelle plus-value écologique. De plus, son intermittence et sa spécificité impliquent un changement d'habitudes sociétales, et notamment d'atteindre un certain niveau de sobriété.

Mot-clé : Réduction directe du fer, Analyse de cycle de vie, Solaire à concentration, Hydrogène, Ammoniac, Transformation alimentaire.

Concentrated solar power as a building block of a sustainable society?

~

Direct reduction of iron oxide by hydrogen and ammonia and life cycle analysis of a solar dish for food processing.

Abstract

The human influence on the environment is no longer to prove: as human activities are mostly based on fossil and mineral resources, large amounts of greenhouse gases are emitted as well as toxic substances for ecosystem and living beings. The anthropogenic emissions come from many industries which, for some part, use thermal energy. The latter is used in the electricity production or for industrial and agri-food processes as examples. In order to lower the corresponding emissions, it is important to consider the issue of sustainable thermal energy. The concentrated solar power is based on the concentration of solar irradiation on a point, a line or in a volume. This allows to reach operating temperature ranging from around 100 °C to more than 2000 °C, which makes it a potential heat source for many thermal processes. The question about its place as an elementary building block of a sustainable society therefore needs to be tackled. This work aims to give elements of answer by approaching the concentrated solar power from two angles: i) the ecological impact of a low temperature solar based process (cooking) and ii) the feasibility of a high temperature process (the direct reduction of iron ore) under a concentrated light flux.

We performed life cycle assessments of four different cooking appliances. It showed that the solar parabolic cooker has a real ecological advantage in comparison with conventional cooking appliances notably because of the absence of impact during the use phase. The results give details about the contribution of each phase of the life cycle and of all the manufacturing and energy processes and energy. Our study considered several building materials for the solar cooker as well as different use scenarios of the devices, including the influence of the carbon grid intensity.

Secondly, our experiments of direct reduction of iron ore under hydrogen and ammonia showed that this high temperature thermochemical process is possible using concentrated solar power. Indeed, high reduction rates of 96% were achieved in 12 and 16 minutes with hydrogen and ammonia respectively, which meets the requirement for the ironmaking and steel making industry. Moreover, as the light flux is oriented, a change from a pellet to a flat disk allows a more efficient heat propagation and thus a faster reduction rate. The environmental impacts of this process are not calculated here but constitutes an important perspective of this work.

We have shown that the solar parabolic device needs more manufacturing resources than the other devices. Nonetheless, when all the phases of the life cycle are considered, the impacts of the manufacturing phase are largely offset by the direct use of solar energy. We have shown that the concentrated solar power is perfectly suitable for a high temperatures process as the direct reduction of iron ore. Given the expected manufacturing resources required to build a solar concentrator dedicated to high temperature processes, the calculation of the ecological impact of such an iron production will be necessary. Additionally, its intermittent nature and

Abstract

its specificity may require a change of the social habits, for example by achieving a certain level of sobriety in order to fulfil the demand.

Keywords: Concentrated solar power, Direct reduction of iron, Life cycle assessment, Hydrogen, Ammonia, Food processing.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé.....	7
Abstract	9
Table des matières.....	11
Introduction.....	15
Chapitre I. Etat de l'art	19
I.1. La métallurgie.....	21
I.1.1. La métallurgie classique du fer.....	21
I.1.2. Conclusion	32
I.2. Réduction décarbonée à l'hydrogène	32
I.2.1. Production de l'hydrogène.....	33
I.2.2. Aspects thermodynamiques.....	40
I.2.3. Mécanisme de réaction.....	42
I.2.4. Conclusion	54
I.3. Métallurgie solaire.....	55
I.3.1. Les procédés à concentration comme source de chaleur.....	55
I.3.2. Ammoniac comme réducteur.....	67
I.3.3. Conclusion	79
I.4. L'analyse de cycle de vie (ACV)	80
I.4.1. Introduction.....	80
I.4.2. Méthode	81
I.4.3. ACV de concentrateurs solaires	92
I.5. Conclusion	105
Chapitre II. Techniques et méthodes expérimentales	107
II.1. Réaction sous flux solaire.....	109
II.2. Méthodes de caractérisation.....	111
II.2.1. Diffraction aux rayons X (DRX) et affinement de Rietveld.....	111
II.2.2. Microscope électronique à balayage (MEB) et spectroscopie à énergie dispersive (EDS).....	113
II.3. Efficacité énergétique des appareils conventionnels	114
II.4. ACV	115
II.4.1. Logiciel et base de données.....	115
II.4.2. La méthode de calcul et les indicateurs	118
II.4.3. Méthode d'inventaire de cycle de vie	124
II.4.4. Conclusion.....	124

Chapitre III. Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson	125
III.1. Présentation de l'étude.....	127
III.1.1. L'unité fonctionnelle	127
III.1.2. Champ de l'étude : les appareils étudiés.....	128
III.1.3. Hypothèses principales	132
III.2. Consommation énergétique des appareils : résultats des tests de cuisson	134
III.3. L'inventaire de cycle de vie	138
III.3.1. Inventaire descriptif et équivalences ecoinvent	138
III.3.2. Inventaire quantitatif	153
III.4. Impacts environnementaux.....	160
III.4.1. Méthodes conventionnelles	160
III.4.2. Les paraboles solaires	174
III.4.3. Comparaison générale	181
III.4.4. Analyse de sensibilité	185
III.4.5. Conditions des avantages écologiques des cuiseurs solaires	191
III.4.6. Considérations économiques et accessibilité.....	193
III.5. Conclusion.....	194
Chapitre IV. Procédé solaire à haute température : Expériences.....	197
IV.1. Introduction	199
IV.2. Réduction sous hydrogène	199
IV.2.1. Tests préliminaires sur poudres	199
IV.2.2. Réduction de pellets et influence de la pression, du temps de réduction et de la puissance de la lampe	208
IV.2.3. Optimisation de la cinétique de réduction	216
IV.2.4. Conclusion	232
IV.3. Réduction sous ammoniac	233
IV.3.1. Tests préliminaires sur poudres	233
IV.3.2. Réduction sous flux lumineux.....	238
IV.3.3. Perspectives : réduction avec l'urée comme source d'ammoniac	243
IV.4. Conclusion.....	244
Conclusions générales.....	247
Perspectives.....	250
Bibliographie	253
Annexe	265
A. Appareils de cuisson conventionnels.....	266

a.	Cradle-to-use.....	266
b.	Cradle-to-grave	272
B.	Les paraboles solaires.....	274
a.	La parabole de référence	274
b.	Résultats mid-point sans fin de vie.....	275
c.	Mid-point avec fin de vie.....	278
d.	End-point sans fin de vie.....	281
e.	End-point avec fin de vie	283
C.	Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes.....	286
a.	Durée de vie de la structure de la parabole de référence.....	286
b.	Trajet des barres d'aluminium et du bois.....	288
c.	Incertaines.....	295
D.	Un modèle simple pour déterminer les conditions des bénéfiques des cuiseurs solaires	298
E.	Considérations économiques.....	299
F.	Influence du temps de réduction	300
G.	Influence de la puissance de la lampe	301
H.	Diffractogrammes des réductions.....	302
a.	Pellets.....	302
b.	Graviers	303
c.	Disques	305

Introduction

En 1856, Eunice Foote réalise une expérience durant laquelle un récipient fermé rempli d'air et un autre récipient rempli d'air et d'acide carbonique gazeux (dioxyde de carbone) sont placés au soleil. Ses résultats montrent que le récipient avec le mélange monte plus haut en température [1]. Pour la première fois, il est montré que la présence de dioxyde de carbone influe sur la température de l'atmosphère. En 1992, le Groupement International pour l'Environnement et le Climat (GIEC) publie son premier rapport. Dans celui-ci, les auteurs concluent déjà que les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère liées aux activités humaines entraînent sensiblement l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, chlorofluorocarbones, oxyde nitreux) [2]. De plus, ce rapport montre que multiplier la concentration en dioxyde de carbone par deux entrainerait une augmentation de la température moyenne de 1,5 °C à 4,5 °C [2].

Aujourd'hui, il a été montré que les activités humaines engendrent de nombreux impacts supplémentaires en plus du réchauffement climatique (occupation des terres, disparition de la biodiversité, appauvrissement en ozone...) tous néfastes pour l'environnement et, par conséquent, néfastes pour l'espèce humaine. Cependant l'augmentation de l'effet de serre fait partie des plus marqués en raison des très grandes quantités de gaz émises depuis, notamment, la révolution industrielle. Le réchauffement pourrait avoir des conséquences dramatiques puisque certaines zones du globe pourraient afficher des températures moyennes de l'air et des taux d'humidité potentiellement mortels [3]. Par ailleurs, le réchauffement pourrait entraîner l'augmentation du niveau des océans, la disparition de nombreuses espèces animales et végétales ainsi que l'augmentation de phénomènes météorologiques extrêmes (sécheresses, tempêtes...) [3]. Il est donc nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de limiter les effets déjà perçus et éviter d'enclencher de nouveaux changements.

Nombreux de ces impacts environnementaux sont dus à l'utilisation intensive de ressources fossiles, notamment en tant que combustible. Ainsi, il paraît logique de réduire, voire de stopper leur utilisation afin de fortement diminuer les impacts environnementaux anthropiques. Cette diminution de l'utilisation des énergies fossiles peut être réalisée grâce à la sobriété dans l'utilisation des matières et des énergies (électricité, chaleur et autres) aussi bien au niveau personnel qu'au niveau collectif. Au total, 47% des émissions de dioxyde carbone sont dues au secteur de l'énergie (électricité et autres) [4]. La production d'énergie est donc un des points clés pour se diriger vers une société pérenne. Afin de réduire les émissions de ce secteur, il faudra que les systèmes de production basés sur les énergies fossiles doivent être remplacés par des systèmes basées sur des énergies renouvelables. Le photovoltaïque et l'éolien sont déjà utilisés pour produire de l'électricité mais leur déploiement doit se poursuivre, voire s'accélérer. Par ailleurs, pour la production de chaleur, les procédés de concentration solaire apparaissent comme une alternative intéressante.

Le solaire à concentration est un procédé connu depuis longtemps. Durant l'exposition universelle de 1878 en France, Augustin Mouchot a présenté une machine à vapeur actionnée par l'énergie solaire concentrée en utilisant un cône comme réflecteur ; il chauffait une ampoule en verre permettant la production de vapeur. En 1900, Manuel Antonio Gomes a réalisé un four solaire à Sorède dans les Pyrénées orientales en France. Il a ainsi pu atteindre une température estimée à 900 °C. Aujourd'hui, de nombreux procédés solaires à concentration ont été développés, majoritairement utilisés pour la production d'électricité et de chaleur. Le solaire

à concentration est basé sur la concentration du rayonnement solaire en un point ou une ligne pour permettre d'atteindre de hautes températures. La gamme de températures atteignables par le solaire à concentration est large : de 100 °C à plus de 3000 °C selon la technologie utilisée [5]. Cette large plage de températures en fait un procédé de production de chaleur alternatif équivalent en termes de température avec ceux basés sur les énergies fossiles. Grâce à son principe de fonctionnement basé sur l'exploitation du rayonnement solaire, aucun impact n'est généré lors de son utilisation ce qui en fait un réel candidat à la diminution des émissions du secteur de l'énergie. De plus, le solaire à concentration peut être low-tech en se basant sur des matériaux simples ou de récupération. La disponibilité de la ressource solaire permet aussi de rendre le solaire à concentration disponible pour un grand nombre de personnes à travers le monde. Cependant, l'intermittence induit des difficultés de mise en œuvre et d'utilisation de cette technologie pour des productions intensives. Certaines recherches actuelles sur ce procédé portent sur le stockage d'énergie thermique afin d'éviter l'hybridation d'une installation solaire avec une énergie fossile. Globalement le solaire à concentration affiche beaucoup de qualités cohérentes avec une société moins émettrice de gaz à effet de serre. Cependant, la construction d'infrastructures pour récupérer l'irradiation solaire qui est diffuse génère des surcoûts en comparaison des densités énergétiques des énergies fossiles.

Dans un premier temps, nous nous sommes demandés quel secteur, autre que la production d'électricité, pourrait être alimenté par le solaire à concentration. Le secteur de la métallurgie représente à lui seul 7% des émissions anthropiques ; son potentiel de réduction des émissions est donc important. Dans la littérature, le solaire a été étudié pour ce secteur, les températures nécessaires à la réduction du minerai de fer pouvant être atteintes par un tel dispositif. Néanmoins, beaucoup de ces études utilisaient un réducteur carboné (méthane, biochar). Il a aussi été montré dans des réacteurs classiques que la réduction pouvait être réalisée avec des réducteurs décarbonés tels que l'hydrogène. Nous nous sommes donc orientés vers la réduction de minerai de fer par l'hydrogène sous irradiation directe d'un flux lumineux concentré.

La production d'hydrogène actuelle est très émettrice en gaz à effet de serre, bien que certaines alternatives comme l'électrolyse de l'eau permettent de limiter ses impacts. De plus, son transport et son stockage restent relativement compliqués. Une alternative a donc été étudiée : l'ammoniac. Ce gaz contient une grande quantité d'hydrogène (17,6 %_{masse}) et permet la réduction du fer. Son stockage et son transport sont plus faciles que ceux de l'hydrogène, et les infrastructures nécessaires existent. De plus, ce composé peut être biosourcé à partir d'urée par exemple, un composé chimique présent dans l'urine des mammifères. La métallurgie solaire décarbonée constitue donc le premier angle de réflexion avec lequel la place du solaire dans une société pérenne sera étudiée. Plus généralement, cela permettra d'apporter des éléments de réponse sur son potentiel pour des procédés dans la gamme de température allant de 500 °C à 800 °C environ.

Ensuite, nous avons remarqué que, dans la littérature, c'est généralement l'impact sur le réchauffement climatique seul qui est étudié pour montrer l'avantage du solaire à concentration. Cependant d'autres impacts existent et peuvent être induits par le solaire à concentration. Les calculs des impacts environnementaux sont généralement réalisés avec la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), aussi bien dans la recherche que dans l'industrie. Le principe de l'ACV est simple : il consiste à modéliser toutes les étapes de production d'un produit ou de réalisation d'un procédé et de calculer les impacts environnementaux qui en découlent. Cette méthode qui date du début des années 2000 est normalisée (ISO 14040 et 14044) et permet l'évaluation de l'impact environnemental d'un produit ou d'un procédé grâce

à quatre étapes : i) la définition d'un objectif; ii) la définition du champ de l'étude, qui est la définition des limites et de l'unité fonctionnelle ; iii) la réalisation de l'inventaire, qui consiste à faire l'inventaire de tous les échanges nécessaires à la construction du produit ou du procédé ; et iv) le calcul et l'interprétation, qui consistent à calculer les impacts environnementaux grâce à différentes méthodes. Il est également possible de réaliser des comparaisons de produits ou de procédés remplissant la même fonction principale.

Nous avons donc voulu étudier l'impact écologique de la métallurgie solaire. Cependant comme le procédé n'est pas mature, il manquait beaucoup d'informations nécessaires à la réalisation d'une ACV. Un procédé existant a alors été choisi bien qu'à plus basse température : la cuisson.

La cuisson est un besoin primaire des humains qui est actuellement principalement rempli avec l'aide de différentes technologies basées sur des combustibles fossiles (charbon, bois ou gaz) ou utilisant de l'électricité, qui peut elle-même être produite en utilisant des ressources fossiles. Dans les sociétés occidentales, les technologies les plus utilisées sont le brûleur à gaz, la plaque électrique et la plaque à induction. Mais la cuisson peut également être réalisée avec une parabole solaire à concentration. Afin d'étudier l'éventuel gain écologique lors de l'utilisation du solaire à concentration pour des procédés basses températures, nous avons comparé les impacts écologiques de la cuisine solaire avec ceux de la cuisine utilisant des appareils conventionnels. L'analyse de cycle de vie constitue le deuxième angle de réflexion avec lequel la place du solaire dans une société pérenne sera étudié. Plus largement, il est possible de faire l'hypothèse que ces résultats pourront être extrapolés à d'autres procédés où le solaire pourrait être appliqué.

Ainsi, en résumé, ce travail aura pour but d'étudier le potentiel du solaire à concentration comme brique élémentaire d'une société pérenne selon deux angles : les procédés haute température et basse température. D'abord d'un point de vue de la faisabilité d'un process puis du point de vue des impacts environnementaux.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (LPCNO) dans le cadre du projet ANR MétaSol, projet en collaboration avec le Toulouse Biotechnology Institute (TBI) et le laboratoire PROCédé Matériaux et Énergie Solaire (PROMES). Les expériences de réduction sous flux lumineux concentré ont été réalisées au LPCNO où le banc de test est placé. De plus, le LPCNO est doté de machines de diffraction aux rayons X et d'accès à des microscopes électroniques à balayage équipés de capteur de spectroscopie à énergie dispersive qui ont permis de réaliser la caractérisation des échantillons. Cette thèse a été co-encadrée par Ligia Tiruna-Barna qui dirige l'équipe SOPHyE au TBI. Notre travail sur l'ACV a donc profité de son expertise. Nous avons aussi eu accès à la base de donnéesecoinvent ainsi qu'au logiciel Umberto LCA+ pour réaliser les modèles et les calculs grâce à Ligia Tiruna-Barna. Les observations MEB ont été réalisées en collaboration avec Bertrand Huneau, de l'Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) de l'Ecole Centrale de Nantes. Par ailleurs, Sylvain Rodat et Stéphane Abanades du laboratoire PROMES ont développé, dans le cadre du projet ANR, un réacteur adapté à la métallurgie solaire, qui ne sera pas décrit dans ce manuscrit. Nous avons néanmoins pu profiter de leurs expertises théoriques et techniques sur les procédés solaires à concentration.

Ce travail sera décomposé en quatre chapitres : l'état de l'art, les techniques et méthodes expérimentales, l'analyse de cycle de vie de la cuisson solaire et la métallurgie solaire décarbonée.

Introduction

Le premier chapitre balayera tous les aspects techniques et théoriques permettant d'appréhender ce travail. Il sera montré que la réduction directe de minerai de fer sous hydrogène est un procédé connu qui permet de produire du fer sans émettre de CO₂ durant la réaction chimique elle-même. Ensuite, les techniques de concentration solaire seront aussi présentées en montrant qu'elles sont adaptées aussi bien pour des procédés haute température que basse température. Finalement, la méthode de l'ACV sera présentée en détail en développant les étapes de la méthode. Il sera aussi présenté des analyses ayant été faites sur des concentrateurs solaires.

Lors du second chapitre, toutes les techniques et méthodes expérimentales utilisées au cours de cette thèse seront présentées, aussi bien pour la caractérisation de la réduction directe de minerai de fer (diffraction de rayons X, microscopie électronique à balayage, banc de test, etc) que pour la réalisation de l'inventaire de cycle de vie (base de données, catégories d'impact, méthode de calcul).

Le troisième chapitre présentera en détail l'ACV comparative de la cuisson solaire avec les appareils conventionnels. D'abord, les impacts des appareils seront présentés en détail en montrant l'influence importante des différentes phases du cycle de vie. Ensuite, les résultats des calculs pour le cuiseur solaire de référence seront présentés ainsi que la contribution des procédés de production où la production de l'aluminium domine. Différents matériaux de construction de la parabole seront aussi étudiés et montreront un avantage notable pour les matériaux recyclés ou renouvelables. Par la suite, les différents appareils seront comparés. Nous verrons ainsi que les cuiseurs solaires ont un avantage écologique devant les appareils conventionnels. Finalement, une analyse de sensibilité sur la consommation énergétique, la durée de vie des cuiseurs et l'intensité carbone du mix électrique utilisé par les appareils conventionnels sera présentée. Cette analyse de sensibilité sera suivie d'une étude préliminaire sur la question de l'usage et de l'aspect économique.

Finalement, le dernier chapitre présentera les résultats de l'étude de la réduction directe de minerai de fer sous hydrogène et ammoniac. D'abord, un certain nombre d'expériences préliminaires sur poudre seront présentées, l'objectif étant d'étudier la cinétique de réduction. Ensuite, toute l'étude sur la réduction sous hydrogène et sous flux lumineux concentré sera présentée. Le déroulement de la réduction induit par le flux lumineux concentré, qui est drastiquement différent de ce qui se passe dans un four, sera discuté. L'influence du temps de réduction, de la puissance de la lampe et de la pression de gaz sera présentée et montrera que tous ces facteurs ont une influence notable sur la performance de la réduction. Ensuite, différentes stratégies pour diminuer le temps de réduction seront présentées et permettront de montrer qu'un mouvement de l'échantillon sous le flux lumineux durant la réduction permet de fortement diminuer le temps de réduction grâce au changement de la surface directement irradiée. De plus, cette partie montrera que les échantillons avec une grande surface irradiée et une faible épaisseur sont les plus performants et s'affranchissent du mouvement, ce qui permet d'imaginer un procédé industriel plus facilement. Finalement, des expériences préliminaires de réduction sous ammoniac seront présentées. Ces réductions présentent des différences avec celles sous hydrogène, que ce soit sur la cinétique de réduction ou sur les phases présentes lors de la réduction.

La conclusion générale et les perspectives de ce travail seront présentées à la fin de ce manuscrit, en amont de la bibliographie et des annexes.

Chapitre I. Etat de l'art

I.1. La métallurgie

I.1.1. La métallurgie classique du fer

La quasi-totalité (99,7%) de la production actuelle de fer et d'acier est réalisée via deux voies qui sont schématisées sur la Figure I-1. La première, la voie dite « intégrée », consiste à réduire le fer et le carboner pour produire de la fonte liquide. Cette fonte est transformée en acier grâce à un convertisseur à oxygène, puis l'acier est mis en forme par coulée continue sous forme de produit semi-fini (brames, blooms et billettes), et enfin réchauffé et laminé à chaud en produit fini (fil, tôle, profilé, poutre, etc). La seconde voie est la réduction directe suivie par une fusion et un affinage dans un four électrique. Cette voie consiste à réduire le fer à l'état solide puis à le fondre dans un four électrique et finir la production de la même façon que précédemment : coulée continue et laminage à chaud. En termes de proportion, l'organisation mondiale de l'acier (World Steel association) nous apprend que la voie intégrée représente 70,8% de l'acier produit en 2021 et la seconde voie 28,9% [6]. Comme le montre la Figure I-1, dans les deux voies, la première étape est la production du fer, qui consiste en la réduction du minerai de fer. Ensuite il y a l'étape de conversion vers l'acier puis la finition. Le détail de chaque étape est présenté dans cette partie.

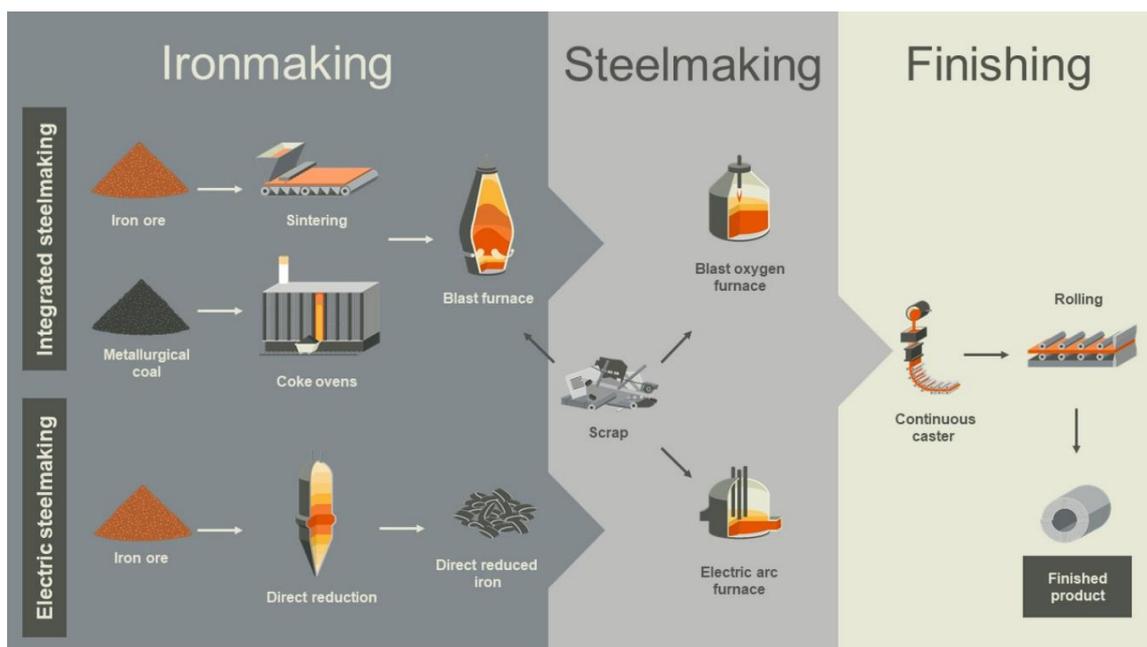


Figure I-1: Méthodes actuelles de production de fer et d'acier [7]

I.1.1.1. La réduction de minerai de fer

I.1.1.1.1. Le haut fourneau

Comme dit précédemment, la plus utilisée des deux voies est celle intégrée. Pour cette dernière, la réduction du minerai de fer produit de la fonte et est réalisée dans un haut-fourneau. La Figure I-2 schématise une installation complète de production de fonte avec un haut-fourneau. Sur la gauche de l'image il est possible de voir la partie « matière première » qui

fournit en minerai, généralement Fe_2O_3 sous forme de pellets, en coke et en chaux, puis au centre le système de chauffage, généralement au gaz naturel, qui envoie de l'air chaud dans le fourneau et enfin à droite de l'image le haut fourneau lui-même.

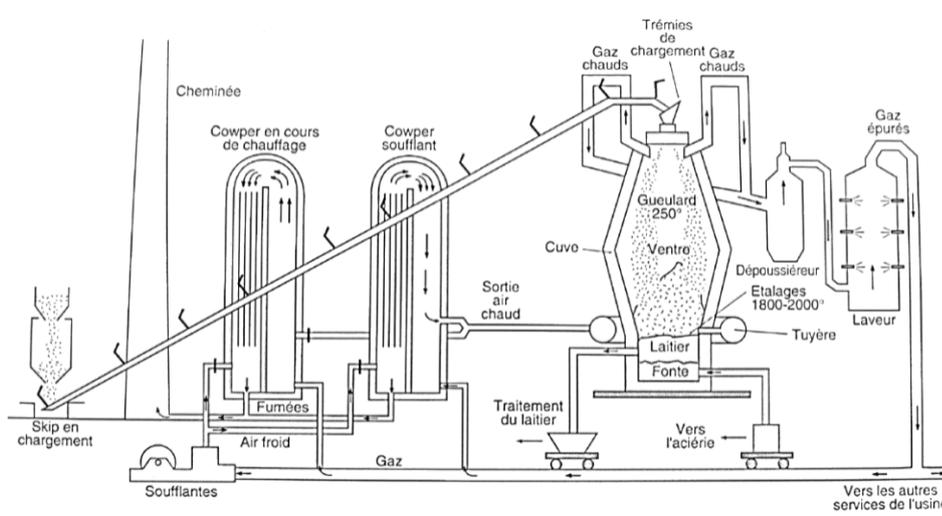


Figure I-2: Schéma d'un haut fourneau, de l'alimentation en minerai et du système de chauffage du gaz [8].

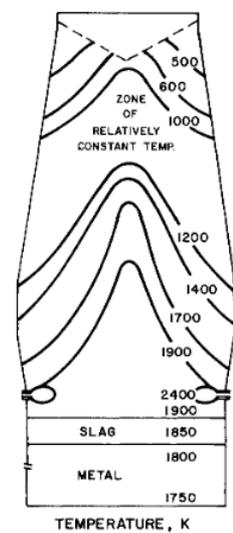


Figure I-3: Répartition des températures du gaz dans le haut fourneau [9].

Les pellets sont généralement réalisés à partir de minerai de fer concentré mis en forme grâce à deux technologies : le pelletiseur à disque (Figure I-4-a) ou à tambour (Figure I-4-b). Le premier est constitué d'un disque penché qui tourne sur lui-même ; le second est constitué d'un cylindre incliné de 6° à 10° appelé tambour. Dans les deux cas, le concentré hydraté est introduit dans le pelletiseur avec des liants et, dans certains cas, de l'eau. Lorsque le concentré tourne sur lui-même dans le tambour ou le disque, il s'agrège et forme des boules. La taille des pellets est gérée soit directement en sortie du pelletiseur pour celui à disque soit après pour celui à tambour [10].

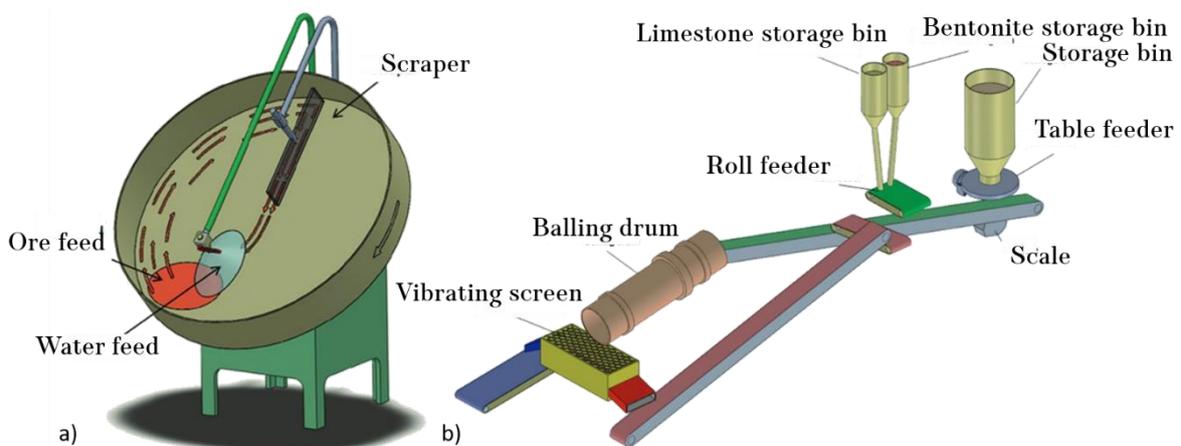
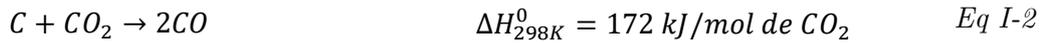
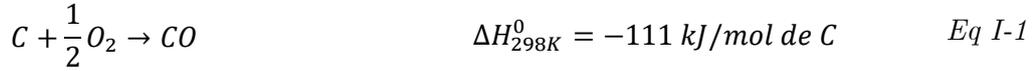


Figure I-4 : (a) Pelletiseur à disque et (b) à tambour [10].

La chaux est introduite sous forme de poudre soit telle qu'elle, soit mélangée au minerai ; la chaux permet d'agréger les impurétés lors de la formation du laitier. Le flux d'air (entre 950 et

1350°C), qui peut être enrichi en oxygène, embrase du coke incandescent (autour de 1500°C) situé à la sortie de la tuyère, ce qui crée du monoxyde carbone (CO) qui réduit les oxydes fer en remontant dans le fourneau avant qu'ils ne soient fondus [9], [11]. La production du monoxyde de carbone est réalisée par la succession des réactions Eq I-1 (production de monoxyde de carbone) et Eq I-2 (gazéification du coke) en présence de CO₂ et en excès de C [9]. Les gaz libérés lors de ces réactions sont à des températures d'environ 2000-2200°C [8].



Cette température élevée assure la fusion de la fonte en bas du haut fourneau avant qu'elle n'en sorte et soit ensuite envoyée vers la raffinerie avec une partie du laitier (résidus riches en chaux formés dans le haut fourneau lors de la fusion du minerai et la combustion du coke).



La réaction de réduction du minerai de fer avec le monoxyde carbone se produit comme le montrent les équations Eq I-3, Eq I-4, et Eq I-5 [9]. La carburation du fer se déroule lorsque le fer ruisselle sur les morceaux de coke : à ce moment le carbone se dissout doucement dans le fer en phase liquide [8]. Le produit fini de cette étape est de la fonte liquide, d'une température aux alentours de 1500°C, contenant entre 2% et 6,7% de carbone.

La production journalière d'un haut fourneau est de 6000 tonnes de fonte soit environ 2200 kt/an [12]. Pour produire une tonne de fonte, il faut environ 1600 kg de minerai de fer, 320 kg de coke à 90% de carbone (permettant la carburation), 160 kg de charbon à 75-85% de carbone (permettant la formation de CO) et 1000 Nm³ d'air [8]. D'un point de vue environnemental, l'ensemble de ces étapes conduit à des émissions d'environ 1476 kgCO_{2eq}/tonne de fonte liquide, dues à 70% à l'utilisation du charbon [13].

I.1.1.1.2. La réduction directe

La seconde voie de production de fer est la réduction directe, qui est un procédé utilisant soit le charbon soit le gaz naturel [11], [14], [15]. Pour ce qui est de l'utilisation du gaz, les réacteurs utilisés sont les fours à cuve (grande majorité), les lits fluidisés ou les réacteurs à retors, alors que pour les procédés à base de charbon, les fours utilisés sont des fours à sole tournante (grand majorité), des fours rotatifs ou des fours à foyers multiples [11], [14]. La matière première utilisée pour la réduction directe se présente sous forme de pellet de minerai de fer mise en forme comme présenté précédemment. Le produit fini de la réduction directe est appelé fer pré-réduit ou, en anglais *direct reduced iron* (DRI) ou *sponge iron*. Il contient environ 0,1% de carbone pour la réduction directe basée sur le charbon et environ 2% quand le gaz est utilisé [11], [16]. Il se présente sous forme de pellets de fer poreux qui peuvent être transportés, après refroidissement ou à chaud, en direction d'un four à arc électrique. Ils peuvent également être transformés en briquette (*hot briquette iron*) afin de faciliter leur transport et limiter l'oxydation [14], [15]. Le DRI est caractérisé par son degré de réduction (R) et de métallisation (M), dont les définitions sont données Eq I-6 et Eq I-7. Dans le DRI, la

quantité de gangue (impuretés) est importante, car elle aura une influence sur les étapes suivantes de production de l'acier [14].

$$R = \frac{\text{oxygène éliminé}}{\text{oxygène total lié au fer avant la réduction}} \quad \text{Eq I-6}$$

$$M = \frac{\text{Fe présent à l'état métal Fe}^\circ}{\text{Fe total dans le minerai réduit}} \quad \text{Eq I-7}$$

Les avantages principaux de la réduction directe par rapport à la réduction en haut fourneau sont : i) l'absence de dépendance à la production de coke puisqu'il sert à la carburation, ici le produit n'est pas fortement carboné et est réduit via des gaz (attention, le charbon lui reste présent dans le cas de la réduction directe au charbon) et ii) la taille des installations qui sont plus petites et ont un plus faible impact environnemental. Cependant certains désavantages sont à noter : i) une productivité plus faible par unité de volume du réacteur ; ii) le produit final a une faible teneur en carbone, ce qui peut créer des difficultés lors de la transformation en acier [11]. Un désavantage notable est également qu'étant donné la porosité et la grande surface spécifique du DRI, la réoxydation est possible s'il est chauffé autour de 200°C ou même à température ambiante en présence d'humidité [11]. L'impact écologique de ces méthodes est de 1048 kgCO_{2eq}/tonne de métal avec l'utilisation du charbon et 522 kgCO_{2eq}/tonne de métal avec l'utilisation du gaz naturel [13].

Pour la suite, seuls les procédés les plus couramment utilisés seront présentés.

Reduction directe basée sur le charbon :

Le premier réacteur utilisé pour produire du DRI avec du charbon est le four rotatif. La Figure I-5 présente le schéma simplifié du procédé. Le système est composé d'une trémie pour fournir la matière première, d'un four rotatif, d'un système de traitement des gaz d'échappement, d'un refroidisseur rotatif à l'eau, d'un filtre et d'un système de séparation magnétique.

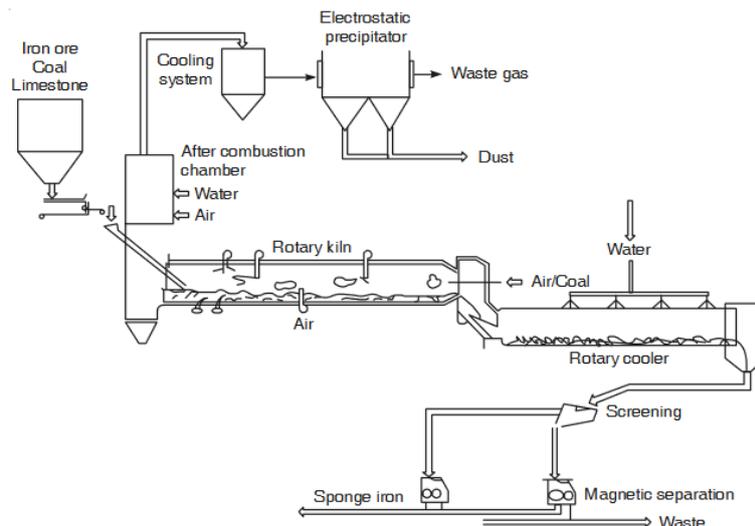


Figure I-5: Schéma simplifié du procédé de production de DRI via un four rotatif [11]

La matière première (minerai de fer, charbon et calcaire) est introduite dans le four rotatif qui tourne dans le sens inverse au déplacement des gaz réducteurs produit par la combustion du

charbon. Une fois le minerai réduit, le DRI est refroidi dans un refroidisseur rotatif lui-même refroidi à l'eau. Finalement, le minerai est trié une première fois lorsque le DRI est récupéré ; ensuite une seconde séparation (magnétique) est réalisée pour séparer le charbon résiduel avant que le DRI soit transporté ou transformé en briquette. La proportion d'air présent dans le four est gérée afin que la combustion du charbon produise du monoxyde de carbone. La température cible pour la charge solide (minerai et charbon) est de 950-1050 °C afin d'éviter une grosse différence avec le gaz, ce qui entrainerait la formation d'agglomérats sur les parois du four et la fusion locale de la charge solide.

La Figure I-6 présente le procédé Fastmet de la société Midrex et Kobe qui a une capacité de production de 450 kt/an [14]. Ce procédé réalise la réduction directe du minerai de fer avec du charbon et utilise un four à sole rotative.

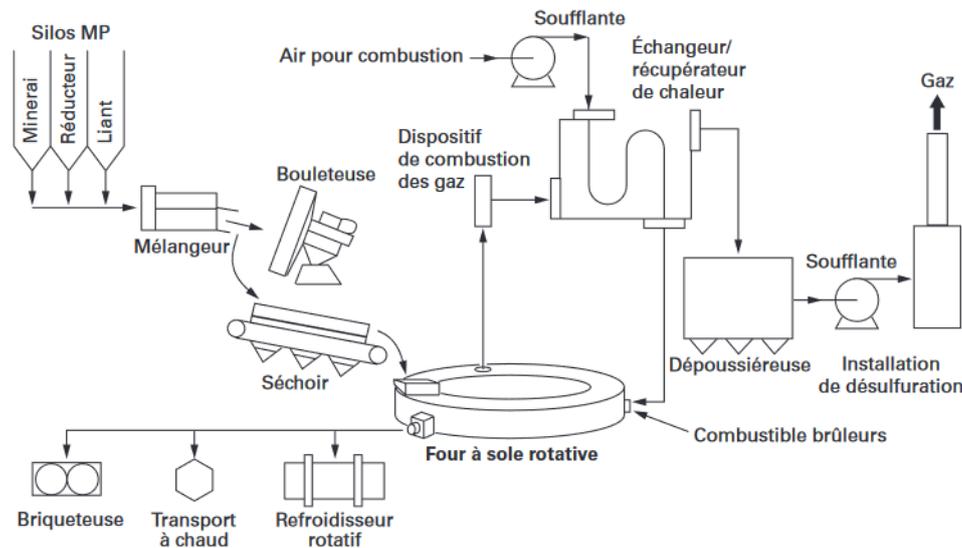
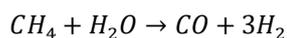


Figure I-6 : Diagramme descriptif de procédé de réduction directe par le charbon Fastmet (Société Midrex et Kobe) [14]

La matière première de ce procédé est composée de minerai de fer concentré de faible granulométrie qui est mélangé avec du charbon en poudre et des liants. Le tout est transformé en pellets avant d'être séché et placé dans le four sur une seule épaisseur. Ensuite, la charge est chauffée aux alentours de 1250-1400 °C grâce à la combustion de gaz, d'hydrocarbure ou de charbon pulvérisé et est métallisée à 90-95% en 6 à 12 min[11]. La réduction est réalisée par le carbone du charbon présent dans les pellets et directement en contact avec les oxydes de fer. La réduction est aussi réalisée par les gaz (CO et H₂) présents dus à la combustion du combustible fournissant la chaleur. Ensuite, le DRI est déchargé en continu à la sortie du four et placé soit dans un refroidisseur rotatif annexe, soit transporté à chaud ou encore transformé en briquette. La teneur en carbone peut être contrôlé de 1 à 6% ce qui offre un minerai pré-réduit carboné avec un haut taux de métallisation, idéal pour la sidérurgie [11].

Reduction directe basée sur le gaz naturel :

Les gaz généralement utilisés dans les procédés de réduction directe par le gaz sont le dihydrogène (H₂) et le monoxyde de carbone (CO). Ces derniers peuvent être produits via le vaporeformage du méthane dont la réaction principale est donnée ci-dessous Eq I-8 [17]. Le détail de la production de dihydrogène est présente partie I.2.1.



$$\Delta H_{298K}^0 = 206 \text{ kJ/mol de } CH_4$$

Eq I-8

Comme dit précédemment, plusieurs réacteurs sont utilisés pour la réduction directe basée sur le gaz ; cependant le plus largement répandu est celui de la société Midrex basé sur le four à cuve. En effet, le procédé représente 80% de la production de DRI par four à cuve et 60% de la production globale de DRI (2021) [18]. La Figure I-7 présente le procédé en question. Sa capacité de production varie entre 300 et 2000 kt/an en fonction de la taille de l'unité de production [14]. Le process est composé d'un récupérateur de chaleur, d'un reformeur de gaz naturel, d'un four à cuve, de différents systèmes de compression, lavage et refroidissement des gaz, et d'une cheminée.

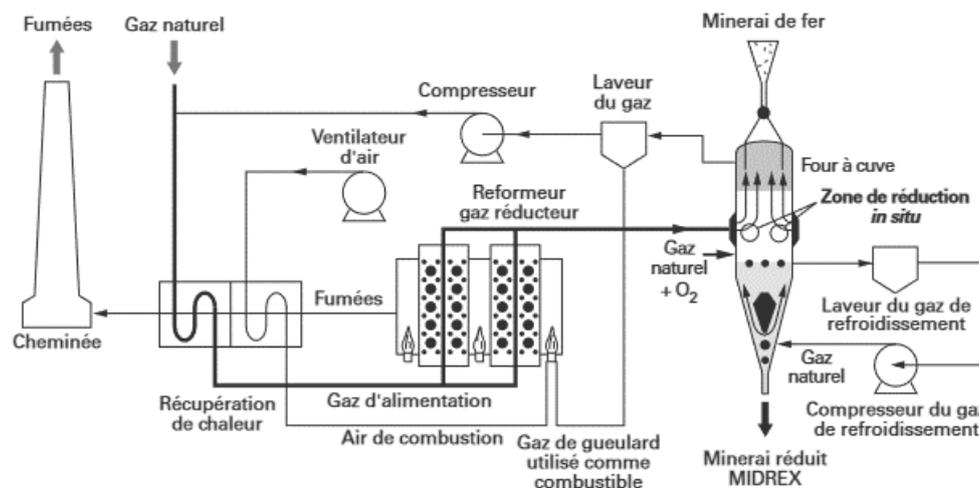
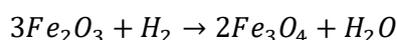


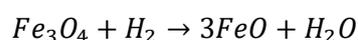
Figure I-7: Procédé Midrex de production de DRI avec reformage de méthane in situ [14]

Le gaz naturel est préchauffé avant d'être reformé en amont du four à cuve (dans le reformeur) afin de produire du monoxyde carbone et de l'hydrogène. Le mélange de dihydrogène et de monoxyde de carbone est ensuite directement envoyé dans le four à cuve pour la réduction. La réduction prend place à l'état solide entre les gaz qui remontent le four et le minerai de fer qui le descend. La réaction se déroule selon les équations Eq I-3, Eq I-4 et Eq I-5 pour le monoxyde de carbone et selon les équations Eq I-9, Eq I-10 et Eq I-11 ci-après pour le dihydrogène [19]. La réduction de fer sous hydrogène est présentée en détail dans les parties I.2.2 et I.2.3.



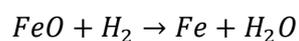
$$\Delta H_{298K}^0 = -1,0 \text{ kJ/mol de } Fe$$

Eq I-9



$$\Delta H_{298K}^0 = 24,9 \text{ kJ/mol de } Fe$$

Eq I-10



$$\Delta H_{298K}^0 = -25,4 \text{ kJ/mol de } Fe$$

Eq I-11

Après la réduction, les gaz d'échappement (gaz de gueulard) majoritairement composés de monoxyde de carbone et de dihydrogène sortent au sommet du four, sont lavés et utilisés comme combustible pour le reformage du méthane (en plus de méthane et d'air). Une fois la zone de réduction passée, le DRI entre dans une zone conique où il refroidit et au bout de laquelle il est récupéré pour être envoyé vers un four à arc électrique. De plus, lorsqu'un DRI à haut taux de carbone est nécessaire, il est possible d'introduire du méthane dans cette dernière zone où il est cracké en présence du DRI métallique réactif. De manière générale, la métallisation du DRI est aux alentours de 93-94% [11].

Un autre réacteur précédemment cité est celui à lit fluidisé comme utilisé dans le procédé Finmet des sociétés FIOR et VAI (voir Figure I-8) qui a une capacité de 550 kt/an [14]. Le système est composé dans un premier temps de reformeur de gaz à la vapeur, puis de quatre réacteurs à lit fluidisé (R1 à R4), de différents systèmes de traitement de gaz (laveur, compresseurs...) et d'un système de trémies permettant de transférer la matière première d'un réacteur à l'autre [14].

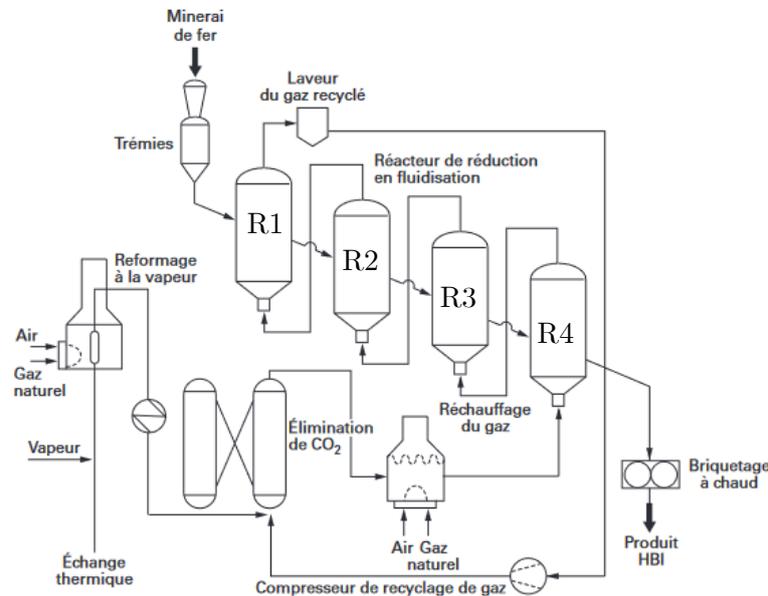


Figure I-8: Procédé Finmet de production de DRI avec reformage, adapté de [14]

Ici, la matière première (morceaux sous forme de bloc de minerai concentré d'une taille inférieure à 12 mm) est introduite dans le premier réacteur R1, et le mélange de gaz réducteur (majoritaire dihydrogène et monoxyde carbone, accompagné de méthane) dans le dernier R4. Le mélange de gaz, dont la composition est gérée en fonction de la teneur finale en carbone voulue, se présente à R4 aux alentours de 820°C et arrive à R1 aux alentours de 550°C [11]. Ensuite, le préchauffage, le séchage et la réduction vers le fer se fait par étape en passant d'un réacteur à un autre en suivant les équations présentées page 23 sous monoxyde de carbone et celles présentées pour le procédé Midrex sous hydrogène (page 26) [11]. Les gaz d'échappement sont nettoyés et réinjectés dans le système. Le DRI est récupéré à la sortie du R4 sous forme de morceaux métallisés à hauteur de 93% et est transformé en briquette [11].

La prochaine étape de la production d'acier est le passage de la fonte ou du DRI vers l'acier.

I.1.1.2. La conversion vers l'acier

Ici, deux technologies vont être présentées : le convertisseur à oxygène et le four à arc électrique. Le premier est utilisé pour certaines étapes de raffinage de la fonte qui sont présentées dans le Tableau I-1 avec les autres étapes d'affinages et leurs réacteurs. Le second est utilisé dans le même but avec différentes matières premières (acier de seconde main, DRI, briquette et parfois fonte). La partie I.1.1.1.2 présente plus en détails le fonctionnement des fours à arc électrique et la production d'acier recyclé en utilisant ces fours. La Figure I-9 schématise le cycle dans lesquelles les étapes de raffinage sont réalisées.

Tableau I-1: Les étapes de raffinage de la fonte et leurs réacteurs [5]

Réacteur métallurgique	Rôle
Poche à fonte	Désulfurisation
Convertisseur	Décarburation Désiliciation Déphosphoration
Poche à acier	Désoxydation, décantation des inclusions Réglage analytique et thermique (composition et température) Désulfuration par brassage métal-laitier
Traitement par vide	Décarburation (pour acier très bas carbone) Déshydrogénation Désoxydation

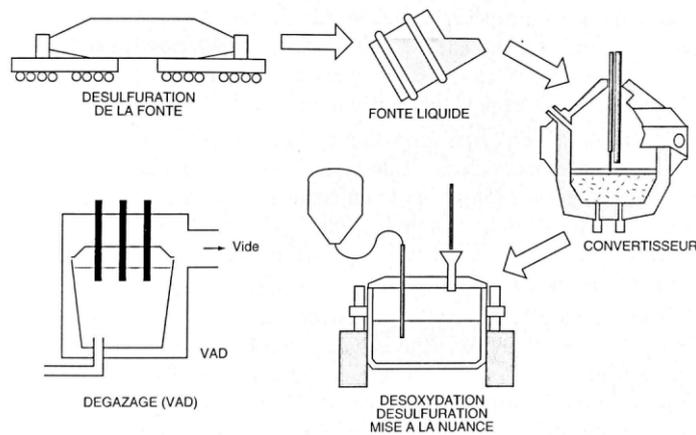


Figure I-9 : Les cuves des différentes étapes de raffinage de la fonte [8]

I.1.1.1.1. Convertisseur à oxygène

Parmi les opérations de raffinage de la fonte, l'opération principale est appelée conversion et est réalisée dans un convertisseur à oxygène où l'objectif est d'oxyder les impuretés présentes dans le fer, de les agglomérer avec le laitier déjà présent et d'oxyder le carbone pour réduire fortement sa concentration. Il est important de noter qu'à cette étape de la ferraille peut être rajoutée [8]. Il existe plusieurs types de convertisseurs à oxygène, présentés Figure I-10, avec

des différences liées à i) la projection de l'oxygène dans l'acier chaud qui se fait soit par le haut, soit par-dessous et au ii) refroidissement des tuyères de projection qui se fait par eau ou par hydrocarbure. Il existe également un dernier type de convertisseur dit mixte qui combine les deux précédents. De plus ce dernier permet un mélange laitier-fonte qui permet une bonne agglomération des particules oxydées dans le laitier.

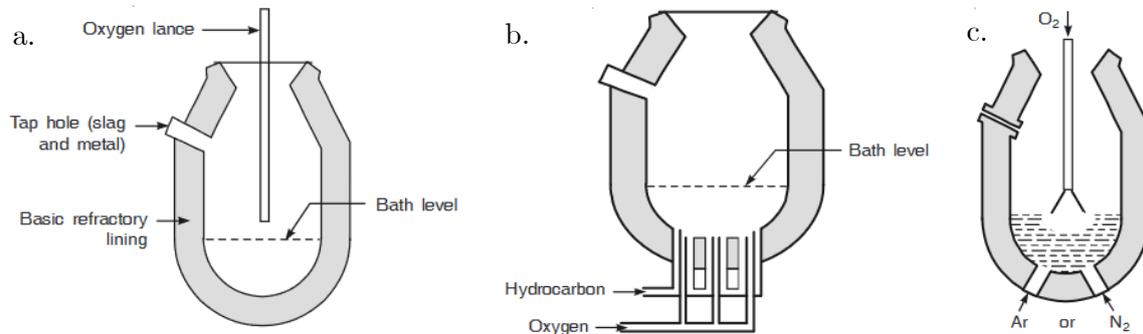


Figure I-10 : Différents types de convertisseur à oxygène soufflé (a) par le bas, (b) par le haut et (c) mixte [11]

Après la conversion de la fonte il reste des étapes d'affinage qui sont réalisées dans d'autres réacteurs pendant la métallurgie secondaire [8].

I.1.1.1.2. Four à arc électrique

Une fois le DRI produit, l'étape suivante est sa fusion et son raffinage, ce qui est en partie réalisé dans un four à arc électrique. Le four à arc électrique peut être à courant alternatif (AC) ou à courant continu (DC) [16]. Cette technique représente environ 24% de la production totale d'acier et émet, pour cette étape seule, de 0,23 à 0,46 tCO_{2eq}/tonne d'acier en fonction de la source d'électricité, des rendements et de la provenance de l'acier (recyclé, DRI ...) [13]. Lorsque la charge est uniquement composée d'acier de seconde main, la consommation du four est estimée à 670 kWh/t d'acier liquide [20]. La Figure I-11 présente deux schémas de fours à arc électrique, en haut est présenté le four AC et en bas celui DC. La différence principale entre la composition des deux fours est le nombre d'électrodes. En effet, le four à arc électrique AC possède 3 électrodes contre une seule pour un four DC. De plus, les fours DC ont des anodes situées au fond de la sole [11], [16]. Les principaux avantages de ces fours devant les convertisseurs à l'oxygène sont : des tailles relativement faibles, un impact sur l'environnement plus faible, une plus grande flexibilité sur l'acier produit et un contrôle plus précis [11].

La transformation de l'acier se déroule en trois phases : l'amorçage, la fusion et l'affinage. Au début, lors de l'amorçage, la puissance de l'arc n'est pas maximale pour qu'il n'y ait pas trop de rayonnement vers la voute. Dans cette étape les électrodes (ou l'électrode pour le four DC) descendent et créent leurs puits dans le métal froid. L'objectif est d'avoir une vitesse de descente rapide des électrodes pour pouvoir passer à la phase de fusion et limiter au maximum le rayonnement de l'arc sur la voute. Lors de l'étape de fusion, la ferraille est fondue par rayonnement direct et/ou par transfert thermique de la partie fondue avec le reste de la ferraille, la puissance dans les électrodes étant quasiment maximale. Au début de cette phase, l'arc est complètement entouré de ferraille donc il ne représente pas de risque pour les parois du four. Cependant, plus la fusion progresse plus les parois de la cuve sont exposées et donc dégradées ; la puissance de l'arc est donc diminuée. Finalement, la phase d'affinage a pour but de monter en température la charge pour la coulée et de réaliser les opérations d'affinage

nécessaire. A ce moment, la puissance de l'arc est gérée pour limiter l'usure du revêtement [21]. Le reste du raffinement et l'ajustement de la composition se fait ensuite dans une louche de sidérurgie pendant la métallurgie secondaire [11], [16]. Dans un four AC, l'arc est émis par les électrodes entre 30° et 45° vers les parois depuis la pointe de l'électrode vers la charge et non verticalement comme dans les fours AC où l'arc est émis de la pointe de l'électrode vers la charge. Cela permet une fonte de la charge plus rapide et plus régulière ainsi que des pertes thermiques réduites. Cette spécificité s'additionne à d'autres avantages du four DC comme la réduction des perturbations électriques induites par le four, la réduction du bruit, et la réduction de la consommation d'électrode. Cependant, des désavantages sont à noter au niveau du prix des électrode qui est plus élevé lorsque le diamètre est plus élevé. Il faut aussi noter que l'entretien de la cuve est légèrement plus cher [22].

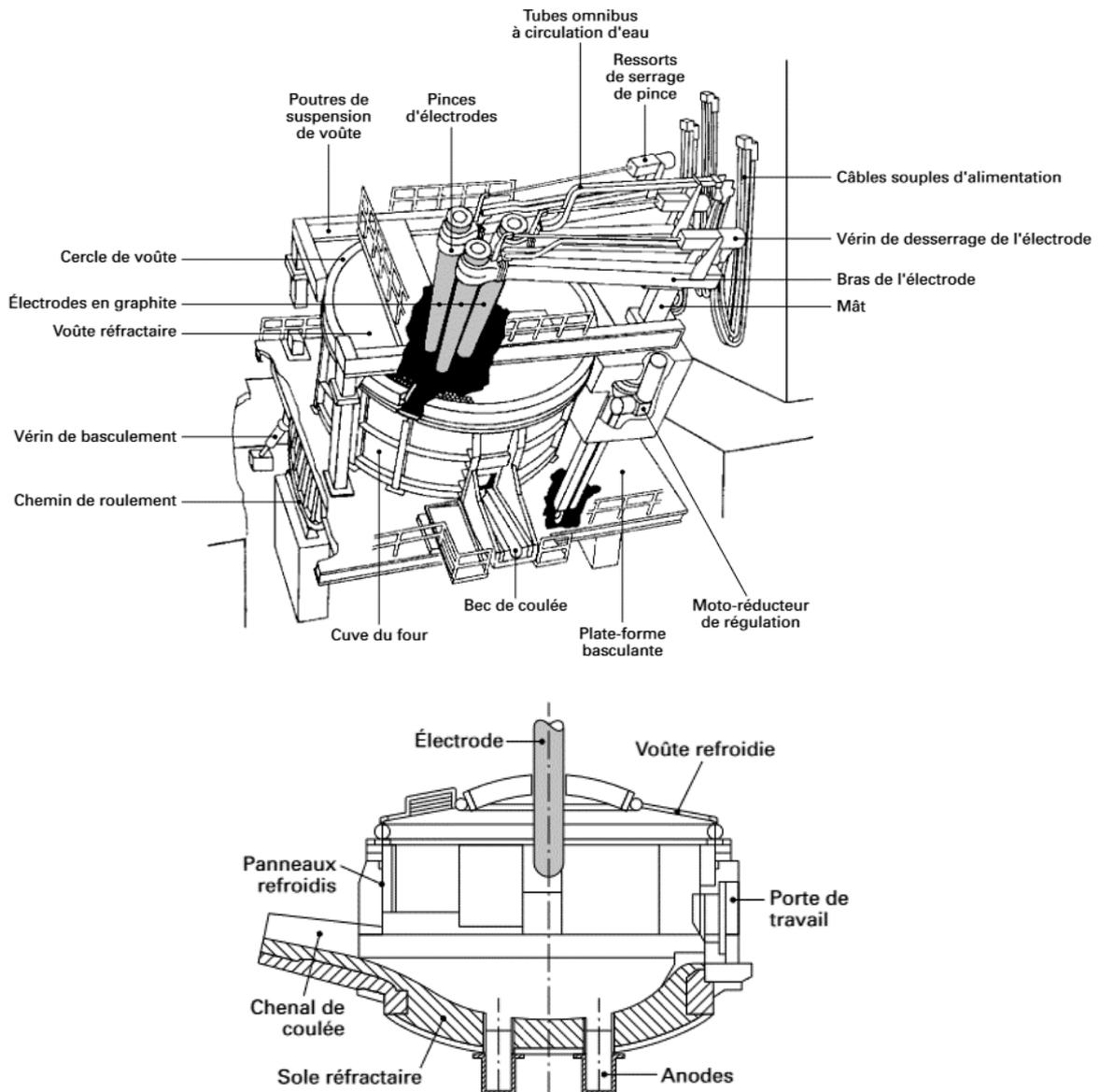


Figure I-11: Schémas de fours à arc électrique à courant alternatif (haut) et à courant direct (bas) [11].

I.1.1.1.3. Métallurgie secondaire

Les opérations de métallurgie secondaire sont réalisées en « poche » ou en « four poche » et consistent en la désoxydation par ajout d'éléments désoxydants (silicium, aluminium et autres), la désulfuration par brassage au gaz neutre en présence d'un laitier riche en chaux, la décarburation par insufflation d'oxygène (seulement pour les aciers à basse teneur en carbone), la dénitruration et déshydrogénation par dégazage sous vide, et enfin la mise à la nuance en ajoutant les éléments d'alliage par l'addition de fil en bobine. La mise à température pour la coulée est réalisée par aluminothermie pour les affinements en poche et par arc électrique pour les « fours poches » [8].

Une fois toutes les étapes d'affinage et de métallurgie secondaire réalisées, l'acier est transformé en produit fini.

I.1.1.2. La coulée continue

Le procédé se situe juste après les étapes de métallurgie secondaire afin de réduire l'apport en chaleur nécessaire pour la mise en forme. La Figure I-12 présente les éléments principaux de la coulée continue. Tout d'abord, une poche (où sont réalisées les étapes de métallurgie secondaire) permet le transfert de l'acier liquide dans un répartiteur qui est chauffé, l'acier étant ensuite coulé dans un moule et refroidi pour entamer la solidification. A la sortie du moule, se trouve un système permettant le contrôle de la vitesse de sortie. Ensuite, dans le cas schématisé ci-dessous, la poutre d'acier est pliée alors qu'elle est encore malléable avant d'être mise en forme et coupée en produit semi-fini. Historiquement les coulées continues se faisaient verticalement mais cela impliquait de très hauts bâtiments. Cette méthode a donc été remplacée par celle présentée Figure I-12, par moule courbé et par des systèmes complètement horizontaux [11]. Les produits de la coulée continue sont des brames, des blooms ou des billettes qui vont en four de réchauffage pour être laminés à chaud en forme de produits plats (tôle ou plaque) ou de produits longs (profilés, poutrelles, fils, barres) [8].

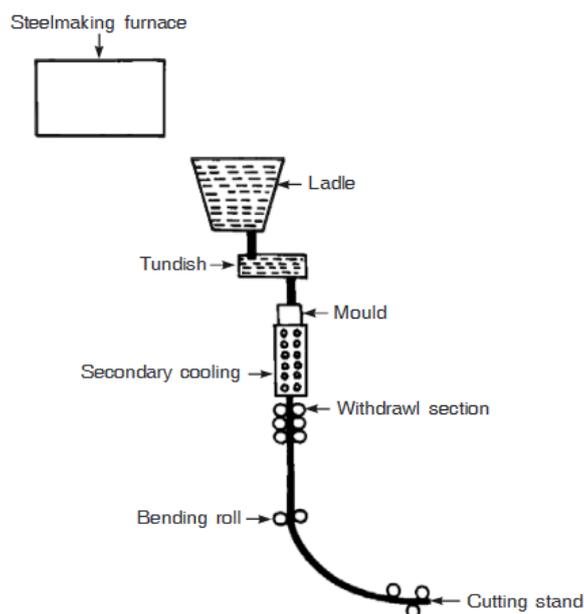


Figure I-12 : Eléments principaux nécessaires à la coulée continue de l'acier [11]

I.1.2. Conclusion

Précédemment, l'ensemble des technologies de la métallurgie primaire et secondaire a été présenté. Dans tous les cas, une quantité plus ou moins importante de gaz à effet de serre est émise à différents stades : lors de la transformation du minerai en fer, de sa conversion vers l'acier, de la métallurgie secondaire et même durant le recyclage de l'acier. La suite de ce travail va se focaliser sur la première étape : la transformation du minerai vers le fer, et plus précisément sur la réduction directe basée sur l'utilisation de gaz réducteur. Afin de minimiser son impact, un autre réducteur que le monoxyde de carbone est possible et a déjà été introduit, il s'agit de l'hydrogène. L'intérêt principal de ce réducteur est que la réaction avec le minerai n'émet aucun gaz à effet de serre et qu'il peut être produit grâce à l'électrolyse de l'eau. La prochaine partie traitera de la production de ce réducteur ainsi que des mécanismes de la réduction sous hydrogène.

I.2. Réduction décarbonée à l'hydrogène

Comme annoncé précédemment, la réduction de fer émet une grande quantité de gaz à effet de serre. Ces émissions sont dues, en partie, à la réaction de réduction du minerai de fer qui utilise généralement des réactifs carbonés. L'hydrogène permet la réduction de fer sans émissions de gaz à effet de serre, il s'inscrit donc dans la démarche de décarbonation de la réduction. En effet, l'utilisation de l'hydrogène dans la réduction peut permettre une réduction proche de 90% des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux méthodes classiques de réduction directe en fonction de la méthode de production de l'hydrogène [23].

Du point de vue de la production, 54 kg d'hydrogène sont nécessaires pour produire une tonne de fer, donc la production d'une mégatonne de fer nécessiterait une unité de production d'hydrogène d'une capacité de 70000 Nm³/h [23]. Afin d'avoir une idée de ce que représenterait la production de DRI avec de l'hydrogène un simple calcul est possible. En 2022, 125 Mt de DRI ont été produites d'après World Steel Association ; les produire avec de l'hydrogène nécessiterait 6,75 Mt de ce réducteur. Or l'électrolyse requiert entre 53,4 et 70,1 kWh/kg de H₂ [24]. Donc, si on prend la valeur moyenne, il faudrait 416 TWh d'électricité pour assurer la production, cela représente 1,5% de la production mondiale d'électricité en 2022 ou quasiment la production d'électricité française en 2022. Il paraît donc difficile de passer toute la production de DRI à l'hydrogène. De plus, ces calculs ne considèrent pas la production via la voie intégrée qui représente la plus grosse partie de la production. En effet, pour produire l'intégralité, nous serions proche du quart de la production mondiale d'électricité. En revanche, si l'on se place dans une démarche plus sobre en terme de production, l'hydrogène peut avoir sa place comme alternative au gaz réducteur carboné (*i.e.* le monoxyde de carbone CO).

Cette partie a pour but de donner le maximum d'informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement de cette réaction et de la production d'hydrogène. Par conséquent, les méthodes de production d'hydrogène seront présentées des points de vue technique et énergétique. La réaction entre le minerai de fer et l'hydrogène sera ensuite détaillée en passant en revue i) les aspects thermodynamiques et chimiques puis ii) les paramètres qui influent sur la cinétique de réduction.

I.2.1. Production de l'hydrogène

En réponse aux fortes émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation des combustibles fossiles dans les industries, l'hydrogène attire un grand nombre d'entre elles (automobile, aviation, métallurgie...). Cependant, ce dernier est aujourd'hui produit avec des technologies émettant de grande quantité de gaz à effet de serre. En effet, l'agence internationale de l'énergie (IEA) nous apprend que, sur les 90 Mt d'hydrogène produites en 2020, 79% proviennent d'installations de production d'hydrogène basées sur des énergies fossiles : 59% proviennent de gaz naturel et 19% de charbon ; les 21% restant sont le sous-produit du raffinage d'hydrocarbures ; le tout complété par d'autres méthodes [25]. Pour décarboner la production, la voie la plus prometteuse est celle de l'électrolyse de l'eau, qui représente aujourd'hui 0,03 % de la production globale avec environ 30 kt d'hydrogène produits en 2020 [25]. Pour ce qui est de l'utilisation de l'hydrogène, 72 Mt sont utilisés directement dans l'industrie pétrolière et la production d'ammoniac, et 18 Mt sont destinées à la production de méthanol et à la réduction directe de minerai de fer [25].

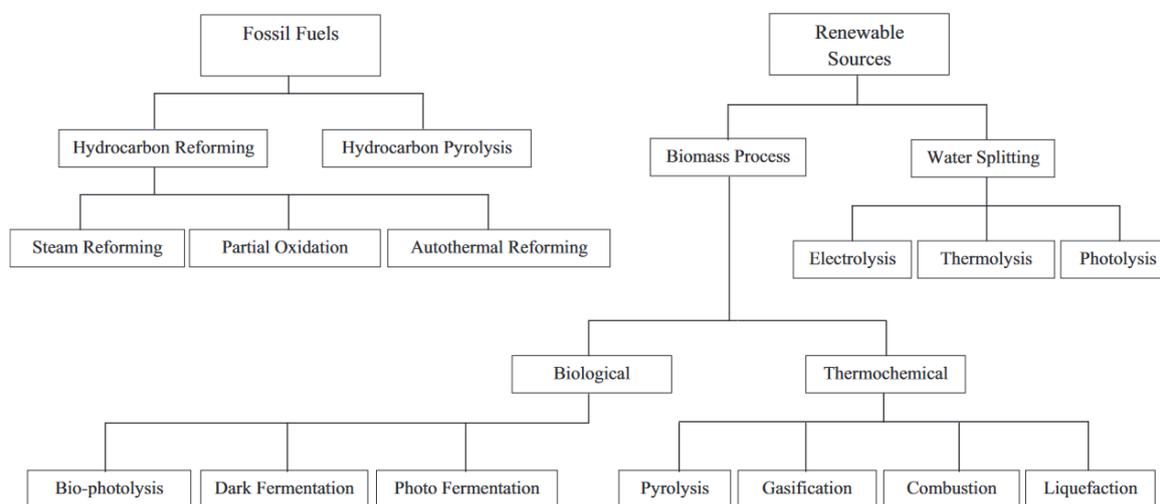


Figure I-13 : Différentes technologies de production d'hydrogène [26]

La Figure I-13 présente toutes les voies actuelles de production d'hydrogène. Il est possible de distinguer deux familles principales : à partir de carburants fossiles et à partir de sources renouvelables. Dans la voie fossile deux grands groupes existent : la pyrolyse d'hydrocarbures ou leur reformage. Ce dernier est possible *via* trois techniques : le reformage ou vaporeformage, l'oxydation partielle (gazéification) et le reformage autothermique. Pour ce qui est de la voie renouvelable, il est possible d'utiliser la biomasse ou l'eau. Pour la biomasse deux voies sont possibles : *via* un traitement biologique ou *via* la thermochimie. La première voie regroupe de nombreuses techniques, à savoir la bio-photolyse, la fermentation sombre et la photo-fermentation. La seconde voie regroupe quatre techniques qui sont la pyrolyse, la gazéification, la combustion et la liquéfaction [26]. De la Figure I-13 il est possible de voir que de très nombreuses techniques sont aujourd'hui disponibles. Cependant certaines sont plus matures et onéreuses que d'autres : aujourd'hui, les plus utilisées (> 78%) sont le vaporeformage d'hydrocarbures (gaz naturel) et la gazéification du charbon. Cette partie présentera donc en détail ces deux techniques ainsi que la plus répandue des techniques renouvelables *i.e.* l'électrolyse de l'eau. Afin de passer en revue l'entièreté des sources d'hydrogène présentées

par l'IEA, il sera également rapidement présenté le vapocraquage d'hydrocarbures, actuellement responsable d'une grande partie de la production d'hydrogène [25].

I.2.1.1. Le vaporeformage de gaz naturel

Le vaporeformage de gaz naturel consiste à décomposer le gaz naturel (majoritairement du méthane (CH_4) en dioxyde de carbone (CO_2) et dihydrogène (H_2). La Figure I-14 présente les étapes principales de cette technique.

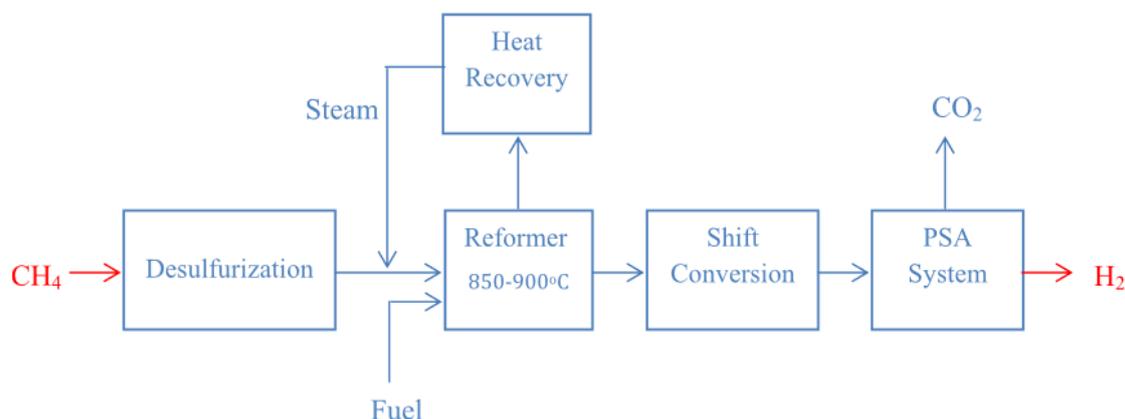
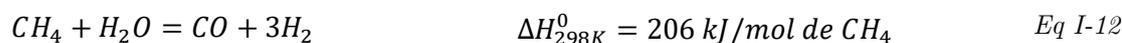
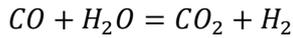


Figure I-14 : Schéma block des étapes de vaporeformage de méthane [26]

Dans les charges en entrée du système de reformage se trouvent des composés soufrés qui peuvent conduire à un empoisonnement du catalyseur au sein du reformeur. Afin de les supprimer, la première étape de désulfuration est nécessaire, comme présenté Figure I-14 [26], [27]. Cette purification est réalisée par la combinaison irréversible du sulfure d'hydrogène et de l'oxyde de zinc. Initialement, les composés soufrés peuvent avoir plusieurs formes : du sulfure d'hydrogène (H_2S), des mercaptans (R-HS) et du sulfure de carbone (COS). Une première étape d'hydrogénation catalytique est nécessaire pour transformer les composés soufrés en sulfure de dihydrogène [27]. Après purification, le gaz naturel est envoyé dans le reformeur où l'étape principale se déroule. Dans le reformeur, on retrouve la charge (gaz naturel) combinée à de la vapeur d'eau chaude sous pression. Le gaz en sortie du reformeur se situe aux alentours de $800\text{-}950\text{ }^\circ\text{C}$ bien que le procédé soit activé autour de $700\text{-}800\text{ }^\circ\text{C}$ sous une pression allant de 3 atm à 28 atm suivant le type de reformeur [28], [29]. L'équation du reformage du méthane est présentée Eq I-12 [28]:



Cette réaction est réalisée avec un catalyseur à base de nickel [25]. Lors du reformage, une forte quantité d'énergie thermique ($63,3 \text{ kJ/mol d'H}_2$) est nécessaire pour activer la réaction [26]. Cette dernière est fournie par combustion de gaz naturel qui représente 30-35% de la consommation totale en gaz du procédé [30]. A noter qu'une récupération de chaleur permet de chauffer la charge en entrée aux alentours de $450\text{-}650\text{ }^\circ\text{C}$ [28]. Enfin, afin d'éviter la formation de coke dans le four de reformage, le ratio entre la vapeur et le carbone dans le réacteur doit être supérieur à trois, une valeur plus faible entraînant la diminution de l'efficacité du procédé ainsi que la qualité du gaz fourni [29], [31]. Une fois le reformage réalisé, suit une conversion du monoxyde de carbone par *water gas shift* (WGS). Cette réaction est décrite par l'Eq I-13 et augmente considérablement la quantité de dihydrogène produite [32].



$$\Delta H_{298K}^0 = -41 \text{ kJ/mol de CO}$$

Eq I-13

L'étape finale est la purification par adsorption pressurisée (PSA) afin d'atteindre de très hauts niveaux de pureté de 98-99,999 mol% d' H_2 avec des gaz en entrée à faibles températures ($\approx 20-40^\circ C$). A noter que la composition initiale du gaz est 70-80% d' H_2 , 15-25% de CO_2 , 3-6% de CH_4 , 1-3% de CO et des traces de N_2 [33]. Concrètement, le flux de gaz pressurisé en entrée traverse un adsorbent sur lequel les impuretés sont adsorbées ; une partie du gaz est retirée directement et constitue le premier flux de dihydrogène pur. Cette étape est arrêtée avant que l'adsorbent ne soit saturé par le gaz d'entrée. Ensuite, l'adsorbent est descendu à une pression inférieure en envoyant une partie du gaz propre vers un autre adsorbent voisin. Cette étape est répétée deux fois supplémentaires. L'adsorbent est ensuite dépressurisé au maximum à contre-courant, les gaz en sortie étant des gaz d'échappement contenant une partie des impuretés désorbées. Une purge vient ensuite grâce à un flux de dihydrogène provenant d'un adsorbent voisin. C'est là que les impuretés restantes sont désorbées et extraites via une voie d'échappement. Ensuite, l'adsorbent est remonté en pression jusqu'à celle du premier remplissage grâce à un adsorbent voisin. Une fois remonté en pression, l'adsorbent est prêt pour un nouveau cycle [33].

Ces quatre étapes représentent les étapes clés de la production d'hydrogène via le vaporeformage de méthane. Au total, ce procédé nécessite 50,9 kWh/kg H_2 [34]. La capacité de production d'une unité de production d'hydrogène est d'environ 20000 kg/h avec un rendement de conversion de 74 à 85% [26], [27].

I.2.1.2. La gazéification de charbon

La gazéification du charbon ou oxydation partielle du charbon consiste à oxyder du charbon en présence d'eau et de dioxygène (O_2). La Figure I-15 présente les étapes principales de la gazéification du charbon. Il est possible d'identifier des unités similaires au vaporeformage de méthane : la désulfuration, la conversion de CO (WGS) et la purification (PSA). Comme ces techniques ont été présentées précédemment (sous-partie I.2.1.1), elles ne seront pas représentées ici. On remarque aussi la présence d'un reformeur et d'un système de séparation d'air [26]. Dans ces systèmes, le charbon est introduit dans le réacteur avec de l'oxygène à haute température et/ou de la vapeur [32].

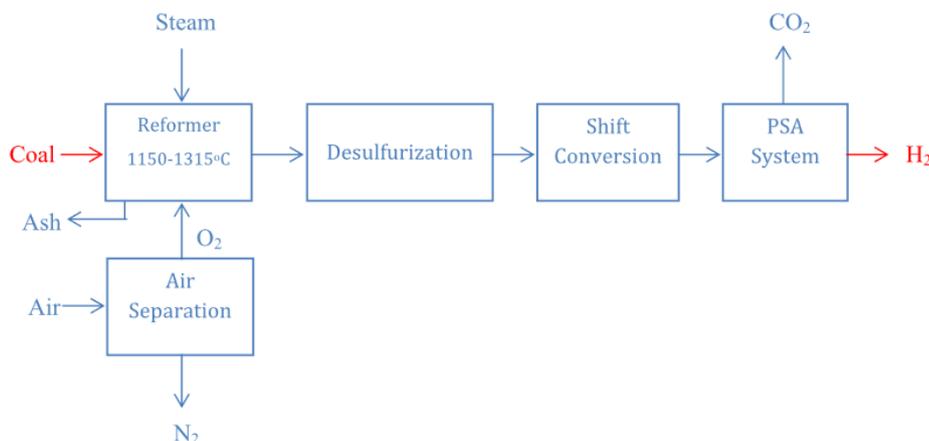
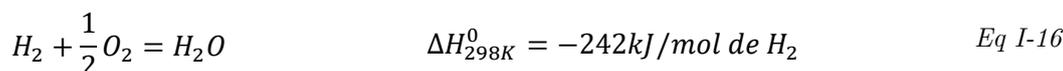
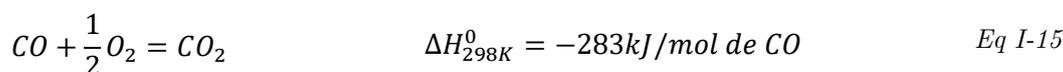
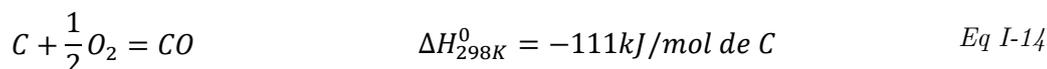


Figure I-15 : Diagramme block des étapes principales de gazéification de charbon [26]

Concrètement, l'oxygène et la vapeur présentes dans le réacteur oxydent le charbon, conduisant à un mix de gaz contenant de la vapeur d'eau (H_2O), du monoxyde carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO_2) et du dihydrogène. Il est également possible de retrouver des composés indésirables tels que du goudron, des phénols ou des cendres, par exemple [32]. La gazéification du charbon est un procédé complexe qui est réalisé à des températures très élevées allant de $1250\text{ }^\circ\text{C}$ à $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Il se déroule selon plusieurs réactions chimiques dont les principales sont présentées Eq I-14, Eq I-15, Eq I-16 et Eq I-17 [32], [35]. L'efficacité thermique de ce procédé varie entre 60 et 75% lorsque le calcul est basé sur la valeur du pouvoir calorifique supérieur (PCS) [36]. Par ailleurs, le rendement de transformation du charbon en gaz varie entre 80% et plus de 95% en fonction du type de réacteur (mobile, fluidisé et entraîné) [37]. Au niveau de la production, la plus grosse unité de transformation coal-to-hydrogen en Mongolie produit 20455 kg/h d'hydrogène [38].



I.2.1.3. Vapocraquage d'hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés chimiques issus du raffinage du pétrole. Ces bruts pétrochimiques sont composés uniquement d'atome de carbone et d'hydrogène, ils sont de la forme C_nH_m . Une fois extraits, les bruts pétrochimiques sont fractionnés, conduisant à du gaz naturel et des fractions pétrolières principalement constituées d'hydrocarbures saturés, de paraffines et de naphthalènes. Ces composés possèdent de faibles réactivités chimiques et ne permettent pas une grande diversité de production de composés chimiques [39]. C'est par vapocraquage que ces produits sont transformés en hydrocarbures insaturés, qui offrent de nombreuses possibilités réactionnelles et sont donc très utilisés dans la synthèse organique [39].

Les hydrocarbures sont composés de liaison C-C ou C-H qui peuvent être rompues à une certaine température. Par exemple, l'heptane (C_7H_{16}) peut fournir un alcane saturé et une oléfine (C_3H_8 et C_4H_8 respectivement) lorsqu'une réaction de craquage se produit (rupture C-C) ou une oléfine et de l'hydrogène (C_7H_{16} et H_2 respectivement) lorsqu'une réaction de déshydrogénation se produit (rupture C-H). Cependant, généralement, les réactions de craquage sont majoritaires étant donné que l'énergie de la liaison C-C est bien plus faible que celle de la liaison C-H : 345 kJ/mol contre 413 kJ/mol respectivement [39]. La pyrolyse ayant pour objectif la formation d'oléfine, la vapeur d'eau est utile à plusieurs niveaux. Dans un premier temps, elle permet de diminuer les pressions partielles d'hydrocarbures, résultant en une amélioration de la sélectivité de la pyrolyse en faveur des oléfines légères recherchées. Ensuite la vapeur apporte de l'énergie thermique au réacteur et permet aussi de diminuer la formation de coke [39].

Les charges en entrée des pyrolyses sont nombreuses et vont des hydrocarbures saturés légers jusqu'aux fractions pétrolières plus ou moins lourdes en fonction des zones géographiques. Par exemple aux Etats-Unis, les hydrocarbures légers sont très utilisés suite à leur disponibilité sur le territoire alors qu'en Europe ce sont les coupes pétrolières d'hydrocarbures lourds [39]. Le Tableau I-2 présente les produits obtenus lors de vapocraquage de différentes charges traitées à de très hautes sévérités¹ et avec un recyclage de l'éthane [39]. On remarque que, dans tous les cas, on retrouve une production d'hydrogène allant de 8,8 % à 0,8 % en volume pour, globalement, une production via ces techniques qui représentent 21% de la production mondiale d'hydrogène [25].

Tableau I-2 : Influence de la nature de la charge sur les rendements (% masse) du vapocraquage [39]

Produits obtenus	Charges					
	Éthane	Propane	Butane	Naphta moyen	Gazole atmosphérique	Gazole sous vide
H ₂ à 95 % (vol.)	8,8	2,3	1,6	1,5	0,9	0,8
CH ₄	6,3	27,5	22,0	17,2	11,2	8,8
C ₂ H ₄	77,8	42,0	40,0	33,6	26,0	20,5
C ₃ H ₆	2,8	16,8	17,3	15,6	16,1	14,0
C ₄ H ₆	1,9	3,0	3,5	4,5	4,5	5,3
Autres C ₄	0,7	1,3	6,8	4,2	4,8	6,3
Essence	1,7	6,6	7,1	18,7	18,4	19,3
Benzène C ₆ H ₆	0,9	2,5	3,0	6,7	6,0	3,7
Toluène C ₇ H ₈	0,1	0,5	0,8	3,4	2,9	2,9
C ₈ aromatiques	....	....	0,4	1,8	2,2	1,9
C ₈ non aromatiques	0,7	3,6	2,9	6,8	7,3	10,8
Fuel ¹	....	0,5	1,7	4,7	18,1	25,0

¹Ici, terme général pour désigner un mélange d'hydrocarbure

I.2.1.4. Electrolyse de l'eau

Comme expliqué précédemment, l'électrolyse de l'eau représente une part très faible de la production d'hydrogène (0,03% en 2020). Parmi ces 0,03% plus de 40% sont produits en Europe [25]. Il est prévu qu'en 2050 la part de la production réalisée par électrolyse représente 50%-

¹ Sévérité : Taux de gazéification de la charge, pour plus de détail se référer à [39].

60% en fonction des scénarios [25]. Aujourd'hui, trois technologies sont utilisées pour réaliser l'électrolyse [26], [36], [40] :

- L'électrolyse alcaline
- L'électrolyse à membrane (Proton exchange membrane (PEM))
- L'électrolyse à oxide solide (Solid oxide electrolysis cells (SOEC))

Globalement, comme le montre la Figure I-16, les technologies d'électrolyse sont composées d'un système de déionisation d'eau, d'une source électrique, d'un électrolyseur, et de séparateurs de gaz (H_2/H_2O ou O_2/H_2O). Ces technologies présentent de bons rendements (environ 60% à 70%) mais sont fortement énergivores : 53,4 – 70,1 kWh/kg H_2 produit au total [24], [41]. La technologie la plus répandue est celle alcaline et représente une capacité de production de 380000 kg H_2 /an, soit 4228000 m³/an [26].

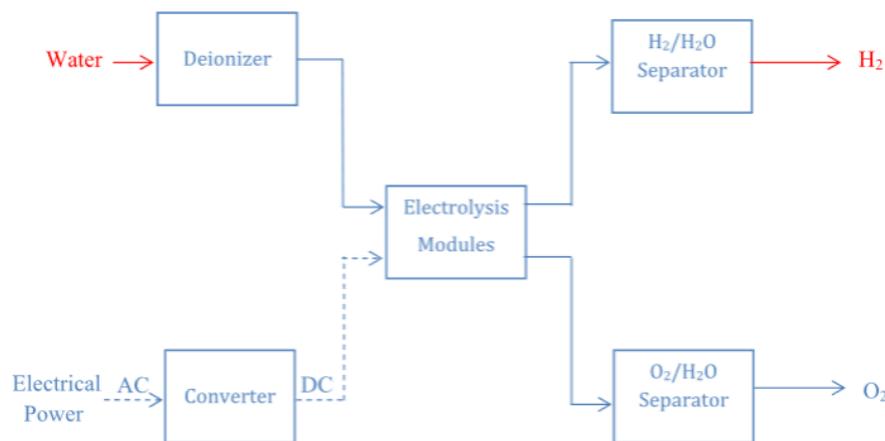


Figure I-16 : Schéma-bloc des composants principaux d'un électrolyseur pour la production d'hydrogène [26]

Cette partie aura pour but de présenter les principes de chacune des technologies d'électrolyse : l'alcaline, la PEM et la SOEC.

I.2.1.4.1. L'électrolyse alcaline

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue des trois. Typiquement, dans cette technologie, la cathode peut être en acier, en acier inoxydable, en acier avec une couche de nickel ou en nickel. Pour l'anode, les matériaux classiques sont l'oxyde de nickel, la spinelle de nickel et le cobalt supporté sur titane [42]. Pour ce qui est de l'électrolyte, il s'agit en général d'une solution aqueuse contenant à hauteur de 25-30 %_{massique} d'hydroxyde de potassium (KOH) afin d'améliorer la conductivité électrique. Il est également possible de retrouver de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou du chlorure de sodium (NaCl) [36], [40], [42]. Lors de la réaction, l'électrolyte fonctionne typiquement à de fortes densités de courant de 100 à 300 mA/cm². Ce dernier n'est pas consommé durant le fonctionnement mais sa quantité diminue avec le temps en raison d'autres pertes, et doit être réapprovisionné régulièrement [36], [40]. Pratiquement, les deux électrodes sont plongées dans l'électrolyte et séparées par une membrane ou un diaphragme. Un courant direct est appliqué, ce qui va entraîner un mouvement d'électrons du pôle négatif du générateur vers la cathode. Donc, les cations

hydrogène (H^+) se dirigent vers la cathode et les anions hydroxyde (OH^-) vers l'anode. Une fois les cations hydrogène à la cathode, ils y sont réduits, s'y recombinent pour former du dihydrogène [42]. Les réactions qui gouvernent la décomposition de l'eau sont présentées Eq I-18, Eq I-19 et Eq I-20 [26], [43].



I.2.1.4.2. L'électrolyse à membrane à échange de proton (Proton Exchange Membrane : PEM)

La seconde technologie utilisée est l'électrolyse à membrane à échange de protons. L'électrolyseur est composé de deux électrodes et d'une membrane. Pour le fonctionnement, il est nécessaire d'utiliser de l'eau déionisée de haute pureté et d'une résistivité minimum de $1 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ [36], [40]. Dans un premier temps, de l'eau déionisée est introduite du côté de l'anode et le courant appliqué produit des cations hydrogène (H^+) et du dioxygène. Ensuite, les protons traversent la membrane sous l'effet du champ électrique tout en laissant le dioxygène du côté de l'anode qui est évacué à pression atmosphérique. Le dihydrogène est formé à la cathode grâce aux électrons fournis par la source de courant [36], [40]. Pour que cette réaction se produise, il est nécessaire d'avoir une haute densité de courant ($> 1600 \text{ mA}/\text{cm}^2$). Plus cette dernière est grande, plus le rendement global décroît mais plus la quantité d'hydrogène produit augmente [40]. Les avantages de cette technologie sont i) qu'une grande différence de pression est maintenue entre l'anode et la cathode, les hautes pressions d'oxygène étant ainsi évitées, et ii) l'utilisation de produits dangereux tels que l'hydroxyde de potassium est évitée [40]. Les équations qui régissent l'électrolyse sont présentées Eq I-21, Eq I-22 et Eq I-23 [26], [36], [43].



I.2.1.4.3. L'électrolyse à cellule d'oxide solide (Solid oxide electrolysis cell : SOEC)

La dernière technologie est l'électrolyse à cellule d'oxide solide, qui a la particularité d'avoir un électrolyte solide avec les électrodes de part et d'autre de ce dernier. Pratiquement, de la vapeur est introduite au niveau de la cathode poreuse et se diffuse jusqu'à l'interface électrolyte/cathode. Puis un courant est appliqué : à ce moment, l'eau est dissociée en dihydrogène et anions oxygène. Les anions traversent l'électrolyte vers l'anode, où ils sont oxydés en dioxygène et diffusent à travers l'anode poreuse [44]. Dans cette technologie, les électrodes sont généralement référées comme étant des électrodes à hydrogène (hydrogen electrode) ou électrodes à oxygène (oxygen electrode) en fonction du gaz produit sur celles-ci [45]. Pour que la cellule fonctionne correctement il est important que l'électrolyte soit

chimiquement stable tout en ayant une bonne conduction ionique et électronique. Il doit également être étanche au gaz pour éviter la recombinaison de l'hydrogène avec l'oxygène et doit être assez fin pour éviter les surpotentiels ohmiques. Les électrodes, quant à elles, doivent être chimiquement stables dans l'environnement réducteur ou oxydant, poreuses, et avoir une bonne conductivité électronique. Finalement, les coefficients de dilatation thermique doivent être proches afin d'éviter les dommages liés aux mouvements mécaniques [44]. Le meilleur matériau qui compose l'électrolyte est la zircone (ZrO_2) stabilisée à l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) généralement identifié par YSZ, notamment dopé à 8 mol% d'oxyde d'yttrium. On retrouve aussi de l'oxyde de cérium (CeO_2) dopé au gadolinium (CGO ou GDC). Pour ce qui est de l'électrode à hydrogène, des céramiques métalliques composées du matériau de l'électrolyte (YSZ) et un métal comme du nickel e.g. (YSZ-Ni ou Ni-CGO) sont maintenant utilisées. Finalement, pour l'électrode à air des pérovskites à base de $(La,Sr)(Co,Fe)O_3$ et de $La_{0,8}Sr_{0,2}MnO_{3,5}$ respectivement appelées LSCF et LSM sont utilisées pour leurs bonnes performances électro-catalytiques [45].

Cette technologie conclue la présentation des méthodes actuelles de production d'hydrogène. Nous avons vu que la plus répandue est le vaporeformage de méthane qui représente 59% de la production mondiale, suivi par la gazéification de charbon avec 19% de la production, enfin 21% de la production est obtenue en sous-produits du craquage de d'hydrocarbures. Cependant, les technologies de production par vaporeformage et gazéification émettent de grande quantité de gaz à effet serre : 11,7 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ et 20 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ respectivement [25]. Comme expliqué précédemment, une fois produit, l'hydrogène est utilisé dans plusieurs secteurs dont la réduction directe de minerai de fer [25]. Il est donc nécessaire de décarboner la production d'hydrogène afin d'améliorer l'impact de la réduction de fer par l'hydrogène. Une des voie présentées pour ce faire est l'électrolyse : en France cette technique permet de faire chuter les émissions à 2,77 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ bien que, lorsqu'un mix énergétique plus carboné est utilisé, cette technologie reste aussi émettrice que les fossiles (19,8 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ quand le mix européen est utilisé) [46]. Il faut garder en tête que l'électrolyse consomme de grandes quantités d'électricité (53,4 – 70,1 kWh/kgH_2 [24]) donc que le pays dans laquelle elle est réalisé doit avoir un mix faiblement carboné pour que ce soit intéressant.

Comme dit précédemment, la réduction de minerai de fer est une des applications de l'hydrogène. Cette réaction est connue et utilisée dans l'industrie. La réaction de réduction sera présentée en détail dans la partie suivante en passant par les aspects thermodynamiques, le mécanisme de réduction et les paramètres influant sur la cinétique de réaction.

I.2.2. Aspects thermodynamiques

La réduction de minerai de fer sous hydrogène est connue et a été étudiée de nombreuses fois. Dans un premier temps, le principe est de réduire de l'oxyde fer en fer pur grâce à l'hydrogène ce qui forme de l'eau. L'équation générale de cette réaction est présentée Eq I-24 [19].



La réaction globale est donc relativement endothermique et d'un point de vue industriel, pour transformer 1 tonne de minerai de fer en environ 700 kg de fer, il est théoriquement nécessaire de fournir 420 Nm³ d'hydrogène soit environ 38 kg d'H₂².

La Figure I-17 présente le diagramme de phase du système fer-oxygène en faisant correspondre température et pourcentage d'oxygène à chaque phase existante. On remarque la présence d'hématite (Fe₂O₃), de magnétite (Fe₃O₄) et de wüstite (Fe_(1-y)O) qui se succèdent avec la diminution du taux d'oxygène. De plus, on remarque que pour des taux d'oxygène inférieur à 27,6% et une température inférieure à environ 570°C, il n'y a pas de formation de wüstite [47]. Ces données nous montrent que le schéma réactionnel de la réduction dépend de la température et que plusieurs réactions se succèdent pour arriver à la réduction complète [14], [19], [47]. Les équations Eq I-25 et Eq I-26 présentent la réduction pour une température inférieure à 570 °C et les équations Eq I-27, Eq I-28 et Eq I-29 pour une température supérieure à 570 °C.

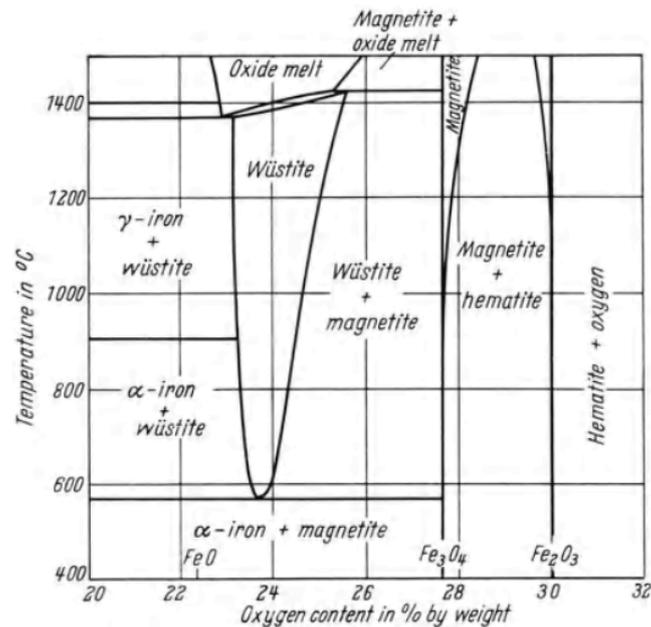
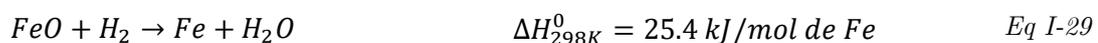


Figure I-17 : Diagramme de phase du système Fer-Oxygène pour des températures de 400 °C à plus de 1400 °C et des contenus d'oxygène de 20% à 32% [47].

Température inférieure à 570 °C [19], [47] :



Température supérieure à 570 °C [19], [47] :



² 1 kg d'H₂ = 11 Nm³

Pour cette réaction, l'énergie libre de Gibbs est décrite Eq I-30. Cette expression montre que ces réactions sont influencées par la température et par les pressions partielles d'eau et d'hydrogène. Donc la réaction peut ne pas se produire si la teneur en eau est trop grande devant la proportion d'hydrogène.

$$\Delta G_{(n)}(T) = \Delta G_{(n)}^{\circ}(T) + RT \ln\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}}\right) \quad \text{Eq I-30}$$

Ensuite, la Figure I-18 présente le diagramme de Chaudron de la réduction de minerai de fer sous hydrogène [47]. Les lignes continues représentent l'équilibre de deux phases solides. Par exemple, la ligne horizontale aux alentours de 900°C correspond au passage du α -Fe au γ -Fe. Autre exemple : pour 40% d'eau dans le mélange gazeux et à 1000°C on passe de γ -Fe à de la wuestite de type $Fe_{0.94}O$. Ce diagramme nous montre qu'avec une augmentation de la température, la formation de fer peut se faire même avec de fortes proportions d'eau dans l'atmosphère de la réaction (jusqu'à 40% à plus de 1000°C). En outre, si la proportion d'eau est trop élevée, même à de très hautes températures, la réduction complète du fer ne sera pas possible. Par ailleurs, à de basses températures, la proportion d'eau maximale est plus faible. Par exemple, si l'on se place à moins de 570°C donc dans le cas où la transformation en wuestite est évitée, le taux d'eau maximal est d'environ 20%.

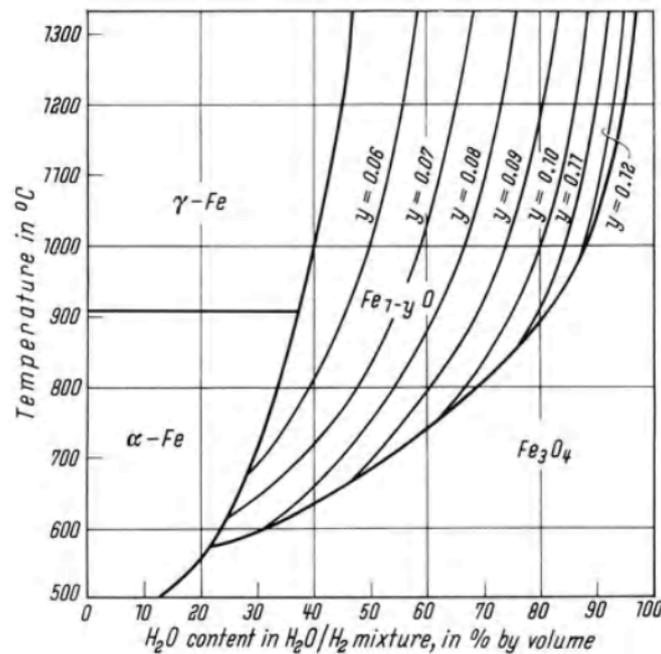


Figure I-18 : Diagramme de Chaudron de la réduction de minerai de fer sous hydrogène [47].

Maintenant que les aspects principaux de la thermodynamique de la réduction ont été expliqués, les aspects physico-chimiques de la réduction sous hydrogène vont être développés.

I.2.3. Mécanisme de réaction

L'objectif de cette partie est de montrer comment la réaction se déroule pour pouvoir l'appliquer au solaire à concentration et identifier les paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour avoir la réaction la plus adaptée à notre cas. Le mécanisme de réduction sera

présenté en trois parties. D'abord, les spécificités de la réaction entre le gaz et le solide seront expliquées d'abord au niveau macroscopique ensuite au niveau microscopique, ensuite la germination du fer d'un point de vue structurale sera présentée.

I.2.3.1. Réaction gaz-solide

I.2.3.1.1. Aspects macroscopiques

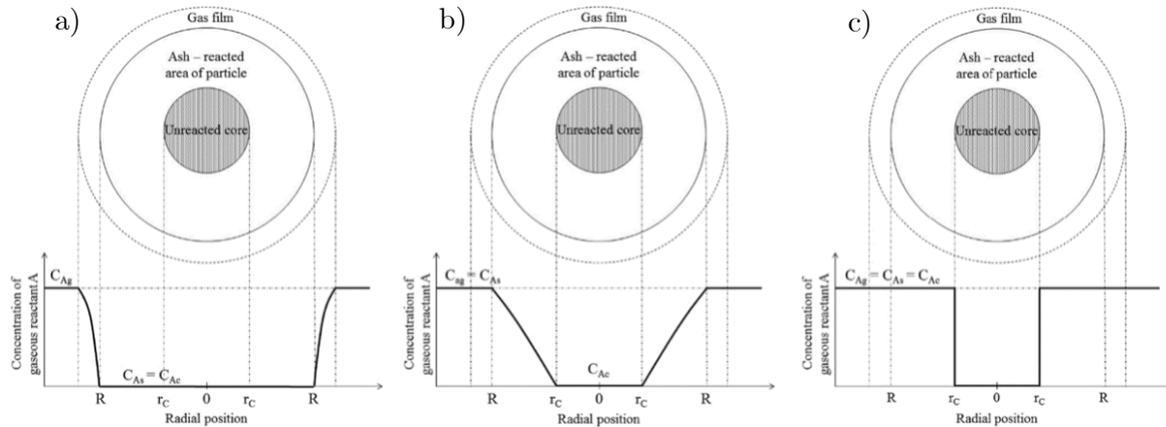


Figure I-19 : Représentation de l'évolution radiale de la concentration en gaz réducteur selon différents phénomènes limitants dans le modèle du cœur rétrécissant : a) transfert du gaz réducteur dans le film de gaz, b) diffusion du gaz réducteur dans la partie de la particule transformée, c) réaction chimique. C_{Ag} : concentration de gaz dans l'atmosphère, C_{As} : concentration de gaz dans la particule, C_{Ae} : concentration à l'équilibre, R : rayon de la particule, r_c : rayon du cœur non réagit. Adapté de [48] par [49].

Dans un premier temps, il est important de noter que les pellets seront considérés ci-après comme des sphères. En réalité, les pellets ont des formes variées bien que très majoritairement sphéroïdales. De plus, la réduction du minerai de fer sous hydrogène constitue une réaction où la particule ne change pas de taille durant la réaction [48]. Dans ce cas, généralement, deux modèles sont utilisés : le modèle de conversion progressive (PCM pour *progressive-conversion model*) et le modèle du cœur rétrécissant (SCM pour *shrinking-core model*) [48]. Dans le PCM, le gaz diffuse dans la particule et réagit à tout temps de la réaction. La cinétique peut être différente à certains endroits, mais la particule est convertie continuellement. Dans le SCM, la réaction commence sur la surface extérieure de la particule puis progresse vers le centre, laissant une couche de matière transformée appelée *ash* en anglais. Le diamètre du cœur qui n'a pas encore réagi rétrécit avec l'avancement [48]. Généralement, étant donné que la couche de fer est dense, la diffusion homogène dans le minerai n'est pas possible. De plus, comme le gaz réducteur est fortement en contact avec le minerai, la réduction débute par la surface extérieure. Logiquement, c'est donc le modèle du cœur rétrécissant qui est privilégié pour décrire la réduction du minerai de fer [49], [50].

Dans ce modèle, plusieurs phénomènes peuvent être limitants selon les conditions : la diffusion du gaz de l'atmosphère vers la surface réactionnelle, la diffusion du gaz dans la partie transformée de la particule et la réaction chimique à la surface du cœur [48]. Des représentations graphiques sont présentées Figure I-19 et montrent l'évolution de la concentration de l'espèce gazeuse dans la particule en fonction de la position radiale. Dans le premier cas, la transformation est limitée par la diffusion du gaz vers la surface réactionnelle. Ce phénomène est limitant lorsque la température est élevée : la réaction chimique se produit rapidement et

peut être décrit par les lois de diffusion de Fick, s'appliquant au gaz réducteur. Il est possible de remarquer sur la Figure I-19-a que la concentration du gaz est nulle dans la particule elle-même [49]. Dans le second cas, Figure I-19-b, c'est la diffusion dans les pores de la partie réduite qui est limitante. Il est possible de différencier deux types de pores : ceux présents au début de la réaction et ceux formés pendant. Le gaz réducteur a une concentration égale à celle du film de gaz et/ou de l'atmosphère, qui diminue lorsqu'on s'approche du cœur, jusqu'à devenir nulle au niveau de l'interface de réaction. Finalement, Figure I-19-c, c'est la réaction chimique qui est limitante. On peut voir que la concentration de gaz dans la particule est la même et tombe à la valeur de l'équilibre réactionnel lorsqu'on arrive au niveau du cœur [48], [49].

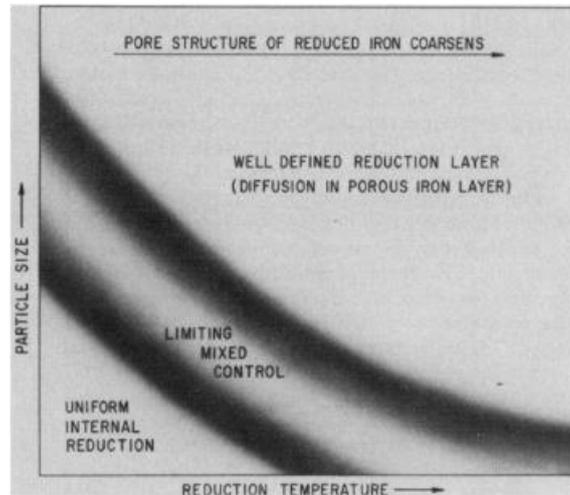


Figure I-20 : Différents régimes de contrôle de la réduction en fonction de la taille de la particule et de la température de la réduction [51].

Plus spécifiquement, Turkdogan, Vinters et Olsson ont étudié en profondeur les phénomènes limitants dans la réduction du minerai de fer sous hydrogène [51], [52], [53]. Ils ont déterminé trois processus contrôlant la réduction et pouvant être simultanés :

- Réduction interne uniforme : A lieu lorsque de petites particules poreuses sont réduites à basse température et que la diffusion n'entrave donc pas la réduction. Dans ce cas, le temps de réaction est indépendant du rayon de la particule.
- Régime de contrôle mixte : Ce régime est valable au début de la réduction pour des pellets plus gros et à une température élevée. Dans les premiers instants de la réaction, une fine couche de fer se forme dans laquelle la diffusion est toujours rapide. Grâce à la bonne diffusion de l'hydrogène dans la couche de fer, la réaction se fait avec le réactif le plus proche du front de réaction. Donc, la porosité de cette phase et la réaction chimique sont limitantes dans cette configuration : le temps de réaction est proportionnel au rayon de la sphère. Il est important de noter que, dans certains cas, ce régime peut entraîner des inclusions réduites plus profondes que le front de réduction de la wuestite en fer.

- Diffusion dans le fer formé : Lorsque la couche de fer s'épaissit et que la réduction progresse, c'est la diffusion dans les pores du fer qui est limitante. Le temps de réaction est dans ce cas proportionnel au carré du rayon du pellet.

Ces différents régimes limitants sont présentés Figure I-20 en fonction de la taille de la particule et de la température. On remarque que, comme expliqué, le régime de réduction interne correspond à des températures et à des tailles de particules faibles, le régime de diffusion dans le fer formé correspond à des particules plus grosses et à de plus hautes températures, le régime de contrôle mixte étant à la transition entre les deux précédents. On peut aussi noter que le régime de contrôle mixte est valable pour de petites particules à haute température et pour des particules relativement grosses à faible température [51].

I.2.3.1.2. Aspects microscopiques

D'un point de vue microscopique et de manière simplifiée, la réduction d'un grain d'oxyde fer se réalise via sept étapes physico-chimique appelées la séquence de réaction. La Figure I-21 présente schématiquement cette séquence [47]. Dans un premier temps, l'hydrogène est transféré du flux de gaz vers la surface du minerai (1). Ensuite le gaz diffuse dans les macropores (2) puis dans les micropores (3) de l'échantillon jusqu'au site actif où la réaction chimique se produit (4). Ensuite, la vapeur diffuse vers l'extérieur par les micropores (5) puis par les macropores (6) avant d'être transférée vers le flux de gaz (7) [47]. Chacune des étapes de cette séquence seront détaillées ci-après.

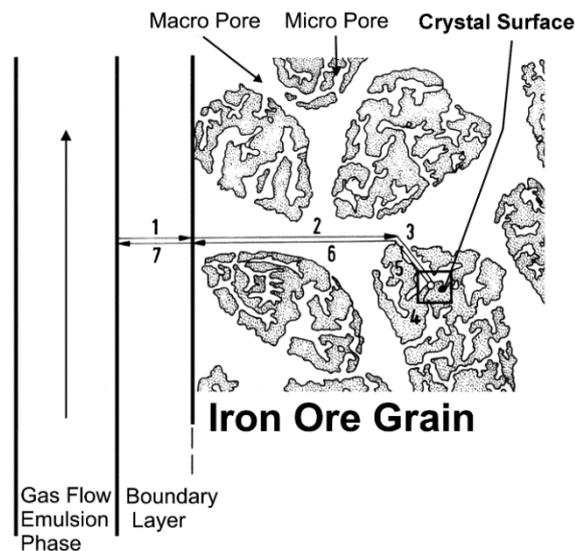


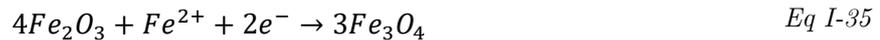
Figure I-21 : Étape physico-chimique de la réduction de minerai de grain de fer sous hydrogène : (1)- Transfert de matière (H_2) jusqu'à la surface, (2),(3)- Diffusion de l'hydrogène dans les macro- et micro-pores respectivement, (4)- Réaction à l'interface gaz-solide (réduction) (5),(6)- Diffusion de la vapeur dans les micro et macro pores et (7)- Transfert de la vapeur vers le flux de gaz [47].

Étapes 1 et 7 : En général, lorsque qu'une couche de fer solide est produite, la diffusion dans celle-ci est plus lente que le transfert de masse de l'hydrogène vers la surface de l'oxyde. Donc, la résistance de cette étape peut être négligée [48].

Étapes 2, 3, 5 et 6 : Ici, il s'agit du trajet des molécules de dihydrogène et d'eau dans les macro- et micro-pores de l'oxyde. Dans les macro-pores, la diffusion dépend surtout des pressions partielles ou des concentrations des deux gaz puisque le diamètre des pores est grand devant la taille des molécules gazeuses. Le fait que les pores soient grands implique également que les

molécules de gaz oxydants et réducteurs ne rentrent pas en collision avec leurs parois. De plus, le coefficient de diffusion est fonction du volume des pores ainsi que de leur tortuosité [47]. Lorsque les pores sont plus petits (rayon du pore inférieur au libre parcours moyen), c'est la diffusion de Knudsen qui prévaut sur la diffusion classique : dans ce cas, la collision des molécules avec les bords des pores n'est plus négligeable. La différence entre les deux cas de figure est aussi que le coefficient de Knudsen ne dépend pas de la pression totale et de la section efficace des molécules. En revanche d'autres facteurs liés aux pores et à leur distribution sont pris en compte [47].

Etape 4 : La réaction qui se produit au niveau des sites actifs combine l'adsorption de l'hydrogène, le transport à l'état solide des ions et des électrons, la formation de H_2O et la désorption de cette dernière. Elle est présentée Figure I-22 et Figure I-23 dans le cas de la réduction de magnétite et de wuestite. Pratiquement, si les conditions sont réunies (énergie d'activation, quantité d'hydrogène suffisante etc.), l'hydrogène en contact avec la surface est adsorbé sur deux sites interstitiels vacants ($2Va^+$) (liaison avec des atomes de surface composant le minerai) selon Eq I-31. Son interaction avec l'oxygène en surface permet de former l'eau et de libérer deux électrons selon Eq I-32 et Eq I-33 [54]. Ces électrons permettent la réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} (Eq I-34) et permettent la production de magnétite selon Eq I-35 [55], [56]. De plus, un gradient de potentiel chimique est créé entre la surface extérieure de magnétite et le front hématite-magnétite, ce qui entraîne une migration des électrons et des ions Fe^{2+} vers l'hématite, produisant de la magnétite supplémentaire. Le même processus est à l'origine de la transformation de la magnétite vers la wuestite via Eq I-36 [55], [56]. Lors de la réduction de la wuestite vers le fer, le processus est différent. En effet, une fois qu'une couche de fer est formée, la réaction est possible grâce au gradient d'activité de l'oxygène qui va entraîner la migration des atomes d'oxygène depuis l'interface Fe/FeO, où l'équilibre $FeO \leftrightarrow Fe + O$ prévaut, vers la surface où la vapeur sera formée. Ceci est dû au fait que la couche de fer qui se forme sur la wuestite ne possède pas d'oxygène en surface et que le gaz réducteur ne peut donc pas réagir directement avec ce dernier [56]. Il est important de noter que l'adsorption de l'hydrogène et les étapes de réduction sont des procédés successifs quasiment impossibles à dissocier dans le déroulement de la réaction [47].



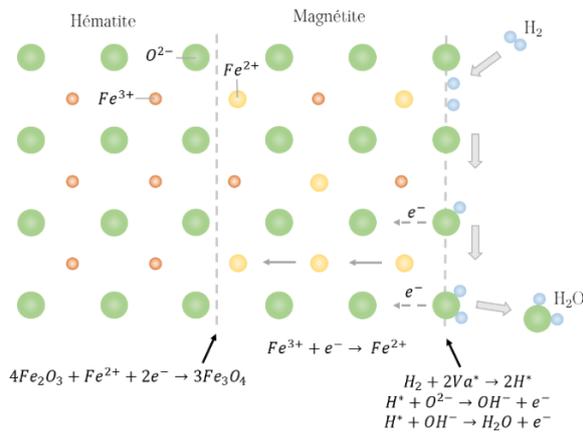


Figure I-22 : Schéma de principe de la transformation d'hématite en magnétite [55].

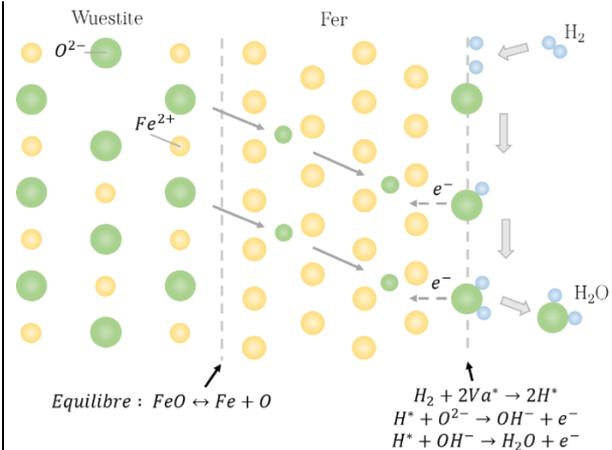


Figure I-23 : Schéma de principe de la transformation de wuestite en fer [56].

Au niveau cinétique, en raison du faible coefficient de diffusion de l'oxygène dans le fer (*e.g.* à 700°C : $2.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le $\alpha\text{-Fe}$) l'étape de transformation de la wuestite est plus lente que les deux étapes précédentes[47], [56]. Ici, la wuestite est écrite FeO mais il est important de rappeler que la wuestite est une phase non stoechiométrique qui peut, suivant les conditions (Figure I-18), avoir plus ou moins de lacunes d'atome de fer dans les mailles. Himmel *et al.* ont étudié la diffusion du fer dans la wuestite et ont montré que, plus le nombre de lacunes de cations est important, plus le coefficient de diffusion des cations de fer est élevé. Cette propriété peut aussi engendrer la diffusion d'oxygène dans le fer et donc améliorer la vitesse de réduction [56], [57]. Le déplacement des cations est réalisé comme montré par la Figure I-24 [47].

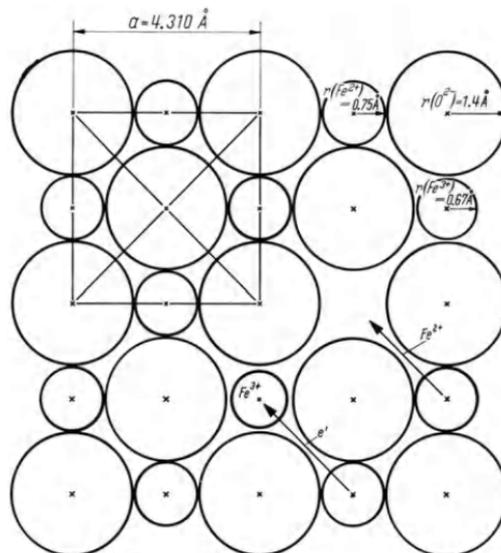


Figure I-24 : Représentation d'un plan 001 de Wuestite avec une lacune d'ions ferreux avec mouvement d'ions [47].

Maintenant que les mécanismes de réduction ont été présentés, des précisions sont apportées sur la nucléation du fer sur la surface de wuestite dans la sous-partie suivante.

I.2.3.1.3. La nucléation du fer

La transformation de la wuestite en fer passe d'abord par un état ionique. En effet, le fait de retirer un oxygène de la matrice de wuestite produit un cation de fer divalent, comme expliqué par Hayashi et Iguchi [58]. Avec l'avancement de la réaction, la concentration en cations va éventuellement dépasser l'équilibre FeO/Fe et va atteindre une super-saturation critique. Finalement, cette saturation entraîne la formation d'un nucléus de fer sur un défaut ou une impureté avec l'énergie de surface la plus élevée [58]. Ensuite, une fois que les premiers nuclei de fer sont formés et grandissent, les cations diffusent vers l'interface oxyde/fer pour créer une sur-saturation et, ainsi, continuer la progression de la métallisation. Dans le cas de la wuestite, les lacunes sont d'abord comblées [59].

Au niveau du mécanisme, d'après Wagner [59], la nucléation débute à la surface de l'oxyde en contact avec le gaz réducteur. De plus, il a été montré que la nucléation débutait préférentiellement aux joints de grain des oxydes. En effet, Bahgat *et al.* ont étudié la réduction d'un cube de wuestite polycristallin dense sous CO [60]. Les échantillons ont été réduits pendant différents temps à haute température (800°C) et observés au microscope électronique. Leurs résultats montrent que la nucléation du fer a tendance à être favorisée au niveau des joints de grain de wuestite. D'après eux, ceci serait dû au fait que la diffusion des ions Fe^{2+} est plus aisée au niveau des joints de grain que dans le cœur des cristaux de wuestite. Cependant, ils ont également observé quelques nucléations au cœur des grains, autour d'impuretés ou de défauts offrant une énergie de surface particulièrement élevée. Des résultats similaires ont été trouvés par Kim *et al.* lors de la réduction de minerai sous hydrogène [56]. Kim *et al.* ont réduit des pellets d'hématite industrielle sous hydrogène pur à 700°C et observé l'influence des microstructures sur la réduction grâce à différentes techniques de microscopie électronique. Les résultats sont également clairs et montrent que la formation de fer a tendance à débiter au bord des grains de wuestite. Feilymar *et al.* ont étudié la réduction de différents oxydes sous hydrogène à des températures inférieures à celle de l'apparition de wuestite, et ont observé les échantillons au microscope optique après polissage [55]. Les observations montrent la même tendance que précédemment *i.e.* l'apparition de la phase de fer aux joints de grain et un avancement vers le cœur des grains.

Pendant ces réactions physico-chimiques, des changements cristallographiques et volumiques s'opèrent. De nombreuses études ont été réalisées sur la question et globalement, leurs résultats montrent que la structure poreuse des échantillons initiaux change durant la réduction avec une diminution de la taille des pores [52]. Il a également été montré que le volume poreux total augmentait avec le temps de réaction bien que la taille des pores diminue, ce qui indique une augmentation de leurs nombres [52], [56]. Par ailleurs, l'apparition de fissures dans les microstructures est constatée lors de la réduction. Ceci est dû aux différences de volume entre les différentes phases. Par exemple, lors de la réduction de l'hématite en wuestite, une diminution de volume de 19% est observée et une diminution de 42% est observée lors de la transformation de la wuestite en fer [56], [61]. En comparaison avec la réduction classique sous monoxyde de carbone, la structure poreuse de la réduction sous hydrogène est observée comme plus fine [53].

Les deux précédentes sous-parties ont présenté les principes physico-chimiques de la réduction de fer d'un point de vue macro- et microscopique. Il faut cependant garder en tête que certains phénomènes présentés précédemment sont plus compliqués dans la réalité, comme l'activation de la molécule d'eau sur la surface de wuestite, de magnétite ou d'hématite. La rapidité de

déroulement des séquences présentées précédemment représente la cinétique de réduction. Cette dernière est fonction de plusieurs paramètres (température, pression, échantillon...). Leur influence sera présentée par la suite.

I.2.3.2. Paramètre influant sur la cinétique

La réduction sous hydrogène est une réaction chimique complexe faisant intervenir plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres, certains sont plus influents que d'autres sur la cinétique de réduction, et seront discutés ici. D'abord, l'influence de la température sera étudiée, suivie par l'influence de la taille de l'échantillon, suivie par l'influence de la composition du gaz réducteur et du type d'échantillon.

I.2.3.2.1. Influence de la température

La constante cinétique de réduction suit la loi d'Arrhenius décrite en Eq I-37 ; elle est donc fortement liée à la température. De plus, comme montré Eq I-24, la réduction de fer par l'hydrogène est globalement endothermique, donc plus l'apport de chaleur est important, plus la réduction est avantagée.

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad \text{Eq I-37}$$

De nombreuses études ont étudié expérimentalement l'impact de la température. Fruehan *et al.* ont réduit 100 mg de poudre de minerai préalablement séchée ; l'atmosphère était un mélange 60/40% d'hydrogène et d'azote à un débit de 2L/min. La Figure I-25 présente l'évolution du taux de réduction de deux échantillons. Le premier est réduit à 700 °C et le second est d'abord réduit à 700 °C puis est monté à 800 °C après 1000 s de réduction. Les mesures montrent clairement une augmentation du taux de réduction avec l'augmentation de la température [62]. Afin d'observer une plus large plage de température, Wagner *et al.* ont réalisé des analyses thermogravimétriques de poudre d'hématite pure sous 100% d'hydrogène à différentes températures. Leurs résultats montrent que la température la plus élevée (900 °C) permet la réduction la plus rapide et que, plus la température diminue, plus le temps pour atteindre une réduction totale augmente [63]. Étant donné que la matière première utilisée dans l'industrie sidérurgique est composée de pellets de minerai de fer de forme sphérique, certains auteurs ont réalisé des réductions sur ces échantillons. Par exemple, Zuo *et al.* ont réduit des pellets de minerai de fer sous différents ratio H₂:CO à différentes températures. Leurs résultats démontrent les mêmes tendances que précédemment. En effet, la Figure I-26 montre l'évolution en fonction du temps de la réduction de pellet sous hydrogène pur à 800 °C, 900 °C et 1000 °C : il est possible de voir que les réductions à 800 °C et 900 °C arrivent à 98% de réduction après 37,5 min et 25,8 min respectivement. A 1000 °C la réduction est encore plus rapide puisqu'en 19,5 min l'échantillon est réduit à 98% soit un gain d'environ 20 min pour 200 °C de différence. Zuo *et al.* ont également mis en évidence que les coefficients de diffusion augmentaient avec la température [64].

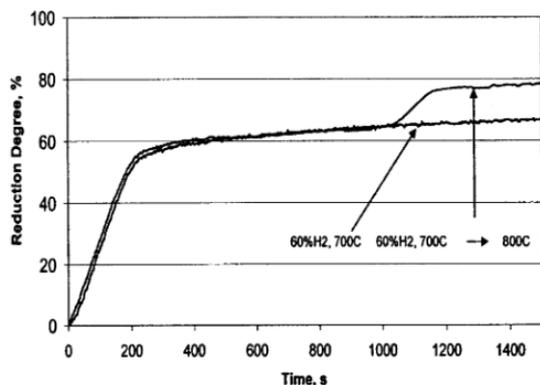


Figure I-25 : Évolution du taux de réduction de poudre d'hématite sous 60/40% H_2/N_2 entre 700 °C et 800 °C en fonction du temps [62].

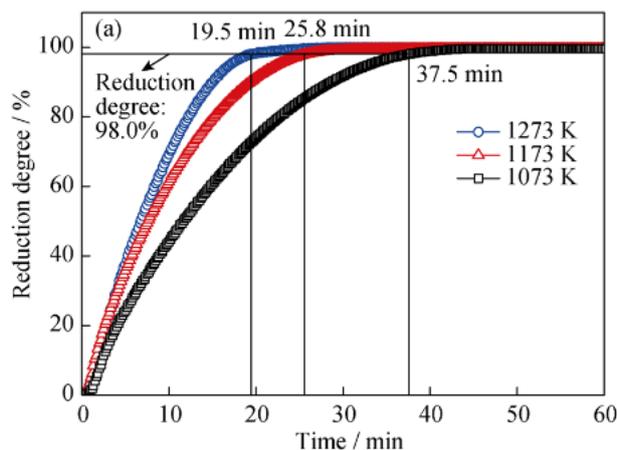


Figure I-26 : Evolution du taux de réduction de pellets de minerai sous hydrogène en fonction du temps pour 800 °C, 900 °C et 1000 °C [64].

Cependant, certains auteurs ont observé un ralentissement de la réduction pour des températures autour de 650 °C. Par exemple, comme le montre la Figure I-27, Turkdogan et Vinters ont observé un ralentissement de la réduction pour des minerais de petites tailles (1 mm) entre 500 °C et 800 °C. Ce ralentissement n'a pas été observé pour des gros minerais (15 mm) [51]. Ils précisent que ce phénomène n'a pas d'explication satisfaisante mais qu'il est raisonnable de dire que cela est dû à l'effet combiné d'un changement de porosité, de la quantité de wuestite piégée dans le fer réduit et à l'absence de wuestite en dessous de 560-570 °C [51].

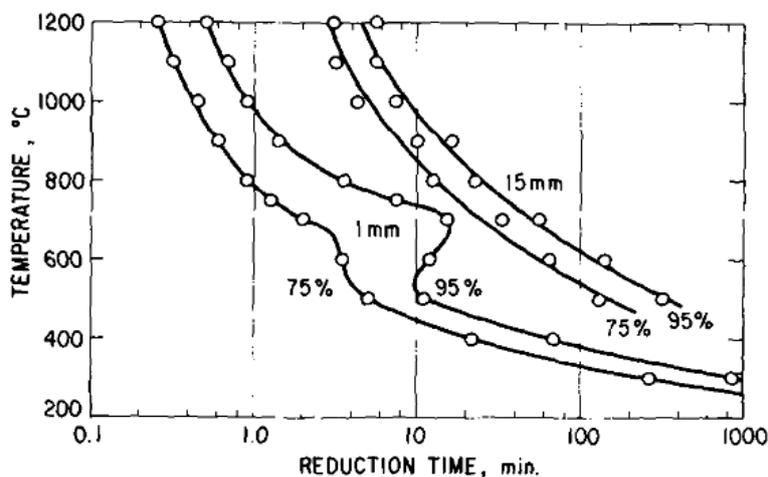


Figure I-27 : Effet de la température sur le temps de réduction sous 0,96 atm d' H_2 de minerai d'hématite de 1 ou 15 mm de diamètre [51].

Donc, une claire et nette amélioration de la cinétique de réduction est observée avec l'augmentation de la température. Cette observation est aussi bien valable sur de petites particules que sur des pellets d'hématite de l'ordre de plusieurs millimètres de diamètre. Cette tendance est nuancée par certaines études montrant des ralentissements de la cinétique aux alentours de 600-700 °C pour de petites particules. Afin de mieux cerner l'influence de la taille, la prochaine partie développera ce paramètre.

I.2.3.2.2. Influence de la taille de l'échantillon

Le second paramètre qui a été beaucoup étudié est la taille de l'échantillon. Dans un premier temps, Turkdogan et Vinters ont montré un changement de régime avec la taille de l'échantillon. En effet, sur la Figure I-28 il est possible de voir que plus le diamètre est grand plus le régime limitant de la réduction est la diffusion dans les pores. Et, pour les diamètres plus faibles, les limitations sont dues à une combinaison des différents régimes [51]. En terme de vitesse de réduction, Choi et Sohn ont réduit des particules d'environ 25-32 μm et d'environ 45-53 μm à très haute température (1400 °C) et ont observé une nette augmentation de la vitesse de réduction puisque les plus petites particules ont atteint environ 100% de réduction en environ 1 sec contre 90% en environ 1,75 s pour les plus grosses. Ceci montre que, même à une petite échelle, la taille influe [65].

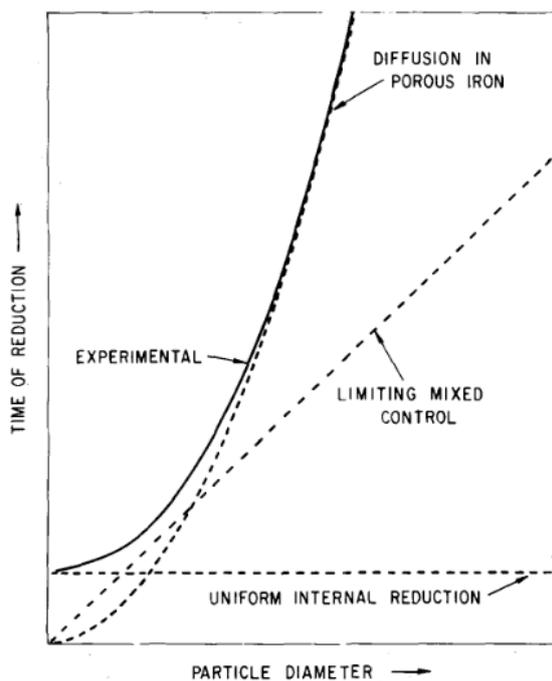


Figure I-28 : Comparaison des différents régimes limitants théoriques et de l'évolution expérimentale du taux de réduction en fonction du temps [51].

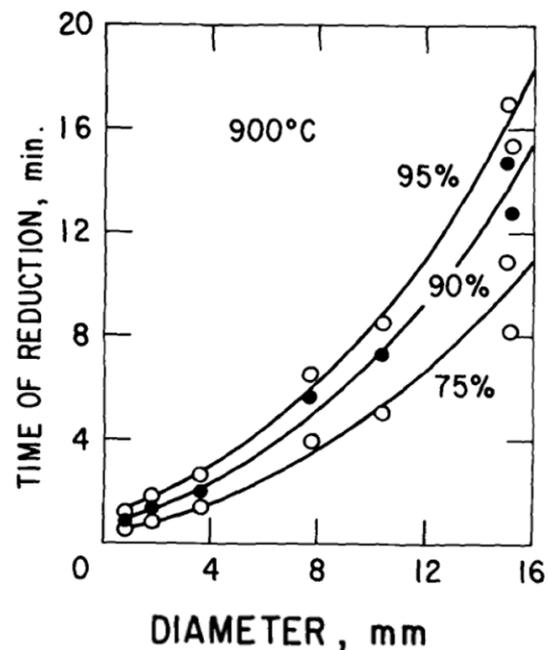


Figure I-29 : Impact du diamètre sur le temps de réduction de pellets d'hématite sous hydrogène. Les courbes représentent un avancement de la réduction dont la valeur est le pourcentage écrit sur la figure [51].

Comme évoqué précédemment, certains auteurs ont préféré travailler avec des échantillons de tailles industrielles. C'est le cas de Zhang *et al.*, qui ont réalisé des analyses thermogravimétriques sous hydrogène de pellets de titanohématite de différents diamètres (5,5 mm à 8,5 mm tous les mm). Leurs résultats montrent qu'à environ 1000 °C, le diamètre du pellet a bien une influence sur la vitesse de réduction, puisque le temps de réduction pour atteindre 90% est divisé par deux entre le pellet de 5,5 mm et celui de 8,5 mm soit, respectivement environ 4 min et environ 8 min [66]. Turkdogan et Vinters ont également étudié l'impact de la taille de l'échantillon sur le temps de réduction lors de réductions de minerai d'hématite sous hydrogène. Les résultats sont présentés Figure I-29, les courbes représentant un taux de réduction donné et évoluant en fonction du diamètre de l'échantillon. Il est possible

de voir que le temps de réduction augmente drastiquement avec le diamètre puisque, pour atteindre 95% de réduction avec un échantillon de 4 mm de diamètre, il faut moins de 4 minutes, alors que pour 16 mm de diamètre, il faut environ 18 minutes. On peut aussi remarquer que la dépendance entre le temps de réduction et le diamètre n'est pas linéaire [51].

Durant la partie I.2.3.1.1 sur les aspects macroscopiques de la réduction du minerai de fer, le modèle du cœur rétrécissant a été présenté. Ce dernier montrait plusieurs régimes de diffusion des gaz dans l'échantillon. Ces régimes indiquaient que le temps de réduction était directement lié au rayon de l'échantillon considéré. Les résultats de ces études viennent donc appuyer le modèle par des résultats expérimentaux cohérents.

De la même manière, dans la partie I.2.3.1.2 sur les aspects microscopiques de la réduction, il a été montré que le gaz réducteur se diffusait dans les pores des matériaux. Il est donc logique que la taille des gaz influe sur la diffusion et, étant donné, que tous les gaz ne sont pas de la même taille, la composition du gaz a une influence sur la cinétique de réduction ; ce sera l'objet de la prochaine partie.

I.2.3.2.3. L'influence de la composition du gaz réducteur

Dans un premier temps, sachant que la réduction directe est classiquement réalisée avec du monoxyde de carbone, il est nécessaire de comparer sa performance à celle de l'hydrogène. C'est ce que Bonalde *et al.* ont réalisé en réduisant à 850 °C des pellets de minerai sous flux de différents gaz réducteurs *i.e.* hydrogène, monoxyde de carbone et du gaz Midrex (55,7% d'H₂, 34,0% de CO, 6,3% de CO₂ et 4,0% de CH₄). Les résultats sont présentés Figure I-30 et sont clairs. En effet, il est possible de voir un net avantage pour la réduction sous hydrogène suivi du gaz Midrex et finalement du monoxyde de carbone. La réduction complète est atteinte en environ 15 min pour l'hydrogène alors que les deux autres sont à 80% de réduction et 50% environ pour le gaz Midrex et le monoxyde de carbone respectivement [67]. Cette tendance a également été montrée par Zuo *et al.* à différentes températures (800 °C, 900 °C et 1000 °C), avec la meilleure cinétique obtenue quand seul l'hydrogène est présent. En effet, étant donné que la taille du dihydrogène est nettement plus faible que celle du dioxyde de carbone et que sa viscosité est aussi plus faible, le coefficient de diffusion effectif augmente. Ce dernier vaut, à 800 °C, $0,052 \times 10^{-4}$ m²/s et $4,145 \times 10^{-4}$ m²/s pour le monoxyde de carbone seul et le dihydrogène seul, respectivement. Ils ont aussi montré que la constante cinétique augmentait : par exemple, toujours à 800 °C, la constante passe de $0,502 \times 10^{-2}$ mol/s à $1,210 \times 10^{-2}$ mol/s pour le monoxyde de carbone seul et le dihydrogène seul respectivement. Pour résumer, comme la viscosité de l'hydrogène est nettement plus faible que celle du monoxyde de carbone et que sa taille est aussi plus faible, les molécules d'H₂ sont plus en contact avec la surface à réduire ce qui améliore la cinétique de réduction [64].

Dans un second temps, étant donné que la réduction sous hydrogène produit de l'eau, il est important de discuter de l'impact de la vapeur d'eau sur la réduction. Tout d'abord, la Figure I-18 (page 42), montre que si la quantité d'eau est trop élevée, la réduction complète n'est pas possible même à très haute température [47]. Plus précisément, Lorente *et al.* ont réalisé des analyses thermogravimétriques de la réduction d'hématite dans des atmosphères composées de dihydrogène, de vapeur d'eau et d'azote à 400 °C. Leurs résultats ont montré que la présence d'eau dans l'atmosphère n'affectait pas significativement la première étape de la réduction (hématite vers magnétite) mais que la suite de la réduction était nettement ralentie. Ce ralentissement est fonction de la quantité d'eau et, même avec peu d'eau, une réduction

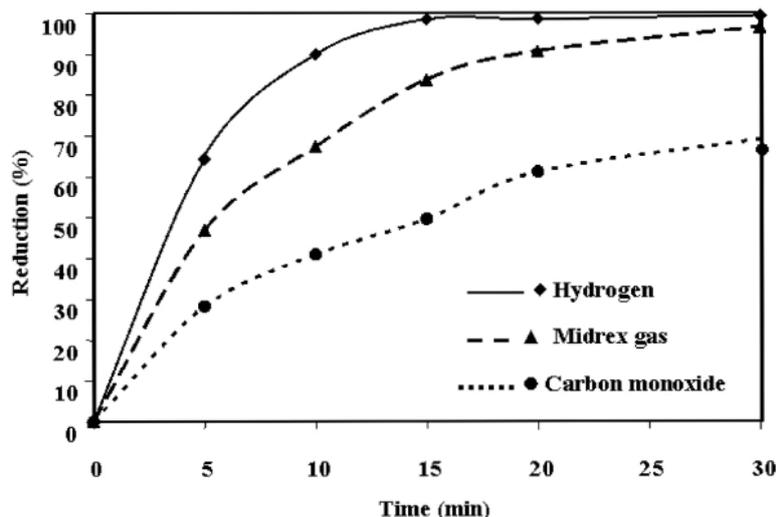


Figure I-30 : Taux de réduction d'un pellet de minerai de fer en fonction du temps sous différentes atmosphères. Losange : Hydrogène, Triangle : Gaz Midrex et Rond : Monoxyde de carbone [67].

complète n'a pas été observée [68]. Un autre effet de la présence d'eau est la réoxydation du fer. En effet, Brinkman *et al.* et Peña *et al.* ont observé que l'oxyde de fer transformé par l'hydrogène peut se réoxyder en présence d'eau. Cette observation a été réalisée dans le cadre du stockage d'hydrogène grâce à un cycle d'oxydo-réduction de métaux. Dans un premier temps, le métal oxydé est réduit par hydrogène, ce qui forme de la vapeur. Cette vapeur est stockée et peut ensuite être utilisée pour oxyder un métal, libérant l'hydrogène [69], [70]. Le processus de réoxydation est favorisé à des températures entre 100 °C et 500 °C [69].

Les résultats précédents montrent, que lors de la réaction, de la vapeur est formée ; cette dernière peut ralentir la réduction voire réoxyder l'échantillon dans certains cas. Il est donc important de gérer la quantité d'hydrogène pour assurer une réaction complète. Cependant, il est clair que la composition du gaz a une forte influence. L'hydrogène est plus efficace que le monoxyde de carbone pour opérer la réduction en raison de sa plus faible viscosité et de sa taille. Cela appuie le fait que la porosité a une importance primordiale. Si on fait le lien avec le modèle du cœur rétrécissant présenté partie I.2.3.1.1 page 43, les régimes de diffusion dépendent beaucoup de la porosité de l'échantillon lorsque le fer est formé, ce qui appuie l'avantage de l'hydrogène devant le monoxyde de carbone. Le type d'échantillon utilisé est donc primordial pour assurer une bonne réduction. La prochaine partie présentera l'influence de ce dernier.

I.2.3.2.4. Influence du type d'échantillon

Plusieurs paramètres de l'échantillon lui-même peuvent avoir une influence sur la réduction comme par exemple sa porosité et sa composition.

Intuitivement, étant donné que les phénomènes limitants de la réduction du minerai sont liés à la porosité, on peut penser qu'une plus grande porosité améliore la réduction du minerai. C'est ce que Joseph avait étudié en 1936 avec une étude sur la porosité qui a montré que plus la porosité est grande, meilleure est la réductibilité [71]. Cette tendance a été vérifiée par Higuchi and Heerman, qui ont étudié la réduction de minerai plus ou moins poreux sous un mélange de CO/CO₂/N₂ à des températures modérées (500 °C et 800 °C). Leurs résultats montrent une augmentation du taux de réduction avec la porosité jusqu'à une porosité de 40%,

après quoi il se stabilise. La stabilisation viendrait du fait que la partie réduite recouvre tous les pores et que la suite de la réduction ne dépend donc plus de la taille des pores mais de la diffusion. Ils ont aussi montré que des pores avec un diamètre inférieur ou égal à 0,25 mm permettaient un plus haut taux de réduction pour une porosité totale équivalente. D'après eux, une des explications serait que des petits pores répartis induiraient des fissures entre eux et entre des pores initialement fermés lors du changement de volume entre l'hématite et la magnétite [72]. Pichler *et al.* ont également étudié cette relation, en réalisant la réduction de minerais contenant différentes formes d'oxyde fer (*i.e.* hématite (Fe_2O_3), magnétite (Fe_3O_4), et limonite (FeOOH)). Il a été remarqué que la limonite était le minerai le plus poreux et aussi que sa réductibilité était la meilleure [73]. Il est donc possible de conclure que la porosité influence sur la réduction.

Dans un second temps, la question des impuretés présentes dans le minerai vient à l'esprit. Hayashi et Iguchi ont montré que la présence d'impuretés sur la surface permettait un plus grand nombre de nucléations de fer parce qu'elles permettent d'avoir une énergie de surface supérieure en regard de celle des régions sans impuretés [58]. Cependant, Kim *et al.* nous apprennent que l'influence bénéfique des impuretés n'est pas observée dans toutes les études et que, en fonction de l'impureté, l'influence sur la réduction peut aussi être négative :

- CaO ou SiO_2 : Certaines études ne montrent pas d'impact et d'autres une amélioration de la cinétique.
- MgO : Sa présence peut être aussi bien bénéfique que négative suivant les conditions.
- TiO_2 : Sa présence produirait plus de fissures.
- Al_2O_3 : Améliore la vitesse de réduction si 3%_{masse} sont introduits dans la magnétite
- V_2O_5 : Plus sa proportion est élevée dans la magnétite plus les cristaux de fer sont gros

Globalement, ils ont montré, lors d'études de tomographie par sonde atomique sur des oxydes réduits par l'hydrogène, que les impuretés les plus préoccupantes étaient celles qui pouvaient former des oxydes mixtes avec le fer. Ces oxydes ainsi que l'accumulation d'impuretés au front de transformation wuestite/fer réduiraient la vitesse de réduction [56]. De manière plus générale, Teplov a réduit à 500 °C sous hydrogène différents minerais contenant plus ou moins d'impuretés et ses résultats montrent que la réduction la plus rapide était celle du minerai contenant le moins d'impuretés [74].

Il est donc possible de conclure que la porosité aussi bien que la composition ont une influence sur la vitesse de réduction. Cependant, une porosité trop élevée et des pores trop grands ne sont pas intéressants et la présence d'impuretés en trop grandes quantités ne sert pas la réduction.

I.2.4. Conclusion

Les parties précédentes ont permis de décrire les modèles de réduction des oxydes de fer par l'hydrogène aussi bien au niveau macroscopique que microscopique, et les différents régimes accessibles. L'influence de plusieurs paramètres sur la cinétique de réduction (température, taille/porosité/composition de l'échantillon, et nature de l'atmosphère gazeuse) a été présentée. La réduction par l'hydrogène constitue la voie la plus prometteuse de la métallurgie décarbonée. Cependant, certains aspects restent énergivores (comme la production de dihydrogène) et/ou écologiquement impactants (comme la montée en température). La prochaine partie a pour but de présenter la voie explorée dans ces travaux : la métallurgie solaire.

I.3. Métallurgie solaire

Le principe de la métallurgie solaire repose sur l'utilisation de l'énergie solaire concentrée comme source de chaleur pour que la réduction se produise. Dans cette partie, l'ensemble des technologies solaires à concentration seront présentées ainsi que les travaux de recherche déjà réalisés sur ce procédé.

I.3.1. Les procédés à concentration comme source de chaleur

Les rayons provenant du soleil sont appelés irradiation et l'énergie qu'ils véhiculent sur un temps et une surface donnée peut être exprimée en kWh/m². La Figure I-31 et la Figure I-32 présentent respectivement une mappemonde de l'irradiation directe normale sur l'année 2019 et la moyenne de l'irradiation directe normale en France entre 1994 et 2018. On parle d'irradiation directe puisque deux irradiations sont distinguées : l'irradiation directe et l'irradiation diffuse. Comme expliqué sur la Figure I-33, l'irradiation directe est l'irradiation qui arrive directement sur la surface de mesure ou le sol à l'inverse de l'irradiation diffuse qui est la partie de l'irradiation incidente diffusée par l'atmosphère traversée. L'irradiation directe est dite normale lorsqu'elle arrive perpendiculairement à la surface de mesure. Il est également possible de parler d'irradiance, la densité surfacique de puissance associée, en W/m², et dont l'irradiation est l'intégrale sur le temps. De plus, il existe l'irradiation circumsolaire qui correspond à l'irradiation provenant des alentours proches du soleil.

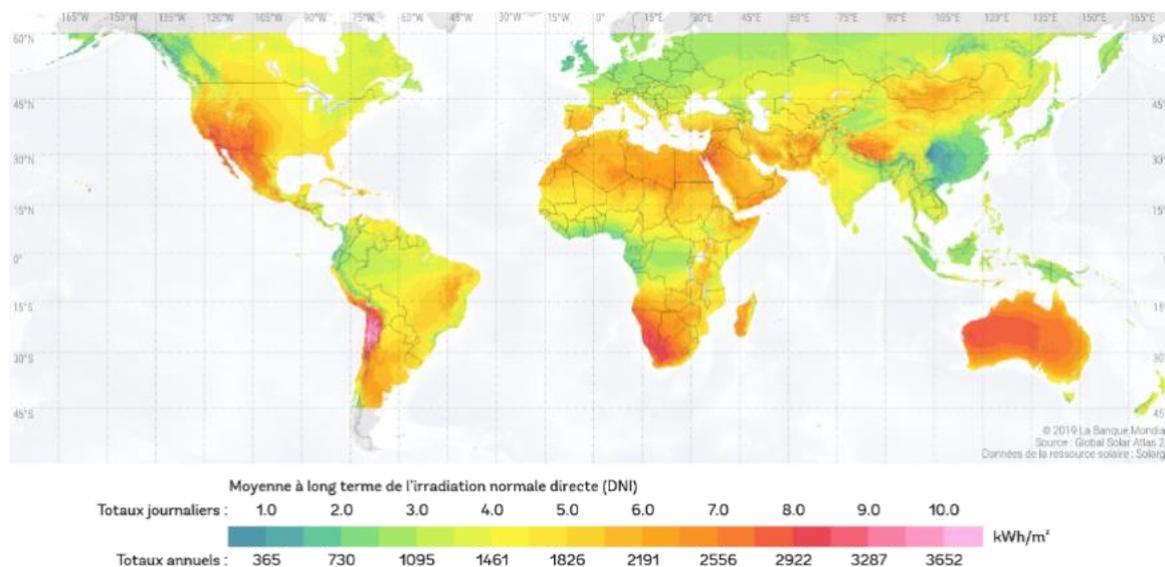


Figure I-31 : Mappemonde de l'irradiation directe normale de l'année 2019

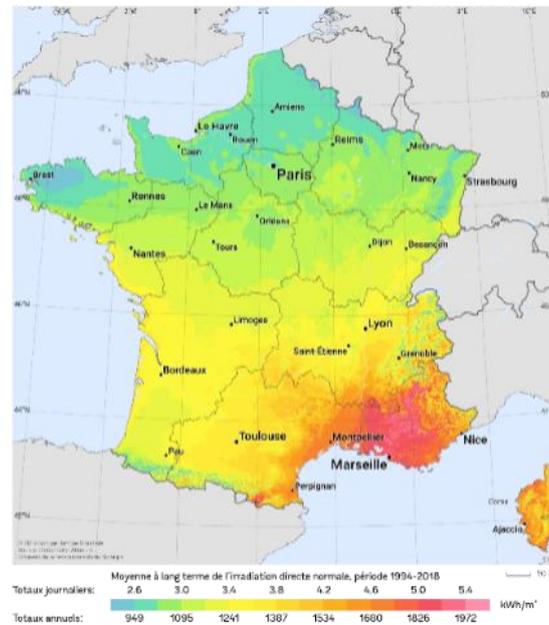


Figure I-32 : Carte de l'irradiation directe normale en France. Moyenne entre 1994 et 2018 [75].

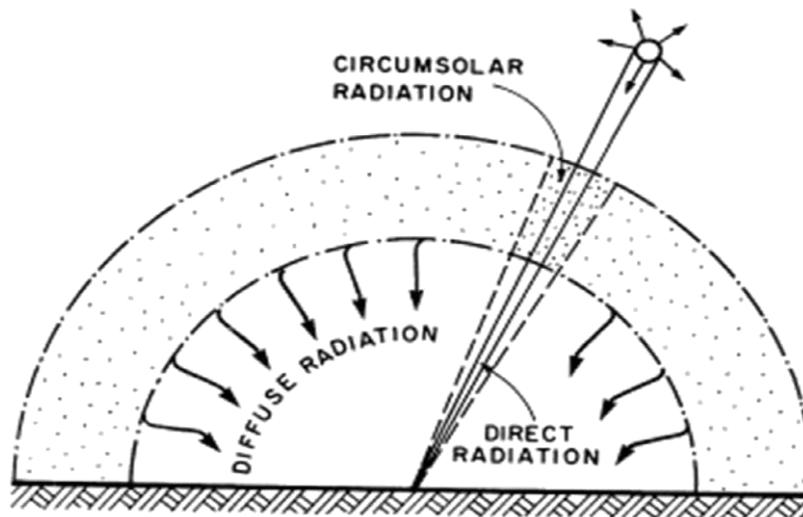


Figure I-33 : Schéma explicatif des différentes irradiations : directe, diffuse et circumsolaire.

Les procédés solaires à concentration sont composés généralement d'un collecteur et d'un récepteur. Le premier collecte l'irradiation solaire généralement à l'aide de matériaux réfléchissants et la concentre en un point ou une ligne où est placé le récepteur. Cela veut dire que soit le collecteur est linéaire (2D) et réfléchit alors les rayons lumineux sur une ligne, soit les rayons lumineux sont collectés par un réflecteur parabolique ou simulant une parabole (3D) et convergent vers un point. Un paramètre primordial est le coefficient de concentration, qui est défini comme le rapport entre l'intensité de l'irradiation au point focal et l'irradiation normale directe [76]. Il peut aussi être défini de manière géométrique comme le rapport entre l'aire d'ouverture du concentrateur et la surface du point ou de la ligne concentrée. Par exemple, si un concentrateur a une aire d'ouverture de 2 m² et concentre les rayons sur une tâche de 20 cm², le ratio de concentration est de 1000.

Les procédés solaires à concentration thermochimiques convertissent l'énergie radiative en énergie chimique afin de permettre la transformation de réactifs en produits. Dans ces procédés, le rendement d'absorption du réacteur solaire $\eta_{absorption}$ est la puissance absorbée par le réacteur divisée par la puissance solaire, comme présenté dans l'Eq I-38, où $Q_{ouverture}$ est la puissance interceptée par l'aire d'ouverture $A_{ouverture}$ du récepteur, α_{eff} et ε_{eff} sont l'absorbance et l'émittance effective du recteur solaire, σ est la constante de Stefan-Boltzman, T est la température nominale du récepteur et $Q_{solaire}$ est l'énergie totale provenant du concentrateur vers le récepteur. Le premier terme du numérateur correspond à la puissance absorbée par le récepteur et le second à celle réémise par radiation. La différence est la puissance nette absorbée [76]. C'est cette puissance nette absorbée qui doit valoir au minimum l'enthalpie de réaction de la réaction chimique voulue pour qu'elle se produise [76].

$$\eta_{absorption} = \frac{\alpha_{eff}Q_{ouverture} - \varepsilon_{eff}A_{ouverture}\sigma T^4}{Q_{solaire}} \quad Eq\ I-38$$

Si l'on introduit le coefficient de concentration moyen C qui est le ratio de l'énergie absorbée par le réacteur divisé par sa surface, le tout normalisé par l'irradiation normale directe I (voir Eq I-39), que l'on se place dans le cas où le récepteur absorbe toute l'énergie fournie par le concentrateur (soit $Q_{ouverture} = Q_{solaire}$) et que le récepteur est considéré comme un corps noir (donc $\alpha_{eff} = \varepsilon_{eff} = 1$), le rendement d'absorption Eq I-38 est décrit par Eq I-40.

$$C = \frac{Q_{ouverture}}{I A_{ouverture}} \quad Eq\ I-39$$

$$\eta_{absorption} = 1 - \frac{\sigma T^4}{IC} \quad Eq\ I-40$$

La performance de transformation de l'énergie solaire en énergie chimique du procédé est donnée par son rendement exergétique η_{exergy} décrit Eq I-41 où \dot{n} est le débit molaire du réactif et ΔG_{rxn} est la quantité de travail maximale pouvant être extraite des produits lors de leur retransformation en réactifs [76].

$$\eta_{exergy} = \frac{-\dot{n}\Delta G_{rxn}|_{298K}}{Q_{solaire}} \quad Eq\ I-41$$

Comme la conversion de la chaleur solaire vers ΔG_{rxn} est limitée par le rendement d'absorption solaire et par le rendement de Carnot, le rendement exégétique maximal $\eta_{exergy,ideal}$ est le produit du rendement d'absorption et du rendement Carnot, comme décrit dans l'Eq I-42, où T_H et T_L sont les températures maximale et minimale de la machine thermique de Carnot équivalente [76].

$$\eta_{exergy,ideal} = \left[1 - \left(\frac{\sigma T_H^4}{IC}\right)\right] \times \left[1 - \left(\frac{T_L}{T_H}\right)\right] \quad Eq\ I-42$$

Le rendement exégétique maximal $\eta_{exergy,ideal}$ est tracé Figure I-34 en fonction de T_H et pour T_L égale à 298 K pour un récepteur considéré comme un corps noir et qui récupère toute l'énergie fournie par le concentrateur. Sur cette figure, le coefficient de concentration moyen varie, permettant d'observer la gamme de températures en fonction de ce dernier.

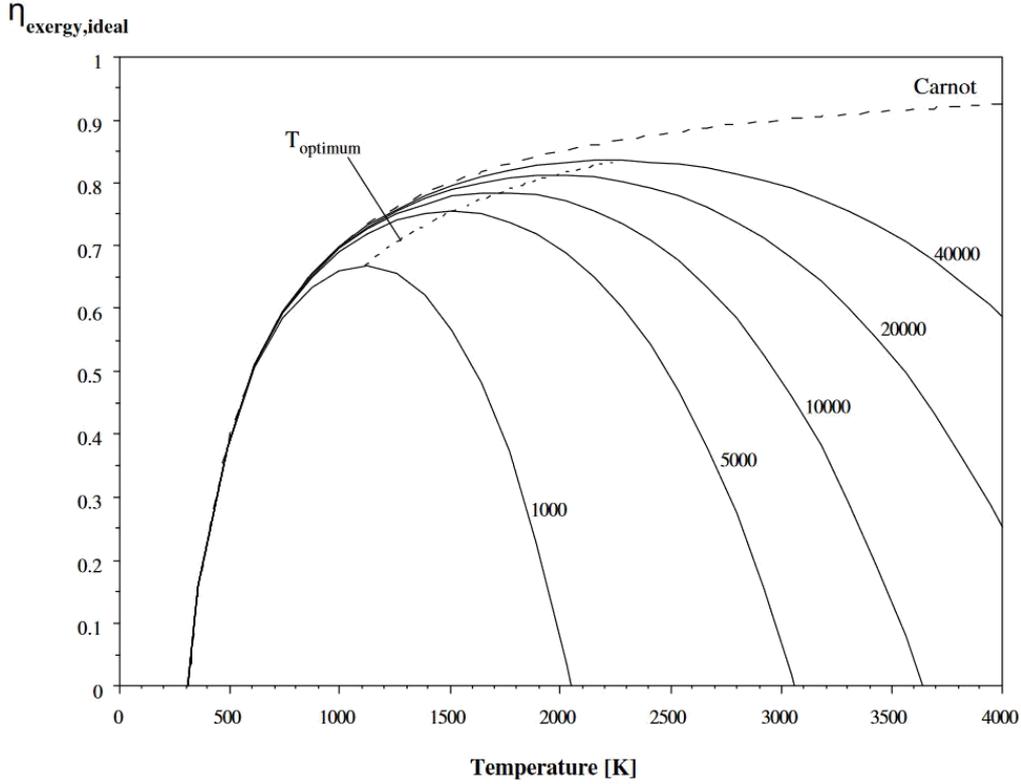


Figure I-34 : Evolution du rendement éxergétique idéal (Eq I-42) pour un récepteur parfait (corps noir et récupérant toute l'énergie fournie par le concentrateur) en fonction de la température haute de la machine thermique de Carnot équivalente et pour $T_L = 298 \text{ K}$. Le paramètre présenté est le coefficient de concentration moyen C . Les évolutions du rendement de Carnot ainsi que la température optimale sont également présentées.

En raison de la limite fixée par le rendement de Carnot, plus la température maximale est haute, meilleur est le rendement. Cependant, du point de vue des échanges thermiques, plus la température est élevée, plus les pertes radiatives le sont. Cela induit donc que l'énergie absorbée est réémise instantanément et donc que $\eta_{exergy,ideal} = 0$. Cette température est appelée température de stagnation $T_{stagnation}$ et est donnée par l'Eq I-43. Par exemple, sous une irradiation typique de 1 kW/m^2 , la température de stagnation $T_{stagnation}$ d'un concentrateur avec un coefficient de concentration de 10000 vaut autour de 3600 K, comme montré sur la Figure I-34.

$$T_{stagnation} = \left(\frac{IC}{\sigma}\right)^{0,25} \quad \text{Eq I-43}$$

Sur la Figure I-34, il est possible de voir que $\eta_{exergy,ideal}$ suit une évolution parabolique et admet donc un maximum. La température correspondant à ce maximum est appelée température optimale $T_{optimum}$, et est déterminée grâce à Eq I-44. L'évolution de cette température est présentée sur la Figure I-34.

$$\frac{\partial \eta_{exergy,ideal}}{\partial T} = 0 \quad \text{Eq I-44}$$

La température optimale correspond donc à la température de fonctionnement permettant d'avoir le meilleur rendement éxergétique soit, le plus d'énergie récupérée par le concentrateur, transmise à la réaction chimique pour transformer les réactifs en produits. Dans le cas de ce travail, la réaction chimique est la réduction directe de pellets de minerai de fer, et donc la

transformation de minerai de fer en fer. La température à laquelle est réalisée la réduction est environ 950 °C. D'après la Figure I-34 elle est facilement accessible pour tous les ratios de concentration présentés.

Les procédés solaires à concentration sont nombreux et proposent de larges gammes de température. Ces procédés seront présentés ici suivant les températures de fonctionnement qu'ils proposent. Ensuite, plus précisément, l'utilisation des concentrateurs dans le domaine de la métallurgie sera présentée.

I.3.1.1. Procédés basses températures

Les premiers concentrateurs présentés sont ceux utilisés pour des applications basses températures : cuisson, séchage etc.

Flat-plate :

Dans le cas extrême où le coefficient de concentration est de 1, se trouvent les flat-plates qui sont plutôt des récupérateurs car ils ne concentrent pas les rayons. L'irradiation solaire traverse une vitre ou une plaque transparente placée au-dessus d'une plaque absorbante en contact avec un tube qui serpente et est chauffé par conduction. A l'intérieur des tubes circule un fluide qui est chauffé. La structure du flat-plate est réalisée en matériaux isolants pour limiter au maximum les pertes thermiques [70].

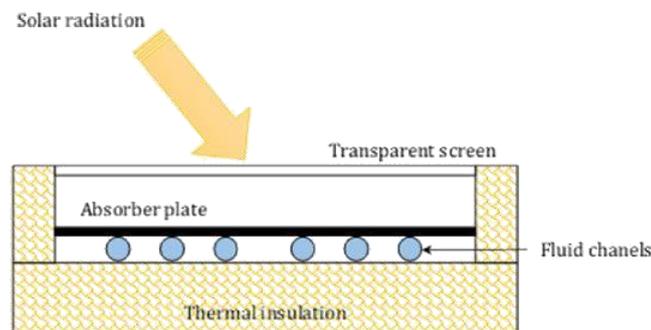


Figure I-35 : Vue en coupe d'un récupérateur solaire flat-plate [77]

Typiquement, les flat-plates sont utilisés pour produire de l'eau chaude domestique et pour le séchage d'aliments [77]. Cependant, d'autres applications sont possibles ; par exemple, Wayua *et al.* ont réalisé un pasteurisateur de lait de chamelle en utilisant un flat-plate. Le flat-plate de 1,67 m² d'ouverture est lié à un réservoir de 80 L dans lequel se trouve le lait. Le réservoir est chauffé au bain marie par l'eau chaude sortant du flat-plate. De plus, l'ensemble composé du réservoir et du bain marie est placé dans des matériaux isolants afin de minimiser les pertes. Les auteurs ont réussi à pasteuriser 40 L de lait uniquement : avec une plus grosse quantité, les températures atteintes n'étaient pas suffisantes [78].

Concentrateur boîte (box-type) :

Le concentrateur de type boîte (box-type en anglais) est l'un des plus simples et basiques des concentrateurs. Sa composition consiste en une boîte fermée, généralement composée de parois et fond isolants et d'une vitre sur la face supérieure qui peut être simple ou double vitrage [79]. Cette partie permet l'accumulation de chaleur à l'intérieur. De plus, une plaque absorbante est généralement placée dans le fond de la boîte, et des réflecteurs sont fixés sur les côtés de la boîte, permettant à une plus grande quantité de rayons lumineux de pénétrer dans la boîte, augmentant le coefficient de concentration jusqu'à quelques unités. La Figure I-36 présente le schéma d'un concentrateur boîte et son principe. Les températures de fonctionnement de ces concentrateurs sont faibles (de l'ordre de 100 °C) mais peuvent être augmentées lorsque plusieurs réflecteurs sont utilisés [80], [81].

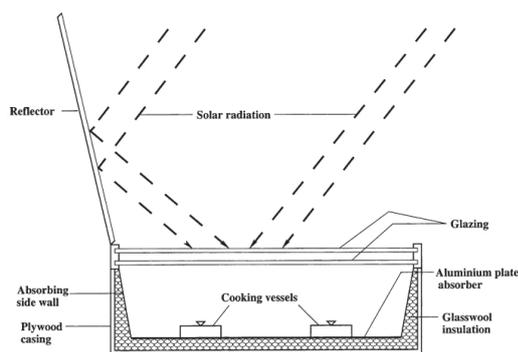


Figure I-36 : Schéma de principe et composition d'un concentrateur solaire de type boîte [79].

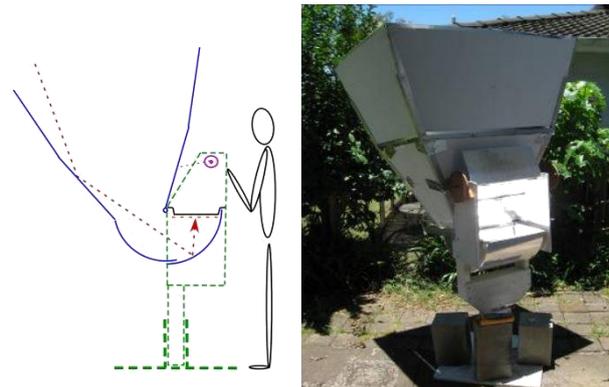


Figure I-37 : Schéma et photo de l'adaptation d'un concentrateur de type boîte pour de la cuisine debout et à haute température [81].

L'utilisation classique des concentrateurs boîte est la cuisine. Mahavar *et al.* ont réalisé un concentrateur boîte pouvant contenir environ 1,2 kg de nourriture et répondant à trois critères : une taille relativement petite pour qu'il soit facile à manipuler, des performances thermiques correctes et un coût relativement faible. Les tests de cuisson ont été réalisés avec différents aliments (riz, pomme de terre, légumes, eau, etc) et en moyenne la cuisson des 1,2 kg a pris 2h20. Dans le meilleur cas, la plaque absorbante a atteint 144 °C sous une irradiation de 945 W/m² [82]. Dans un cas un peu moins typique, Edmonds a adapté un concentrateur boîte permettant de cuisiner debout et d'une dimension bien supérieure à celle habituelle, offrant donc de hautes températures de cuisson [81]. La Figure I-37 présente un schéma et une photo du concentrateur. Il est également possible de voir que le concentrateur boîte a été adapté pour permettre le renvoi des rayons lumineux sur une plaque alors que classiquement ils sont emprisonnés dans la boîte pour chauffer l'intérieur. Edmonds a été en mesure de cuire du riz et des légumes à basse température et, à haute température, de la viande et de la friture. Finalement, la stérilisation de l'eau a également été possible. En terme de température, un maximum de 275 °C a été atteint sur la plaque pour un coefficient de concentration géométrique d'environ 12 [81].

I.3.1.2. Procédés moyennes températures

Les concentrateurs opérant à moyenne température sont les concentrateurs 2D : les collecteurs cylindro-paraboliques ou (*Parabolic Through Collector* en anglais (PTC)) et ceux à réflecteur linéaire de Fresnel (LFR).

Concentrateur cylindro-parabolique - Parabolic Through Collector - PTC :

Les PTC offrent des coefficients de concentration allant de 15 à 90 et des températures de fonctionnement de 50°C à 400°C [83], [84]. Comme présenté sur la Figure I-38, les PTC sont des concentrateurs linéaires composés d'un réflecteur (« *reflector* » sur la Figure I-38) et d'un récepteur (« *Absorber tube* » sur la Figure I-38). Le réflecteur est une pièce rectangulaire courbée dans la largeur selon une parabole et réalisée en verre recouvert d'une couche réfléchissante ou en aluminium [85]. Le récepteur, placé sur la ligne focale de la parabole, est un tube métallique [86]. La chaleur est transportée grâce à des fluides caloporteurs tel que des huiles, de l'eau ou des sels fondus, qui circulent dans le récepteur. De plus, pour maximiser la quantité de rayons lumineux collectés sur la journée, les collecteurs sont orientés sur l'axe nord-sud et peuvent pivoter autour de cet axe de l'est vers l'ouest [86]. Généralement, les PTC sont utilisés pour produire de la vapeur et celle-ci peut actionner une turbine pour produire de l'électricité. Les PTC peuvent produire de la vapeur directement ou via l'intermédiaire d'un fluide caloporteur et d'un échangeur thermique [85]. Le rendement solaire-électricité des PTC varie entre 10% et 16% [83]. Il a aussi été montré que les PTC pouvaient être utilisés pour réaliser de la cuisson. En effet, Saini *et al.* ont réalisé des expérimentations de cuisson de riz et de légumineuses en utilisant un PTC de 1,5 m² d'ouverture et un coefficient de concentration de 12 comme source de chaleur. Ils ont montré que la cuisson de deux repas par jour (midi et soir) était possible [87].

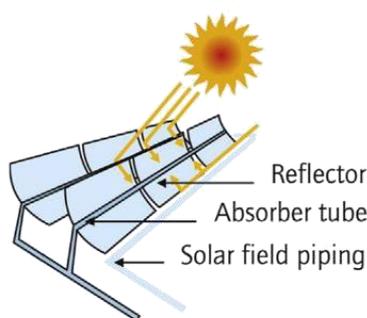


Figure I-38 : Schéma d'un collecteur cylindro-parabolique de principe [86].

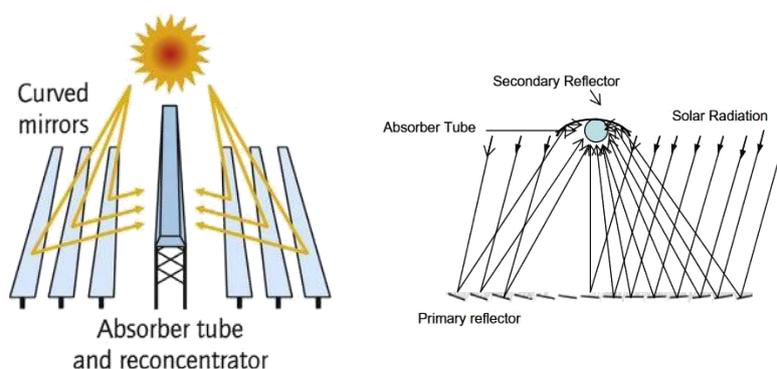


Figure I-39 : (Gauche) Schéma d'un concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel [86]. (Droite) Schéma de principe du concentrateur linéaire de Fresnel [88].

Concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel - Linear Fresnel Reflector - LFR :

Pour les LFR les ratios de concentration peuvent aller de 25 à 170 et offrent des températures de 150 à 400°C [83]. La Figure I-39 présente un schéma d'un LFR. Ces derniers sont composés de réflecteurs primaires, d'un réflecteur secondaire et d'un récepteur. Les réflecteurs primaires réalisés en miroir sont de longs rectangles qui peuvent être légèrement incurvés et qui sont inclinés indépendamment de manière à renvoyer les rayons lumineux vers le récepteur [89]. Le

réflecteur secondaire est placé au-dessus du récepteur et ressemble à un petit PTC. Il a pour ligne focale le récepteur, et permet d'augmenter le facteur de concentration des rayons lumineux renvoyés vers le récepteur [89]. De la même manière que les PTC, les concentrateurs LFR sont orientés selon l'axe nord-sud et chaque réflecteur peut pivoter pour suivre le déplacement du soleil d'est en ouest. La production d'électricité avec les concentrateurs LFR suit le même principe qu'avec les PTC [89], leur rendement solaire-électricité variant entre 8% et 12% [83]. D'autres applications sont également possibles pour les LFR. Par exemple, Farooqui a étudié la possibilité d'utiliser un LFR de $1,96 \text{ m}^2$ d'ouverture pour réaliser de la cuisson à l'eau ou de la friture, le cuiseur étant composé d'un récipient dans lequel se trouvait l'eau chauffée au bain marie et isolée thermiquement. Ces résultats ont montré que l'installation était convenable pour cette application avec un rendement thermique global de 30% [90]. Par ailleurs, Alhaj *et al.* ont simulé l'utilisation de LFR pour réaliser de la désalinisation multi-effets à Doha au Qatar. Leurs résultats montrent que 226 m^2 de collecteur permet de produire 1 m^3 d'eau distillé. Cependant, le coût initial de l'installation est élevé en raison du coût de construction du champ solaire [91].

I.3.1.3. Procédé hautes températures

Certaines technologies solaires permettent de larges gammes de température et d'utilisation. C'est le cas des tours solaires, des concentrateurs paraboliques dits « Dish » ou « parabole solaire », et des concentrateurs dits Scheffler.

Tour solaire (SPT) :

Les concentrateurs solaires permettant d'atteindre de hautes températures sont les tours solaires (Solar Power Tower (SPT)). Les tours sont composées de deux éléments principaux : la tour et le champ d'héliostats, comme montré sur le schéma Figure I-40 et sur la photo Figure I-41. Les héliostats sont de grands miroirs plans qui permettent de réfléchir la lumière du soleil sur le sommet de la tour. Chaque héliostat a la possibilité de suivre le mouvement du soleil selon deux directions (nord-sud et est-ouest) afin de concentrer le maximum de rayons lumineux vers le sommet de la tour [89], [92]. Cette technologie propose de hauts ratios de concentration, de l'ordre de 600 à 1000, ce qui permet d'atteindre de hautes températures : de l'ordre de $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, voire $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ dans certains cas [83], [84], [93].

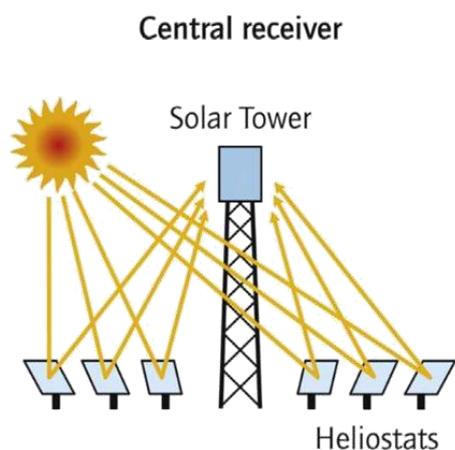


Figure I-40 : Schéma de principe d'un système de concentration à tour [86].



Figure I-41 : Photo des tours solaires SP10 et SO20 à Séville en Espagne.

Une fois les rayons du soleil concentrés sur le récepteur au sommet de la tour, l'énergie radiative des rayons est transformée en énergie thermique grâce à un matériau absorbant et transmise à un fluide caloporteur (eau, air, sels fondus) qui permettra la production de vapeur dans un échangeur et, par la suite, l'activation d'une turbine pour produire de l'électricité [92]. Les hautes températures de ces tours permettent de nombreuses applications. Li *et al.* ont par exemple réalisé la pyrolyse de matière organique issue des forêts (sciure de pin, noyaux de pêche, marc et conopée de raisin) [93]. Les expérimentations ont été réalisées sur une tour solaire au laboratoire PROMES à Odeillo. Cette étude a montré que la production de gaz de synthèse et de biochar via la pyrolyse solaire était possible et que les températures pouvaient atteindre 2000 °C [93]. Par ailleurs, Alzahrani et Diner ont simulé la possibilité de produire de l'hydrogène via électrolyse SOEC (cf. partie I.2.1.4.3), pilotée par une tour solaire avec un stockage thermique. Leur simulation a été réalisée avec une irradiance directe de 850 W/m² et un champ d'héliostats de 6000 m². Leurs résultats montrent un rendement solaire-hydrogène global de 13%, ce qui est du même ordre de grandeur que la production d'hydrogène via du photovoltaïque couplé à un électrolyseur, et ce qui en fait donc une technologie intéressante pour cette application [94], [95].

Concentrateur parabolique :

Le concentrateur parabolique est réalisé selon le sommet d'un paraboloïde convexe : son point focal lui permet d'offrir des coefficients de concentration très élevés allant jusqu'à 3000, et donc des températures allant jusqu'à 1500 °C pour la production d'électricité, et potentiellement plus en fonction du coefficient de concentration comme montré sur la Figure I-34 page 58. Cependant, si sa taille est faible et son ratio de concentration aussi, il peut aussi être utilisé à basse température aux alentours de 150 °C ce qui en fait un concentrateur très versatile et répandu [83]. Les concentrateurs paraboliques sont placés sur un pied permettant le suivi du soleil et sont réalisés en aluminium ou miroirs [89]. Pour la production d'électricité, les concentrateurs paraboliques sont généralement couplés à un moteur Stirling : la chaleur entraîne un mouvement mécanique via la détente d'un fluide ; ce mouvement mécanique est utilisé pour la production d'électricité avec un rendement autour de 25 à 30% [89]. Les concentrateurs paraboliques peuvent également être utilisés pour produire de l'hydrogène. Par exemple, Holmes-Gentle *et al.* ont utilisé à Lausanne (Suisse) un concentrateur de type parabolique pour produire de l'hydrogène via un procédé photoélectrochimique et ont atteint un rendement solaire-hydrogène de 20% [96]. Dans la même dynamique, Schäppi *et al.* ont produit des carburants solaires (CO et H₂) en utilisant un concentrateur parabolique et en réalisant des cycles d'oxydo-réduction d'oxyde de cérium non-stœchiométrique [97]. Une autre application répandue des concentrateurs paraboliques est la cuisine. Cette application est suffisamment mature pour trouver des modèles commerciaux comme la SK14, commercialisée sous différentes formes par de nombreuses entreprises ou associations (E.G. solar par exemple) [98]. A noter que cette dernière est la parabole qui sera étudiée dans ce travail lors de l'analyse de cycle de vie. Par ailleurs, Prado *et al.* ont réalisé une étude sur la désalinisation de l'eau avec un concentrateur en recyclant un antenne parabolique chromée. Ils ont montré que, dans les meilleures conditions, il était possible de dessaliniser 4,95 kg d'eau par jour pour 1 m² de concentrateur [99].

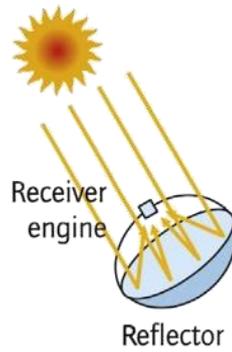


Figure I-42 : Schéma d'un concentrateur solaire parabolique dit « dish » [86].

Concentrateur Scheffler :

Le concentrateur Scheffler est particulier puisqu'il permet d'avoir un foyer déporté. En effet, il est construit selon une partie latérale d'un paraboloïde convexe et non selon son sommet (voir Figure I-43) [100]. Le coefficient de concentration du Scheffler est d'environ 100, ce qui oblige à rester à des températures inférieures à 1000 °C, bien que cette valeur soit variable en fonction de la conception du Scheffler. Le Scheffler est composé d'une surface réfléchissante généralement réalisée en aluminium offrant 88 à 91% de réflectance et d'une structure porteuse en aluminium. La structure porteuse du Scheffler permet le suivi du soleil grâce à un pivot dont l'axe est incliné d'un angle équivalent à l'angle de latitude du site d'utilisation, comme montré sur la Figure I-44 [100].

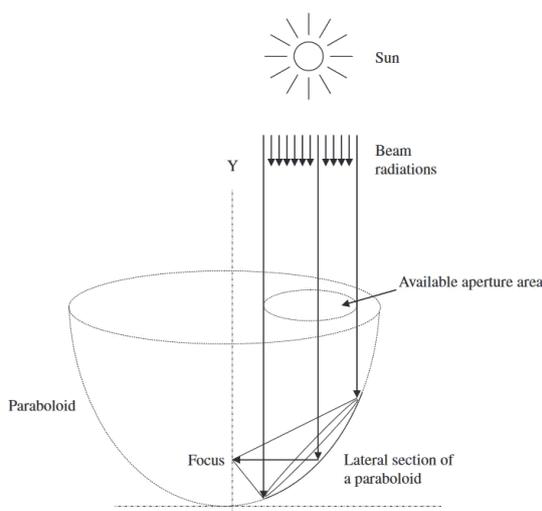


Figure I-43 : Schéma de la construction d'un concentrateur Scheffler [100].

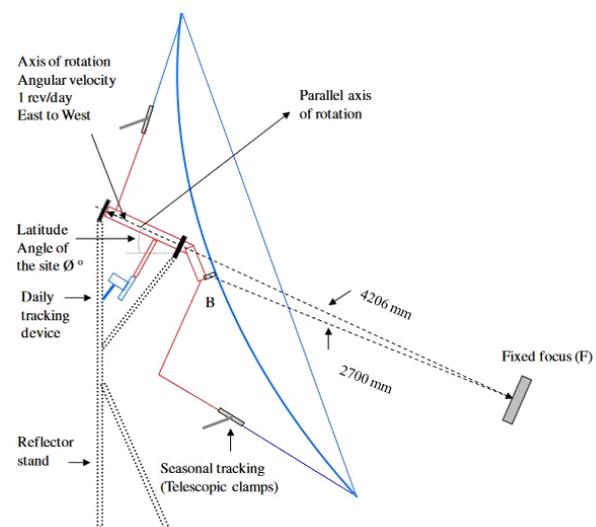


Figure I-44 : Schéma technique d'un Scheffler avec structure porteuse et mécanisme de tracking [100].

L'intérêt d'avoir un foyer déporté est que l'utilisation de l'énergie concentrée peut se faire en intérieur tout en ayant le concentrateur en extérieur. Par exemple, Schapers a suivi une coopérative de femmes chiliennes qui ont changé de source de chaleur en partant de brûleurs à gaz pour aller vers 6 Schefflers de 10 m² afin de produire du sirop d'agave. Les Scheffler ont donc pu être placés à l'extérieur et les cuisines en intérieur. Son étude a montré que lors de journées ensoleillées la coopérative est en capacité de produire un aguamiel de qualité similaire

à celui réalisé avec le gaz en quantité (250 L). De plus, les économies faites sur le gaz leur ont permis de rembourser les concentrateurs [101]. Müller a montré que l'utilisation d'un Scheffler de 8 m² permettait de produire du pain dans un four communautaire en Argentine. Le four était rempli de pierres chauffées par le concentrateur, ce qui a permis d'atteindre 360 °C en environ 2 h et de produire 60 kg de pain en 5-6 h de fonctionnement [102]. Finalement, Scheffler a montré que ce type de concentrateur permettait de très hautes températures puisqu'il a réalisé un crématorium solaire en Inde. Le Scheffler utilisé mesurait 3,4 m² pour une cible de 8 cm de diamètre ce qui faisait un ratio de concentration d'environ 670. La chambre de crémation est montée aux alentours de 900 °C et a brûlé 4 kg de viande de chèvre en 35 min [103].

I.3.1.4. Métallurgie solaire

L'utilisation du solaire à concentration dans la production de matériaux a été étudiée de nombreuses fois comme pour la production de silicium, aluminium, zinc et céramique [104]. Kováčik *et al.* ont étudié, avec succès, la possibilité d'utiliser la concentration solaire dans la métallurgie du titane [105]. Pour ce qui est de la production de fer ou d'acier, peu d'études ont été réalisées. Steinfeld et Fletcher ont étudié en 1991 la réduction carbo-thermique d'hématite sous flux solaire [106]. Plusieurs expérimentations ont été menées pendant différents temps : 10, 30, 45 min et 1 h, à plusieurs températures, avec un mélange d'hématite et de carbone sous une atmosphère d'argon. Ils ont observé la réduction de l'oxyde et atteint un taux maximum de réduction entre 1580 °C et 1730 °C avec une valeur de 78%. Ils ont également observé la formation de cémentite (Fe₃C) [106]. En 1993, Steinfeld *et al.* ont étudié la réduction de magnétite en fer sous un flux solaire maximal de 200-400 W/cm² et dans une atmosphère de méthane (10 %_{vol}) et d'argon [107]. Leurs réductions ont été réalisées sur 10 g d'un mélange de poudre de magnétite et de silice séchée. Leurs résultats ont montré une cinétique de réduction plus lente lors de la réaction wuestite vers fer que lors de la réaction magnétite vers wuestite. Un taux de fer maximal de 68% a été atteint à 1000 °C après 15 min de réduction sous flux de 1 NL/min de gaz, le reste de l'échantillon étant de la wuestite. Leur étude a aussi montré la production d'hydrogène lors de la réaction [107]. Plus tard, Mochón *et al.* ont réalisé des réductions de mélange de poudre d'hématite pure, de manganèse pur et de carbone pur sous atmosphère ambiante [108]. Les expérimentations ont été réalisées à Odeillo en France sur le site du laboratoire PROMES, sur un concentrateur vertical décrit Figure I-45. Le concentrateur est similaire à celui d'Almeria présenté précédemment, puisqu'il est composé d'un héliostat qui traque le soleil et qui renvoie les rayons vers une parabole qui, elle, va concentrer les rayons sur l'échantillon, offrant un ratio de concentration d'environ 10000. Les résultats montrent des températures maximales de 1400 °C environ sous une irradiance de 1030 W/m². Cependant, étant donné que la réduction a été faite sous atmosphère ambiante, les taux de réduction atteints sont faibles puisque le plus haut pourcentage de fer mesuré est 6%. La formation de cémentite et d'autres composés (FeMn₃, FeMn₂, MnFe₂O₄, Mn₂SiO₄, (FeMn)₂SiO₄) a été observée [108].

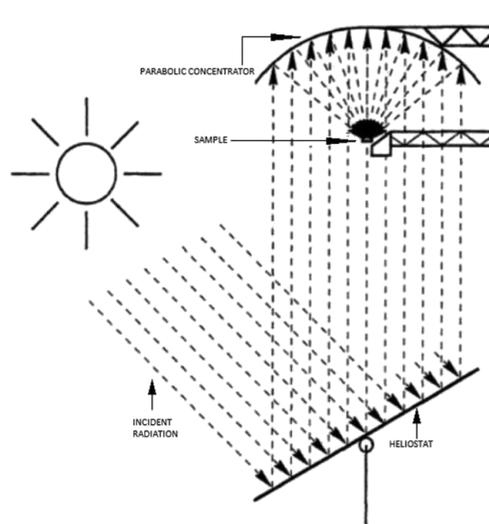


Figure I-45 : Schéma d'un concentrateur solaire vertical du laboratoire PROMES à Odeillo, France [108].

D'autres essais ont été réalisés à Odeillo comme ceux par Fernández-González *et al.* en 2018, qui ont réalisé trois expérimentations sur du minerai de fer [104]. D'abord la question de l'agglomération de minerai a été étudiée en réalisant un mélange de charbon et minerai placé sous le flux solaire. Cette première étude n'a pas été concluante en raison de la fusion du haut du mélange qui a empêché l'agglomération du reste de l'échantillon. Ensuite, une réduction à l'état liquide a été tentée en mélangeant des poudres micrométriques d'hématite pure et de carbone pur dans un creuset placé sous le flux solaire et sous atmosphère ambiante. Comme précédemment, les taux de réduction sont faibles puisque le pourcentage de fer le plus haut atteint est de 5,6%. De la même manière que pour Mochón *et al.* la présence d'air a fortement réduit la performance de la réduction puisqu'une partie du carbone présent a été transformé en CO_2 en réagissant avec de l'air. Finalement, la réduction de l'aggloméré de fer avec du charbon a été testée. L'aggloméré et le charbon ont été placés en couche successives pour simuler une mise en œuvre industrielle. Malheureusement, comme précédemment, la partie supérieure de l'échantillon a fondu ce qui a empêché la réduction du reste de l'échantillon. Malgré la fusion, la réduction a été plus efficace puisque 29,7% de fer réduit ont été obtenus au maximum [109]. Par ailleurs, Ruiz-Bustanza *et al.* ont étudié le recyclage de déchets de la production d'acier (notamment du calcaire de laminoir) sous forme de disques pour obtenir de la magnétite pure. Les expérimentations ont été réalisées sur un concentrateur solaire dans un réacteur à lit fluidisé à Almeria en Espagne, à des températures de 750 °C pendant 40 min et sous une atmosphère de H_2/N_2 à 5%_{vol} et 95%_{vol}. Leurs résultats montrent la réduction partielle des déchets en magnétite ce qui pourrait être une solution pour recycler les déchets de la production d'acier en matière première du procédé de frittage [110].

Il est possible de remarquer que lors de la tentative de réduction de minerai en utilisant un flux solaire concentré, seule l'utilisation de réducteur carboné (charbon et méthane) a été étudiée, et dans une atmosphère composée d'air ambiant.

Seuls Li *et al.* ont essayé de combiner l'utilisation d'un réducteur décarboné et du solaire à concentration en 2021. En effet, ils ont réalisé la réduction de 500 g de poudre dans un lit fluidisé d'hydrogène placé sous un flux solaire concentré pouvant permettre des températures

de 500-600 °C. De plus, il est important de noter que le lit est vibrant pour permettre l'agitation de la poudre d'hématite : les fréquences de vibration vont jusqu'à 47,7 Hz maximum. La vitesse superficielle de l'hydrogène était de 0,01 m/s. Leurs résultats montrent qu'en 50 min, il est possible d'atteindre 98% de réduction quand la vibration était de 45 Hz et 90% avec une fréquence de vibration 20 Hz [111]. Ceci montre clairement que la réduction solaire avec un réacteur décarboné est possible avec des durées et des rendements compatibles avec les exigences des procédés industriels actuels.

Par ailleurs, une source d'hydrogène est l'ammoniac (NH₃), et cette dernière peut être biosourcée à partir d'urée. Dans la littérature, aucune étude d'utilisation d'ammoniac pour la réduction minérale sous flux solaire n'a été trouvée. Ce sera donc une des pistes explorées dans ce travail. En amont, la prochaine partie aura pour but de présenter la production actuelle d'ammoniac, une solution de production alternative et les études déjà réalisées pour la réduction sous ammoniac.

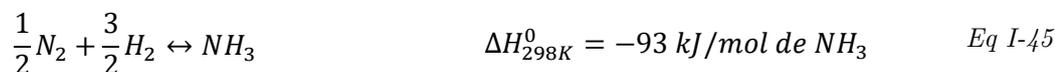
I.3.2. Ammoniac comme réducteur

L'ammoniac (NH₃) est un composé qui contient beaucoup d'hydrogène (17,6 %_{masse}) et a de plus une forte densité énergétique, (4,32 kWh/L à l'état gazeux), ce qui est environ le double de l'hydrogène liquide [112], [113]. Il est aussi important de noter que l'ammoniac est facilement stockable à 1 MPa et que sa température d'ébullition est de -33 °C contre -253 °C pour l'hydrogène, ce qui en fait un produit bien plus facile à transporter et à stocker [113]. Pour ces raisons, son utilisation comme source d'hydrogène et réducteur a déjà été considéré et son test en tant que réducteur pour la métallurgie solaire sera étudié au cours de cette thèse. La production d'ammoniac est possible par plusieurs voies mais le procédé majoritairement utilisé est le procédé Haber-Bosch (pour 96%) [114].

I.3.2.1. La production d'ammoniac

I.3.2.1.1. Le procédé Haber-Bosch

Le procédé Haber-Bosch a été mis en place à une échelle industrielle en 1913 et reste aujourd'hui le procédé le plus utilisé pour produire de l'ammoniac [115]. Ce procédé est basé sur l'Eq I-45 et est typiquement réalisé à des températures de 400 à 650 °C et à des pressions aux alentours de 100-400 bar [112], [115].



On voit donc que la production d'ammoniac dépend directement de celle d'hydrogène. D'après l'agence internationale de l'énergie, en 2020, 72% de l'ammoniac produit dépend de vaporeformage du méthane (Cf. partie I.2.1.1) et 26% de la gazéification du charbon (Cf. partie I.2.1.2) [115]. La Figure I-46 présente un schéma du procédé, dans lequel il est possible de distinguer deux parties : la production d'hydrogène et la production d'ammoniac. Ici, la production d'hydrogène est réalisée par vaporeformage de méthane (partie supérieure). L'hydrogène produit est ensuite comprimé et fourni au réacteur Haber-Bosch, où il réagit avec l'azote selon Eq I-45, généralement en présence d'un catalyseur ferreux (magnétite, wuestite). En sortie du réacteur, l'ammoniac est récupéré par condensation puisque la température de liquéfaction de l'ammoniac est bien plus élevée que pour l'azote ou l'hydrogène, et les impuretés (méthane, argon) sont purgées. Ensuite, une boucle de recyclage est mise en place puisque la

conversion du réacteur Haber-Bosch est faible : 15% [114]. L'azote, lui, est produit par différentes voies : soit par distillation d'air liquéfié soit par séparation d'air gazeux [116]. Une unité de séparation cryogénique est principalement composée d'un compresseur d'air et d'un appareil de purification qui permet de retirer les impuretés de l'air (eau, dioxyde de carbone, hydrocarbures etc...). En sortie de ce pré-traitement, l'air pur sous pression est refroidi à température cryogénique et est envoyé dans une colonne de distillation où l'oxygène, l'azote, et l'argon sont séparés par distillation étagée puis sont stockés [117]. Pour la séparation en phase gazeuse, deux voies sont possibles : soit par le procédé PSA, qui offre des puretés allant de 95% à 99,999% (expliqué en partie I.2.1.1), soit grâce à des systèmes membranaires qui utilisent la perméation sélective ou l'affinité ionique pour retenir l'oxygène et les impuretés de l'air. Cela permet de produire de l'azote d'une pureté de 95% à 99,5%, et parfois, 99,9% [116]. D'un point de vue énergétique, le procédé Haber-Bosch est énergivore puisqu'environ 30 GJ/t de NH_3 sont nécessaires au total, même si la chaleur résiduelle du procédé de production d'hydrogène est utilisée pour les étapes de production d'ammoniac [118].

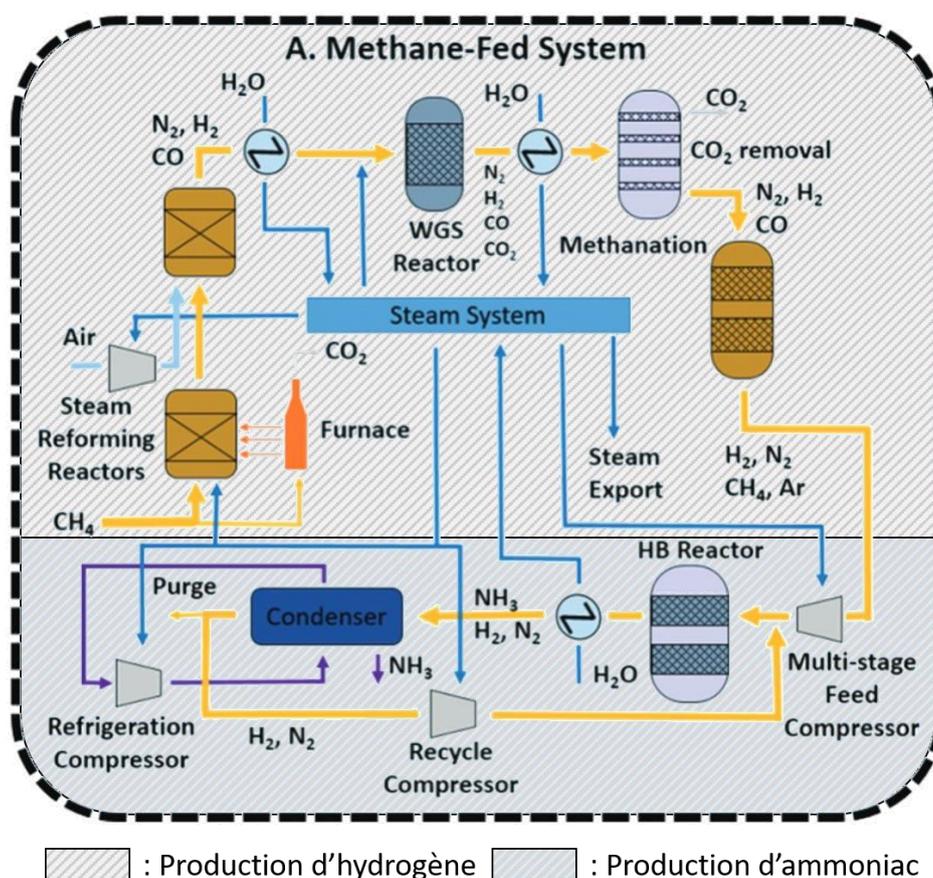


Figure I-46 : Schéma block du procédé de production d'ammoniac avec la production d'hydrogène par vaporeformage [114]

Plusieurs voies de décarbonation du procédé sont étudiées en produisant de l'hydrogène d'électrolyse alimentée par énergie renouvelable notamment, ou par d'autres voies comme les procédés liés à la biomasse : fermentation sombre, bio-photolyse, pyrolyse entre autres (voir Figure I-13, partie I.2.1) [112], [114], [119]. Une autre source, potentiellement biosourcée, est l'urée qui, en se décomposant, libère du NH_3 . Cette décomposition sera l'objet de la prochaine partie.

I.3.2.1.2. La décomposition d'urée

L'urée a pour formule $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ et se trouve naturellement dans l'urine des mammifères. Un humain produit environ 550 L/an d'urine, avec une concentration d'urée proche de 20 g/L, représentant environ 11 kg d'urée par an [120], [121]. La décomposition de l'urée en ammoniac est connue et se déroule en deux temps. Dans un premier temps, l'urée solide se décompose en ammoniac gazeux et en acide isocyanique gazeux. Puis l'acide isocyanique gazeux se décompose en ammoniac gazeux et dioxyde de carbone gazeux en présence d'eau. Les deux étapes sont décrites Eq I-46 et Eq I-47 [122].



En 1998, Isa et Chen ont réalisé des études d'analyses thermogravimétriques et de spectrométrie de masse de la décomposition d'urée. D'abord, la décomposition a été observée avant la fonte de l'urée ($\approx 132,5 \text{ }^\circ\text{C}$) de manière très faible (0,01%) et se déroule ensuite en quatre étapes bien plus significatives avec les pertes de masse suivantes : 66%, 13%, 18% et 3%. Celles-ci révèlent un mécanisme bien plus complexe qui donne lieu à des réactions secondaires. La décomposition d'urée en ammoniac et acide isocyanique selon Eq I-46 a effectivement été observée en parallèle de la formation de sous-produits (biuret, acide cyanurique, amméline et autres) [123]. Schaber *et al.* ont étudié la décomposition thermique d'urée sèche dans un réacteur ouvert, donc en présence d'oxygène. L'objectif de leur étude était d'observer avec plus de précision les sous-produits de la décomposition. Au même titre que Chen et Isa, la fonte a été observée vers 133 $^\circ\text{C}$ et la décomposition a révélé 4 paliers de température :

- Première partie - températures ambiantes $\rightarrow 190 \text{ }^\circ\text{C}$: La décomposition d'urée selon Eq I-46 a été observée en passant par le cyanate d'ammonium ($\text{NH}_4^+ \text{CO}^-$) entre 150 $^\circ\text{C}$ et 160 $^\circ\text{C}$. A 160 $^\circ\text{C}$ le HNCO formé commence à réagir avec l'urée pour produire du biuret ($\text{H}_2\text{N-CO-NH-CO-NH}_2$). Ensuite, aux alentours de 175 $^\circ\text{C}$, l'acide cyanurique ($\text{CYA} - \text{C}_3\text{N}_3(\text{OH})_3$) se forme, accompagné d'un dégagement d'ammoniac. A noter que cet acide peut aussi se former si une pression critique d'acide isocyanique est atteinte, notamment en présence d'une surface ferreuse. Finalement, toujours à partir de 175 $^\circ\text{C}$, de l'ammélide peut également être produite par deux voies : soit par la réaction d'urée ou de biuret avec de l'acide isocyanique, soit par la réaction d'acide cyanurique avec de l'ammoniac. Cette deuxième voie est cependant peu probable ici puisqu'elle n'apparaît qu'à hautes pressions ou à des températures supérieures à 300 $^\circ\text{C}$ [124].
- Deuxième partie - 190 $^\circ\text{C} \rightarrow 250 \text{ }^\circ\text{C}$: à 193 $^\circ\text{C}$ le biuret fond et se décompose en reformant de l'acide isocyanique et de l'urée. Des réactions d'autocondensation (avec perte d'une molécule d'eau) accompagnent cette décomposition et peuvent produire les acides cyanurique et isocyanique, de l'ammélide, de l'ammoniac et de l'eau bien sûr. A partir de 210 $^\circ\text{C}$ il semblerait que de l'ammélide soit produite à partir d'une réaction d'amination de l'ammélide (nécessite une haute température ou pression) ou par la réaction directe entre du biuret et l'acide isocyanique, produisant aussi de l'eau. Ensuite, à 250 $^\circ\text{C}$, de la mélamine a été détectée dans le résidu. Ici encore, lorsque de hautes températures ou pressions sont atteintes, l'amination de l'amméline peut conduire à la production de mélanine. Selon Schaber *et al.*, les conditions de réacteur ouvert favorisent la réaction de trimérisation de la cyanamide. La cyanamide peut

provenir de la déshydratation de l'urée, de la réaction de l'acide isocyanique avec de l'ammoniac (accompagné de la production d'eau) ou de la décomposition du cyanate d'ammonium. A noter qu'entre 225 °C et 250 °C, la perte de masse mesurée est faible [124].

- Troisième partie - 250 °C → 360 °C : Avant 260 °C les composants majoritaires (acide cyanurique, ammélide et ammélide) sont stables : un plateau est observé suivi d'une forte perte de masse après 260 °C. Ceci est dû en partie à la décomposition d'acide cyanurique en acide isocyanique jusqu'à 275 °C. De plus l'ammélide, la mélamine, le biuret, et l'urée continuent de se décomposer alors que l'amméline commence à apparaître. Ensuite, à 320 °C l'urée, le biuret et la mélamine ne sont plus détectables. Entre 255 °C et 350 °C, une forte présence d'HNCO est observée ainsi que de l'eau, du dioxyde de carbone et de l'ammoniac. Le premier vient de la décomposition de l'acide cyanurique et les trois derniers peuvent venir de la pyrolyse de l'acide isocyanique. On peut noter que l'amméline et l'ammélide se subliment à partir de 310 °C et 340 °C, respectivement. Ensuite, après 350 °C, peu de changements sont observés.
- Quatrième partie - 360 °C et plus : Au-delà de 360 °C la perte de masse continue mais faiblement, traduisant la continuation de la décomposition de CYA entre 375 °C et 380 °C, la sublimation et/ou décomposition de l'ammélide et de l'amméline restante qui se termine à environ 600 °C et 700 °C respectivement [124].

Ces résultats ont été reproduits et sont appuyés par une étude plus récente (2010) menée par Eichelbaum *et al.* Ces derniers ont également étudié la décomposition thermique de l'urée sèche, leurs résultats étant résumés Figure I-47. Les températures et les mécanismes observés sont sensiblement les mêmes, bien que les réactions n'aient pas été réalisées dans un réacteur ouvert. Cependant, quelques différences sont à noter, notamment des phénomènes d'amination et la présence de melem en fin de réaction qui se transforme en acide isocyanique et cyanogène [125].

Plusieurs équipes se sont intéressées à la cinétique de réduction d'urée. Notamment, Lundström *et al.* ont réalisé des thermolyses d'urée soit imprégnée sur un monolithe de cordiérite (céramique) (immersion du monolithe dans une solution aqueuse d'urée à 32,5% massique puis séchage), soit en utilisant des granulés d'urée solides dans un creuset en silice. Dans les deux cas la décomposition est réalisée sous flux d'azote. Les vitesses de montée en température étaient de 10 K/min ou 20 K/min et ce entre 25 et 760 °C. Leurs résultats montrent une production d'ammoniac plus élevée lorsque 20 K/min sont utilisés plutôt que 10 K/min. Le pic de production se situe aux alentours de 200 °C lorsque les expériences sont réalisées sous flux et se décale vers 250 °C lorsque les expériences sont réalisées comme dans un réacteur ouvert. Dans ces mêmes conditions, le suivi de la production d'HNCO montre deux pics à 250 °C et 400 °C environ. Le premier pic est dû à un transfert thermique moins efficace que dans les expérimentations sous flux ; le second montre que les sous-produits de réduction se décomposent en HNCO. Au niveau des taux récupération varie entre 83% et 91% lors des réactions à 10 K/min et entre 99% et 104% lors des réactions à 20 K/min [126]. Dans une étude plus récente, Wang *et al.* ont étudié l'influence de la part d'oxygène dans l'atmosphère de la réaction sur le rendement et les produits formés. Leurs analyses de calorimétrie différentielle à balayage et de thermogravimétrie couplée à de la spectrométrie de masse montrent des résultats similaires à Lundström *et al.* et confirment le mécanisme décrit par

Schaber *et al.* et Eichelbaum *et al.*, c'est-à-dire une décomposition en quatre étapes avec une première étape de décomposition majoritaire lors de la première étape (plus de 60% de perte de masse) avec une forte production d'ammoniac. De plus, comme dans l'étude de Lundström *et al.*, la quantité d'ammoniac produite est plus importante avec une rampe en température plus élevée (10 K/min plutôt que 5 K/min). Dans le cas de Wang *et al.*, le pourcentage de perte de masse de chaque étape de décomposition est légèrement différent de ceux montrés par Schaber *et al.* : 63,6%, 22,4%, 11,6% et 2,4% pour Wang *et al.* contre 66%, 13%, 18% et 3% pour Schaber *et al.* Par ailleurs, les températures sont similaires ainsi que les sous-produits identifiés. Ils ont également remarqué la production de protoxyde d'azote (N_2O) et de monoxyde de carbone (CO) dans des quantités bien plus faibles que celle d'ammoniac. Finalement, Wang *et al.* ont montré que la présence d'oxygène dans l'atmosphère inhibait la production d'ammoniac et favorisait celle de CO et N_2O [127].

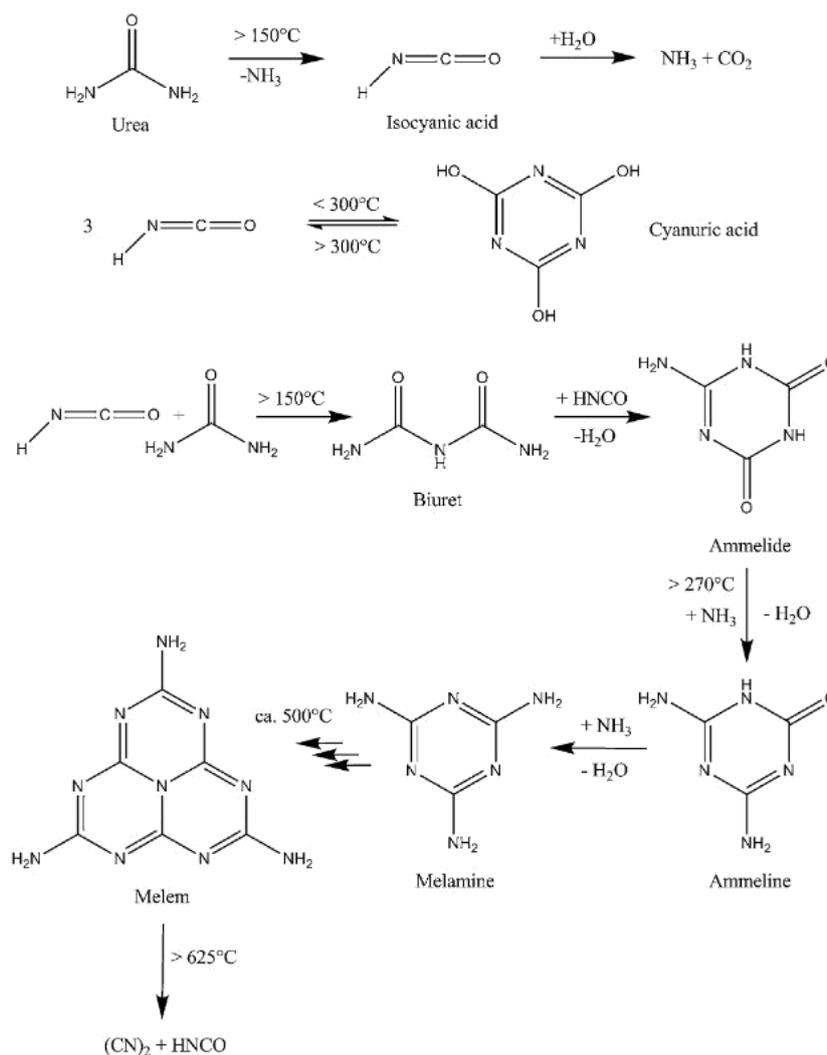


Figure I-47 : Schéma des différentes réactions du processus de décomposition thermique d'urée sèche [125].

Lorsqu'une solution d'urée et d'eau est décomposée, plusieurs réactions successives se produisent. D'abord, l'eau s'évapore avant le début de la décomposition d'urée, créant de la vapeur. Ensuite, la réaction Eq I-46 se produit. La différence est qu'en simultanée de la

décomposition, l'hydrolyse de l'acide isocyanique a lieu selon Eq I-47, puisque de la vapeur est présente [122]. Mahalik *et al.* ont réalisé une étude cinétique d'hydrolyse d'urée pour différentes températures relativement faibles (120 °C-160 °C) et pour différentes concentrations (7 % massique à 40% massique d'urée), avec une agitation plus ou moins rapide ou sans agitation. L'influence des paramètres a été observée en mesurant la concentration avant et après la réaction. Leurs résultats montrent une forte dépendance de la conversion à la température ainsi qu'au temps d'hydrolyse. En effet, pour une même concentration, 7 % par exemple, la conversion augmente de 2% à 25% en passant de 120 °C à 160 °C, ce qui est logique au vu de la nature endothermique de la réaction d'hydrolyse d'urée. De plus, la concentration finale de la solution en urée diminue franchement avec l'augmentation du temps d'hydrolyse. Finalement, la conversion augmente entre les essais sans agitation et ceux avec, les mesures montrant aussi que l'agitation augmente la conversion en raison d'un meilleur échange thermique. Cependant, lors de cette étude, seule la diminution de la concentration d'urée est étudiée et aucune information sur la récupération d'ammoniac n'est donnée [128]. Chen *et al.* ont étudié l'hydrolyse d'acide isocyanique avec ou sans catalyseur en mesurant les quantités de produits en sortie de la réaction de décomposition de solution d'urée. Leurs résultats montrent que le HNCO est relativement stable sous forme gazeuse et que sa décomposition en ammoniac – même dans une atmosphère humide – n'est pas bonne sans catalyseur mais peut se produire. Cette observation a été confirmée par Yim *et al.* lors d'une étude de décomposition thermique d'urée [129]. En dépit de ce constat, lors de la première décomposition, plus de 90% de conversion de la solution en NH₃ et HNCO est atteint. Ils ont également montré que la température était un facteur favorisant la décomposition thermique ainsi que l'hydrolyse du HNCO. Finalement, l'utilisation d'un catalyseur, γ -Al₂O₃ ici, augmente drastiquement (facteur 100) le ratio NH₃/HNCO lors de l'hydrolyse [130]. D'autres catalyseurs ont été étudiés comme le Fe- β (Fe-Zeolite) et le TiO₂, par Piazzesi *et al.* et par Lundström *et al.* Les résultats montrent une meilleure performance du TiO₂ comme catalyseur de l'hydrolyse de l'acide isocyanique, suivi du Fe- β , lui-même étant meilleur que γ -Al₂O₃ [131]. Cependant, il a été montré que le Fe- β pouvait permettre d'atteindre 100% de conversion du HNCO à de plus hautes températures (supérieures ou égales à 200 °C) [132]. De plus, lors de leurs expérimentations, Lundström *et al.* ont montré que l'hydrolyse du HNCO empêchait la production de sous-produits de réaction de la décomposition d'urée (biuret, l'acide cyanurique), confirmant ainsi le mécanisme présenté précédemment. La présence d'humidité supplémentaire dans l'atmosphère permet aussi une meilleure transformation de l'acide isocyanique en ammoniac. Les rendements de production, basés sur la quantité d'urée, avec et sans catalyseur sont toujours plus importants en présence d'humidité et sont toujours supérieurs à 100%. En effet, le rendement sans catalyseurs est de 104% montant à 121% avec de l'humidité. Cela veut dire que la quantité d'ammoniac produite est supérieure à celle stoéchiométrique, donc qu'une partie du HNCO produit se décompose. Le meilleur rendement étant pour le Fe- β avec 208% de rendement à sec et 251% avec de l'humidité [131].

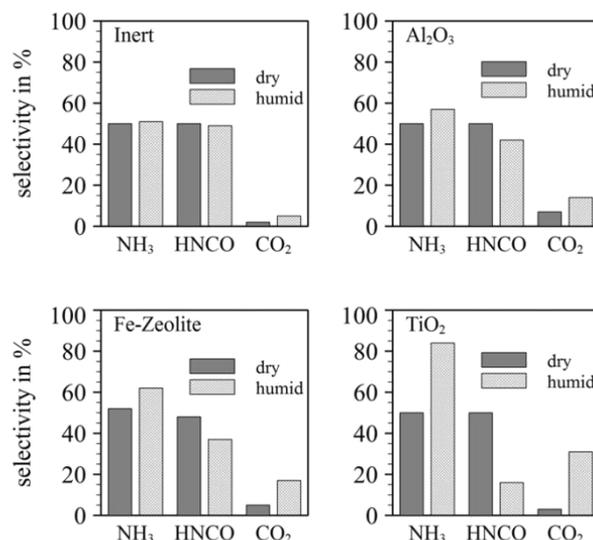


Figure I-48 : Sélectivité chimique de l'ammoniac, de l'acide isocyanique et du dioxyde de carbone lors de la décomposition d'urée dans une atmosphère sèche (gris foncé) ou humide (gris clair) pour différents éléments catalyseurs : Al_2O_3 (en haut à droite), Fe-Zeolite (en bas à gauche) et TiO_2 (en bas à droite) et sans catalyseur (en haut à gauche). Les expérimentations ont été réalisées entre 25 et 500 °C avec une montée à 10 °C/min [131].

Comme expliqué précédemment, l'urine humaine est composée en partie d'urée (20 g/L) qui est riche en ammoniac. De plus l'ammoniac est composé à 17,6%_{masse} d'hydrogène [112], [120]. Donc, une application plus récente est la production d'hydrogène par décomposition de l'urée. Aisin-Mira *et al.* ont étudié cette possibilité en partant d'urine humaine récupérée via séparation à la source. Le procédé se déroule en 3 étapes : 1 - l'adsorption de l'urée sur du charbon actif par immersion, 2 - la décomposition thermique d'urée pour produire l'ammoniac, 3 - la décomposition catalytique de l'ammoniac en hydrogène. L'adsorption est faite avec 0,5 g de charbon actif dans 12,5 mL de solution aqueuse d'urée à différentes concentrations à 30, 45 ou 60 °C. Le mélange a ensuite été mélangé pendant 1 h, filtré et séché à 80 °C. La concentration des solutions d'urée a été mesurée par colorimétrie. Ensuite, la décomposition d'urée s'est faite entre 50 °C et 300 °C montant à 10 °C/min sous un flux d'argon de 50 mL/min. Finalement, la décomposition d'ammoniac est réalisée avec 7%_{masse} de ruthénium en guise de catalyseur. Deux réacteurs en série ont été utilisés : le premier avec 4,5 g de charbon sec saturé et le second avec le catalyseur. Dans un premier temps, une pré-réduction du catalyseur a été réalisée sous flux d'H₂, le premier réacteur étant à température ambiante et le second à 250 °C. Ensuite, sous un flux d'hélium de 4 mL/min, le premier réacteur est monté à 200 °C et le second à 400 °C. Les concentrations en ammoniac et hydrogène ont été mesurées via chromatographie en phase gazeuse. Leurs résultats montrent que l'adsorption est plus performante à basse température et à haute concentration initiale d'urée. La production d'ammoniac a été observée entre 140 °C et 190 °C ; la présence de dioxyde de carbone est mesurée à partir de 150 °C alors que l'acide isocyanique n'est détecté qu'entre 250 °C et 275 °C. Ces résultats montrent une hydrolyse de l'acide isocyanique à environ 160 °C et, probablement, la décomposition d'acide cyanurique ou de biuret à 275 °C pour produire l'acide isocyanique. Leurs rendements de décomposition de l'urée en NH₃ et HNCO, ainsi que du HNCO en NH₃ et CO₂ sont respectivement de 100% et 80%. Finalement, la production d'hydrogène à partir de l'ammoniac récupéré est réalisée avec succès. De plus, Aisin-Mira *et al.* ont été en mesure de réaliser plusieurs cycles d'adsorption avec le même charbon actif sans perdre en performance. Cette observation montre que la désorption d'urée est complète lors des opérations précédentes. Une

étude de cas préalable a été également réalisée avec des données issues du traitement des eaux municipales. Les calculs ont montré que, dans une ville de 160 000 habitants, il était possible de produire 430 kgH₂/jour, en partant du principe que chaque personne produit 1,5 L/jour d'urine concentrée à hauteur de 20 g/L d'urée [133].

Une dernière application, plus rare mais qui met bien en évidence le potentiel de l'urée pour la réduction de certains oxydes métalliques, est son utilisation pour synthétiser des nanoparticules métalliques via un process de réduction/expansion (RES – *Reductive/Expansion Synthesis*). Zea *et al.* ont étudié la synthèse de particules nanométriques et submicroniques de Fe, Ni ou Fe-Ni via RES. Les nanoparticules formées ont été analysées par MEB et TEM équipées d'EDX. De plus, des analyses thermogravimétriques ont été réalisées sur 20 mg de i) nitrate de nickel, ii) d'urée et iii) d'un mélange de nitrate et d'urée. Les précurseurs utilisés sont des nitrates de fer hydratés (Fe(NO₃)₃·9H₂O) et/ou des nitrates de nickel hydratés (Ni(NO₃)₂·6H₂O), qui sont mélangés à de l'urée pure à 99,99%. L'ensemble est mélangé et placé dans un creuset en alumine. La réaction se déroule pendant 180 s environ à 800 °C dans un four à clapet. La synthèse des particules a été réalisée avec succès, des particules entre 50 et 250 nm étant observées au TEM avec la présence de FeNi métallique. Il a été remarqué que les particules étaient composées d'un aggloméré de plus petites particules. Le process étudié se déroule en 3 étapes qui se déroulent probablement simultanément : 1 - Le précurseur métallique se décompose en particule d'oxyde, 2 - Le réducteur (urée) se décompose en gaz réducteur (NH₃), 3 - Le gaz réducteur réduit les particules d'oxyde métallique pour former des particules de métal submicroniques et nanométriques. Le procédé étant rapide et précis, il pourrait être réalisé à une échelle plus importante. Cependant, il faudrait d'abord déterminer les rendements et voir si la consommation d'énergie peut être réduite [134].

Basé sur le même processus, Daniels *et al.* ont étudié la possibilité de produire des petits objets en métal en forçant le frittage de poudres d'oxyde de métal et de métal via une réduction par l'urée. Ce genre d'assemblage est réalisé via des ponts qui se forment entre les particules de métal, conduisant à une pièce avec un volume vide réparti de manière homogène. Les particules utilisées lors des essais étaient un mélange à différents ratios d'oxyde de nickel et de nickel préalablement activé de taille de 44 µm et 5 µm respectivement. L'activation a été réalisée avec 5 mL de peroxyde d'hydrogène pour 1 g de poudre de nickel métallique, l'ensemble étant chauffé à environ 70 °C jusqu'à ce que la réaction soit complète (environ 300 s). Le mélange de poudre est ensuite brièvement broyé avec un mortier et un pilon pour l'homogénéiser. Ensuite, le mélange est mis en forme et placé sur une épaisseur de Grafoil³ lui-même placé sur un creuset d'alumine dont le fond est rempli de 0,5 g d'urée. Il est important de noter que le ratio NiO:urée est maintenu à 1:1, soit 1 mol équivalent de NH₃ pour une mol de NiO (et 1,5 mol de H₂) sans présence d'eau, et 2 mol de NH₃ pour 1 mol de NiO en présence d'eau (et 3 mol de H₂). Une représentation du montage avec le creuset est donnée Figure I-49. La réaction s'opère dans un four à 950 °C pendant 20 min sous flux de N₂. Les analyses comprennent de la diffraction des rayons X, des observations au microscope électronique à balayage, des analyses de spectroscopie dispersive et des mesures de densité et dureté.

³ Grafoil : Superposition de feuilles de graphite, produit commercialisé par NeoGraf solution

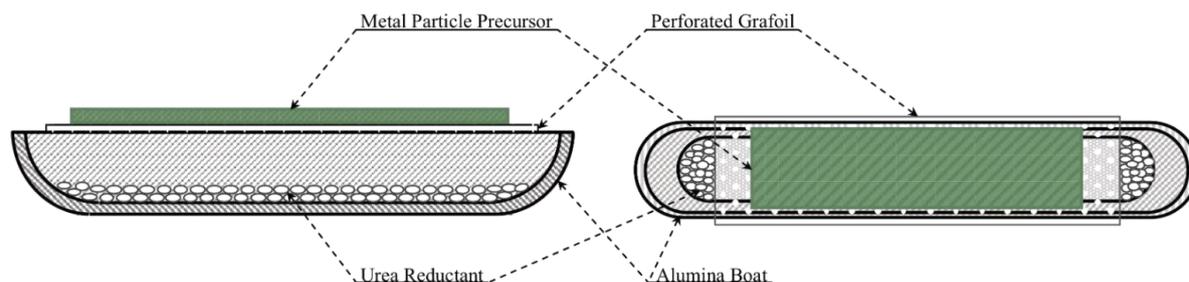


Figure I-49 : Montage du creuset en alumine rempli d'urée utilisée pour la cuisson des particules de fer posées sur une couche perforée de Grafoil.

Les résultats ont montré que seuls les mélanges de précurseurs composés des oxydes et des métaux, NiO et Ni en l'occurrence, ont pu produire des objets qui se soutiennent. Ils montrent aussi que l'urée doit être présente mais en dehors du mélange des précurseurs. Il a également été remarqué que les formes diminuent de volume pour atteindre 75% de la taille initiale environ. Les observations microscopiques ont également mis en évidence des ponts entre, au minimum, deux autres particules et souvent beaucoup plus. Les espaces vides sont inévitables étant donné que l'on part d'un amas de particules. Certains échantillons ont été traités spécifiquement à hautes températures et pressions. Les observations montrent des structures différentes après traitement, avec des zones très denses et des vides beaucoup plus marqués. Au niveau de la dureté, les pièces ont été mesurées à 86 HV en moyenne, alors que des pièces classiques en nickel coulées ont des duretés comprises entre 81 et 90 HV. Les particules d'oxyde sont réduites à 90% après une cuisson et tout est réduit après 2 cuissons. De plus, les pièces sont réalisées à des températures sensiblement plus faibles que dans le procédé classique (environ 1400 °C). Ce procédé a donc plusieurs avantages, comme par exemple le bas prix, la simplicité, la possibilité de produire plusieurs pièces dans un four, la rapidité et la possibilité de travailler de nombreux métaux [135].

L'ensemble de ces procédés montre que la décomposition d'urée est utilisée pour différentes raisons et surtout pour sa composition riche en ammoniac. L'ammoniac est ensuite utilisé soit pour produire de l'hydrogène soit pour des applications de réduction d'oxydes métalliques. Maintenant que les différentes sources d'ammoniac ont été présentées, nous allons maintenant traiter de la réduction d'oxydes de fer avec de l'ammoniac comme réducteur.

I.3.2.2. Aspects thermodynamiques de la réduction d'oxydes de fer par NH_3

Sur la Figure I-50, il est montré la variation de l'énergie libre de Gibbs pour la réduction du Fe_2O_3 sous ammoniac, sous hydrogène et pour la décomposition de l'ammoniac en hydrogène. Sur cette figure, il est clair que la réduction à l'ammoniac a un avantage thermodynamique sur la réduction à l'hydrogène. De plus, il est possible de voir que la décomposition de l'ammoniac en hydrogène et azote est réalisable à basse température. Hosokai *et al.* ont étudié la réduction d'hématite pure à 99,9% sous un flux de 200 mL/min d'azote et d'ammoniac à 5%_{vol} sur un lit fixe chauffé à 10 °C/min jusqu'à 450 °C, 600 °C et 700 °C [136]. Une fois la réaction finie, le mélange gazeux est remplacé par de l'argon pur jusqu'à ce que l'échantillon soit froid. Le taux de réduction est calculé à partir du changement en masse de l'échantillon. Les phases ont été identifiées par diffractométrie des rayons X et les gaz en sortie de la réaction ont été analysés par spectrométrie de masse. Leurs résultats montrent que la

réduction débute aux alentours de 430 °C et peut atteindre 99% à 600 °C et 100% à 700 °C [136]. Dans une autre étude, Yasuda *et al.* ont réalisé la réduction de minerai de fer sous ammoniac et argon dans le même dispositif expérimental que Hosokai *et al.* et ont observé que la cinétique de réduction augmentait avec la proportion d'ammoniac et ce jusqu'à 20%_{vol} d'ammoniac après quoi il y a un plateau [137]. De plus, en comparaison, ils ont observé que la réduction à l'ammoniac était plus lente que celle sous hydrogène [137]. Aucune explication n'est donnée dans l'article, mais il est possible de faire l'hypothèse que cela est dû à la diffusion de l'hydrogène qui est meilleure que celle de l'ammoniac dans l'échantillon.

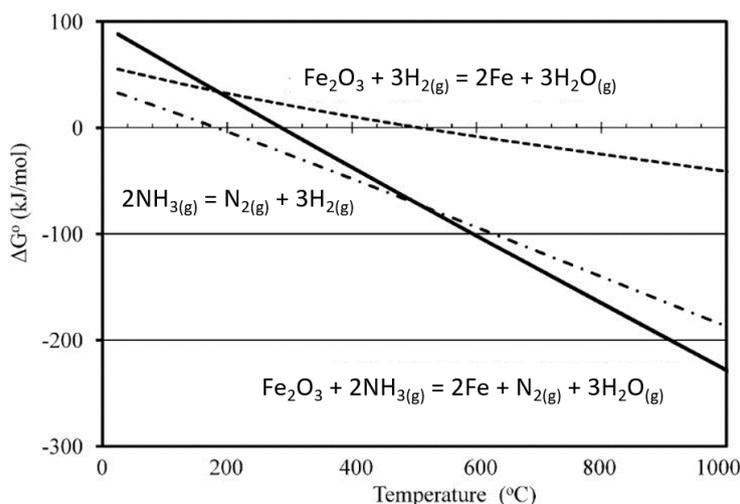


Figure I-50: Variation d'énergie libre de Gibbs en fonction de la température pour la réduction d'hématite sous hydrogène ou ammoniac ainsi que pour la décomposition d'ammoniac [136].

Plus récemment, en 2022, Iwamoto *et al.* ont étudié la réduction de minerais plus ou moins humides (certains séchés sous vide) broyés à des dimensions caractéristiques comprises entre 0,6 et 0,3 mm [138]. Pour la réduction, 0,3 g de minerai sont placés sur un lit fixe de 0,04 g de mousse de quartz sous un flux de 200 mL/min de gaz composé de 20% d'ammoniac et 80% d'argon. Ensuite, le réacteur est monté à 650, 700 ou 750 °C en une minute et est maintenu à ces températures pendant 5 à 30 min. A la fin de la réaction, l'échantillon est trempé sous un flux important de plus de 4000 mL/min d'argon pur à 350 °C puis est refroidi sous 200 mL/min d'argon. Les gaz d'échappement sont analysés par spectrométrie de masse, et les échantillons par diffractométrie des rayons X et microscopie électronique à balayage. Dans le cas du minerai humide, la réduction atteint 67% en 10 min, 96% en 20 min à 700 °C et n'augmente pas jusqu'à 30 min. Pour le minerai moins humide, la réduction augmente avec le temps, passant de 51% à 65% puis à 82% pour 10, 20 et 30 min de réduction respectivement. Ceci est notamment en raison de la formation de pores lors de la déshydratation qui permet une meilleure réduction [138].

I.3.2.3. Similarité avec la réduction à l'hydrogène

Comme montré sur la Figure I-50 et dans la partie I.3.2.1.2, l'ammoniac peut se décomposer en hydrogène et azote aux alentours 300 °C. Cependant, d'après les analyses de gaz d'Hosokai *et al.*, l'hydrogène n'est pas observé de manière significative avant 500 °C, ce qui montre que le début de la réduction est réalisé avec l'ammoniac seulement. Ensuite, aux alentours de 530 °C, la quantité d'hydrogène diminue nettement et concorde avec la production

de vapeur, ce qui montre le début de la réduction à l'hydrogène [136]. Ces résultats montrent donc que la réduction directe à l'ammoniac selon Eq I-48 est réalisée avant 530 °C environ et qu'ensuite, c'est une réduction « indirecte » à l'ammoniac via sa décomposition en hydrogène qui suit le mécanisme expliqué partie I.2.



Les résultats de Yasuda *et al.* concordent avec ceux de Hosokai *et al.* puisqu'aucune trace d'hydrogène en sortie de réaction n'a été observée avant 590 °C, ce qui implique i) soit que la réaction se produit directement avec l'ammoniac, ii) soit que la cinétique de décomposition de l'ammoniac à ces températures est plus faible que celle de la réduction de l'hématite par l'hydrogène [137]. De plus, d'après Yasuda *et al.*, au-dessus de 590 °C, de forts changements dans les gaz d'échappement sont notés, avec une augmentation notable de la production d'azote et d'hydrogène, indiquant que la température était plus propice à la décomposition de l'ammoniac. De ce fait, ils ont conclu que la réduction de la magnétite en fer était majoritairement réalisée par l'hydrogène [137]. De plus, Iwamoto *et al.* ont observé une décomposition d'ammoniac en hydrogène et azote sans aucun minerai dans le réacteur. Ce résultat appuie le fait que la réduction à l'ammoniac est en réalité très proche de celle à l'hydrogène, notamment parce que la décomposition de l'ammoniac en hydrogène entraîne une grande proportion de ce dernier dans l'atmosphère de réduction [138]. Cependant, ils notent aussi que la réaction avec l'ammoniac et sa décomposition sont réalisées simultanément. Finalement, comme pour la réduction sous hydrogène et comme le montre la Figure I-51, Iwamoto *et al.* ont remarqué que la cinétique de réduction était fonction de la température [138].

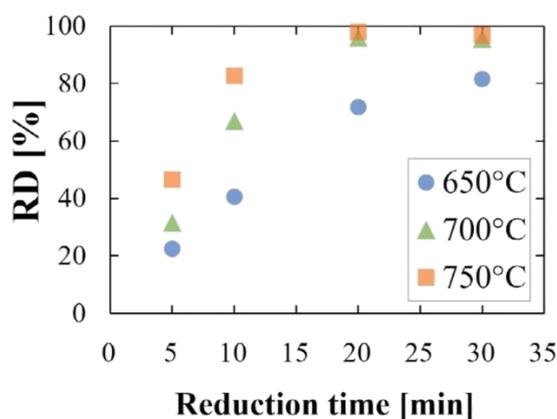


Figure I-51 : Evolution du taux de réduction (RD) défini comme le rapport entre la masse d'oxygène perdue sur la masse maximale pouvant être théoriquement perdue en fonction du temps et pour différentes températures : 650 °C - rond bleu, 700 °C - triangle vert et 750 °C - carré orange [138].

I.3.2.4. Formation de nitrures de fer

Lors de la réduction d'oxyde de fer par de l'ammoniac, des phases de nitrures de fer (Fe_3N , Fe_4N) ont été observées. Les nitrures de fer sont bien connus dans le monde de la sidérurgie. Ils sont produits par nitruration afin d'améliorer la tenue à la fatigue des aciers ainsi que leur résistance à la corrosion et à l'usure [139]. La présence de nitrure de fer tel que Fe_3N et Fe_4N est généralement observée sur une épaisseur d'environ quelques dizaines de micromètres mais, suite à de la diffusion, le Fe_4N peut aussi être retrouvé sur des épaisseurs

allant jusqu'à quelques centaines de micromètres [139]. Ces phases sont instables à des températures supérieures à environ 680 °C et leur obtention nécessite une composition précise en atome d'azote, comme le montre le diagramme de phase Fe-N Figure I-52. Dans notre cas, il est plus intéressant d'observer le diagramme de Lehrer présenté Figure I-53 qui présente les phases obtenues lorsque l'on expose le fer à une atmosphère d'ammoniac [139]. Ce diagramme montre clairement que, plus la température est élevée, moins la quantité d'ammoniac nécessaire à la formation des nitrures est importante. Cependant, à partir de 700 °C, on remarque un plateau de la phase $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ et donc que la température n'influe plus sur la formation de nitrure de fer. Ceci implique que pour des températures supérieures à 700 °C, la quantité minimum de NH_3 nécessaire pour former des nitrures reste à 6%. [139].

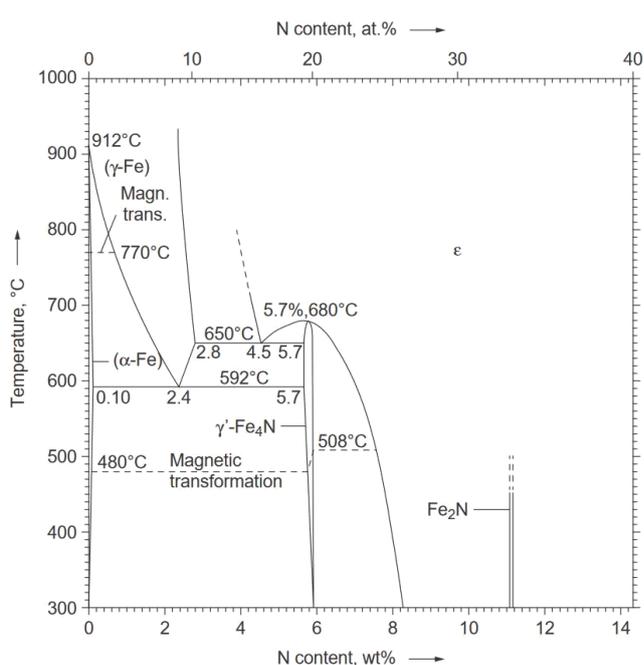


Figure I-52 : Diagramme d'équilibre Fe-N.

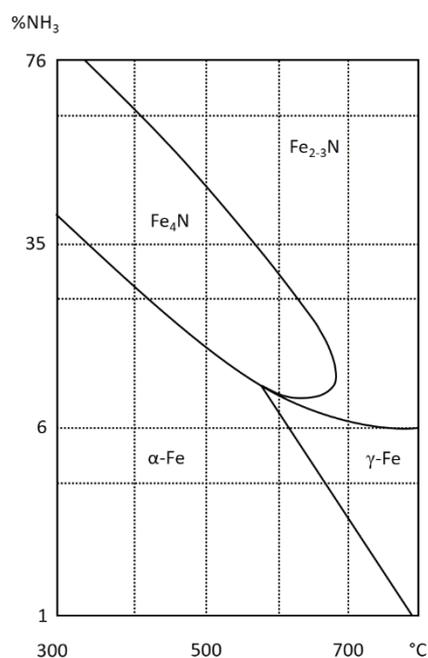


Figure I-53 : Diagramme de Lehrer des phases de fer et nitrure de fer en fonction de la température et du pourcentage d'ammoniac dans une atmosphère $\text{NH}_3\text{-H}_2$.

La nitruration serait due à la réaction entre le fer et l'azote atomique (Eq I-49) présent lors de la décomposition de l'ammoniac (Eq I-50). Cependant, une fois formées, les molécules de N_2 ne contribuent pas à la nitruration car les liaisons azote-azote sont très stables (945 kJ/mol) [137], [139]. Ces phases ont déjà été observées lors de la réduction de minerai de fer par l'ammoniac. En effet, les analyses de diffractométrie de Hosokai *et al.* ont noté la présence de nitrure de fer (Fe_4N) à 450 °C même après près de 3 h de réduction. Cependant, leur disparition est observée à 600 °C [136]. Yasuda *et al.* ont également observé la présence des nitrures : leurs résultats de diffractométrie *in-situ* montrent que le fer produit lors de la réduction est directement sous forme de nitrure de fer Fe_3N , qui se décompose avec l'augmentation de la température en Fe_4N et Fe selon Eq I-51. L'hématite est réduite en magnétite à 500 °C et l'on observe un faible taux de Fe_3N . Ensuite, la phase de nitrure de fer augmente en même temps que la phase de magnétite diminue ; aux alentours de 700 °C les diffractogrammes montrent l'apparition du Fe_4N [137].



Au même titre que Yasuda *et al.*, Iwamoto *et al.* ont remarqué que la quantité de Fe_4N et de Fe augmente avec le temps de réduction et que la quantité d'azote dans le fer diminue. Ils ont également remarqué qu'aux températures les plus hautes (700 °C et 750 °C) les nitrures se décomposent, comme le montre la Figure I-54 [138]. Iwamoto *et al.* ont également étudié la section d'un morceau de minerai d'environ 350 μm de large au microscope électronique en réalisant de la spectroscopie à énergie dispersive. Les mesures montrent que la présence d'atomes d'azote est plus forte sur les bords du morceau qu'au cœur [138]. Cette observation fait écho au fait que la réduction de minerai de fer débute par la surface extérieure de l'échantillon étant donné que sa porosité est un élément important pour réussir la réduction.

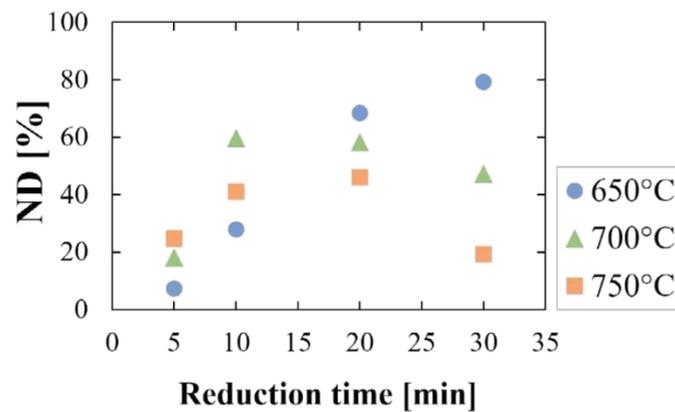


Figure I-54 : Evolution du taux de nitruration défini comme le ratio de la quantité de Fe dans les nitrures et de la quantité de Fe total en fonction du temps pour différentes températures (650 °C - rond bleu, 700 °C - triangle vert et 750 °C - carré orange) [138].

I.3.3. Conclusion

La précédente partie a présenté les deux aspects explorés par ce travail. D'abord le principe du solaire à concentration a été présenté ainsi que son utilisation pour des applications thermochimiques. Il a été montré qu'une température optimale correspondant à la meilleure transmission de l'énergie thermique récupérée par le concentrateur solaire à la réaction chimique qui est la réduction de minerais fer ici. Il a également été montré que ce rendement maximal est directement dépendant du rendement de Carnot, de la capacité d'un récepteur du concentrateur à récupérer l'énergie fournie par le concentrateur, ainsi que du coefficient de concentration du concentrateur. Par ailleurs, la performance du concentrateur dépend des qualités optiques des matériaux de construction. Dans notre cas, étant donné que la réaction est optimale à haute température, il sera important d'avoir un concentrateur offrant un fort coefficient de concentration afin d'avoir le rendement exergétique maximal. Ensuite, l'ammoniac a été présenté comme réducteur de substitution de l'hydrogène. Bien que ce dernier soit produit via le procédé Haber-Bosch – qui est très énergivore, basé sur l'hydrogène gris

aujourd'hui, et donc émettant de grande quantité de gaz à effet de serre – il permet une réduction efficace des minerais de fer. Cette réaction a une cinétique plus lente que celle à l'hydrogène mais est très similaire puisque l'ammoniac peut se décomposer en azote et en hydrogène. De plus, l'ammoniac peut être trouvé de manière biosourcée à partir de l'urée présente dans l'urine des mammifères.

La suite de ce chapitre aura pour but de présenter le deuxième aspect de ce travail : l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) de procédés ou d'objets. Dans un premier temps, la méthode d'Analyse de Cycle de Vie sera détaillée, puis des ACV de concentrateurs solaires et de la cuisson solaire seront présentées.

I.4. L'analyse de cycle de vie (ACV)

I.4.1. Introduction

Le deuxième aspect de ce travail porte sur l'Analyse de Cycle de Vie ou ACV. L'ACV est une méthode normalisée qui permet d'évaluer les impacts et les dommages environnementaux d'un produit ou d'un procédé et d'identifier les points d'amélioration de ces derniers d'un point de vue écologique. Cette méthode permet aussi de réaliser des comparaisons entre différents procédés ou produits sur la base de leur ACV respective. Dans notre cas, l'ACV est intéressante pour identifier les aspects du solaire à concentration qui ont un fort impact environnemental. Cette démarche permet aussi d'anticiper les zones d'impacts importants pour un éventuel procédé de réduction de fer à une échelle industrielle. L'ACV permettrait donc de concevoir ce nouveau procédé dans une démarche plus responsable en calculant les impacts potentiels afin d'assurer l'avantage écologique du procédé et les conditions de cet avantage.

La première étude axée sur l'ACV date des années 1960 et traite des besoins énergétiques pour la production de produits chimiques [140]. De nombreux développements ont été réalisés depuis et, aujourd'hui, l'analyse de cycle de vie est un outil standard permettant d'évaluer les impacts potentiels d'un produit sur l'environnement, les ressources et la santé humaine. Le cycle de vie du produit comprend l'approvisionnement en matières premières, la fabrication du produit, son transport, son utilisation et sa maintenance, puis finalement son traitement de fin de vie [140]. L'intérêt pour cette méthode et le nombre de publications à ce sujet sont grandissant, notamment à la vue des enjeux écologiques actuels. La Figure I-55 présente l'évolution des publications sur le moteur de recherche « Web of Science » lorsque les mots-clés « *life cycle assessment* » ou « *life cycle analysis* » sont présents dans le titre d'une publication. Les résultats bruts ont été normalisés par le nombre de publication total de l'année en question. Il est possible de voir une augmentation plutôt lente avant 2006, suivie d'une augmentation plus marquée à compter de cette période. Ce constat montre que cette méthode suscite aussi un intérêt fleurissant dans la recherche.

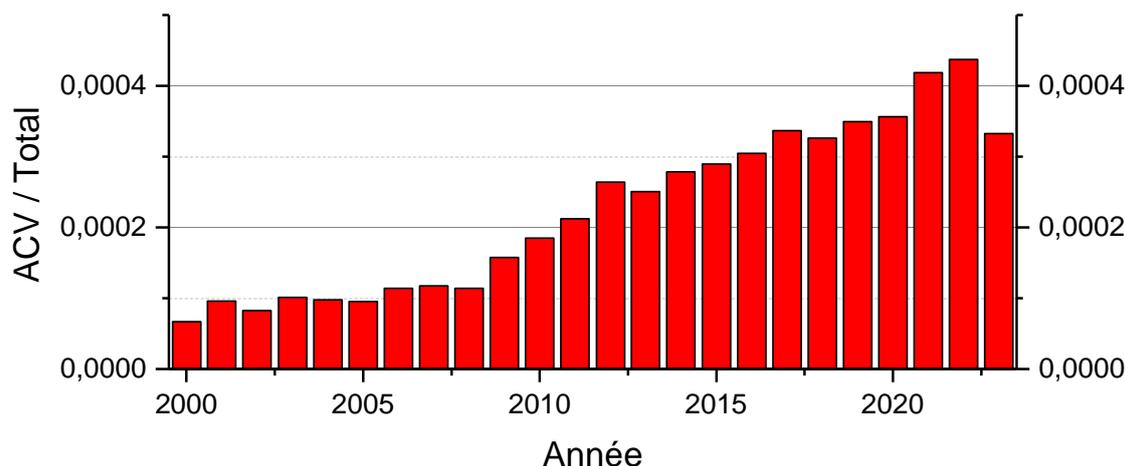


Figure I-55 : Evolution du nombre de publications contenant "life cycle analysis" ou "life cycle assessment" dans le titre entre 2000 et 2023 normalisé par le nombre total de publications. Réalisé à partir des données bibliographiques (14158 publications d'ACV et 52569071 publications au total) de "Web of Science" le 14 Juillet 2023.

En dehors du monde de la recherche, des entités comme les gouvernements ou les entreprises s'intéressent à l'ACV. Par exemple, l'union européenne considère l'ACV comme une des méthodes de référence pour étudier l'impact des choix politiques depuis 2015. L'ACV peut aussi être utilisée par les gouvernements pour motiver ou implémenter des décisions politiques [140]. Du point de vue des industriels, l'ACV a cinq intérêts : i) aider à la conception d'un produit ou d'un procédé, ii) apporter des arguments commerciaux, iii) déterminer des indicateurs permettant de mieux connaître les performances d'un produit ou d'une usine, iv) aider dans le choix d'un fournisseur ou d'un partenaire et v) aider à la définition de la stratégie de l'entreprise [140]. Les particuliers sont aussi exposés en le sachant ou non à des conclusions venant des ACV, par exemple lors d'achat de produits [140].

I.4.2. Méthode

La méthodologie de l'ACV a été discutée au niveau international autour de 1990, afin de proposer des principes communs. Bien que certains aspects de la méthode soient encore en discussion aujourd'hui, les grandes lignes et les aspects fondamentaux sont les mêmes depuis la publication de la norme ISO 14040 en 1997, qui a été révisée en 2000 puis 2006 (ISO 14044) [140], [141].

L'analyse de cycle de vie est composée de 4 étapes : la définition de l'objectif, la définition du champ d'étude (ou limites), la réalisation de l'inventaire et la réalisation des calculs. A chaque étape, on retrouve de l'interprétation [140]. La Figure I-56 schématise ces étapes ; on y constate que les échanges entre les étapes sont bilatéraux. En effet, l'ACV est une procédure itérative dans laquelle les premiers résultats de l'inventaire peuvent résulter en un changement sur les limites et les objectifs de l'étude, ceci étant aussi valable avec les impacts. Lorsque l'objectif est de déterminer quel produit a l'impact le plus faible, le nombre d'itérations sera faible si les différences d'impacts sont larges et au contraire, il sera élevé si les impacts sont similaires [140].

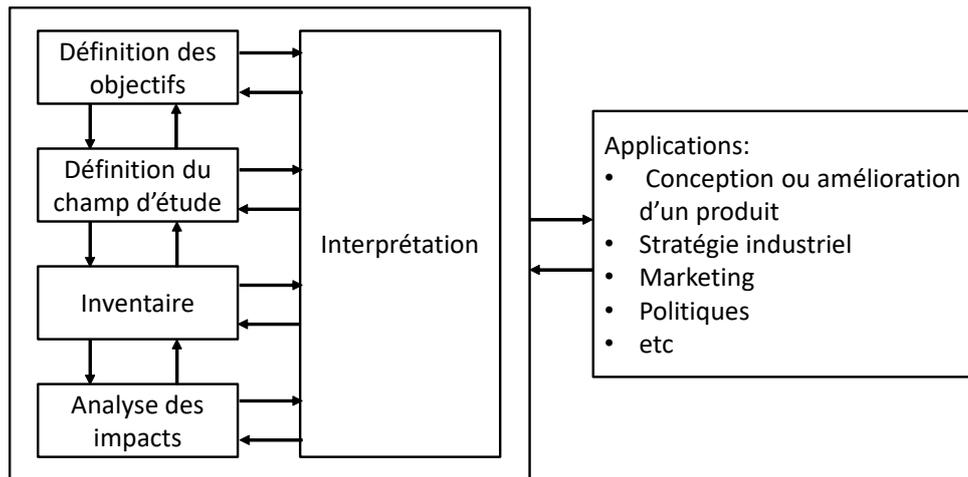


Figure I-56 : Structure de la réalisation d'une analyse de cycle de vie selon la norme 14040 [140].

La suite de cette partie aura pour but de donner plus de détails sur la réalisation et la substance de chacune des étapes de la méthode ACV. L'ensemble des principes et des explications à suivre sont tirées de [140] sauf indication contraire.

I.4.2.1. Définition de l'objectif

La définition de l'objectif est une étape primordiale et influence les trois étapes suivantes. La réalisation de ces dernières doit être cohérente avec l'objectif bien que, comme dit précédemment, les résultats ou données des étapes suivantes peuvent avoir comme conséquence de revoir l'objectif. D'après les exigences de la norme ISO, la définition de l'objectif comprend 6 aspects :

- Prévoir l'application des résultats : la réalisation d'une ACV comprend l'étude d'un ou plusieurs produits dans le but de comparer les impacts, identifier quel procédé ou partie impacte le plus l'environnement, déterminer les zones d'amélioration possibles, informer sur les performances environnementales, développer des critères d'éco-labélisation ou développer des politiques prenant en compte les choix environnementaux. Plusieurs applications sont souvent réalisées en simultanément et il est important de savoir en amont laquelle ou lesquelles sont visées puisque cela influera sur le choix des limites, de l'inventaire et des indicateurs de résultats.
- Montrer les limites de choix méthodologiques : cette étape constitue une critique de l'utilisation de l'étude. En effet, si une étude n'est réalisée que sur une partie du cycle de vie ou que sur un aspect de l'impact environnemental, il est important de le prendre en compte dans l'objectif. Par exemple, si on réalise une étude comparant la production d'un kilogramme de bois et d'un kilogramme de brique, les résultats ne pourront pas être utilisés pour statuer sur la performance écologique du produit dans la construction d'une maison. En effet, leurs différences de caractéristiques impliquent des différences dans les quantités utilisées lors de la construction.
- Contexte décisionnel et raisons de la réalisation de l'étude : souvent, la raison de la réalisation de l'étude et l'application des résultats sont confondus. Afin de les distinguer, il est possible de voir le premier comme « qu'est-ce que l'étude fait ? » et le second comme

« pourquoi l'étude est menée ? ». La raison de l'étude peut entraîner différents contextes décisionnels qui peuvent être résumés dans deux catégories : lorsque l'étude a pour but d'induire des changements ou lorsqu'elle est descriptive et informative. Dans le premier cas, on distingue les décisions qui influent à grande échelle ou à petite échelle. Dans le deuxième, on doit spécifier si l'étude est réalisée en prenant en compte les interactions avec d'autres systèmes ou non.

- Déterminer la cible de l'étude : l'objectif doit prendre en compte à qui l'étude est destinée (particulier, monde scientifique, industrie, politique...). La cible aura une grande influence sur l'interprétation des résultats et sur le détail de l'inventaire.
- La définition de l'objectif doit clairement montrer si l'étude est comparative et destinée à être rendue accessible au grand public. Dans ce cas des spécifications de la norme ISO ont été mises en place pour assurer la transparence et la qualité de l'étude (documentation de l'étude, relecture indépendante...).
- La définition de l'objectif doit aussi clairement statuer qui a réalisé l'étude et pour qui, afin de mettre en avant tout conflit d'intérêt potentiel.

Ces 6 aspects permettent, d'après la norme ISO, de définir un objectif clair et pertinent pour une étude sans ambiguïté. Cependant, il est à noter que les aspects 2, 4, 5 et 6 sont plutôt liés à la communication des résultats qu'à la réalisation de l'ACV elle-même. Une fois l'objectif bien défini, vient la définition du champ d'étude.

I.4.2.2. Définition du champ d'étude

Le champ d'étude détermine ce qui sera pris en compte durant l'analyse et la manière dont elle va être réalisée. Un autre objectif prédominant de la définition des limites est d'assurer et tracer la cohérence de l'étude (méthodes, hypothèses, données) ainsi que de renforcer la reproductibilité. Au total, 9 éléments sont pris en compte lors de la réalisation du champ d'étude : les livrables ; l'objet de l'analyse ; le cadre de modélisation et la gestion des procédés multifonctionnels ; les limites du système et la complétude ; la représentativité des données ; la préparation des bases de l'étude d'impact ; les spécificités de la comparaison des différents systèmes ; la nécessité d'un examen critique et l'organisation de la présentation des résultats. A noter que les éléments allant de 2 à 6 inclus sont nécessaires à la réalisation de l'ACV, alors que les éléments 1, 7, 8 et 9 traitent de la publication des résultats :

- Livrables : très concrètement les livrables sont ce qui ressort de l'ACV. Généralement, les résultats de l'inventaire ainsi que les résultats des calculs d'impacts sont les livrables. Néanmoins, parfois, seul l'inventaire est réalisé. Dans tous les cas, il est important de documenter de manière transparente l'inventaire afin qu'il puisse être réutilisé à bon escient lors d'autres ACV.
- L'objet de l'analyse : d'abord, afin d'avoir une analyse pertinente, il est nécessaire de définir la fonction des produits ou procédés étudiés. Il faut que cette fonction soit la même pour tous les produits ou procédés, sinon la comparaison n'a pas de sens. Il est également possible d'avoir plusieurs fonctions, mais dans ce cas tous les produits ou procédés analysés

doivent avoir à peu près les mêmes pour pouvoir être comparés. Par exemple, cela n'a aucun sens de comparer l'impact écologique d'une chaise d'école et le siège d'une voiture. Bien que la fonction principale soit la même, le siège de voiture permet de nombreuses autres fonctions (chauffage, réglage adapté, sécurité, etc). La comparaison ne serait donc pas sensée. Vient ensuite l'unité fonctionnelle (UF) qui correspond à la quantification de la fonction précédemment déterminée. Généralement, pour que l'unité fonctionnelle soit correcte, il faut qu'elle réponde aux questions suivantes : quoi, quelle quantité, pour combien de temps/combien de fois, où, selon quels critères (exemple Figure I-57) ? Il est important de bien définir l'unité fonctionnelle puisqu'elle va fortement influencer l'inventaire, les résultats et leurs analyses. En effet, c'est cette valeur qui va permettre de comparer de manière objective et juste les procédés ou les produits ; elle doit donc englober l'entièreté des aspects fonctionnels de l'objet ou du produit utilisé. Finalement, une fois l'unité fonctionnelle définie, il est possible de calculer le flux de référence, qui est la quantification de l'unité fonctionnelle pour chaque produit ou procédé étudié. Ce flux de référence peut être différent d'un produit à un autre si les quantités nécessaires pour réaliser l'unité fonctionnelle de la même manière sont différentes.

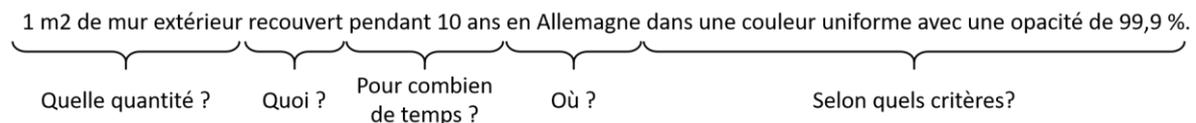


Figure I-57 : Exemple d'une unité fonctionnelle pour une ACV comparative de peintures d'extérieur. Traduit de [140].

- Cadre de modélisation et gestion des procédés multifonctionnels : ici il s'agit de déterminer comment seront traitées les fonctions accessoires du produit ou du procédé, c'est-à-dire les fonctions non utiles à la réalisation de l'unité fonctionnelle et qui n'ont donc pas d'intérêt du point de vue de l'utilisateur. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt pour un autre produit ou procédé lié à celui étudié. La norme ISO 14044 propose plusieurs solutions en fonction de la situation. D'abord, si le procédé est découplable en sous-procédés, alors les procédés réalisant la seconde fonction seront exclus (*cut-off*). Si cela n'est pas possible, alors la norme suggère de réaliser l'expansion des systèmes, c'est-à-dire de réaliser la seconde fonction en utilisant le procédé le plus probable pour fournir le produit de la seconde fonction (*expansion*). Finalement, si cela n'est pas possible, les standards suggèrent de découper les entrées et sorties du procédé multifonctionnel en plusieurs procédés avec plusieurs fonctions différentes (*allocation*). Lors de la modélisation d'un inventaire, deux chemins sont possibles : « *attributinal* » ou « *consequential* », la différence étant l'approche de la modélisation de l'objet. Le premier essaye d'isoler le produit ou le système du reste de la technosphère ou de l'économie alors que le second prend en compte les variations du marché dues au produit. Cela va impliquer qu'en « *attributinal* », l'utilisation de process moyen pour modéliser des procédés de fond sera privilégiée, alors qu'en « *consequential* », des procédés marginaux pourront être utilisés si l'économie est plus avantageuse. L'utilisation de l'un ou l'autre dépend du contexte décisionnel présenté précédemment. Grossièrement, si les choix dus à l'étude influent à une petite échelle, alors on privilégiera la modélisation « *attributinal* ». Il en est de même lors des études informatives. En revanche, lorsque les décisions dues à l'étude influent à une plus grande échelle, on privilégiera un mix entre « *attributinal* » et « *consequential* ».

- Les limites du système et la complétude : les limites représentent la fracture entre le système étudié, la technosphère et l'écosphère. La complétude est le concept lié aux détails nécessaires pour modéliser au mieux le système au regard de l'objectif. Concrètement, les limites idéales représentent l'ensemble des process unitaires nécessaires pour délivrer le flux de référence défini par l'unité fonctionnelle. Cependant, il n'est pas forcément nécessaire de mettre en place ces limites si une étude ne prend pas en compte tout le cycle de vie, ou lorsqu'une étude comparative est menée et que certains procédés sont identiques et délivrent des quantités identiques pour chaque produit. Dans le cas de systèmes très complexes ou rebouclant, il est quasiment impossible de mettre en place les limites idéales. Donc, en pratique, il est rare de pouvoir prendre en compte tous les process unitaires permettant de délivrer le flux de référence. La complétude peut être vue selon une approche quantitative ou qualitative. Dans la première, le critère est la différence de masse entre le produit réel et celui modélisé. Par exemple, s'il y a une différence de 0,1%, alors le modèle sera considéré comme complet. Cette approche a une limite puisque de petites quantités peuvent fortement influencer l'analyse de cycle de vie. Lors de l'approche qualitative, chaque quantité omise sera étudiée grâce à d'autres ACV ou des bases de données pour voir son influence.
- Représentativité des données d'inventaire : cet aspect évalue la représentativité des données par rapport à la réalité selon trois critères : géographique, temporelle et technologique. Le critère géographique relève de la spécificité de la zone dans laquelle le process unitaire est réalisé, puisque les impacts peuvent fortement varier pour un process offrant la même sortie mais réalisé dans deux pays différents (production d'électricité, par exemple). La dépendance au temps fait référence à l'évolution technologique des process unitaires au cours de la durée de l'unité fonctionnelle. Le critère technologique reflète dans quelle mesure les choix des process unitaires technologiques sont cohérents avec ceux réellement utilisés.
- Préparation des bases de l'étude d'impact : cet aspect de la définition du champ d'étude consiste à déterminer quel est le domaine dans lequel le produit ou procédé va avoir un fort impact et donc consiste à choisir la méthode de calcul la plus cohérente. Plusieurs critères peuvent aider au choix, comme la complétude du spectre d'indicateurs de la méthode, la solidité scientifique, la pertinence environnementale ou encore l'acceptation par les pairs.
- La comparaison de système : dans la norme ISO 14044, il est précisé que si l'étude est à but comparatif, l'unité fonctionnelle et les méthodes d'inventaire et de calculs doivent être parfaitement similaires et que toute différence devra être clairement spécifiée. De plus, les incertitudes devront être étudiées lorsqu'un produit semble être moins impactant d'un point de vue environnemental. Si un seul indicateur est choisi pour la comparaison, il est important de nuancer les solutions proposées puisqu'une solution sur un indicateur peut augmenter l'impact sur un autre indicateur.
- Le besoin d'une relecture critique : cet aspect de la norme indique qu'il est préférable – et nécessaire dans certains cas – de faire relire l'étude par des personnes extérieures à l'étude afin d'en assurer la qualité et d'améliorer l'étude.
- L'organisation de la publication des résultats : suivant la cible de l'étude, différentes spécifications sont de mise afin d'assurer la transparence et la justesse de l'étude.

Une fois le champ d'étude défini, vient la réalisation de l'inventaire de cycle de vie.

I.4.2.3. Réalisation de l'inventaire de cycle de vie (ICV)

L'inventaire consiste à déterminer tous les flux entrants et sortants des limites de l'étude. On différencie deux types de flux : les flux élémentaires et les flux intermédiaires. Les flux élémentaires sont des substances unitaires entrantes dans le système depuis l'écosphère (environnement) sans être transformées par l'activité humaine. Les flux sortant du système sont reversés dans l'écosphère sans transformations humaines ultérieures. Les flux intermédiaires sont les flux de matières ou d'énergie qui sont échangés entre des activités humaines.

La réalisation de l'ICV est souvent l'étape la plus chronophage et difficile à mener puisque la recherche des données est souvent compliquée. D'ailleurs, il est rare d'avoir une complétude de 100% mais, heureusement, c'est rarement nécessaire pour atteindre les objectifs.

Dans un premier temps il faut détailler les chaînes de valeur du produit. C'est-à-dire partir du flux de référence et remonter dans la chaîne de production jusqu'à atteindre le niveau de détail cohérent avec les limites de l'étude. Plusieurs niveaux de process sont alors mis en place : le process qui produit le flux de référence (niveau-0), les process produisant un flux qui sera physiquement utile à la production du flux de référence (niveau-1), les process fournissant une fonction utile à la réalisation du process de niveau-0 (niveau-2), les process offrant un service au process de niveau 0 (niveau-3) et les process utiles à la production et l'entretien des infrastructures nécessaires au fonctionnement du process de niveau 0 (niveau-4). Lorsque des procédés ou produits multifonctionnels sont étudiés, la même démarche que dans la définition du champ d'étude est réalisée (subdivision) ; si ce n'est pas possible, elle est réalisée en expansion du système et, si les deux précédentes ne sont pas possibles, en répartition. La définition des process change si on se place en modélisation « *attributional* » ou en modélisation « *consequential* ». Dans le cas d'une modélisation « *attributional* » l'idée est de prendre en compte tous les process que le produit « voit » durant son cycle de vie. Dans l'approche « *consequential* » on modélise l'impact attribué à une décision ; il faut donc prendre en compte la réaction du marché à la demande que l'on crée. Globalement, il est plus facile de réaliser une modélisation « *attributional* » puisque seule des connaissances techniques sur le produit sont suffisantes pour réaliser l'inventaire. L'approche « *consequential* » n'est utilisée que lorsque l'étude influe à une grande échelle sur les prises de décisions en lien avec le marché.

Une fois les chaînes de valeurs déterminées, il faut regrouper toutes les données nécessaires à la construction des process unitaires qui sont des procédés de mise en œuvre utilisés pour la construction du produit ou la réalisation du procédé. Au préalable, il est conseillé d'organiser les données nécessaires selon leur importance afin de ne pas perdre de temps à chercher des données spécifiques pour un process peu impactant. Plusieurs approches sont possibles suivant la spécificité de la donnée cherchée. Si la donnée cherchée est très spécifique, alors il peut être difficile de trouver le flux lié à cette dernière. Il est donc de mise, dans ce cas, d'essayer de construire le process unitaire en recueillant tous les flux entrants et sortants liés à la réalisation de ce process en demandant aux industriels ou en réalisant des mesures. Dans le cas où les données recherchées ne sont pas particulièrement spécifiques, il est probable que les process unitaires soient facilement trouvables sur internet ou directement disponibles dans les bases de données d'ACV comme ecoinvent, ELCD, Agri-foodprint, LCA food, etc. Parmi toutes les bases de données d'ACV, la plus complète et la plus utilisée est ecoinvent, une base de données Suisse

avec plus de 18000 process unitaires répertoriés dans la version 8.3 [142]. La base de données utilisée pour notre travail sera détaillée plus loin dans le manuscrit partie II.4.1. Finalement, si la recherche d'informations sur la donnée recherchée est inefficace ou si les bases de données ne permettent pas d'avoir le process unitaire, alors il est possible de se baser sur le jugement d'un-e spécialiste. Finalement, il est également possible de se placer dans le « pire cas » afin de réaliser les calculs en utilisant ce qui est disponible, mais, il faut dans ce cas le spécifier clairement dans la présentation de l'inventaire. Une fois les process unitaires construits ou récupérés d'une base de données, il faut vérifier la qualité (complétude, des flux, justesse des quantités) des activités afin d'éviter de grosses erreurs ou des incohérences. Il est possible de vérifier la complétude des flux et leur quantité, en connaissant bien le process en question et en vérifiant la logique entre les flux entrants et sortants. Il est également possible de faire une vérification à la vue des résultats lors de la première itération de calcul. Dans le cas où les process unitaires ont été réalisés manuellement, il faut faire attention à bien nommer les flux pour que le logiciel utilisé puisse les reconnaître.

Une fois que toutes les données sont collectées et vérifiées, vient la construction du modèle. Il s'agit d'intégrer dans un logiciel dédié (SimaPro, GaBi, Umberto...) l'ensemble des procédés unitaires et de les lier les uns aux autres. Lors de la réalisation du modèle, les process unitaires ne sont pas forcément tous à la même échelle. Par exemple, si un procédé A produit 1 kg d'un produit « a » et que le procédé B a besoin en entrée de 1,7 kg de « a » pour produire « b » alors les procédés ne sont pas à la même échelle. Cette mise à l'échelle est schématisée sur la Figure I-58 et est faite automatiquement lors du calcul si le flux de référence spécifié est lui à la bonne échelle. C'est une fois le modèle réalisé qu'il est possible de calculer tous les flux et d'avoir donc les résultats de l'inventaire qui consiste en une liste des flux élémentaires induits par le flux de référence.

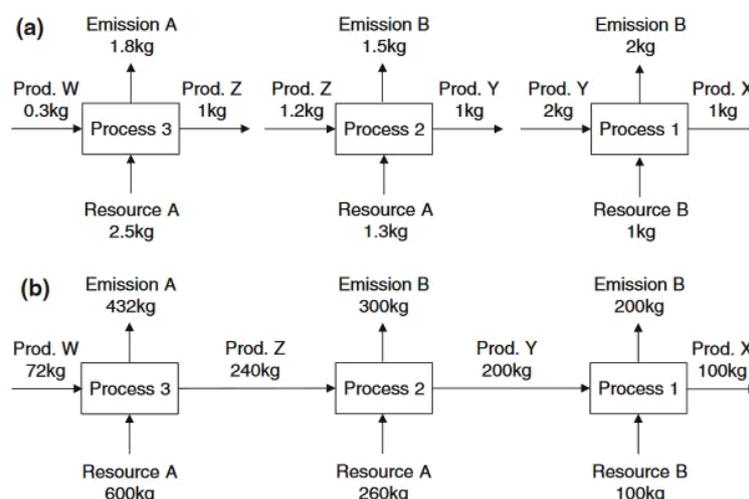


Figure I-58 : Exemple de modèle d'inventaire avec 3 process unitaires (Process 1, 2 et 3) pour un flux de référence étant de 100 kg du produit X. (a) sans mise à l'échelle (b) avec mise à l'échelle [140].

Pour que l'inventaire puisse être réutilisé par d'autres études d'ACV, il est important de bien le documenter. Il est conseillé de réaliser des tableaux contenant toutes les informations liées à l'inventaire, comme les flux élémentaires et intermédiaires contenus dans les process unitaires réalisés à la main ou la liste des process unitaires des bases de données utilisées. A noter que les bases de données donnent généralement accès aux détails des échanges et aux informations géographiques de tous les process unitaires qu'elle comporte. Il est aussi important de spécifier toutes les hypothèses et tous les choix réalisés lors de l'inventaire pour être le plus transparent

possible. Une fois que tout cela est correctement réalisé et rapporté, les calculs des impacts sont effectués.

I.4.2.4. Calcul des impacts et interprétation

Les impacts écologiques sont définis comme l'ensemble des changements environnementaux positifs ou négatifs dus à l'activité anthropogène ; le calcul de ces derniers correspond à la dernière étape (Life cycle impact assessment – LCIA) de l'analyse de cycle de vie. Lors des calculs, les flux de l'inventaire vont être transformés en impacts de manière quantitative ou qualitative suivant différentes méthodes de calcul. Chaque méthode est une modélisation des mécanismes environnementaux sous forme de chaînes de cause à effet : ces chaînes vont des émissions ou de l'interaction physique jusqu'à l'impact. Certaines étapes sont nécessaires pour les calculs des impacts : la sélection des catégories d'impact ou des indicateurs, la classification des flux dans les indicateurs et la caractérisation des flux. D'autres sont optionnelles mais peuvent aider aux calculs et aux interprétations : la normalisation, la pondération et le regroupement. Il est important de noter que les résultats de cette phase de calcul sont des impacts potentiels et non des impacts réels étant donné qu'ils sont basés sur une unité fonctionnelle et calculés avec de nombreuses hypothèses.

I.4.2.4.1. Etapes nécessaires

En pratique l'étape de choix des indicateurs ou des catégories d'impact est réalisée lors du choix de la méthode de calcul parmi celles existantes (ReCiPe, EDIP, EcoIndicator99, Impact 2002+...). Il est important de bien choisir la méthode en fonction de l'objectif établi. L'étape de classification consiste à répartir chaque flux élémentaire dans les catégories d'impact ou indicateurs de la méthode ; par exemple les émissions de CO₂ sont attribuées à l'indicateur sur le changement climatique. Cette étape est très complexe puisqu'une substance peut avoir un impact sur plusieurs indicateurs ; de solides connaissances dans les mécanismes environnementaux sont donc nécessaires. Ceci explique pourquoi cette étape est incluse dans les méthodes et non laissée aux utilisateurs. Lors de l'étape de caractérisation, la construction d'impact est déterminée en fonction du degré de contribution de chaque flux élémentaire à cet impact. Chaque flux élémentaire (E) classifié dans une catégorie d'impact (c) est multiplié par son facteur de caractérisation (CF) et est sommé pour chaque intervention significative, le tout résultant en un score d'impact (IS) pour chaque catégorie (voir Eq I-52).

$$IS_c = \sum_i (CF_i \cdot E_i) \quad \text{Eq I-52}$$

Le facteur de caractérisation représente la contribution quantitative d'un flux élémentaire à un impact environnemental spécifique. Son unité est liée à la catégorie d'impact et est donc la même pour tous les flux élémentaires dans cette catégorie. Le calcul de ce facteur est réalisé par des modèles scientifiquement valides et quantitatifs des mécanismes environnementaux qui représentent au mieux la chaîne de cause à effet entre un échange de flux élémentaire et ses conséquences sur l'environnement. Les catégories d'impact sont déterminées après l'observation d'un effet négatif suffisamment préoccupant pour que sa prise en compte dans une optique de développement respectueux de l'environnement soit justifiée. La caractérisation vient ensuite et est toujours entre les flux élémentaires et l'écosphère ou la technosphère, soit de type émissions soit de type extraction. Plus l'indicateur représente un effet loin dans la chaîne de cause à effet, plus l'indicateur représente le dommage de cet effet et moins il est

quantitatif. Afin de représenter au mieux les impacts d'abord de manière quantitative puis de manière plus qualitative, le développement de la méthode d'ACV a donc nécessité des indicateurs tôt dans la chaîne de cause à effet qui sont plus quantitatifs (mid-point) et d'autres au bout de la chaîne (end-point). Généralement, les deux approches sont utilisées puisqu'elles sont complémentaires, la première permettant d'avoir les quantités relatives à chaque indicateur et la seconde les dommages induits.

Voici des exemples d'indicateurs d'impacts mid-point :

- Changement climatique
- Appauvrissement de la couche d'ozone
- L'acidification (terrestre, eaux douces)
- Eutrophisation (terrestre, eaux douces et marines)
- Formation d'oxydant photochimique
- Ecotoxicité (terrestre, eaux douces et marines)
- Toxicité humaine
- Formation de particule
- Radiation ionisante
- Utilisation des terres (agricoles, urbaines) et transformation des terres naturelles
- Ressources fossiles et minérales

Pour les end-point, chacun des indicateurs mid-point est caractérisé par une relation dose-effet qui permet d'évaluer le dommage que l'impact entraîne sur une des trois zones de protection : la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources. Les dommages end-point permettent aussi de comparer les indicateurs entre eux puisque les indicateurs sont exprimés en points. Le détail des indicateurs utilisés dans notre étude sera présenté dans la partie II.4.2.

Lors des calculs, il est important de garder en tête que le LCIA est réalisé d'un seul coup comme si tous les flux élémentaires étaient échangés instantanément, alors qu'en réalité les processus ne se font pas forcément simultanément et que leurs impacts peuvent être différés. Un autre aspect temporel est la durée de vie des substances émises qui n'est pas infinie : différents horizons temporels sont considérés, parfois explicitement mais souvent implicitement dans les différentes méthodes ; cela change la caractérisation de la substance étudiée. Au même titre, il est difficile d'évaluer le changement du caractère impactant d'une substance dans le temps. Les impacts dans le LCIA peuvent être qualifiés de globaux, régionaux ou locaux en fonction du mécanisme environnemental qu'ils impactent. Par exemple, l'impact sur le réchauffement climatique est global puisqu'il impacte toute la planète alors que l'utilisation des terres ou de l'eau sont des impacts locaux puisqu'ils sont d'autant plus ressentis que l'on est proche de leur lieu d'émissions. Il est possible de gérer cette variabilité de deux façons : modéliser des émissions ou extractions typiques correspondant à des cas précis de localisation, ou modéliser des impacts relativement précis géographiquement. Les incertitudes lors des calculs peuvent être importantes, parfois plus que celles induites par le LCI. Cependant, rien ne justifie d'exclure un indicateur ayant une forte incertitude. Lors des mises à jour des méthodes ou des données, les incertitudes peuvent être réduites.

Certaines hypothèses sont inhérentes au calcul des impacts lors d'une ACV. Voici la liste de ces hypothèses :

- Les modèles de calcul ne prennent généralement pas en compte les variations des paramètres environnementaux.

- La caractérisation des systèmes est réalisée de façon linéaire c'est-à-dire que si les flux élémentaires sont doublés, les impacts potentiels sont également doublés.
- Il existe deux possibilités pour la modélisation des impacts : soit via les impacts moyens, soit via les impact marginaux. Dans le premier cas, un impact moyen des échanges intermédiaires est utilisé, alors que dans le second, l'addition d'impact par émission/extraction réalisée dans les systèmes de fonds est réalisée.
- Les résultats sont des impacts potentiels non réels car ils sont relatifs à l'unité fonctionnelle choisie et dépendent des conditions choisies (horizon temporel, spécifications géographiques, etc).
- Conservation de masse et d'énergie dans les systèmes.
- Le LCA et le LCIA sont réalisés de la façon « la plus simple possible et aussi complexe que nécessaire ».
- Les résultats d'ACV ne peuvent être comparés qu'à des systèmes servant la même fonction.
- La réalisation du LCIA est objective et le même niveau de précaution est pris pour tous les systèmes étudiés. De plus, il faut essayer d'éviter autant que possible de prendre des cas très spécifiques.

I.4.2.4.2. Etapes optionnelles

La normalisation des impacts permet de comparer les impacts mid-point entre eux afin d'avoir une idée du plus important au regard du système de référence. Cela est réalisé en ramenant tous les impacts à ceux d'un système de référence (pays, monde ou secteur industriel). Le calcul du score normalisé se fait en multipliant la valeur de l'impact par un facteur de normalisation propre à chaque indicateur. Le facteur de normalisation est obtenu en réalisant le LCIA sur le système de référence et en divisant l'impact par la population du système. Utiliser la normalisation d'impact peut avoir des conséquences sur les résultats de l'ACV et donc sur les conclusions qui en sont tirées. Lors de la normalisation, il faut essayer d'utiliser un système de référence aussi gros que possible afin d'éviter l'introduction de biais. De plus, il faut garder en tête que la normalisation ne permet pas de comparer l'importance ou le poids des indicateurs les uns par rapport aux autres mais par rapport à un système de référence.

La pondération ne peut être réalisée qu'après une étape de normalisation : elle a pour but de classer les différents impacts en fonction de leur importance. Cette pondération n'est pas basée sur des faits scientifiques ou objectifs ; une méthode de pondération est toujours subjective. D'après la norme ISO 14044, la pondération ne peut pas être utilisée lors d'études divulguées au public et doit être publiée avec les résultats sans pondération. La pondération utilisée doit être en accord avec les objectifs de l'étude, ce qui peut favoriser certaines parties prenantes à l'étude. Pour limiter les biais, plusieurs pondérations différentes sont souvent réalisées. Si les conclusions tirées de différentes pondérations sont divergentes, alors il faudra prioriser une pondération plutôt qu'une autre, ce qui peut induire des biais.

Le calcul des facteurs de pondération prend en compte différents principes tels que l'impact social des dommages, les coûts de la prévention des impacts, la consommation énergétique, l'avis d'experts ou de parties prenantes d'après des perspectives scientifiques, le niveau d'impact atteint en rapport à la cible et les perspectives culturelles. Les perspectives culturelles sont utilisées dans certaines méthodes telles que ReCiPe, EcoIndicator99 : cela consiste à considérer les choix non pas d'individus mais de groupes représentatifs de différentes

perspectives culturelles pour les hypothèses sur la gestion des dommages et la caractérisation des effets. Dans l'ACV ces préférences peuvent avoir trois points de vue :

- Hiérarchisé : les hypothèses sont basées sur des consensus scientifiques, la gestion de dommages est basée sur le principe qu'une politique adéquate peut éviter de nombreux problèmes.
- Individualiste : les hypothèses sont basées sur ce qui a été prouvées uniquement et, la gestion de dommages est basée sur le principe du techno-solutionisme.
- Egalitaire : les hypothèses sont basées sur tous les effets possibles, et la gestion de dommages est basée sur le fait que les problèmes peuvent entraîner des catastrophes.

Ces perspectives culturelles peuvent aussi représenter la vision du lien entre la nature et la société. La Figure I-59 présente les différentes visions de la nature selon les perspectives culturelles. Le point noir est l'état de la nature considéré comme une bille qui roule le long d'un profil qui représente la réaction de la nature à un changement. L'état présenté sur la figure est celui d'équilibre. Il est possible de voir que chaque perspective induit une réaction plus ou moins catastrophique de la nature aux activités humaines, la plus optimiste étant l'individualiste et la plus pessimiste l'égalitaire. Pour la première, il sera toujours possible de retrouver un point d'équilibre alors que pour la dernière, tout changement implique une réaction dramatique. L'approche hiérarchisée se situe au milieu : il est possible de retrouver un équilibre dans certaines limites.

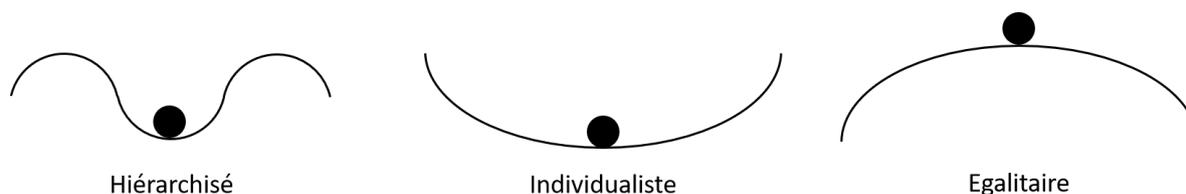


Figure I-59 : Vision de la nature pour chaque perspective culturelle et les risques liés à ces perspectives.

Finalement, le regroupement consiste à regrouper les impacts mid-point suivant des groupes liés aux émissions, aux ressources ou aux variations géographiques (impacts locaux, globaux ou régionaux) ou suivant des aspects subjectifs (éthique, hiérarchie).

Une fois que le LCIA est réalisé, les interprétations peuvent être réalisées. Dans un premier temps, il faut identifier les points majeurs (process, hypothèses et flux élémentaires) qui ont une forte influence sur les impacts environnementaux. Puis l'exhaustivité est vérifiée aussi bien sur l'inventaire que sur les calculs afin de vérifier qu'il ne manque pas d'information importante ou de catégories d'impact nécessaires pour atteindre l'objectif fixé. Ensuite, une évaluation de la sensibilité est réalisée sous la forme d'une analyse de contributions : elle consiste à voir quel process est le plus impactant et est généralement couplée à l'étude des incertitudes. Cela permet d'identifier les données qui influent fortement sur l'ACV avec une incertitude élevée. Finalement, la cohérence du modèle est évaluée afin de vérifier si les hypothèses, méthodes et données sont cohérentes avec les objectifs et le champ d'étude. S'il y a des incohérences, leurs influences sont déterminées et prises en compte pour tirer des conclusions ou réitérer les calculs.

Enfin, une fois ces étapes réalisées, les conclusions et recommandations peuvent être tirées. Les conclusions devraient être tirées en vérifiant leur cohérence avec l'objectif et les exigences ; lorsque ce n'est pas le cas, les conclusions doivent être vérifiées et reprises. Les recommandations faites lors de l'interprétation doivent être basées sur les résultats importants et liées à l'application définie dans les objectifs. Il faut également spécifier les limites de l'étude.

Lors de la comparaison de plusieurs systèmes, des étapes supplémentaires sont nécessaires pour assurer une comparaison objective. Un point d'attention concerne la différence entre les systèmes, aussi bien au niveau des points clés influant sur les résultats que sur l'exhaustivité de chaque système. Les incertitudes et la sensibilité doivent aussi être étudiées avec soin afin de voir si les différences entre les systèmes sont statistiquement significatives. Finalement il faut aussi vérifier la cohérence des LCA de chaque système pour voir si les méthodes d'inventaire, de caractérisation et de calcul utilisées sont bien les mêmes.

L'ACV est finie lorsque toutes ces étapes ont été réalisées : la définition des objectifs, la définition du champ d'étude, la réalisation de l'inventaire de cycle de vie, les calculs et les interprétations. C'est ensuite que le rapport peut être écrit en étant le plus transparent possible, afin de permettre une compréhension claire et une utilisation des données et des résultats lors d'autres études. Une fois l'étude réalisée et rédigée, il y a une étape de relecture critique qui est réalisée soit par des pairs scientifiques, soit par un panel de personnes qualifiées qui doivent être objectives et ne peuvent pas avoir participé à l'étude ou avoir de potentiels conflits d'intérêts. Cette étape est importante, puisqu'elle permet de vérifier la justesse et la cohérence de l'étude ainsi que le respect de la méthode. La relecture apporte souvent des pistes d'amélioration des résultats et de la qualité à l'étude. Une fois les échanges de relecture réalisés, l'étude est terminée et peut être publiée.

Lors de cette sous-partie la méthode de l'ACV a été présentée en détails. Cette méthode est normalisée par les normes ISO 14040 et 14044 et est composée de quatre étapes ; la définition des objectifs, la définition du champ d'étude, la réalisation de l'inventaire et le calcul et interprétation des impacts. Lors de la comparaison de deux produits ou de deux procédés sur la base de la méthode d'ACV, ces derniers doivent nécessairement remplir la même fonction de référence quantifiée par une unité fonctionnelle, cela permet une base de comparaison similaire. L'ACV est appliquée à de nombreux domaines et à de nombreuses échelles, comme expliqué au début de cette partie. La suite aura pour but de présenter des analyses de cycle de vie de concentrateurs solaires et de la cuisson solaire.

I.4.3. ACV de concentrateurs solaires

Ici des ACV de concentrateurs solaires seront présentées afin de déterminer les zones d'impact les plus importantes. Les technologies étudiées seront celles permettant de monter à haute température, *i.e.* la tour solaire et le concentrateur parabolique, car ce sont les technologies les plus probables pour la voie explorée de la métallurgie solaire. En complément, des ACV sur la cuisson solaire seront aussi présentées, notamment dans la partie dédiée aux concentrateurs paraboliques, pour mieux appréhender le Chapitre II. Les technologies étudiées ici sont présentées dans les parties I.3.1.3.

I.4.3.1. Tour solaire

De nombreuses études ont été publiées sur l'impact écologique des tours solaires avec différentes approches. Généralement, l'application est la production d'électricité.

En 2008, Lechón *et al.* ont réalisé une ACV d'installations solaires à concentration pour produire de l'électricité utilisant une tour et des concentrateurs cylindro-paraboliques [143]. L'étude de la tour sera présentée en détail ici. L'installation, située en Espagne, a une capacité de 17 MW produisant 104000 MWh/an avec un facteur de charge de 71,1%. La concentration est réalisée avec 2750 héliostats pour une aire d'ouverture de 265825 m² et une surface occupée de 1,5·10⁶ m². Le système utilise des sels fondus pour le transport et le stockage de la chaleur. Le rendement global de l'installation est de 16,7% et consomme pour son fonctionnement 48200 MWh/an de gaz naturel et 10800 MWh/an d'électricité provenant du réseau. Le gaz naturel est utilisé pour produire de l'électricité (15% de la production) via des chaudières à gaz. Cependant, les données d'inventaire des chaudières n'étaient pas disponibles, et elles n'ont donc pas été prises en compte dans l'analyse. Les limites de l'étude comprennent la fabrication des matériaux et composants de l'installation aussi bien que sa construction, son fonctionnement, sa maintenance et son démantèlement (prise en compte du recyclage pour l'acier, l'aluminium, le fer, le PET et le PVC). Les calculs ont été réalisés grâce au logiciel SimaPro et à la méthode CML selon les indicateurs : le réchauffement climatique, l'appauvrissement des ressources abiotiques, l'appauvrissement de la couche d'ozone, la toxicité sur la santé humaine, l'écotoxicité terrestre, en eaux douces et marine, oxydation photochimique, l'acidification et l'eutrophication. L'unité fonctionnelle de l'étude est 1 kWh électrique (kWh_e) produit. De plus, la demande énergétique globale a été évaluée par l'indicateur EPT (*Energy Payback Time*) qui correspond au temps de retour sur l'énergie défini comme le temps que le système mettra à éviter l'utilisation de la même quantité d'énergie primaire que celle utilisée pour sa construction. Au niveau de la demande énergétique, l'installation demande 2,79 MJ/kWh_e avec environ 94% de la demande réalisée lors de la phase d'opération et en majeure partie à cause du gaz naturel puisque le demande tombe à 0,17 MJ/kWh_e lorsque le gaz est exclu. Le temps de retour sur l'énergie calculé vaut 12,2 mois d'opération. Lorsque cette valeur est comparée aux autres études, les auteurs ont remarqué qu'elle était très élevée (entre 4,8 et 1,8 fois supérieure). Ceci est notamment dû à la prise en compte de la consommation énergétique lors du fonctionnement provenant du gaz naturel. Au niveau de l'impact sur le réchauffement climatique, c'est également le fonctionnement de l'installation qui a le plus gros impact avec 186 gCO₂eq/kWh pour un impact total de 203 gCO₂eq/kWh. Plus en détails, l'étape d'approvisionnement en gaz compte pour 19,9 gCO₂eq/kWh, celle de la combustion du gaz vaut 114 gCO₂eq/kWh et la consommation électrique vaut 50,1 gCO₂eq/kWh. La dernière valeur est forte car la production espagnole d'électricité est fortement émettrice de gaz à effet de serre (485 gCO₂eq/kWh au moment l'étude en 2006). Hors du fonctionnement, c'est la construction du champ solaire et du stockage thermique qui impacte le plus. A propos des autres impacts étudiés, les valeurs calculées sont :

- Appauvrissement des ressources abiotiques : 1,6 gSb_{eq}/kWh
- Appauvrissement de la couche d'ozone : 0,01 mgCFC-11_{eq}/kWh
- Toxicité humaine : 88,3 g1,4-DB_{eq}/kWh
- Ecotoxicité : 8,7 g1,4-DB_{eq}/kWh, 114,7 kg1,4-DB_{eq}/kWh et 528 1.4 mg1,4-DB_{eq}/kWh pour les eaux douces, les eaux marines et le terrestre respectivement
- Oxydation photochimique : 28,3 mgC₂H₄_{eq}/kWh

- Acidification : 612 mgSO_{4eq}/kWh
- Eutrophication : 49,6 mgPO_{4eq}/kWh

Ces valeurs sont en grande partie dues aux consommations de gaz et d'électricité lors du fonctionnement de l'installation. L'étude montre que les performances environnementales de l'installation sont bien plus faibles que celles des technologies conventionnelles de production d'électricité en Espagne et que l'EPT calculé est aux alentours d'un an de fonctionnement. De plus, les résultats montrent que la majorité des impacts est due à l'utilisation d'énergies fossiles et de l'électricité du réseau pour le fonctionnement de l'installation [143].

Il est donc important de discuter des systèmes d'hybridation pour la production d'électricité solaire et du mix énergétique du pays dans lequel cette technologie est utilisée. En effet, si ces derniers sont basés sur des énergies fossiles, alors l'impact de la technologie solaire est bien plus important que s'ils sont à base d'énergie renouvelable. Une seconde option pour diminuer les impacts liés à ces énergies serait de diminuer la demande de production et donc qu'elles puissent n'être réalisées que par du solaire.

Une étude similaire a été menée par Whitaker *et al.* en 2013. En effet, l'ACV d'une tour solaire – cette fois située à Tucson en Arizona – a été réalisée. Cette étude avait pour but d'évaluer les émissions GES, la consommation d'eau et la demande énergétique globale avec comme unité fonctionnelle 1 kWh électrique produit. Le système a été modélisé dans SimaPro 7.2, avec les données d'ecoinvent 2.0 pour le champ d'héliostat, la tour, le système de stockage thermique, le système de production de vapeur, le système de production d'électricité et le fluide caloporteur (sels fondus). L'ensemble du système est présenté en détails Figure I-60 et a une durée de vie de 30 ans. Au niveau des caractéristiques, l'installation a une capacité nette de production de 106 MW ce qui permet de produire 378463 MWh/an avec un facteur de charge de 41,7% (contre 71,1% dans l'étude précédente) en consommant 7920 MWh/an d'électricité du réseau. Pour produire l'électricité, l'installation dispose de 6682 héliostats, représentant 964712 m² d'aire d'ouverture, disposés sur 635 ha, et l'installation consomme 0,2 L/kWh d'eau. En plus du scénario décrit précédemment, les auteurs ont aussi étudié des variations comme le remplacement des sels fondus minéraux par des sels de synthèse, ou avec l'utilisation de gaz naturel plutôt que l'électricité du réseau pour les besoins de l'installation. Un autre système de stockage dit *thermocline* nécessitant un seul réservoir et moins de sels a également été envisagé, sachant que les variations précédentes peuvent être implémentées seules ou simultanément.

Leurs résultats montrent que l'installation de base émet 37 gCO_{2eq}/kWh, 94% de cet impact étant dus au dioxyde de carbone, 5% au protoxyde d'azote et le reste à d'autres gaz. La plus grosse partie de cet impact est produit lors du fonctionnement et de la maintenance de l'installation, représentant 45% de l'impact. Ensuite, c'est la phase de construction et le démantèlement de l'installation qui induit le plus d'impact avec 38% de contribution. Plus précisément, ce sont les 7920 MWh/an d'électricité du réseau (775 gCO_{2eq}/kWh au moment de l'étude) qui font chuter le bilan en représentant 97% des émissions de la phase de fonctionnement et de maintenance. La consommation d'eau est évaluée à 1,4 L/kWh, le fonctionnement et la maintenance en représentant 67%. Elle est environ 19 fois inférieure à la consommation d'eau de la production d'électricité conventionnelle des États-Unis au moment de l'étude. Pour la production d'1 kWh électrique, l'installation nécessite 0,49 MJ_{eq}/kWh, dont 0,29 MJ_{eq}/kWh sont dus au fonctionnement et la maintenance de l'installation. Cela provient en très large majorité de la consommation électrique du réseau domestique qui nécessite 13 MJ_{eq}/kWh. Les auteurs ont également calculé le temps de retour sur l'énergie, qui vaut

15 mois. Pour finir, les auteurs ont comparé leurs résultats sur l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'eau avec des technologies conventionnelles de production (nucléaire, charbon et gaz naturel (cycle combiné)) ainsi que les autres solutions renouvelables (éolien et photovoltaïque). La comparaison est présentée dans le Tableau I-3 [144].

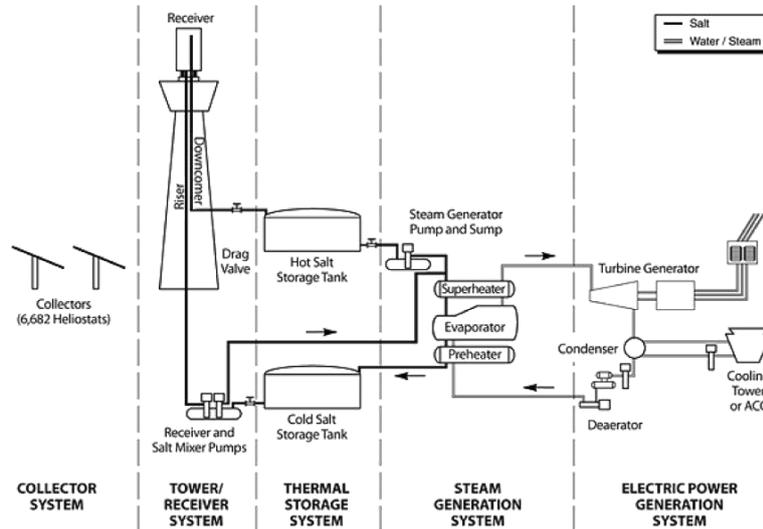


Figure I-60 : Description du système modélisé par [144] avec le champ solaire (collector system), la tour (tower/receiver system), le stockage thermique (thermal storage system), le système de production de vapeur (steam generation system) et la turbine électrique (electric power generation system) [144].

Tableau I-3 : Comparaison des impacts du système à tour solaire avec les systèmes de production d'électricité conventionnels [144].

	Tour solaire	Charbon	Nucléaire	Gaz naturel	Éolien	Photovoltaïque
Changement climatique (gCO _{2eq} /kWh)	37	1001	13	480	11	44
Consommation en eau (L/kWh)	0.34	0.95 - 2.6	1 - 2,5	< 0,01 - 0,91	< 0.01	< 0,01 - 0,1

Il est donc possible de voir que le système étudié dans ce travail émet moins de gaz à effet de serre que lors de l'utilisation de charbon, du gaz naturel et du photovoltaïque. En revanche, l'éolien et le nucléaire sont plus performant. Au niveau de la consommation d'eau le bilan est plus difficile à dresser en raison de grosses variations, mais dans tous les cas le système étudié ici utilise moins d'eau que le charbon et le nucléaire. Au contraire, l'utilisation de l'éolien et du photovoltaïque en consomme moins. L'étude montre donc que l'électricité produite via le solaire à concentration a un bilan écologique et énergétique meilleur que les énergies fossiles quand les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'eau, la demande énergétique et

le temps de retour sur énergie sont étudiés. Cependant, des améliorations du modèle sont possibles au niveau de la précision des données d'inventaire et des calculs [144].

Ces deux études permettent aussi de montrer que l'ACV est un outil permettant de faire des choix pour améliorer le bilan écologique. En effet, entre l'étude de de Lechòn *et al.* et celle de Whitaker *et al.*, une différence de facteur de charge de 24% est à noter. Ce qui permet une production nettement plus importante dans le premier cas que dans le second. Cependant, dans l'étude de de Lechòn *et al.*, l'hybridation au gaz naturel induit des émissions de gaz à effet de serre nettement plus important 203 gCO_{2eq}/kWh contre 37 gCO_{2eq}/kWh dans le cas de Whitaker *et al.*. Il serait donc pertinent d'avoir un facteur de charge important et une hybridation plus propre afin d'avoir une production plus importante sans que l'impact soit trop grand.

En 2013, Kuenlin *et al.* ont également étudié l'impact écologique d'une installation solaire à concentration à tour et l'ont comparé avec les technologies actuelles [145]. L'étude compare quatre installations utilisant 4 technologies à concentration, à savoir le cylindro-parabolique, la tour, le Fresnel et le parabolique, et les compare à des technologies de production d'électricité fossiles (charbon et gaz) et au nucléaire. Ici ne seront présentés que l'étude et les résultats de la tour solaire et la comparaison avec les technologies conventionnelles. L'unité fonctionnelle utilisée pour la comparaison est aussi 1 kWh électrique produit par l'installation. La tour étudiée est celle du projet GermasSol localisé à La Luisiana, en Espagne sous une irradiance directe normale (DNI) de 2000 kWh/m²/an. A noter qu'aucune hybridation n'a été prise en compte et que l'électricité normalement produite par hybridation est retranchée à celle globalement produite. Les limites de l'étude incluent la construction de l'installation (extraction des matières premières, mise en forme, transport et assemblage) qui comprend le champ solaire, la tour, le stockage et le raccordement au réseau, puis le fonctionnement et la maintenance de l'installation, son démantèlement et sa fin de vie. Les limites excluent l'impact des machines de construction, l'impact de la main d'œuvre à la construction, le démantèlement, les bâtiments de contrôle et le recyclage. Le LCIA a été réalisé avec la base de données EcoInvent 2.2 et les calculs d'impact avec la méthode Impact 2002+ avec les indicateurs end-point sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes, le changement climatique et les ressources. Leurs résultats montrent que c'est le champ solaire qui induit le plus de dommages sur tous les indicateurs en contribuant à, au moins, 50% de l'impact à chaque fois. Ensuite vient le stockage thermique et la maintenance. Il est possible de remarquer que, en agrégeant tous les impacts, la tour a l'impact le deuxième plus petit derrière les concentrateurs paraboliques. La comparaison avec les technologies conventionnelles a été réalisée avec la technologie solaire la plus impactante, qui n'est pas la tour solaire mais le concentrateur cylindro-parabolique. Cependant les résultats de la comparaison montrent que les impacts causés par l'installation solaire sont très nettement plus faibles que ceux du charbon, pour toutes les catégories. Lorsque le solaire est comparé au gaz naturel, il est possible de remarquer que le dommage sur la santé humaine est environ 2,25 fois plus faible ; pour la qualité des écosystèmes les impacts sont comparables ; en revanche pour le changement climatique et les ressources, le dommage du solaire est respectivement 18,5 et 15,7 fois plus faible que celui du gaz naturel. Finalement, la comparaison au nucléaire permet de montrer que leurs dommages sont comparables pour la santé humaine et pour la qualité des écosystèmes ; pour le changement climatique c'est le dommage du solaire qui est supérieur ; finalement, pour les ressources, l'impact du solaire est nettement plus faible (16,7 fois). Les auteurs ont aussi étudié l'importance de la situation géographique de l'installation et les tendances observées sont claires. En effet, plus l'irradiance est élevée, moins les dommages sur

toutes les catégories le sont. Ensuite, la distance à une source d'électricité augmente aussi l'impact mais légèrement. Par exemple entre 1 et 10 km, les différences sont minimales, mais entre 1 km et 2020 km la variation peut aller d'un facteur compris entre 1,2 et 1,6. La Figure I-61 présente ces résultats.

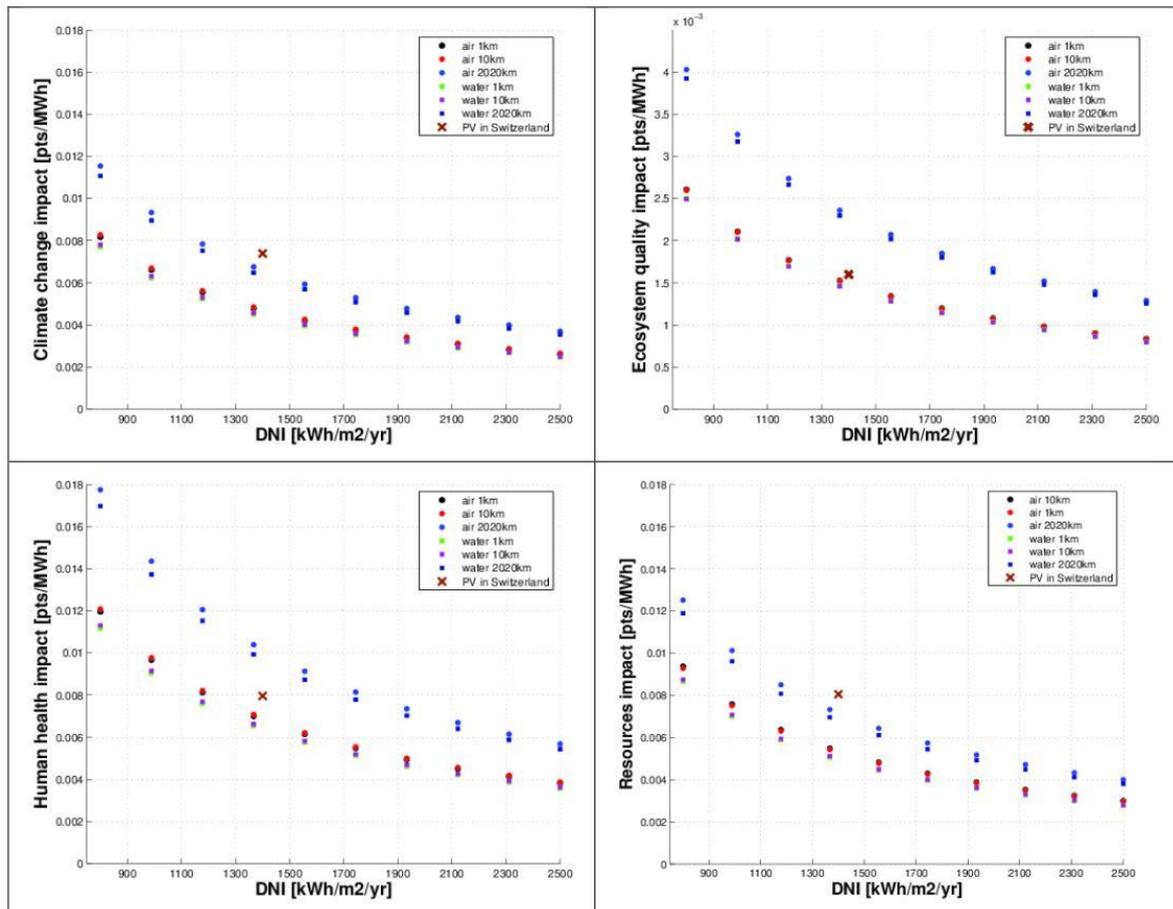


Figure I-61 : (Haut gauche) Evolution du dommage sur le réchauffement climatique, (Haut droit) la qualité des écosystèmes, (Bas gauche) la santé humaine et (Bas droit) les ressources en fonction de l'irradiance normale directe (DNI) et de la distance à une source d'électricité (1, 10 ou 2020 km) [145].

Les auteurs concluent donc l'étude en notant que c'est l'étape de construction qui induit le plus de dommages sur l'environnement, notamment à cause du champ solaire. De plus, en comparaison avec les technologies classiques (charbon, gaz), le solaire à concentration a un net avantage au niveau des émissions de gaz à effet de serre. Les auteurs remarquent aussi que moins les installations sont hybrides, meilleurs sont leurs impacts mais plus chère est l'électricité. Evidemment, l'irradiance normale directe est un facteur déterminant parce qu'elle permet d'augmenter la production d'électricité et donc de diminuer la demande énergétique au réseau ou en énergies fossiles, ou d'envisager des installations réduites [145].

Les études précédentes ont montré que les tours solaires permettaient de produire de l'électricité en émettant des quantités de gaz à effet de serre bien plus faibles que les technologies fossiles comme le charbon et le gaz naturel dans le cas où aucune hybridation n'est nécessaire. Cependant, lors de l'hybridation au gaz naturel ou avec de l'électricité, les impacts sont beaucoup plus mitigés, voire au désavantage de la tour solaire. Il en est de même lorsque l'installation est placée dans un pays où le mix électrique est fortement carboné. Parmi par les

technologies étudiées, seul le nucléaire émet moins. Lorsque d'autres catégories de dommages sont étudiées (santé humaine, impact sur les ressources, qualité des écosystèmes) le solaire a encore une fois un avantage sur les technologies fossiles. Les études ont également montré que l'irradiation normale directe était un facteur influant sur les performances énergétiques puisqu'elle permet de produire plus ou moins d'électricité. Il est à noter que la tour solaire nécessite en moyenne 2,8 ha/GWh/an aux Etats-Unis [146]. Cependant, les nombreuses études présentées précédemment ne donnent aucune information sur les indicateurs liés aux occupations ou transformations des sols.

I.4.3.2. Les concentrateurs paraboliques

En 2006, Cavallaro et Ciralo ont réalisé une des premières ACV sur un concentrateur parabolique hypothétique pour produire de l'électricité via un moteur Stirling. L'installation est imaginée pour produire 1 MWh d'électricité à l'aide de 17 concentrateurs dish de 400 m² utilisant 54 miroirs. Cependant, bien que l'installation d'1 MWh soit imaginée, un des exemplaires des concentrateurs de 400 m² qui la composerait a été réalisé par l'Université National d'Australie. L'installation est prévue pour avoir 5 moteurs Stirling recevant de la vapeur à 550 °C environ et 4,5 MPa, et pour produire de l'électricité avec un rendement solaire-électricité de 18%. Les limites de l'étude incluent la production des concentrateurs, du béton et des moteurs, le transport vers le site, l'assemblage, le démantèlement et le traitement des déchets (recyclage et déchets). Le recyclage est considéré en tout ou rien, c'est-à-dire que, lorsqu'il est considéré, tout ce qui peut être recyclé l'est. L'unité fonctionnelle utilisée est toujours le kWh d'électricité produit. Il est important de noter que les concentrateurs et les moteurs sont produits en Australie et installés dans le sud de la Sicile. Les données utilisées proviennent de précédentes études et de Simapro, ETH-ESU, IDEMAT et BUWAL. Les calculs ont été réalisés avec la méthode EcoIndicateur99 pour les impacts liés aux substances cancérigènes, aux substances respiratoires organiques et inorganiques, au changement climatique, aux radiations, à la couche d'ozone, à l'écotoxicité, à l'utilisation des terres, aux minéraux et aux énergies fossiles. Les auteurs précisent que le démantèlement et le transport pourraient être sous-estimés en raison d'un manque d'informations. Pour le transport, c'est celui lié à la maintenance de l'installation qui n'est pas connu ; cependant le transport des composants est bien pris en compte. Leurs résultats montrent des tendances similaires à celles retrouvées pour les centrales à tour : les impacts sont majoritairement dus à la construction et l'assemblage de l'installation bien que, pour les produits cancérigènes, les substances respiratoires organiques, les radiations, l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'écotoxicité, le transport ait un impact non négligeable : 30%, 15%, 55%, 55% et 15% du total, respectivement. Lorsque le recyclage est utilisé, l'impact est largement diminué : par exemple, l'impact sur le réchauffement climatique passe de 13 gCO_{2eq}/kWh à 7 gCO_{2eq}/kWh. Lorsque les catégories end-point sont étudiées, c'est le dommage sur les ressources qui est le plus important, suivi par celui sur la santé humaine et enfin celui sur la qualité des écosystèmes. L'étude est conclue en disant que cette option pourrait être très avantageuse comparée aux technologies fossiles, au vu de ses faibles impacts par rapport à ces dernières [147].

Bravo *et al.* ont étudié l'hybridation d'un système dish-stirling avec du gaz naturel ou du biogaz afin d'augmenter la production d'électricité à Séville, Espagne. L'ACV a été réalisée en utilisant SimaPro v7.3, la base de données Ecoinvent 2.0 et la méthode de calcul EcoIndicateur99 avec la perspective hiérarchisée. Le système étudié est constitué de deux dish-stirling de 10 kW hybridés soit avec du gaz naturel soit du biogaz et d'une durée de vie de

30 ans. Les étapes étudiées sont celles de la construction, le fonctionnement et du démantèlement, avec des données d'études précédentes et d'une installation pilote. La fin de vie a été prise en compte pour les matériaux métalliques, céramiques, plastiques et le verre. Les consommations de gaz naturel et de biogaz sont également prises en compte, ainsi que leur extraction, production, transport et distribution. L'unité fonctionnelle utilisée pour la comparaison est le kWh produit. Les résultats montrent que le système utilisant le biogaz produit plus d'énergie que celui au gaz naturel (17389 kWh/an contre 2971 kWh/an). A noter que les consommations respectives de gaz naturel et de biogaz sont de 23600 m³/an et 2440 m³/an. Ce résultat est à nuancer parce que la législation espagnole limite l'utilisation du gaz naturel et non le biogaz ce qui permet son utilisation en plus grande quantité. Les dommages finaux de l'installation hybride au gaz naturel et au biogaz sont respectivement de 43,5 points/MWh et 21,6 points/MWh. Cela montre une diminution du dommage d'environ 50% entre l'installation au biogaz et celle au gaz naturel. Cette différence s'explique notamment par un impact sur les ressources bien plus important (environ 45%) alors que dans les autres catégories de dommages (santé humaine et qualité des écosystèmes) c'est l'installation au biogaz qui est plus impactante. Ce dommage important sur les ressources vient de l'utilisation de ressources fossiles, d'après l'analyse mid-point. Pour l'installation au biogaz, la même conclusion est tirée : c'est l'utilisation des ressources fossiles qui impacte le plus. D'après les calculs réalisés avec IMPACT 2002+ les quantités de gaz à effet de serre émises sont 265 gCO_{2eq}/kWh avec le biogaz et 410 gCO_{2eq}/kWh avec le gaz naturel. L'étude conclue donc que l'hybridation de l'installation dish-stirling avec une autre énergie renouvelable (biogaz ici) offre un avantage écologique et énergétique [148].

Étant donné l'impact des activités humaines sur les écosystèmes, la qualité de vie des générations futures dépend de la durabilité et de la pérennité de notre système socio-économique. Afin d'évaluer cette durabilité, une méthode a été proposée en 2008 par Walter Klopffer : le « *life cycle sustainability assessment of products (LCSA)* ». Cette méthode est basée sur trois piliers, à savoir l'impact environnemental, l'impact économique et l'impact social d'un produit. L'ACV se trouve au cœur de cette méthode puisqu'elle constitue la partie « impact environnemental du produit » [149]. Cependant, cette méthode n'est pas très mature et reste peu utilisée pour l'instant [140]. Plus récemment, en 2021, Backes *et al.* ont réalisé un analyse de cycle de vie de durabilité (LCSA) à propos d'une installation dish-stirling à Palerme en Sicile. Le LCSA agrège l'ACV avec le CCV (cout du cycle de vie) et l'ASCV (analyse sociale du cycle de vie), afin de considérer tous les aspects socio-économico-environnementaux d'un produit ou d'un procédé. Ici ne seront présentés en détail que les résultats de l'ACV ; cependant les conclusions du LCSA seront aussi présentées. L'unité fonctionnelle choisie est « un système de production d'électricité ». Les limites sont définies comme cradle-to-use, donc tout ce qui se trouve en amont de l'utilisation et le logiciel utilisé pour l'ACV est GaBi. Le système étudié est présent sur le campus de l'université de Palerme : c'est un concentrateur dish d'une surface d'ouverture nette de 106 m² et une distance focale de 7,45 m équipé d'un moteur stirling de quatre pistons double-effet placés au point focal, avec une surface d'ouverture de 0,03 m². Le réflecteur est composé de 104 miroirs indépendants qui ont une réflectance de 95% et une émissivité de 85% quand ils sont propres. Le fluide utilisé dans le moteur est de l'hydrogène, qui atteint un maximum de 720 °C à une pression maximale de 20 MPa. Sous une irradiance normale directe de plus de 900 W/m², le rendement de conversion solaire-électricité est supérieur à 30%. Le tracking biaxial du soleil est réalisé par des moteurs électriques consommant 1600 W. La durée de vie du système est évaluée à 25 ans. L'ensemble du système est produit en Suède et est transporté à Palerme en camion diesel. La base de données Gabi SP40 et la base de données Ecoinvent 3.5 ont été utilisées pour l'inventaire. La méthode CML

2001 a été utilisée pour les indicateurs sur le réchauffement climatique, le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophication, le potentiel de création d'ozone photochimique, le potentiel d'appauvrissement abiotiques fossiles, le potentiel d'appauvrissement en ressources abiotiques et le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Le système évalué comprend l'unité de conversion d'énergie, le tripode de support du moteur, les miroirs, la structure circulaire, le support du dish, les composants électroniques, le moteur de suivi vertical et la plateforme tournante (suivi azimutal). Le détail des masses et des hypothèses est donné dans l'étude. Les résultats montrent un total de 35 tCO_{2eq}/dish-stirling émises. De ces émissions, 21% sont dues au suivi vertical, 16% au support du dish, 16% aux composants électroniques, 12% aux fondations et 11% à l'unité de conversion. Du point de vue « matériaux » c'est l'acier qui est responsable de 54% de l'impact sur le réchauffement climatique et 43% de la demande énergétique. Le potentiel d'acidification est de 135 kgSO_{2eq}/dish-stirling et est dû à 31% à l'unité de conversion et à 26% aux composants électroniques. Les composants électroniques ont un fort impact puisqu'ils représentent 46% du potentiel d'eutrophication (34% sont dus à l'unité de conversion), 48% du potentiel de création d'ozone photochimique, 61% du potentiel d'appauvrissement de ressources abiotiques et 54% du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Le potentiel d'appauvrissement abiotiques fossiles est plus nuancé puisque 21% du potentiel sont dus aux composants électroniques, 21% au système de suivi vertical et 13% à l'unité de conversion. L'impact de la phase d'utilisation est négligeable devant les impacts de la construction. Le temps de retour sur l'énergie a été calculé avec une production de 46 MWh/an et vaut 3,14 ans, ce qui est élevé comparé à la littérature. L'étude conclue donc que les zones d'impacts les plus importantes sont les composants électroniques, le système de suivi vertical et l'unité de conversion. Lorsque le point de vue des matériaux est pris, c'est l'acier qui a le plus d'impact. D'un point de vue financier, les auteurs ont calculé un coût de 308467 € au total ce qui, ramené au kWh, représente 0,268 €/kWh. Le manque de données n'a pas permis de réaliser un ASCV complet mais les auteurs ont pu calculer un salaire de 12,5 €/h pour des travailleurs non qualifiés [150].

Les études précédentes montrent que la technologie dish-stirling peut être considérée comme compétitive pour la production d'électricité, surtout en comparaison avec les technologies fossiles, comme l'ont montré Kuenlin *et al.* Elles montrent également que l'impact est situé en grande majorité dans la construction de la parabole et les composants électroniques nécessaires à son fonctionnement quand c'est nécessaire. Tout comme pour les tours, il est important de garder en tête que l'intermittence de ces technologies est souvent compensée par une hybridation avec du gaz naturel ou avec de l'électricité. Les impacts sont donc fonction de cette hybridation. Au niveau du prix de l'électricité, les calculs de Backes *et al.* chiffrent la production à 0,268 €/kWh. En France, l'électricité produite coûte 0,193 €/kWh, donc nettement moins qu'avec le concentrateur solaire [151]. La production d'électricité n'est pas la seule application des concentrateurs paraboliques : la cuisson est aussi une application possible. La prochaine partie détaillera des ACV sur la cuisson solaire avec des concentrateurs paraboliques.

I.4.3.3. La cuisson solaire

I.4.3.3.1. Potentiel des cuiseurs solaire pour éviter des émissions

Les deux avantages le plus souvent mis en avant pour la cuisson solaire sont l'absence d'émissions de gaz à effet de serre et de particules fines durant la phase d'utilisation. Panwar *et al.* ont étudié l'utilisation d'un cuiseur solaire à Udaipur en Inde pour préparer la nourriture

pour les animaux laitiers. Leurs résultats ont montré qu'en remplaçant 100% de l'utilisation de biomasse par le solaire l'émission de 425 kg de CO₂ sur une année pouvait être évitée. Dans le cas du diesel, de LPG (Liquefied Petroleum Gas) et du kérosène les émissions évitées valaient, respectivement, 113,1, 100,8 et 134,1 kgCO₂ sur un an [152]. Herez *et al.* ont calculé les émissions qui pouvaient être évitées lorsque le solaire est utilisé pour cuisiner dans une maison, un restaurant, un hôtel ou un snack au Liban. Le LPG a été considéré comme un mélange de butane et de propane au ratio 80:20. Les résultats des calculs ont montré qu'un maximum de 60, 910, 4000 et 6000 kgCO₂/mois dans, respectivement, un foyer, un snack, un hôtel et un restaurant pouvaient être évités [153]. Liyew *et al.* ont aussi étudié le gain écologique possible grâce au solaire. L'étude prend place en Ethiopie où environ 80% de la population vit en zone rurale et utilise des méthodes de cuisson traditionnelle, à savoir le feu ouvert dit « trois pierres » (80%) ou des poêles à bois (11%). Les auteurs ont calculé les émissions de gaz à effet de serre en prenant en compte le CO₂, le CH₄ et N₂O, et ont également évalué la pollution de l'air intérieur, i.e. les émissions de CO, de particules (PM₁₀) et de CH₄, en fonction de la technologie évaluée. Dans un premier temps, il est possible de voir que le feu ouvert émet plus de gaz à effet de serre et impacte plus la santé des utilisateurs. Si tous les feux ouverts (16,35 millions) et les poêles (136 000) étaient remplacés par des cuiseurs solaires l'émission d'environ 33 MtCO₂/an pourraient être évitée, ce qui représente environ 22% des émissions du pays en 2010 [154]. Bien que le gain écologique soit réel lorsque les énergies solaires sont utilisées à la place des énergies fossiles, il est important de garder en tête que la ressource solaire est diluée (environ 1 kWh/m²), intermittente, et pas répartie de manière homogène sur la planète : la plus grosse partie est présente entre les latitudes 30° nord et 30° sud. Son utilisation est donc dépendante de la position géographique de l'utilisation et de la météo. C'est pourquoi l'utilisation du solaire est souvent couplée avec une autre solution de cuisine comme l'électricité ou le gaz.

I.4.3.3.2. ACV de cuiseurs solaires

Bien que l'avantage brut sur la réduction des émissions de CO₂ liée à l'utilisation de cuiseur solaire ait été étudiée, les ACV complètes sur des cuiseurs solaires sont rares.

Andrianaivo et Ramasiarinoro ont réalisé une ACV de la parabole SK14 à Madagascar, qui a plus de 320 jours ensoleillés par an [155]. L'objectif était de comparer le feu de bois, le charbon et la parabole solaire pour la base de la préparation des repas d'une famille malgache sur une année. Les limites de l'étude considèrent la construction et l'utilisation du cuiseur solaire étudié, ce dernier étant une parabole SK14 commercialisée par SOLTEC. Pour le feu de bois et le charbon la combustion et le transport sont considérés. Cependant aucun détail n'est donné à propos de la méthode d'inventaire, ce qui complique l'évaluation de la robustesse des données.

Pour un seul repas, il est estimé qu'il faut 2,25 kg de bois et 2,51 kg de charbon. Le charbon doit être transporté, ce qui représente 0,35 MJ/repas. Pour ce qui est de la parabole, comme aucune énergie n'est nécessaire pendant l'étape d'utilisation, seule celle utilisée pour la construction est prise en compte. La configuration d'utilisation de la parabole est que 55% du temps la parabole est utilisée supplée par le charbon de bois le reste des 45%. Dans le cadre de l'étude cela revient à dire que les émissions du repas sont dues à 55% à la parabole et 45% au charbon. Les émissions lorsque toutes les phases sont considérées valent 3,79 kgCO₂/repas et l'énergie nécessaire est de 37,06 MJ/repas.

Les calculs d'impact sur toute la durée de l'unité fonctionnelle (1 an) montrent que les émissions de CO₂ du bois et du charbon sont respectivement de 3435 et 8940 kgCO₂/an/famille. Lorsque la parabole est utilisée 2 fois par jour seulement, les émissions sont de 2500 kgCO₂/an/famille, soit une diminution d'environ 27% par rapport au bois et de 72% par rapport au charbon. En plus de cette diminution, les auteurs ont noté des avantages sur les pollutions intérieures des foyers malgaches et la diminution des risques liés à la combustion de biomasse (désertification, feux, pertes de biodiversité...).

Certains avantages socio-économiques sont également à noter, notamment au niveau de l'indépendance énergétique des familles et plus largement des régions et du pays, de l'amélioration des conditions de vie, de la création d'emploi et autres. Cependant, le fait de devoir déplacer la parabole pour suivre le soleil oblige les utilisateurs à se placer au soleil et cuisiner dans des conditions difficiles ce qui constitue un bémol important en plus de l'intermittence, et complique l'acceptation sociale de la parabole [155]. Le plus gros frein à l'utilisation de cette parabole reste l'achat initial de la parabole qui représente un gros investissement.

I.4.3.3.3. Utilisation combinée et projection à différentes échelles

Plus récemment en 2019, Mendoza *et al.* ont étudié l'intérêt écologique d'utiliser un cuiseur solaire fait maison à la place d'un four micro-ondes [156].

Leur étude avait les objectifs suivants : i) évaluer les impacts des cuiseurs solaires et identifier les points d'amélioration, ii) comparer les cuiseurs solaires entre eux et avec les fours micro-ondes, iii) étudier les impacts d'une utilisation combinée des cuiseurs solaires et du four micro-ondes. Pour remplir chacun de ces objectifs, trois unités fonctionnelles ont été utilisées : i) chauffer de la nourriture une fois par jour (déjeuner) sur 8 mois, ii) une utilisation pour chauffer un plat et iii) chauffer la nourriture avec un cuiseur solaire et un four micro-ondes. Les limites de l'étude ont été considérées comme cradle-to-grave, et prennent donc en considération l'extraction des matières premières et leurs mises en forme, l'assemblage du produit, l'utilisation (mix électrique européen pour le four à microondes Gallego-Schmid *et al.* [157]), les remplacements et finalement la fin de vie du produit. L'ensemble des étapes de transport ont également été prises en compte. Les données d'inventaire de la base de données ecoinvent 2.2 et celles du logiciel GaBi v6.1 ont été utilisées pour construire les modèles. Les trois cuiseurs solaires (un de type « boîte », un dit « à panneaux » et un cuiseur parabolique) ont été réalisés à la main en utilisant un maximum de matériaux de récupération ou achetés à proximité du lieu d'assemblage. Chaque concentrateur nécessite différents matériaux achetés neufs : du PVC renforcé à l'aluminium, des sacs et du film de polyéthylène, des feuilles de polycarbonate, de la peinture noire, de la colle et du scotch. Il est important de noter que tous les matériaux ne sont pas toujours utilisés dans chaque concentrateur. De plus, certains matériaux ont été récupérés et achetés, comme les feuilles d'aluminium qui sont rachetées neuves en partie. Les concentrateurs finaux sont présentés Figure I-62 et pèsent 1,56 kg, 256 g et 915 g pour le concentrateur boîte, celui à panneaux et le parabolique, respectivement.



Figure I-62 : (Gauche) Concentrateur boîte, (Centre) concentrateur à panneaux et (Droite) concentrateur parabolique étudié par Mendoza et al. [156]

Deux hypothèses sont importantes : la première est que tous les matériaux de récupérations utilisés n'impliquent aucun impact écologique et la seconde que la plus grande distance parcourue par les produits est 25 km en train. Les données d'inventaire du four à micro-ondes d'une étude précédente ont été utilisées (Gallego-Schmid et al. [157]). Elles indiquent que le four à micro-ondes pesait 10,6 kg au total. Pour les calculs d'impacts réalisés sur le logiciel GaBi v7.1, c'est la méthode CML 2001 qui a été utilisée sur 11 indicateurs (*i.e.* la perte des ressources abiotiques des éléments, la perte des ressources fossiles abiotiques, le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophication, le potentiel de réchauffement climatique, le potentiel de toxicité pour l'humain, le potentiel d'écotoxicité aquatique marine, le potentiel d'écotoxicité aquatique en eaux douces, le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, le potentiel de création d'oxydants photochimiques et le potentiel d'écotoxicité terrestre), la demande globale en énergie primaire a également été calculée.

Plusieurs scénarios ont également été étudiés en faisant varier la durée de vie des concentrateurs (1, 3 ou 8 mois) et leur fréquence d'utilisation sur l'année (65, 130 et 240 jours), complétée par le four à micro-ondes.

Leurs résultats pour le premier objectif (chauffer de la nourriture une fois par jour pendant 8 mois avec un cuiseur solaire) montrent que c'est le cuiseur parabolique qui a la valeur d'impact maximale sur 10 des 11 catégories, avec un impact supérieur d'un facteur variant de 2 à 8. La catégorie restante est l'impact sur la perte des éléments abiotiques et elle est dominée par le cuiseur boîte. Ce dernier a également l'impact le plus faible sur le potentiel d'écotoxicité en eaux douces, le potentiel d'eutrophication, le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et le prix. Le reste des catégories est minoré par le concentrateur à panneaux. Les résultats montrent aussi que la durée de vie a un impact important sur les résultats. En effet lorsque la durée de vie est d'un mois les impacts augmentent – assez logiquement – d'un facteur 3 comparés à ceux avec 3 mois de durée de vie en raison de la nécessité de 3 concentrateurs contre 1. Lorsque la contribution des composants aux impacts est étudiée, les résultats montrent que les matières premières comptent pour entre 70% et 100% de l'impact. Ce sont les feuilles d'aluminium utilisées pour les réflecteurs qui impactent le plus pour la plupart des impacts, malgré leur faible contribution au poids des concentrateurs, et ce pour les trois concentrateurs. Le transport a un impact négligeable et la fin de vie ne diminue l'impact que dans le cas du potentiel de perte abiotique d'éléments.

Le deuxième objectif était de comparer le four à micro-ondes et les cuiseurs solaires sur la base d'un seul repas chauffé à midi. Il est important de noter que dans ce cas les concentrateurs ont été considérés avec une durée de vie d'un mois et le four à micro-ondes avec une durée de vie de 8 ans. Les résultats montrent que l'impact pour chauffer avec un concentrateur est plus faible de 10% comparé à celui du micro-onde pour l'indicateur pour le réchauffement climatique

et, d'un facteur 59 pour le potentiel d'écotoxicité aquatique en eaux douces. A noter que les potentiels d'épuisement de ressources abiotiques fossiles et la toxicité sur l'humaine augmentent de, respectivement, 12% et d'un facteur 3 lors de l'utilisation du concentrateur. De plus, le prix pour chauffer le repas est doublé voir quadruplé lorsque les cuiseurs solaires sont utilisés.

Lorsque l'utilisation combinée est étudiée (objectif et unité fonctionnelle iii)) les résultats dépendent du concentrateur utilisé. Lorsque le concentrateur à panneaux est utilisé, tous les impacts et le prix diminuent, sauf quand la durée de vie du concentrateur est de 1 mois : dans ce cas-ci, le prix du repas augmente de 128% si on utilise le concentrateur 240 jours/an et de 35% s'il est utilisé 65 jours/an. Le coût du repas est toujours plus élevé si l'on n'utilise le concentrateur que 65 jours/an. L'avantage écologique diminue également avec la diminution de la durée de vie et la diminution de la fréquence d'utilisation. Ceci est dû à la construction de plusieurs concentrateurs et donc de l'utilisation de plus grandes quantités de matières premières. Finalement, dans le cas d'un concentrateur parabolique, les avantages écologiques seraient bien plus faibles : une forte augmentation du potentiel de toxicité sur l'humain (+130%) et du prix (+211%) en fonction du scénario (durée de vie, fréquence d'utilisation) considéré sont observées, notamment à cause de la plus grande quantité de feuille d'aluminium et de velcro utilisées.

Afin de compléter l'étude, les auteurs ont considéré différentes échelles pour les résultats : la ville (Barcelone), la région (Catalogne) et le pays (Espagne), avec un taux de pénétration de 10%. Les résultats montrent quasiment toujours une diminution des impacts. En effet, pour le concentrateur à panneaux le gain sur les émissions de gaz à effet de serre serait de 319 à 1471 tCO₂eq/an pour l'échelle de Barcelone et de 9235 à 42559 tCO₂eq/an à l'échelle de l'Espagne en fonction du scénario d'utilisation (au mieux 240 jours/an et un changement tous les 8 mois, et au pire 65 jours/an avec un changement tous les mois). Ceci représente entre 0,004 et 0,018% des émissions totales de l'Espagne en 2016 [158]. Seul le potentiel de pertes de ressources fossiles abiotiques et le potentiel sur la toxicité humaine augmenterait dans le cas du concentrateur parabolique, toujours à cause de la grande quantité de feuilles d'aluminium utilisée. Finalement les auteurs précisent que l'utilisation de cuiseur solaire prend part à l'économie circulaire en réutilisant des matériaux et en réduisant le nombre de produits achetés et jetés rapidement par les foyers. Des économies d'énergie peuvent être réalisées : 18 GWh/an sur l'Espagne dans le pire cas d'utilisation (65 jours/an) et 67 GWh/an pour le meilleur (240 jours/an). Le côté social de l'étude est discuté par les auteurs, qui expliquent que le changement d'habitude peut être réalisé mais que l'intermittence et le temps de chauffe du repas sont de gros freins puisque cela va à l'encontre du monde de vie confortable et rapide actuel. Il est donc possible de conclure que l'utilisation fréquente d'un cuiseur solaire robuste permettrait nettement de diminuer les impacts et les coûts. Cependant, à l'inverse, si le cuiseur est fréquemment changé et peu utilisé alors certains impacts augmentent ainsi que le prix. A l'échelle de l'Espagne, dans le meilleur cas, il serait possible d'éviter l'émissions de 42600 tCO₂eq/an, 4200 t/an/foyer de déchets, 67 GWh/an d'électricité et 23,2 M€/an pour 10% de pénétration dans la population seulement. De plus l'utilisation de matériaux de récupération et la réutilisation des matériaux des anciens concentrateurs participeraient à une économie circulaire. Finalement des avantages sociaux découleraient sûrement de l'utilisation de cuiseur comme des lieux d'échanges et de fabrication, une démocratisation des solutions écologique et un rapprochement de la population autour des questions d'écologie [156].

I.5. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté toutes les composantes nécessaires pour appréhender ce travail : métallurgie classique, la réduction sous hydrogène et ammoniac, l'utilisation de l'énergie solaire pour la métallurgie et les analyses de cycles de vie.

Dans un premier temps, les différentes technologies composant les deux voies de production de l'acier – la voie intégrée et la voie de la réduction directe – ont été présentées. Leurs principes ainsi que leurs avantages et inconvénients ont été décrits. Avec ces informations il est possible de conclure que la réduction directe est plus adaptée à une métallurgie durable. Ceci est notamment dû aux plus faibles températures de fonctionnement, à sa flexibilité de production, aux tailles des unités qui peuvent être plus petites et à ses faibles émissions en comparaison à celle de la voie intégrée : 1048 et 522 kgCO_{2eq}/tonne de métal pour la réduction directe au charbon ou au gaz respectivement contre 1479 kgCO_{2eq}/tonne de fonte liquide pour la voie intégrée. Par ailleurs, cette technologie permet aussi la décarbonation de la réduction du minerai de fer en utilisant de l'hydrogène. Ce dernier permet de plus des cinétiques de réduction plus élevées en raison de sa faible taille et de son avantage thermodynamique comparé au monoxyde de carbone classiquement utilisé. A noter que la production d'hydrogène est majoritairement réalisée par vaporeformage de méthane (59% de la production mondiale en 2020), procédé qui émet environ 11 kgCO_{2eq}/kgH₂. L'hydrogène n'est donc pas un réducteur sans impact. D'autres techniques comme l'électrolyse de l'eau permettent la production d'hydrogène en émettant moins de gaz à effet de serre. Cependant, les émissions induites par l'électrolyse dépendent fortement du mix électrique et varient en 1 à plus de 12 kgCO_{2eq}/kgH₂ en fonction de ce dernier. Par ailleurs, bien que la température de réaction soit plus faible que pour la voie intégrée, elle reste élevée (environ 950 °C). Pour l'atteindre, les fours à cuves actuels utilisent de l'énergie thermique provenant de la combustion de ressources fossiles comme du gaz naturel.

Il est donc possible d'identifier deux zones d'impacts majoritaires dans ce procédé : la production d'énergie thermique et la réaction via les gaz réducteurs. La première partie pourrait être réalisée avec le solaire à concentration. La littérature présentée dans ce chapitre permet d'affirmer que des procédés hautes températures comme celle de la réduction de minerai fer sont atteignables pour des coefficients de concentration relativement élevés (concentrateurs paraboliques ou tours solaires) tout en offrant une transmission d'énergie élevée. De plus, certaines études ont déjà montré la possibilité de la réduction de minerai de fer avec un concentrateur solaire mais, pour la plupart, sous une atmosphère carbonée. A notre connaissance, une seule étude s'intéresse à la réduction sous hydrogène de poudre d'hématite sous flux solaire, mais cette dernière ne présente aucun détail sur le schéma réactionnel ou la cinétique de réduction. De plus, la chauffe est réalisée de manière indirecte. Par ailleurs, la question du réducteur reste en suspens, une des solutions pouvant venir de l'utilisation d'ammoniac biosourcé. D'abord, il a été montré que la réduction de minerai de fer sous ammoniac peut être aussi performante que celle sous hydrogène. Ensuite, l'ammoniac peut être biosourcé à partir d'urée, comme de nombreuses études ont pu le démontrer.

En agrégeant les conclusions tirées des deux paragraphes précédents, il est possible de remarquer qu'au croisement se trouve la question de la pertinence de l'énergie solaire concentrée pour la réduction de minerai de fer avec un réducteur décarboné et potentiellement biosourcé. C'est sur cet aspect que la seconde partie de notre travail de thèse porte, afin de

proposer l'utilisation du solaire pour ce procédé haute température. Cela permettra aussi d'apporter les premiers éléments de réponse sur l'utilisation du solaire pour une société pérenne.

Le deuxième aspect sur lequel porte nos études concerne les procédés solaires à concentration basse-température. Un des procédés les plus répandus à basse température est la cuisine ; le solaire à concentration s'est montré adapté à ce dernier. Grâce à la littérature présentée ici, il est possible de conclure que le solaire à concentration améliore nettement le bilan écologique de ce procédé, surtout dans les pays où la ressource solaire est abondante. Souvent, c'est la méthode d'analyse de cycle de vie qui est utilisée pour réaliser l'évaluation environnementale. Cette méthode est normalisée et permet des comparaisons structurées de produits ou de procédés. D'abord elle consiste à définir un objectif clair ainsi que le champ d'étude. Ensuite, un inventaire de cycle de vie est réalisé : il consiste à rassembler tous les flux élémentaires et intermédiaires nécessaires à la construction du produit ou à la réalisation du procédé étudié. Finalement, les calculs sont réalisés suivant différentes méthodes de calcul, ce qui permet d'avoir un grand nombre d'indicateurs sur l'impact environnemental. L'application de cette méthode au solaire à concentration n'a pas été souvent faite : rares sont les études qui évaluent l'impact environnemental du cycle de vie du cuiseur solaire et pas uniquement le potentiel gain lors de l'utilisation de ce dernier. C'est ici que se situe la deuxième partie de ce travail, l'objectif étant de déterminer le réel gain écologique, sur tout le cycle de vie, de l'utilisation d'un cuiseur solaire au lieu d'un appareil conventionnel. Ces résultats permettront d'aborder le solaire à concentration au sein de la société comme un procédé quotidien et d'évaluer ses avantages écologiques et les conditions nécessaires à sa réalisation.

Comme énoncé précédemment, deux aspects du solaire à concentration seront étudiés ici, à savoir son application à des procédés hautes températures et l'impact écologique engrangé par son utilisation pour des procédés basse température. Afin de mener ce travail de nombreuses méthodes expérimentales ont été utilisées et seront présentées ci-après. Par la suite, l'étude sur l'impact écologique de l'utilisation du solaire pour un procédé basse température (cuisine) sera présentée ainsi que ses résultats. Puis, c'est l'étude sur l'application du solaire à concentration sur la métallurgie du fer qui sera présentées. Finalement, des conclusions et des perspectives seront apportées à ce travail.

Chapitre II. Techniques et méthodes expérimentales

Afin de mener les deux sujets sur le solaire à concentration, plusieurs techniques expérimentales et méthodes ont été utilisées. D'abord dans cette partie seront présentés le banc de tests solaires et les méthodes de caractérisation utilisées pour la réaction à haute température. Ensuite, la spécificité de la base de données ecoinvent telle qu'elle a été utilisée sera présentée. De plus, les impacts environnementaux évalués seront expliqués en détails.

II.1. Réaction sous flux solaire

Pour les expériences de métallurgie solaire, nous avons mis en place un banc de test afin de réaliser nos expériences [159]. Le banc de test, présenté Figure II-1-a et schématisé Figure II-1-b, est composé d'une lampe à arc Xenon (taille de l'arc 9X2 mm), d'une puissance de 1600 W électriques et de 384 W lumineux (XLH-E-1600X, Sciencetech) placée au premier foyer théorique d'un miroir ellipsoïdal. Le choix de la lampe Xenon repose sur son spectre pouvant simuler l'irradiation solaire ; il est présenté Figure II-2. La lampe émet de manière continue dans l'ultraviolet et dans le visible, avec de grands pics d'émission dans le proche infrarouge. Le choix de ce système s'appuie aussi sur ses bonnes qualités de collimation : les rayons lumineux sont concentrés au second foyer théorique du miroir qui se trouve à environ 38 cm du premier. C'est à proximité du second foyer qu'est placé le creuset dans lequel l'échantillon se trouve. Les creusets utilisés (Sceram, France) sont en alumine (Al_2O_3), mesurent 16 mm de diamètre et ont une épaisseur de parois de 2 mm. De plus, les creusets ont été recoupés pour ne pas dépasser du support du creuset ou pour avoir des formes particulières liées aux expérimentations. Le creuset est lui-même placé dans un réacteur en verre borosilicaté et de forme sphérique (Figure II-3) dont la courbure permet d'éviter une trop grande divergence des rayons incidents.

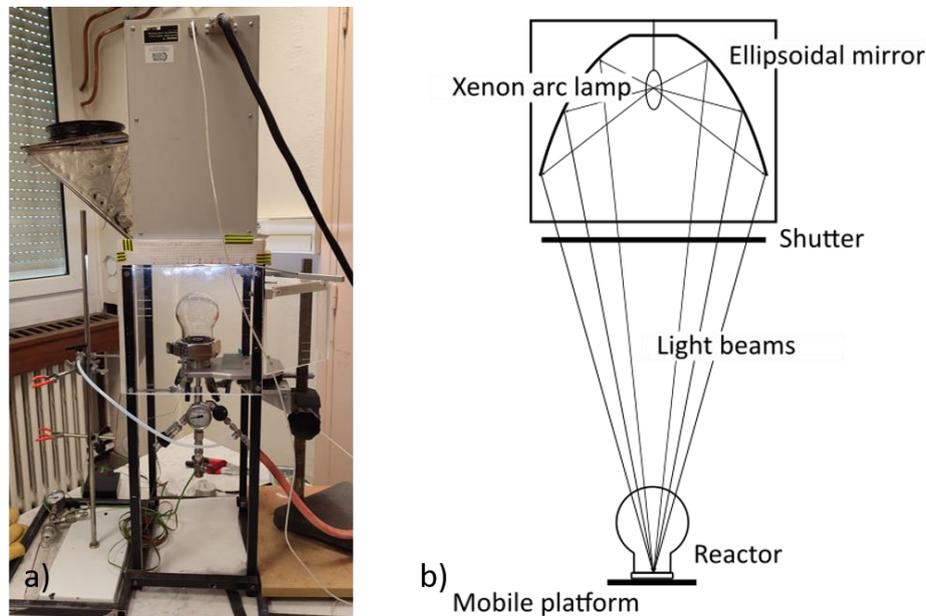


Figure II-1 : Photo (a) et schéma de principe (b) du banc solaire utilisé

Le creuset et le réacteur sont placés sur un support permettant l'étanchéité, réalisée grâce à un joint torique entre l'embase et le réacteur, maintenu en pression avec une bride (voir Figure II-3). Le support du réacteur est également équipé de nombreuses entrées et sorties permettant

notamment la mise en atmosphère réductrice ou inerte. Au niveau de la sécurité, une soupape de sécurité calibrée à 10 bars de pression maximale et un manomètre de contrôle sont aussi présents. Ce support est fixé sur deux plateformes Thorlabs XR25C montées perpendiculairement l'une sur l'autre, formant ainsi une plateforme mobile selon X et Y. La mobilité selon Z est réalisée grâce à un système de pignon crémaillère verticale. Finalement, le réacteur est instrumenté avec deux thermocouples et un capteur de pression. Les thermocouples sont de type K ; le premier est placé sous le creuset et le second est placé dans le réacteur proche de la surface du support, afin de mesurer la température de l'atmosphère. Le capteur de pression est un capteur différentiel Huba Control de type 520. Afin de faire l'acquisition en temps réel des températures et de la pression, une carte d'acquisition est interfacée en Labview.

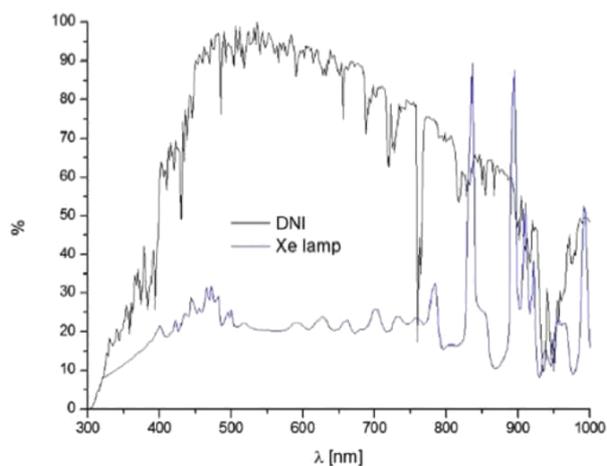


Figure II-2 : Spectre d'émission de la lampe Xénon en bleu et de l'irradiation directe normale (DNI) en noir [160].

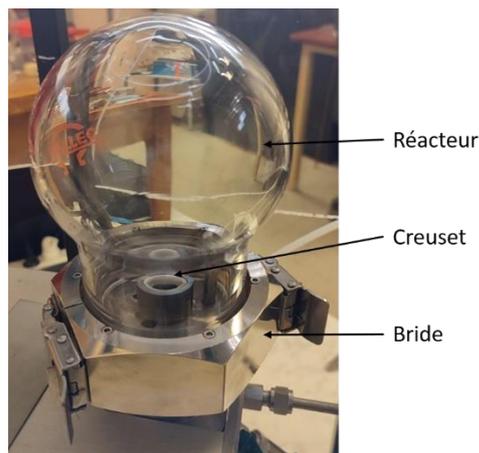


Figure II-3 : Photographie du réacteur, de la bride et du creuset.

De la poudre d'oxyde de fer et des pellets de minerai de fer ont été utilisés en tant qu'échantillon. Les pellets ont été produits par ArcelorMittal qui nous en a fourni via l'intermédiaire de M. José Barros Lorenzo, chef du département d'ingénierie des procédés sur le site de Maizière-les-Metz. Leur composition est présentée en Figure II-4.

Paramètre	Spécifications			Analyse *
	Typique	Minimum	Maximum	
Fe (naturel)				66.666
H2O	2		3	1.6
Fe	67.7	67.4		67.75
SiO2	1.6		1.8	1.68
Al2O3	0.40		0.6	0.36
CaO	0.55	0.35	0.8	0.58
MgO	0.30	0.20	0.40	0.30
TiO2	0.15		0.30	0.15
Mn	0.030		0.06	0.041
P	0.01		0.02	0.007
S	0.002		0.005	0.000
C	---			0.020
K2O	0.015			0.011
Na2O	0.035			0.023

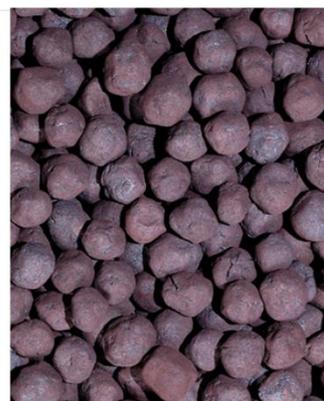


Figure II-4 : Composition des pellets de minerai fer utilisés pour les tests de réduction.

Pour les poudres, deux types ont été utilisées pour les essais : la première est une poudre micrométrique d'hématite pure à 98% (Alfa aesar) et la seconde a été réalisée en broyant des

pellets. Pour transformer les pellets en poudre, un mortier et un pilon en agate ont été utilisés (Giese 600M080 - Fisher Scientific - n°11735146).

Lors des expérimentations, une atmosphère réductrice a été mise en place via la vanne d'entrée présentes sur le support du réacteur. Les deux atmosphères utilisées étaient de l'hydrogène ou de l'ammoniac. L'hydrogène utilisé était sec et provenait d'un électrolyseur d'eau F-DGSi modèle WM-H2 ; pour l'ammoniac c'est une bouteille fournie par Air liquide qui a été utilisée avec une pureté de 99,95%. Dans la plupart des cas l'atmosphère était à 100% composée d'un des deux gaz.

Finalement, dans certains cas, les pellets ont été découpés avant ou après réduction grâce à une disqueuse de précisions Buehler IsoMet « low speed saw » équipée d'une lame diamant Buehler n°114254.

II.2. Méthodes de caractérisation

Afin de caractériser les échantillons ou les réactions, différentes méthodes de caractérisation ont été utilisées : diffraction des rayons X, microscopie électronique à balayage, spectroscopie à énergie dispersive, analyse thermogravimétrique et spectroscopie de masse. L'ensemble de ces méthodes et les machines utilisées sont présentés ci-dessous.

II.2.1. Diffraction aux rayons X (DRX) et affinement de Rietveld

Lors d'une analyse DRX, un échantillon cristallin est bombardé par un faisceau de rayons X dont la direction et la longueur d'onde sont connues. Lorsque les rayons X traversent l'échantillon ils sont diffractés dans des directions qui dépendent de la nature et de la structure du matériau ; les pics de diffractions sont repérés par leur position angulaire et leur intensité sur un diffractogramme. Finalement grâce à la loi de Bragg, qui lie l'angle de diffraction et l'agencement cristallographique de l'échantillon, il est possible de remonter aux phases présentes dans celui-ci.

De la diffraction des rayons X a été réalisée sur des poudres avant et après les réductions. La diffraction des rayons X (DRX) est réalisée avec une machine PANalytical Empyrean utilisée à 45 mA, 35 kW et avec une cible au cobalt ($\lambda = 1.789 \text{ \AA}$) présentée Figure II-5 à gauche. L'échantillon est placé sur un porte échantillon dit « spinner » qui permet la rotation de l'échantillon sur lui-même et donc d'améliorer la statistique de la mesure. Les caractéristiques typiques utilisées pour les scans sont présentées ci-dessous, à droite pour les scans courts et à gauche pour les longs.

Tableau II-1 : Paramètres utilisés pour les scans de diffraction aux rayons X pour (gauche) des scans courts et (droite) des scans longs.

- Axe du scan : Gonio	- Axe du scan : Gonio
- Scan continu	- Scan continu
- Angle de départ : 10 °	- Angle de départ : 10 °
- Angle de fin : 110 °	- Angle de fin : 110 °
- Pas : 0,02626 °	- Pas : 0,0131 °
- Temps par pas : 75,225 s	- Temps par pas : 97,92 s
- Nombre de pas : 3808	- Nombre de pas : 7616
- Durée totale : 00 h 19 min 23 sec	- Durée totale : 00 h 51 min 18 sec

En plus de la DRX sur poudre, nous avons réalisée de la DRX *in situ* dans une chambre réactionnelle Anton Parr XRK 900 présentée Figure II-5 à droite. Cette chambre réactionnelle permet de monter jusqu'à 900 °C sous une pression d'au maximum 10 bars, afin de réaliser de la DRX en fonction du temps et de la température. Dans ce cas, les réactions ont été réalisées sous une atmosphère d'hydrogène ou d'ammoniac dilués : H₂/N₂ et NH₃/N₂ toutes les deux à 5/95%vol. L'intérêt est d'observer l'évolution des phases en fonction du temps à une température donnée ou avec un changement de température, ce qui donne des informations précieuses sur la cinétique et la thermodynamique des réactions.

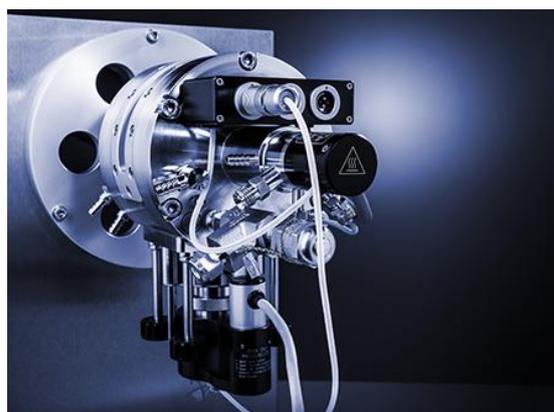


Figure II-5 : (Gauche) Diffractionmètre PANalytical Empyrean et (droite) chambre réactionnel Anton parr.

Les logiciels d'analyse des diffractogrammes utilisés sont Highscore et MAUD. Le premier permet l'identification des phases en fonction des pics mesurés, et ce grâce aux bases de données COD (Crystallography Open Databse [161]) et, éventuellement, ICSD (Inorganic Crystal Structure Database [162]). Le second est un logiciel permettant la quantification des phases identifiées avec Highscore. La méthode de quantification utilisée par MAUD est l'affinement Rietveld ; ce dernier consiste à simuler les diffractogrammes par des gaussiennes paramétrées en utilisant la méthode des moindres carrés. [163]. L'avantage de cet affinement est qu'il permet de prendre en compte de manière bien plus performante le chevauchement des pics.

Le logiciel MAUD se base sur les fichiers CIF (Crystallographic Information File) qui rassemblent, pour chaque phase, toutes les données de la phase en question (paramètre de maille, angle de maille, groupe d'espace etc). Ces fichiers sont récupérés sur les sites des bases de données ICSD et COD. Le logiciel permet également de prendre en compte les spécificités

de la machine utilisée pour faire les mesures. Il suffit de lui fournir un fichier de résolution réalisé avec un étalon dont le diffractogramme est connu et, généralement, simple.

La Figure II-6 présente un exemple de simulation réalisée par MAUD avec le diffractogramme d'une poudre pure d'hématite à 98% mesuré par diffractométrie en noir et celui simulé par affinement en rouge. Il est possible de voir que la régression est satisfaisante grâce à l'encadré placé sous la simulation, qui affiche la différence entre la simulation et la mesure. Cependant, l'indicateur principal permettant d'assurer la cohérence de la simulation est le facteur de fiabilité pondéré (Rwp) qui doit être le plus petit possible. Ce facteur correspond à l'écart quadratique moyen entre la simulation et la mesure, où chaque point est pondéré de son incertitude. Généralement une valeur inférieure à 10% est jugée suffisante. L'analyse présentée Figure II-6 permet d'avoir une composition de l'échantillon de 98,5%_{masse} d'hématite et 1,5%_{masse} de quartz pour un Rwp de 9,9%.

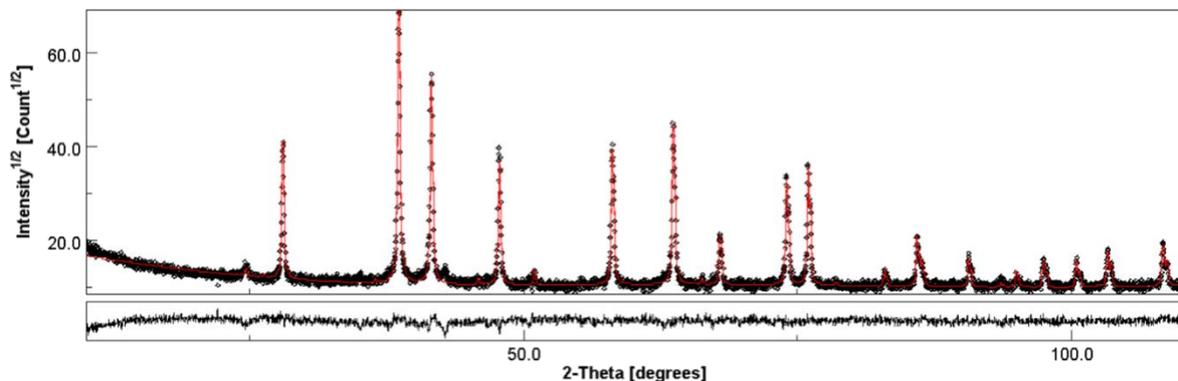


Figure II-6 : Exemple d'un affinement sur une poudre d'hématite pure à 98% de Rietveld par MAUD. Sont tracés le diffractogramme mesuré (noir) et simulé (rouge). Sous le diffractogramme est présenté la résultante de la différence entre la simulation et la mesure.

II.2.2. Microscope électronique à balayage (MEB) et spectroscopie à énergie dispersive (EDS)

La microscopie électronique est basée sur l'interaction entre les électrons et la matière. Un faisceau d'électrons est projeté sur une surface et, lors de l'interaction du faisceau avec la surface, des électrons secondaires rétrodiffusés et des rayons X sont émis. L'ensemble de ces rayons sont récupérés par des capteurs. Les électrons secondaires permettent de construire l'image de la surface à partir de la quantité d'électrons récupérés, les rayons X permettant de réaliser l'EDS.

Les observations au MEB ont été réalisées en partenariat avec Dr. Bertrand Huneau (école centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)). Nous avons réalisé les observations à Nantes avec un MEB JEOL 6060-LA utilisé à 25 kV. L'objectif était de vérifier l'homogénéité des réductions et d'observer les profils de réduction. De plus, le MEB était équipé d'un capteur EDS SAMx et des logiciels d'acquisitions IDFix et MaxView. Cette fonction a permis de réaliser des analyses de spectroscopie ponctuelles et surfaciques. L'installation est présentée Figure II-7.

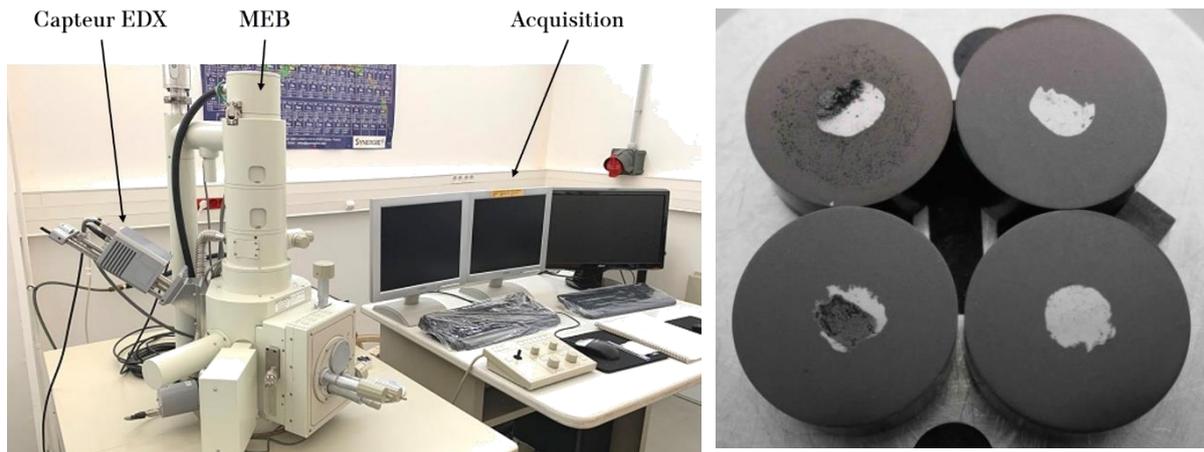


Figure II-7 : (Droite) MEB JEOL 6060-LA du GeM à Nantes, avec capteur EDS et PC d'acquisition. (Gauche) pellets enrobés pour les observations MEB.

Afin d'observer les profils de réduction, les demi-pellets préalablement coupés ont été enrobés à chaud et sous pression dans une résine carbonée Polyfast. Une fois enrobés (à gauche sur la Figure II-7), les échantillons ont été polis jusqu'à avoir une surface parfaitement lisse et, afin d'assurer l'absence d'impuretés, les échantillons ont été nettoyés dans un bain vibrant d'éthanol.

II.3. Efficacité énergétique des appareils conventionnels

Lors de notre travail sur l'ACV de la cuisson solaire, nous avons eu besoin de remonter aux consommations énergétiques des méthodes de cuissons conventionnelles. La littérature permet d'avoir une idée des rendements de ces méthodes, mais les résultats sont divergents et souvent trop spécifiques. Par conséquent, des expériences ont été réalisées afin d'avoir accès aux rendements énergétiques des systèmes étudiés et d'être le plus précis possible au niveau de la réalisation de l'inventaire (voir partie I.4.2.3, page 86).

Ces expérimentations consistaient à mesurer les consommations d'électricité ou de gaz des appareils en chauffant 2 L d'eau de la température ambiante (25 °C) jusqu'à 90 °C. Pour ce faire, nous avons utilisé deux sondes de température à fibre optique (Neoptix, Reflex 4) pouvant opérer de -80 °C à 250 °C.

Ces sondes sont connectées via un boîtier à l'ordinateur d'acquisition par connectique RS232-USB. Un code Python créé par Dr. Stéphane Faure permet la mesure simultanée de quatre sondes Neoptix.

Afin de mesurer la température de l'eau de manière la plus uniforme possible nous avons placé une sonde à environ 1 cm du fond et une sonde à environ 1 cm de la surface de l'eau. Afin d'assurer leur stabilité, les sondes étaient scotchées au couvercle utilisé pour les mesures. Ensuite le couvercle fut placé au-dessus du récipient rempli de 2 L d'eau (voir Figure II-8). La casserole utilisée a été choisie en fonction de la taille du spot chaud pour la plaque électrique et la plaque à induction. Pour le brûleur à gaz, la casserole était légèrement moins large avec

un fond plus épais. Dans tous les deux cas, les récipients étaient adaptés pour la cuisine de féculant (pâte et riz) et étaient en acier inoxydable.

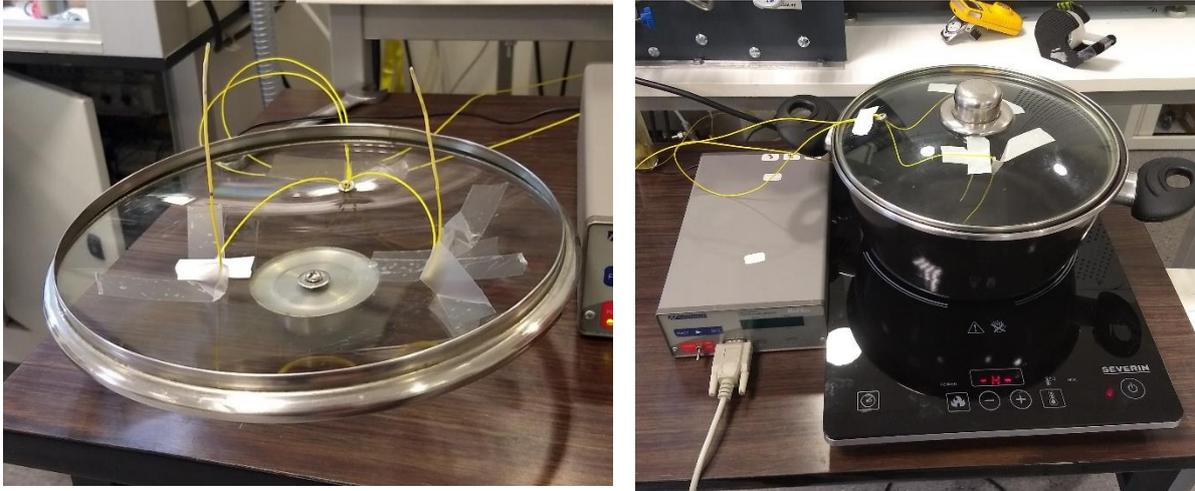


Figure II-8 : (Gauche) Sondes Neoptix (jaunes) scotchées en position de mesure sur le couvercle utilisé pour la mesure de température. (Droite) Dispositif utilisé pour une mesure avec la plaque à induction.

Certaines mesures ont été réalisées sur des appareils électriques (plaque à induction et plaque électrique) qui seront présentés en détail par la suite. Ces appareils étaient branchés sur une prise électrique liée à un compteur électrique (Polier MM32LM, précision de 10^{-2} kWh). Lorsque la chauffe de l'eau était réalisée, la consommation était relevée à des intervalles réguliers. A la différence des appareils électriques, les mesures du gaz n'ont pas été réalisées dans cette configuration : elles ont été réalisées sur une gazinière familiale quatre feux déjà raccordée au gaz de ville. La consommation était mesurée avec le débitmètre installé sur le réseau, dont la précision est de 10^{-5} Nm³.

II.4. ACV

II.4.1. Logiciel et base de données

Pour réaliser les calculs de la méthode ACV nous avons utilisé le Logiciel Umberto LCA+ et la base de données Ecoinvent [142], [164]. Dans ces parties, il sera présenté en détail les spécificités de la base de données ecoinvent comme elle a été utilisée dans nos modèles.

La base de données Ecoinvent est localisée en Suisse et fournit les impacts pour environ 18000 activités utilisées comme process unitaire nommés *datasets*. Les activités couvrent de très larges domaines comme la construction, la production d'électricité ou de gaz, le traitement de l'eau, la manufacture de textile, celle de produits agroalimentaires ou chimiques, le minage, etc. On retrouve également des activités de service. Afin de réaliser des études complètes, l'impact environnemental de chaque activité Ecoinvent est calculé avec différentes méthodes de calcul. De plus, afin d'être le plus transparent possible, des fiches détaillées sont disponibles pour connaître l'inventaire de l'activité et l'impact que représente chaque échange. De plus, les fiches présentes les personnes qui ont créé l'activité et l'origine géographique des données. Enfin, une fois les calculs réalisés par le logiciel, la structure des données dans Ecoinvent (voir

Figure II-9) permet de retracer tous les flux et échanges permettant de réaliser l'activité, et donc de remonter aux substances causant les plus gros impacts.

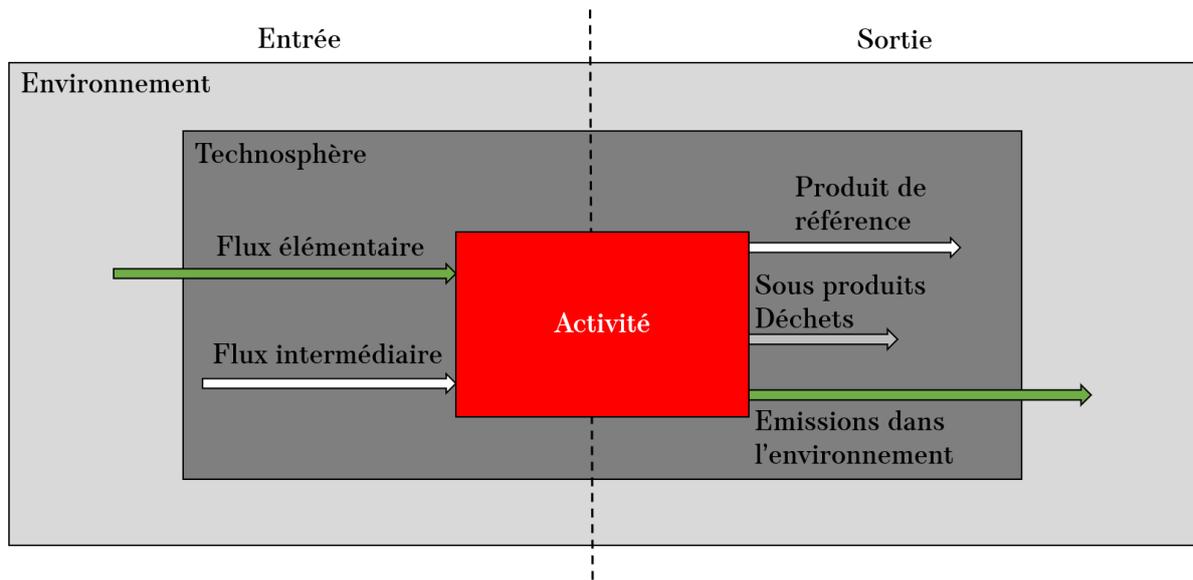


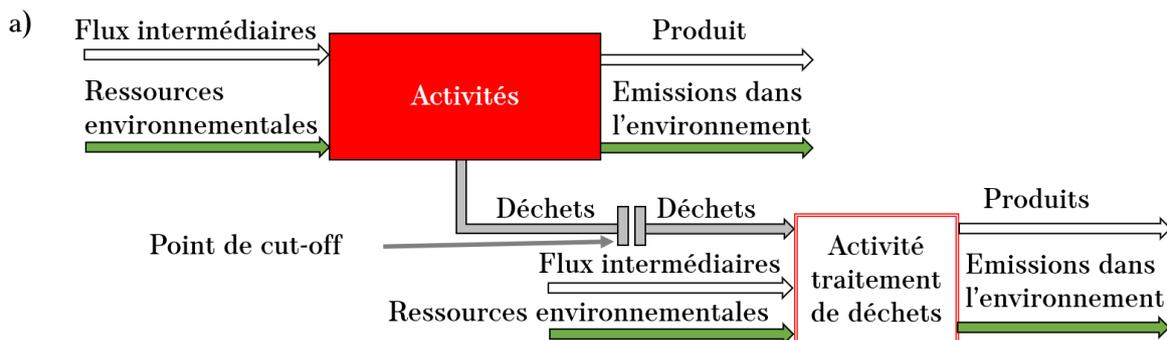
Figure II-9 : Structure d'une activité Ecoinvent

Chaque activité Ecoinvent est simulée pour une zone géographique spécifique qui peut être un pays comme la France (FR), la Chine (CN) ou l'Allemagne (DE). Il existe également d'autres zones plus larges comme des continents : par exemple l'Europe (RER). Finalement d'autres zones sont encore plus larges, notamment la zone globale (GLO), qui correspond au monde dans sa globalité. A partir des zones spécifiques et de la zone globale, d'autres zones « Rest of the World (RoW) » peuvent être construites. Une expression de cette construction est montrée dans l'Eq II-1 pour un volume de production (VP) réalisé en France (FR) et en Chine (CN).

$$VP_{RoW} = VP_{GLO} - VP_{FR} - VP_{CN} \quad Eq II-1$$

Chaque activité est donc liée à une zone géographique qui définit aussi sa précision ; plus la zone est précise, plus l'impact de l'activité est juste. Pour une zone large c'est la moyenne de la région qui est utilisée.

Lors de l'utilisation des données, la modélisation est possible en *consequential*, *allocation cut-off* ou *point of substitution*. Nous avons choisi d'utiliser l'*allocation cut-off*. Concrètement, comme montré Figure II-10-a, cela veut dire que les déchets d'une activité principale ne portent que l'impact de leur transformation ou traitement postérieur. Et, comme montré Figure II-10-b, quand un déchet est en entrée d'une activité principale, son impact n'est pas partagé avec des sous-produits éventuels de son activité de traitement.



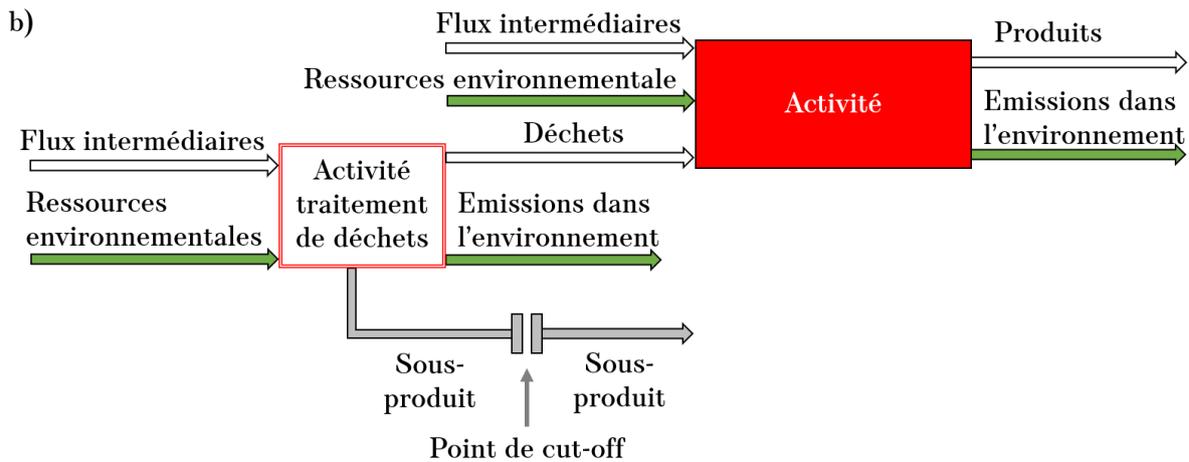


Figure II-10 : Représentation graphique du système cut-off de Ecoinvent dans le cas (a) d'un produit et (b) d'une ressource pour une activité quelconque

Afin de regrouper ces activités et de modéliser les appareils étudiés grâce à Ecoinvent, nous avons utilisé le logiciel Umberto LCA+ et les version 3.8 et 2.2 de la base de données ecoinvent.

Ce logiciel est produit par iPoint-system gmbh, une société basée en Allemagne, et permet de réaliser des ACV en suivant les normes ISO 14040 et 14067. La version 10.0.3.200 a été utilisée pour nos modélisations. Umberto est organisé en projets dans lesquels se trouvent les modèles de nos appareils et les matériaux nécessaires à la réalisation des modèles. Comme montré en Figure II-11-a, le logiciel est organisé en une arborescence des versions de la base de données dans lesquelles sont placés les activités ou les échanges. Les activités sont regroupées par domaine et les échanges par leur type (intermédiaires ou élémentaires – Cf partie I.4.2.3, page 86). Chaque activité comprend une entrée, une sortie et une ou plusieurs connexions. Le modèle est réalisé grâce à ces connexions qui permettent de lier les activités entre elles. Un exemple de modèle simplifié de production de fer est présenté Figure II-11-b. Il est possible de voir des rectangles bleus qui représentent des activités dont les entrées proviennent des ronds verts et dont les sorties vont aux ronds rouges. Les produits de chaque activité sont transférés grâce aux ronds jaunes appelés des connexions. Finalement, la flèche violette est le flux de référence qui permet la mise à l'échelle de tous les autres flux.

Les activités peuvent être utilisées en *result* ou en *unit*. Dans le premier cas toutes les entrées et les sorties sont des flux élémentaires nécessaires à la réalisation de l'activité. Dans le second, les entrées et les sorties sont des flux intermédiaires, ce qui permet donc de choisir l'activité fournissant ou traitant les flux ; cette opération est appelée l'expansion du système. Cela permet donc d'améliorer la précision géographique de la méthode de production ou de traitement. Nous avons utilisé l'expansion du système dans les modèles notamment pour les activités de recyclage pour qu'elles soient réalisées en France et avec les techniques utilisées en France.

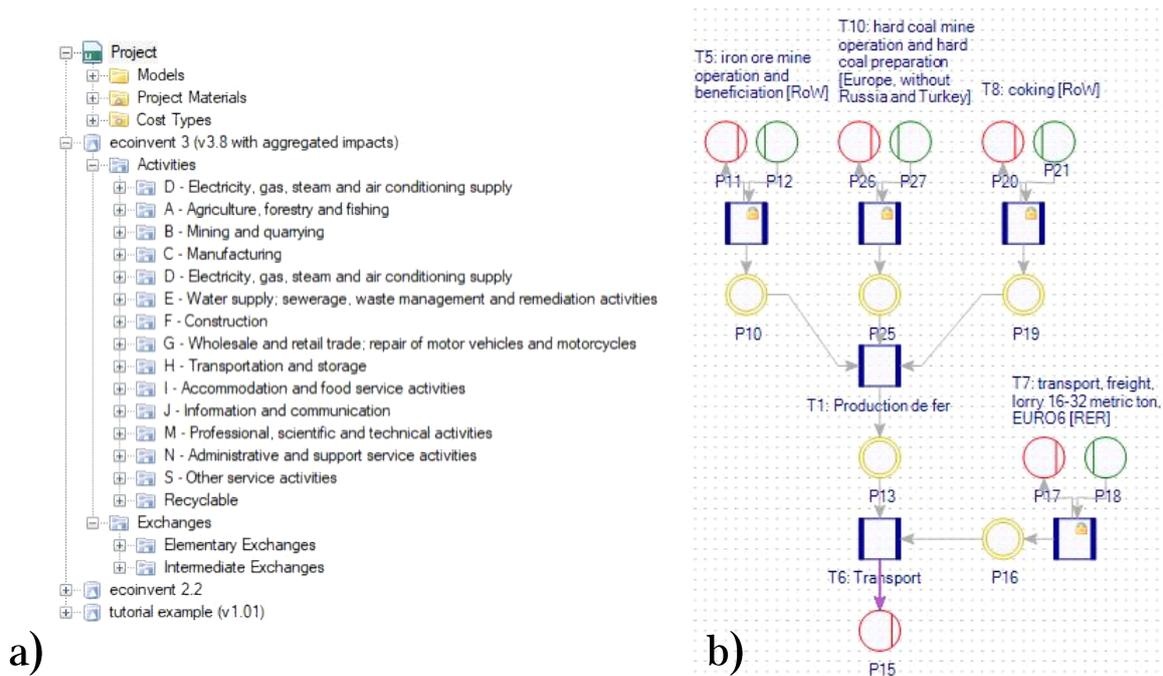


Figure II-11 : (a) Arborescence Umberto de classement des activités et des flux. (b) Exemple d'un modèle Umberto (b) avec en vert les entrées, en rouge les sorties et en jaune les connexions. Chaque rectangle bleu représente une activité et la flèche violette le flux de référence.

Une fois les modèles réalisés le logiciel permet les calculs des flux élémentaires totaux engendrés par le modèle et des impact environnementaux grâce à de nombreuses méthodes : Eco-Indicator, ReCiPe, CML 2001. Une fois les calculs réalisés, Umberto permet l'exportation de données sous la forme d'un fichier Excel contenant les résultats de l'inventaire (échanges de flux élémentaires) et les données selon les indicateurs de la méthode de calcul choisie. Nous avons choisi de travailler avec la méthode ReCiPe qui sera l'objet de la prochaine partie.

II.4.2. La méthode de calcul et les indicateurs

La méthode ReCiPe2008 est apparue en 2009. Cette méthode a été construite à partir de la méthode CML2001 qui réalise des calculs mid-point. De plus, ReCiPe reprend la méthode Eco-Indicator 99 de calcul end-point. Finalement, elle a été mise à jour en 2016. Lors de sa mise à jour, 17 catégories d'impact ont été sélectionnées et caractérisées. Les modèles de caractérisation des indicateurs devaient regrouper les critères suivants : se référer à une échelle globale, être récents et maintenir la consistance entre les impacts. Lorsque plusieurs modèles étaient possibles, ceux gérables par le consortium ReCiPe ont été préférés. Les modèles sélectionnés devaient aussi être capables de quantifier les dommages de manière pertinente [165].

Aujourd'hui, Umberto permet le calcul de dix-huit indicateurs *mid-point* et de trois zones de protection *end-point*. Ces trois zones de protection sont la santé humaine, la qualité de l'écosystème et les ressources. Ci-dessous sont présentés les problèmes environnementaux et les dix-huit indicateurs ReCiPe correspondants (italique) :

- Changement climatique – *climate change* : Le réchauffement climatique est défini par le GIEC comme « un changement dans l'état du climat qui peut être remarqué via le

changement des variations de ses propriétés ou de sa moyenne et dont le changement persiste dans le temps, typiquement des décennies ou plus » [166]. Ce changement climatique se traduit notamment par l'augmentation des températures, ce qui a un effet néfaste sur les écosystèmes et la santé humaine. Le mécanisme derrière le changement climatique est l'effet de serre. Lorsque l'irradiance solaire arrive sur la terre une partie est réfléchiée par l'atmosphère, les nuages et la surface terrestre (28%). Le reste est absorbé par les gaz à effet de serre (21%) et par la surface terrestre (50%). La dernière partie chauffe la terre et est réémise vers l'atmosphère sous forme de rayons infrarouges. Ces rayons sont, en partie, absorbés par les gaz à effet de serre et donc ne sont pas réémis vers l'espace. Ce phénomène entraîne une nouvelle émission vers la terre qui réchauffe la planète, et ainsi de suite. Les principaux gaz à effet de serre anthropiques sont le CO₂, le CH₄ et le N₂O, tous trois ayant des pouvoirs de réchauffement global différent (si on a par définition un pouvoir de 1 pour le CO₂, on est à 84 pour le CH₄ et 264 pour le N₂O). Cet indicateur a donc pour objectif de quantifier les émissions de ces gaz ; il est exprimé en kgCO_{2eq}. Cette unité permet d'exprimer les pouvoirs de réchauffement par rapport à celui du CO₂, comme si tous les gaz étaient convertis en CO₂ [140], [165].

- L'appauvrissement de la couche d'ozone – *ozone depletion* : L'ozone (O₃), bien que toxique au niveau de la surface de la terre, est nécessaire à de hautes altitudes (stratosphère) puisqu'il a un fort pouvoir absorbant des rayons ultra-violets (UV). Cet impact se réfère donc à son appauvrissement dans la stratosphère, qui induit des effets néfastes sur la santé humaine et les écosystèmes. Cet appauvrissement est dû à la concentration au niveau des pôles arctique et antarctique de substances appauvrissantes en ozone (chlore et brome). Ces substances induisent la décomposition des molécules d'ozone lors de la présence d'UV, notamment les UV-C et UV-B. La plupart des composés chlorés et la moitié des composés bromés proviennent des activités humaines. On les retrouve notamment sous forme de chlorofluorocarbures, bromochlorométhane, tétrachlorures de carbone, hydrobromofluorocarbures, hydrochlorofluorocarbures, tétrachlorométhanes, 1,1,1-trichlorométhane, bromure de méthyle, chlorure de méthyle et halons. Ces substances proviennent majoritairement des aérosols, des extincteurs, des mousses de plastique, des pesticides et de la réfrigération et climatisation. Les gaz comme le CH₄, N₂O et H₂O sont également des substances appauvrissantes en ozone, ils sont considérés dans cet impact [140]. Cet impact quantifie les émissions des substances conduisant à la perte d'ozone stratosphérique dans le temps ; il est exprimé en kgCFC-11_{eq} [165]. Le CFC-11 ou trichlorofluorométhane (CCl₃F) est une substance qui contient trois atomes de chlore ce qui en fait une des substances les plus appauvrissantes en ozone, d'où son choix.
- L'acidification terrestre – *terrestrial acidification* : L'acidification de l'environnement a commencé à être visible dans les années 80-90 avec une mauvaise santé des conifères et l'apparition de lacs acides vides de poisson en Scandinavie. L'indicateur peut être défini comme la diminution de la capacité d'un milieu à neutraliser l'acidité (ions hydrogène). Généralement, l'acidité est neutralisée par des cations récupérés sur des plantes ou de la biomasse. Cependant, certaines substances (gaz majoritairement) vont se déposer sur les plantes ou la biomasse et éliminer du milieu ces cations naturellement présents. Parmi ces gaz, les plus impactants sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO, NO₂, NO_x), l'ammoniac (NH₃) et les acides forts (chlorhydrique (HCl) et

sulfurique (H_2SO_4). Ces composés sont principalement émis lors de la combustion de carburants fossiles ou lors de l'incinération de déchets ou l'épandage de fumier par exemple. Il est important de noter que l'acidification est un impact régional dû à la forte solubilité de ses éléments dans l'eau. De plus, l'Europe et l'Amérique du nord ont pris des dispositions pour désulfurer les combustibles fossiles (gaz naturel, charbon) afin de limiter la production de dioxyde de soufre [140]. Cette catégorie quantifie donc les émissions de ces substances responsables du changement d'acidité des sols et a pour unité le $\text{kgSO}_{2\text{eq}}$ [165]. Le SO_2 comme référence en raison de ses fortes émissions et sa forte capacité à acidifier, les autres gaz se verront donc attribuer un coefficient de conversion vers une quantité de SO_2 équivalente.

- L'eutrophisation – *Freshwater and marine eutrophication* : L'eutrophisation caractérise la richesse d'un environnement en nutriments azotés et phosphorés. Ces éléments sont nécessaires au bon développement des plantes et à leur diversification. Cependant, lorsque leur concentration est trop importante, une forte augmentation de la quantité de végétaux peut être engendrée (notamment dans des lacs et rivières, ou zones côtières). Lors du décès de ces végétaux, ils se décomposent et induisent une baisse de la concentration en oxygène, conduisant à terme à une perte de biodiversité. De plus, des espèces toxiques peuvent être favorisées dans certains environnements. D'autres problèmes sont causés par cette abondance de nutriments comme la pousse excessive des végétaux en bord d'eau, ce qui coupe l'arrivée du soleil dans l'eau. Cela fait que le gradient de température dans l'eau s'étage et que les mouvements d'oxygénation ne sont plus aussi performants. En absence d'oxygène, des substances toxiques se forment lors de la décomposition des substances organiques. Comme précédemment, cet impact est considéré comme local ou régional puisqu'il influe spécifiquement sur le lieu où il est émis : rivières, lacs et autres. L'agriculture est considérée comme une source significative d'eutrophisation en raison des engrais non organiques utilisés, qui libèrent des composés azotés ou phosphorés dans l'eau ou l'air [140]. Cet indicateur quantifie les émissions de phosphore en kgP_{eq} pour les eaux douces et, quantifie les émissions d'azote en kgN_{eq} pour les eaux marines [140], [165].
- Formation d'oxydant photochimique – *photochemical oxidant formation* : Cet impact est dû, en grande partie, à la réaction entre de l'oxygène (O_2), du monoxyde carbone (CO), des composés organiques volatiles (COV) et des oxydes d'azote (NO). En effet, lorsque les COV ou du CO se retrouvent dans la troposphère, ils peuvent réagir avec des radicaux hydroxyles (HO^*) pour former des radicaux peroxy (ROO^*). Ces derniers ont la capacité d'oxyder les NO en NO_2 qui vont eux-mêmes oxyder les molécules d' O_2 en présence de lumière pour former de l'ozone (O_3). L'ozone a des conséquences néfastes sur les végétaux quand il est absorbé ou qu'il rentre en contact avec les feuilles : il oxyde les feuilles ou les organes. De fortes concentrations en ozone dans la troposphère peut entraîner la formation de brouillards locaux (dans les villes ou autour) ce qui a des impacts immédiats sur la santé humaine (toux, blessures, et maladies respiratoires). Les COV du plus impactant au moins impactant sont : les alcènes et aromatiques, les aldéhydes, les cétones, les alcanes et les halocarbures. Les activités humaines émettant le plus de COV sont le trafic routier et l'utilisation de

solvants organiques par l'industrie [140]. A noter que, de nouveau, cet impact est plutôt local ou régional, il est exprimé en kgNMVOCeq⁴ pour le quantifier [165].

- L'écotoxicité – *terrestrial, marine and freshwater ecotoxicity* : L'impact toxique d'une substance sur l'environnement dépend non seulement de la substance mais également de la quantité exposée à l'environnement et du milieu où elle est émise. Afin de mieux représenter le mécanisme, il est divisé en quatre étapes consécutives. La première est la modélisation du devenir de la substance, c'est-à-dire la modélisation du comportement de la substance en fonction du ou des milieux d'émissions, des lieux géographiques d'émissions et des moyens (air, eau, sol) d'émission. Cette modélisation est réalisée en faisant des bilans d'échange de masse dans chaque « compartiment » (l'air, l'air urbain, sol d'agriculture, sol naturel, l'eau douce et les eaux marine côtières). Ensuite, il faut modéliser l'exposition d'un organisme à la substance polluante considérée pour une durée et une fréquence spécifique. De nombreux facteurs et procédés influent sur l'exposition comme la sorption, la dissolution, la dissociation et la spéciation. Une fois que le devenir et l'exposition de la substance sont modélisés, vient la prise en compte de l'effet de la substance, qui est défini comme la quantité d'espèces qui seront affectées par l'exposition à la substance. L'effet peut être plural avec la mortalité, la perte de mobilité, la diminution de la taille ou la diminution du taux de reproduction, les mutations, les changements de comportement ou les changements de biomasse ou de photosynthèse. En général, ces effets sont observés lors de tests en laboratoire spécifiques pour chaque substance. Les effets sont triés selon des catégories fonction du temps d'exposition d'un environnement à une substance : aigue, sub-chronique et chronique. A noter que l'écosystème « eaux douces – *freshwater* » comprend les producteurs primaires qui convertissent la lumière en biomasse, les consommateurs primaires qui mangent cette biomasse et les consommateurs secondaires qui sont au sommet de la chaîne alimentaire. De plus, seules les espèces à sang froid sont considérées. Finalement le dommage (*end-point*) est la représentation de la sévérité de l'effet de la substance sur l'environnement. Les substances écotoxiques sont très nombreuses (plus de 123000) et sont notamment dues à l'utilisation de produits chimiques dans tout type de procédé [140]. L'écotoxicité terrestre, en eaux douces et en eaux marines, est quantifiée en kg1,4-DCB_{eq} [165]. Ici le 1,4-DCB ou 1,4-dichlorobenzène, est utilisé comme référence car cette substance est utilisée dans de très grand nombre d'applications : désinfectant, pesticides ou encore déodorant.
- La toxicité sur l'humain – *human toxicity* : Cet impact est très similaire à l'écotoxicité, à la différence que la toxicité est ici évaluée sur l'être humain et non les espèces végétales et animales. Il y a également de petites différences dans les modélisations que nous allons détailler ci-dessous. La modélisation du devenir de la substance est exactement le même que pour l'écotoxicité. La modélisation de l'exposition est différente et peut être décomposée en exposition directe (respiration, eau, etc) et indirecte (via la consommation de produits comme la viande, le lait, le poisson, etc) ou par contact dermatologique. L'exposition humaine prend en compte la variabilité spatiale et est toujours réalisée à l'échelle d'une population. La classification des substances peut être faite via la fraction d'absorption qui est le produit du facteur de devenir et d'exposition.

⁴ NMVOC : *non-methane volatil organic compounds* : Composés volatiles autres que le méthane qui est généralement compté dans l'impact sur le changement climatique.

Pour les émissions chimiques elle varie typiquement entre 10^{-10} et 10^{-5} . Le modèle de l'effet des substances est la quantité de substances inhalées ou ingérées suivant un chemin d'émission considéré. Les deux grandes familles d'effet sont les effets cancéreux et ceux non-cancéreux et couvrent une grande quantité de maladies. Finalement, la sévérité d'une substance représente les années de vies affectées négativement par l'effet. Elle est quantifiée par les années de vie perdues et les années de vie invalides en fonction de la sévérité (mortelle ou pas). Les principales sources d'émissions sont les mêmes que pour l'écotoxicité [140]. Cet indicateur quantifie donc la quantité de substances émises en $\text{kg}_{1,4\text{-DCB}_{\text{eq}}}$ [165].

- Formation de particules – *particulate matter (PM) formation* : La formation de particules est considérée comme une des causes principales contribuant à la charge mondiale de morbidité ; à l'échelle mondiale, une mort prématurée sur cinq est attribuée aux particules. Cela est dû au fait que les particules causent des maladies cardiovasculaires, des douleurs chroniques et aiguës, des cancers des poumons, des diabètes et des complications à la naissance. Les particules peuvent être différenciées selon leurs modes de formation : i) primaire : elles sont alors directement formées ; ii) secondaire : elles sont alors formées après réaction de précurseurs (NO_x , SO_x , NH_3 , COV et autres). La formation secondaire peut constituer jusqu'à 50% des particules ambiantes. Elles peuvent aussi être catégorisées par leur taille : respirable (PM_{10} , $d < 10 \mu\text{m}$), large ($\text{PM}_{10-2,5}$, $2,5 < d < 10 \mu\text{m}$), fine ($\text{PM}_{2,5}$, $d < 2,5 \mu\text{m}$) et ultra fine (UFP, $d < 100 \text{nm}$). Les $\text{PM}_{2,5}$ sont généralement la référence. Comme pour la toxicité humaine, les particules sont caractérisées par quatre facteurs : i) le facteur de devenir qui représente la quantité de particules ou de précurseur dans l'air sur une durée et dans différents endroits ; ii) le facteur d'exposition décrivant le rythme à laquelle les particules sont inhalées sur une journée ; iii) le facteur d'effet lie la quantité de particules respirées avec le nombre de cas de maladie sur une population et iv) le facteur de sévérité est le lien entre les maladies et les dommages qu'elles représentent sur la santé humaine. Les facteurs sont influencés par la densité de population, la présence antérieure ou non de particules, l'altitude des émissions ou d'autres aspects spatio-temporels. Les particules sont majoritairement créées par le trafic routier et la combustion de ressources fossiles pour l'électricité ou pour les particuliers [140]. Historiquement, comme dit précédemment, ce sont les $\text{PM}_{2,5}$ qui ont été utilisées pour quantifier la formation de particules mais, aujourd'hui, c'est le $\text{kgPM}_{10\text{eq}}$ qui est utilisé dans Umberto [165].
- L'utilisation des terres – *agricultural and urban land occupation, natural land transformation* : Cet indicateur se réfère aux conséquences des activités anthropiques sur les sols. Les activités entraînent de nombreux changements des sols, induisant des effets écologiques néfastes comme la perte de biodiversité, des impacts locaux sur la régulation du climat (albédo, déforestation), la perte de production alimentaire, l'augmentation des inondations et des changements sur le cycle de l'eau. D'aucuns peuvent remarquer que tous ces effets correspondent en fait à l'environnement cessant de rendre des services vitaux aux humains. Deux grandes familles peuvent être retrouvées : la transformation et l'occupation. La première représente le changement d'état d'une terre donnée et la seconde un changement d'usage des terres destinée à une utilisation précise. Généralement, l'utilisation des terres entraîne un changement physique de la surface du sol (érosion, artificialisation, etc), de la faune et de la flore,

ce qui induit un changement dans les capacités de stockage de l'eau, dans le fonctionnement du sol et la biodiversité (réduction de l'habitat naturel). Ces changements ont des conséquences écologiques qui provoquent des dommages sur la santé humaine (changement climatique), la qualité de l'écosystème (désertification, biodiversité, pertes de nutriments, etc) et sur les ressources (formation de couche arable, désertification, etc). Il est important de noter que chaque étape est liée à plusieurs suivantes et, les changements physiques peuvent impacter plusieurs impacts écologiques. Ceci rend la modélisation de l'utilisation des terres très complexe. Cet impact est considéré comme local en raison de la spécificité des terres. Par exemple, la déforestation en Amazonie est plus impactante sur la biodiversité que celle en Europe [140]. L'utilisation des terres est quantifiée en m^2/an dans la méthode ReCiPe pour les surfaces occupées et en m^2 pour les surfaces transformées [165].

- L'utilisation de l'eau - *water depletion* : Cet indicateur a pour but de quantifier, en *mid-point*, le potentiel qu'une personne soit privée d'eau dans une région et, en *end-point*, le dommage que ce manque peut induire sur la santé et sur l'écosystème. Le mécanisme est simple quand le dommage est observé sur la santé humaine : il est basé sur le fait que la consommation d'eau entraîne une privation pour une autre partie (agriculture, domestique, ou aquatique), ce qui crée des dommages sur la santé humaine. Quand le dommage sur l'écosystème est considéré, le mécanisme est bien plus complexe étant donné que les « compartiments » (nappe phréatique, rivière, lac, etc) de l'eau sont interconnectés. L'utilisation de l'eau est également différente puisqu'elle peut être dégradante (pollution chimique, solide ou thermique), consommatrice ou pour des infrastructures (barrage, canal, réservoir, etc). Chacune de ces utilisations entraîne de nombreux impacts et dommages sur les écosystèmes aquatiques ou terrestres. La mesure de cet indicateur est le m^3 et représente la quantité d'eau utilisée pour le produit ou le process qui entraîne en manque donc un effet néfaste sur la santé humaine ou l'écosystème [140].
- Utilisation des ressources abiotiques – *fossil and metal depletion* : Cette catégorie a pour but d'étudier la disponibilité des ressources pour les générations futures. Globalement cela veut dire que, lorsqu'une ressource est utilisée, elle n'est pas disponible dans le même état après son utilisation : les ressources sont perdues ou transformées. Cela induit une baisse dans leur disponibilité qui dépend aussi de leur régénération ou de leur recyclage quand cela est possible. Cette baisse de disponibilité implique un effort supplémentaire qui devra être fourni par les générations futures pour extraire la même quantité d'une ressource [140]. La quantification est réalisée en kgFe_{eq} exprimant la quantité de minerai supplémentaire nécessaire pour extraire la même quantité d'un métal donné et, pour les ressources fossiles, en kgOil_{eq} qui est défini comme le rapport entre le pouvoir calorifique supérieur d'une ressource fossile et le contenu énergétique du pétrole brut [165].
- Rayon ionisant – *ionising radiation* : Le mécanisme de cet impact réside dans l'exposition de la population aux radionucléides. Cette exposition peut induire des cancers, fatals ou non, et des problèmes héréditaires. La quantification était historiquement réalisée en $\text{kgCo60}_{\text{eq}}$ mais est maintenant réalisée en $\text{kgU235}_{\text{eq}}$ dans Umberto [165].

Les liens entre les dix-huit indicateurs *mid-point* et les trois *end-point* se font suivant l'augmentation des maladies respiratoires, des différents cancers, des autres maladies et de la malnutrition pour les dommages sur la santé humaine. Pour les dommages sur l'écosystème se sont les dommages sur les espèces d'eaux douces, d'eaux marines et terrestres qui sont évalués et, pour le dommage sur les ressources c'est l'augmentation du prix de la ressource qui est utilisé. Il est possible et souvent le cas que les indicateurs *mid-point* induisent des dommages sur plusieurs des trois zones d'impacts *end-point*.

Nous venons de voir la méthode de calcul et les indicateurs utilisés pour quantifier les émissions et les dommages des appareils modélisés et analysés. En amont, un inventaire de cycle de vie a été réalisé pour pouvoir modéliser les appareils le plus précisément possible. La méthode de l'inventaire sera présentée dans la prochaine partie.

II.4.3. Méthode d'inventaire de cycle de vie

Comme expliqué précédemment, l'inventaire de cycle de vie est une étape cruciale de l'ACV puisqu'il définit la précision avec laquelle les appareils ou les procédés sont analysés. L'inventaire regroupe de nombreux aspects : les pièces composants l'inventaire, le transport des pièces, les procédés de production, etc.

Dans un premier temps, afin de réaliser notre inventaire de cycle de vie, les composants des appareils étudiés ont été analysés. Nous avons appliqué la même méthode que Elduque *et al.* en réalisant des pesées précises pour avoir le plus de détails possibles [167]. La première étape de l'inventaire a donc été de : i) démonter les appareils afin de sortir tous les composants ; ii) les peser avec une balance précise à 0,01 g (et à 10^{-4} g pour les composants électroniques, notamment ceux montés en surface) ; iii) les analyser ; dans certains cas, des observations MEB accompagnées d'EDS ou des analyses de DRX ont été réalisées. De plus, pour les composants peints ou avec un revêtement, les surfaces concernées ont été évaluées.

Dans le cas des procédés, nous avons questionné les entreprises qui ont produit les appareils afin de modéliser le plus justement possible les procédés. Cependant, dans certains cas, les entreprises n'ont pas fourni de réponse et nous nous sommes donc basés sur des expertises et sur les procédés les plus répandus. Finalement, les trajets de chaque pièce ont également été demandés aux industriels, notamment pour les paraboles solaires.

II.4.4. Conclusion

Nous venons de présenter toutes les méthodologies et techniques de caractérisation utilisées dans ce travail. Dans un premier temps, les techniques de caractérisation utilisées pour l'étude sur la métallurgie solaire ont été listées ainsi que leurs principes. Ensuite, les techniques expérimentales utilisées pour l'ACV et l'ICV ont été développées avec notamment la caractérisation de l'efficacité énergétique des méthodes de cuisson conventionnelles nécessaire pour avoir les consommations des appareils étudiés. Ensuite les détails nécessaires pour les calculs d'impacts environnementaux ont été présentés et les détails de la base de données permettant d'interpréter l'inventaire également. Le prochain chapitre portera sur l'analyse de cycle de vie que nous avons réalisé sur les cuiseurs solaires et leur comparaison avec les méthodes de cuisson conventionnelle.

Chapitre III. Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

III.1. Présentation de l'étude

Comme expliqué précédemment, ce travail portera sur la métallurgie solaire décarbonée. Cependant, évaluer l'impact écologique de ce procédé est difficile étant donné que ce procédé n'est pas mature ce qui entraîne le manque de nombreuses informations nécessaires pour réaliser une ACV. Néanmoins, les procédés solaires à concentration sont nombreux et permettent une très large gamme de température comme expliqué durant la partie I.3.1, page 55. C'est pourquoi ils peuvent être intéressants comme procédés de substitution pour produire de la chaleur. Parmi leurs applications basse température la cuisine en est une évidente. La cuisine est en effet l'une des activités primaires des populations à travers le monde. De nombreuses techniques sont utilisées basées sur différentes sources d'énergie *i.e.* l'électricité, le charbon, le bois ou le gaz par exemple. De manière générale, l'utilisation de ces énergies induit de grosses émissions de gaz à effet de serre même dans le cas de l'électricité qui est souvent produite à partir de ressources fossiles. C'est dans ce contexte que le solaire à concentration peut s'imposer pour permettre la réalisation de cuissons avec un impact écologique plus faible. Nous avons donc décidé d'étudier d'un point de vue écologique les paraboles solaires à concentration appliquées à la cuisine. Cette étude permettra d'avoir une idée claire des avantages écologiques du solaire pour des procédés solaires basse température devant les sources de chaleur conventionnelles. Cette étude réalisera donc l'ACV du point de vue *mid-point* et *end-point* de cuiseurs solaires réalisés avec différents matériaux et les comparera avec les différentes méthodes de cuissons traditionnelles occidentales : plaque à induction, plaque électrique et brûleur à gaz. Cette première partie aura pour but de présenter les bases de l'étude que sont l'unité fonctionnelle, le champ d'étude et les hypothèses principales.

III.1.1. L'unité fonctionnelle

Comme la comparaison est réalisée sur des méthodes de cuisson, le flux de référence est la chaleur fournie par les appareils. Comme expliqué dans la partie I.4.2.2 (page 83), l'unité fonctionnelle est la base de comparaison et la quantification du flux de référence. Grâce à elle il sera possible d'évaluer les valeurs des flux élémentaires et flux intermédiaires des processus unitaires. Afin de comparer les appareils nous avons choisi l'unité fonctionnelle suivante : « Monter en température 2 L d'eau de température ambiante jusqu'à 90 °C en utilisant la casserole la plus adaptée, couverte, 3 fois par jour, tous les jours pendant 40 ans à Toulouse en France ». Ainsi, tous les paramètres nécessaires à l'étude sont fournis :

- Quelle quantité : 2 L d'eau
- Quoi : Chauffer
- Pour combien de temps : 40 ans
- Où : Toulouse, France
- Dans quelle mesure : De la température ambiante jusqu'à 90 °C

Afin de calculer la valeur de l'unité fonctionnelle nous avons fixé la température ambiante à 25 °C et la température maximale à 90 °C. Donc la valeur théorique de l'énergie nécessaire à une montée en température vaut 0,151 kWh, donnée par l'Eq III-1 :

$$E_{th} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad Eq III-1$$

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

avec E_{th} la valeur énergétique d'une montée en température, m la masse d'eau : 2 kg ; C_p la capacité calorifique massique de l'eau : 4180 J/kgK et ΔT la différence de température en K : 65 K. Ainsi, dans notre cas, la valeur théorique sur l'ensemble de l'unité fonctionnelle est 6613,8 kWh.

III.1.2. Champ de l'étude : les appareils étudiés

III.1.2.1. Le cuiseur solaire de référence, ses variantes et les étapes de fabrication

Le modèle de référence

Le concentrateur étudié durant l'ACV est une parabole SK14 commercialisée par E.G. Solar [98]. Le concentrateur est parabolique et a un diamètre de 1,54 m, pour une puissance utile annoncée par le constructeur de 700 W sous une DNI de 750 W/m². Il est composé de quatre parties : la structure, le collecteur, le maintien des réflecteurs et la partie qui supporte la casserole comme montré sur la Figure III-1.

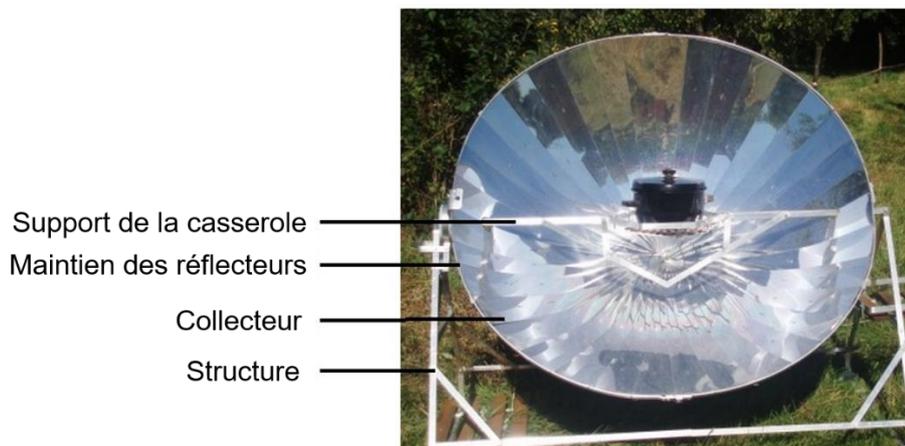


Figure III-1 : Cuiseur solaire parabolique SK14.

La structure est réalisée en barres d'aluminium pliées, percées et assemblées avec des boulons en acier inoxydable. Elle permet de déplacer la parabole grâce à des roulettes en plastique et, ainsi, le suivi du soleil en fonction de sa position dans le ciel se fait de manière aisée. Cette structure supporte le collecteur et le support de la casserole. Le collecteur est un miroir parabolique construit à partir de 24 réflecteurs en aluminium qui sont maintenus ensemble grâce à une pièce en arc de cercle nommé maintien des réflecteurs sur la Figure III-1. Finalement, le support de la casserole est aussi réalisé en barres d'aluminium assemblées avec des boulons en acier inoxydable. Le modèle de référence est aussi équipé de deux roues en polymères provenant de Chine permettant de déplacer la parabole facilement.

Les variantes du modèle de référence

Dans le monde, l'aluminium primaire est produit à plusieurs endroits mais majoritairement en Chine. En 2020, 57,2% de l'aluminium a été produit en Chine, loin devant le Conseil de Coopération du Golfe au Moyen Orient avec 8,9% de la production mondiale [168]. Par ailleurs, l'Institut International de l'Aluminium (IAI) nous apprend qu'en 2021, il y avait 35% d'aluminium recyclé dans le cycle de l'aluminium [169]. Parmi cet aluminium recyclé, deux sources sont mentionnées par l'institut, la première est le « *new scrap* » défini comme les

chutes de l'industrie de l'aluminium qui ne sont pas utilisées et la deuxième est le « *old scrap* » qui est l'aluminium récupéré après une première utilisation. Au niveau de la répartition, l'aluminium recyclé est à 41% du *new scrap* et à 59% du *old scrap* [168], [169]. Au niveau de l'impact sur le changement climatique, d'après la base de données ecoinvent, la production d'aluminium avec l'impact sur le réchauffement climatique le plus faible est celle du Canada. Par ailleurs, l'Amérique du nord (Canada et Etats-Unis) produit 6,1% de l'aluminium mondiale, soit environ 4 Mt dont 3,1 Mt provenant du Canada [168], [170]. En effet, étant donné que la production d'aluminium est énergivore, notamment en électricité, cet impact dépend pour beaucoup du mix énergétique du pays de production.

Par conséquent, nous avons décidé d'évaluer différentes sources ou mélanges pour l'aluminium : Chine ou Canada avec ou sans 35% d'aluminium recyclé et une parabole construite à 100% à partir d'aluminium recyclé. Cela crée 4 autres variantes à la parabole de référence qui est considérée comme celle réalisée à partir d'aluminium chinois.

Nous avons aussi choisi d'étudier l'effet de la substitution de l'aluminium par du bois. Cette alternative a été considérée uniquement pour la structure et le maintien des réflecteurs, il est donc important de noter que dans tous les cas de figure étudiés le support de la casserole et les réflecteurs restent les mêmes, à savoir en aluminium.

Ainsi, 10 modèles de cuiseurs solaires ont été étudiés : des paraboles réalisées en aluminium chinois ou canadien, avec ou sans 35% d'aluminium recyclé dans les deux cas, et une réalisée uniquement en aluminium recyclé. Les mêmes cuiseurs peuvent aussi disposer d'une structure en bois.

Fabrication des réflecteurs

Les réflecteurs sont des surfaces réfléchives triangulaires en aluminium affichant 90% de réflexion solaire et 95% de réflexion totale de la lumière. L'aluminium primaire ou recyclé est produit en gros lingots qui sont ensuite transformés à chaud en tôles et enroulés pour créer des bobines. Ces bobines sont ensuite revêtues d'une couche réfléchive déposée dans un procédé dépôt physique en phase gazeuse (*Chemical Vapor Deposition, CVD*) et protégées par une couche nanocomposite déposée dans un procédé de revêtement de bobine (*coil-coating*). Les deux étapes précédentes sont réalisées par l'entreprise Alanod en Allemagne. Une fois les tôles prêtes, elles sont envoyées à un autre site pour être découpées en triangle. Elles sont finalement transmises au site d'emballage de la parabole.

Fabrication de la structure

La structure est elle aussi produite à partir de lingots d'aluminium. Ils sont ici extrudés pour former des barres de section rectangulaire qui sont envoyées depuis le lieu de production jusqu'au site d'emballage de la parabole. Les barres sont pliées et percées à la main au site d'emballage quand c'est nécessaire. Une fois sur le site d'utilisation, les barres sont assemblées grâce à des boulons en acier inoxydable pour former la structure. A noter que ce processus est le même quelle que soit l'origine de l'aluminium. Les roues, quant à elles, sont réalisées en polymères moulés et usinés. Dans le cas du bois, du bois de récupération à partir de palettes EPAL disponibles partout à travers le monde a été considéré. Ces palettes peuvent être constituées de plus de 25 bois différents ; en Europe elles sont généralement en pin ou en sapin en raison de leur disponibilité. Une fois récupéré, le bois est scié à la main et traité avec de l'huile de lin. Ensuite, les morceaux sont assemblés grâce à des vis en acier inoxydable. L'utilisation du bois nécessite des vis supplémentaires par comparaison avec la structure en

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

aluminium. En effet, là où quatre pièces en arc de cercles sont utilisées dans la parabole en aluminium pour maintenir les réflecteurs, 48 morceaux de bois sont nécessaires pour obtenir un maintien équivalent. Une image de la structure en bois étudiée est présentée Figure III-2.



Figure III-2 : Photo de la parabole avec une structure en bois.

Fabrication du support de la casserole

Le support est composé de deux parties. La première est réalisée à partir des mêmes barres en aluminium que celles utilisées pour la structure, toujours assemblées avec des vis en acier inoxydable. A noter que cet assemblage permet le pivotement de la parabole afin de pouvoir la positionner face au soleil. La seconde est une barre en aluminium de section circulaire repliée plusieurs fois et sur laquelle est posée la casserole au niveau du foyer de la parabole. Par ailleurs, puisque de hautes températures sont atteintes au foyer, il n'était pas possible de réaliser le support de la casserole en bois. Il a donc toujours été considéré en barres d'aluminium sans influence du matériau utilisé pour la structure.

Dans notre étude, nous avons comparé ces paraboles à des appareils de cuisson conventionnels massivement utilisés en Occident. Nous avons choisi des appareils du commerce offrant un seul point de cuisson comme la parabole solaire. Ces appareils et leurs compositions seront présentés ci-dessous. Les détails de la fabrication de certains composants des appareils conventionnels ne sont pas présentés ici parce que les composants sont réalisés par des procédés très compliqués en comparaison avec ceux de la parabole. Par ailleurs, dans ecoinvent, il est possible de trouver la production des composants eux-mêmes.

III.1.2.2. La plaque à induction

La plaque à induction est une plaque Servin KP 1071 d'une puissance de 2000 W avec un seul point de cuisson (voir Figure III-3). La plaque a 9 niveaux de puissance et un niveau dit « boost » qui sera nommé « thermostat 10 » pour la suite de ce travail. Cet appareil est construit et assemblé en Chine avant d'être envoyé puis vendu en France. Il est possible de le

décomposer en plusieurs parties : le carter, la bobine, l'alimentation, la plaque vitrocéramique, la bobine, le ventilateur et l'alimentation.

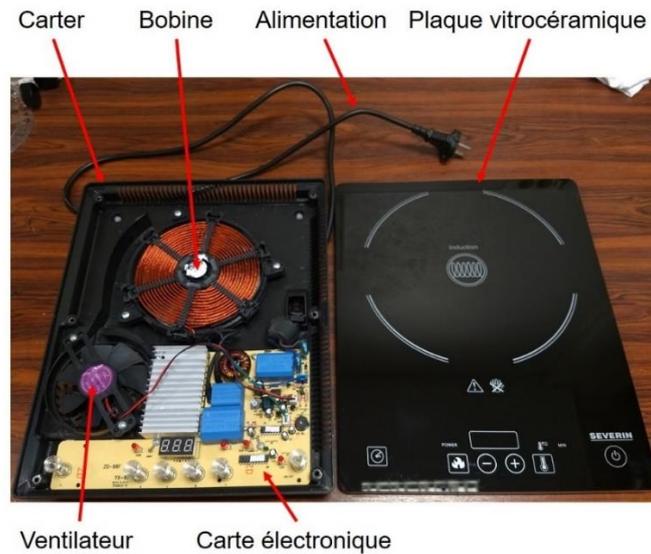


Figure III-3 : Plaque induction Servin KP 1071 démontée.

Le carter est en polypropylène noir et supporte l'ensemble des composants. En effet, sur le carter sont vissés la bobine, le ventilateur et la plaque électrique. Sur la plaque électrique sont soudés le câble d'alimentation ainsi que des composants électroniques (résistances, diodes, LEDs, condensateurs et autres) montés en surface ou traversants. Enfin, la plaque vitrocéramique est collée sur une petite baguette en polypropylène permettant l'assemblage du carter et de cette dernière. Toutes les fixations sont réalisées via des vis en acier inoxydable.

III.1.2.3. La plaque électrique

La plaque électrique est un appareil Proline HPO15W d'une puissance de 1500 W avec un seul point de cuisson. Elle offre 6 niveaux de puissance grâce à un thermostat. Elle peut être décomposée en 3 parties : le carter, la plaque chauffante et le câblage. Au même titre que la plaque à induction, la plaque électrique est produite et assemblée en Chine avant d'être envoyée et vendue en France. La plaque électrique est présentée vue du dessus et ouverte sur la Figure III-4.

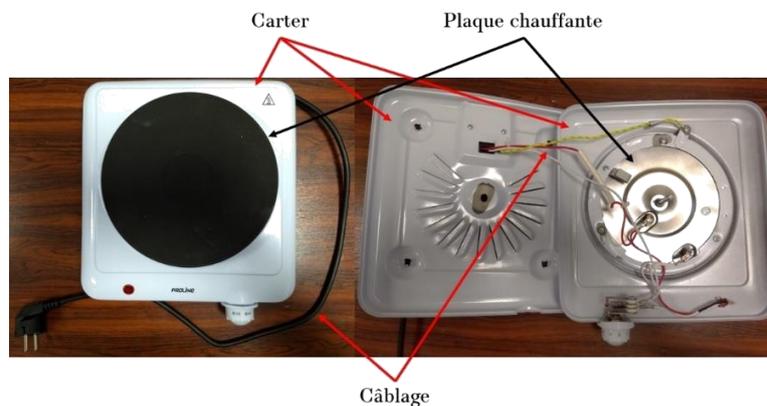


Figure III-4 : Gauche : Image de la plaque chauffante vue du dessus, droite : plaque électrique ouverte.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Le carter est composé de deux parties (supérieure et inférieure) en tôle d'acier assemblées sur la plaque chauffante grâce à une grande tige filetée qui maintient les deux parties à l'aide d'une rondelle et d'un écrou. Finalement, le câblage regroupe les câbles électriques d'alimentation de l'assemblage chauffant et le câble d'alimentation général.

III.1.2.4. Le brûleur à gaz

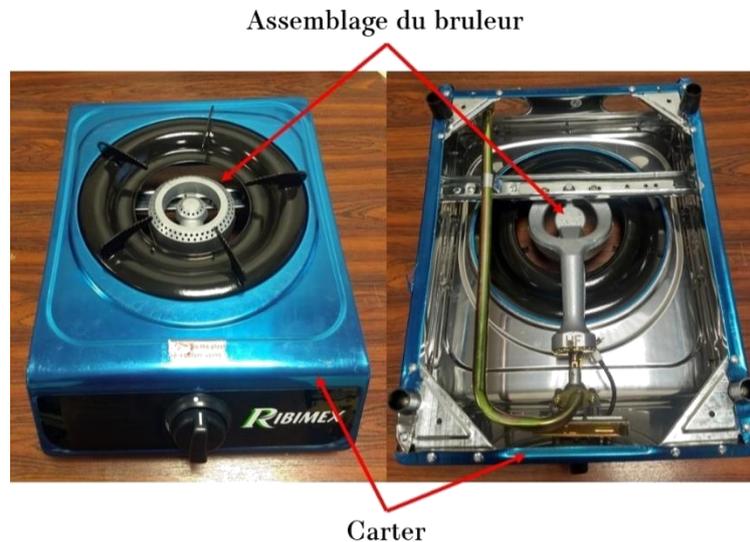


Figure III-5 : (Gauche) Brûleur à gaz vue du dessus et (droite) du dessous.

Toujours dans la volonté d'être cohérents, le brûleur à gaz ne dispose que d'un seul brûleur. Il s'agit d'un Ribimex PRF315 d'une puissance maximale de 2900 W, produit et assemblé en Chine. Il peut être décomposé en 2 parties : le carter et l'assemblage du brûleur. La puissance est gérée grâce à une vanne. Le brûleur à gaz est présenté sur la Figure III-5.

Le carter est composé de parois en acier inoxydable et de renforts dans les angles en acier galvanisé, et également d'un support en acier galvanisé pour le brûleur. De plus, le carter comprend un support pour la casserole en acier revêtu. L'assemblage du brûleur est fixé au carter via la barre transversale et l'assemblage qui gère le débit de gaz.

III.1.3. Hypothèses principales

Maintenant que le champ d'étude est posé, les différentes hypothèses qui ont été formulées pour réaliser ce travail vont être présentées. Elles concernent notamment les aspects géographiques de certaines phases du cycle de vie, les trajets, la durée de vie des appareils et l'inventaire.

III.1.3.1. Trajets et lieux de fin de vie

Dans le cas où des trajets étaient à prendre en compte, comme expliqué précédemment (partie II.4.3, page 124), nous avons, dans un premier temps, demandé aux industriels quels chemins prenaient leurs produits. Cependant quand nous n'avons pas eu de réponse, les principales routes d'échanges commerciaux ont été utilisés pour définir le chemin utilisé. Par exemple, les ports de fret les plus utilisés dans notre cas de figure sont ceux de Shanghai, de

Vancouver et de Rotterdam comme montré Figure III-6. Le calcul des distances a été réalisé avec le site SeaRates de l'entreprise DP world. Finalement pour les trajets routiers le site Maps de Google a été utilisé, et lors de la modélisation, la norme de pollution EURO5 a été utilisée.

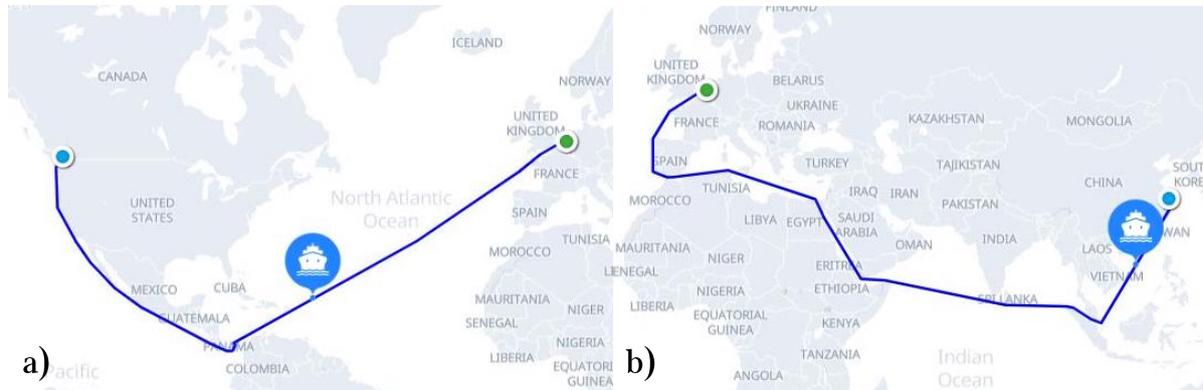


Figure III-6 : Trajet naval utilisé entre (a) Vancouver et Rotterdam et (b) entre Shanghai et Rotterdam d'après Searates.

Toujours en lien avec les données géographiques, la phase d'utilisation a été effectuée à Toulouse en France et c'est dans ce pays que les étapes de fin de vie ont été considérées. Les informations sur les activités de recyclage et d'élimination ont été récupérées auprès d'industriels français du secteur.

III.1.3.2. Durée de vie

Étant donné les différentes technologies considérées et l'unité fonctionnelle, différentes durées de vie ont été attribuées.

Concernant les paraboles solaires, c'est la conception, les matériaux et l'unité fonctionnelle qui ont conditionné les durées de vie. Le collecteur étant constitué de lames d'aluminium revêtues, après consultations avec des utilisateurs, la durée de vie a été fixée à 10 ans qu'importe le matériau de la structure soit 4 collecteurs au total puisque l'unité fonctionnelle est sur 40 ans. Pour la structure, puisqu'elle est réalisée en aluminium avec un design simple et robuste (voir partie III.1.2.1), nous avons considéré une durée de vie de 40 ans : cela signifie qu'elle n'est pas remplacée sur la durée de l'unité fonctionnelle. Lorsqu'elle a été fabriquée en bois, étant donné le caractère bien plus fragile de ce matériau, la durée de vie a été considérée de 10 ans. Il faudra donc *in fine* 4 exemplaires pour 40 ans d'utilisation du cuiseur solaire.

Pour les méthodes de cuisson conventionnelles, nous avons fait l'hypothèse que les utilisateurs ne considèreraient pas de les réparer une fois défectueux. Dans un premier temps, tout appareil contenant des composants électroniques (résistances, diodes, relais...) a ainsi été considéré comme ayant 10 ans de durée de vie. Cela est donc valable pour la plaque électrique et la plaque à induction dont 4 exemplaires sont nécessaires pour remplir l'unité fonctionnelle. Ensuite, pour le brûleur à gaz, étant donnée sa conception relativement simple et robuste (acier, fonte, visserie, absence de plastique et d'électronique) sa durée de vie a été fixée à 20 ans. Cependant, comme recommandé par les distributeurs, le tuyau de raccordement entre la distribution de gaz et le brûleur doit être changé tous les 10 ans. Ainsi, sur la durée de l'unité fonctionnelle, un total de 2 exemplaires du brûleur et quatre tuyaux de raccordement est nécessaire.

III.1.3.3. L'inventaire

Lors de la réalisation de l'inventaire plusieurs hypothèses ont dû être réalisées.

La première est à propos du bois : comme expliqué dans la présentation des cuiseurs solaire partie III.1.2.1, le bois est considéré comme issu de palettes EPAL récupérées. Ces palettes étant disponibles dans toute l'Europe, et donc à Toulouse, nous n'avons pas considéré de trajet pour le bois, en faisant l'hypothèse que la récupération se faisait proche du lieu d'utilisation.

Nous avons considéré le même procédé de production de vis pour tous les appareils étudiés, y compris les paraboles en bois. Étant donné que de nombreux pays produisent de la visserie, celle pour les paraboles a été considérée comme produite dans le pays d'assemblage à savoir l'Allemagne.

Les autres hypothèses concernent la réalisation du modèle d'inventaire sur Umberto LCA+. Les procédés de production des différents appareils ou matériaux ont été demandés aux industriels (E.G. Solar, Alanod, DHL ...) mais parfois, les procédés ou matériaux indiqués étaient trop précis et donc indisponibles dans la base de données. Dans ce cas, les procédés disponibles les plus proches possibles ont été choisis. Par exemple, pour la plaque à induction, la production de verre vitrocéramique n'existait pas sur Umberto LCA+, donc nous avons utilisé la production du verre trempé.

La dernière hypothèse découle du fait qu'au Canada et en Chine, le mix électrique est évalué de manière régional (province) et donc varie d'un lieu à l'autre. Cependant n'ayant pas toujours les lieux exacts de production, les mix électriques associés ont été pris comme étant généraux, donc sous forme d'activité *Market*. Pour rappel, une activité *Market* est une activité qui est elle-même composée de plusieurs activités, par exemple l'activité *Market* de production d'électricité en France prend en compte le mix complet et non uniquement une des technologies de production d'électricité.

III.2. Consommation énergétique des appareils : résultats des tests de cuisson

Comme expliqué précédemment, nous avons réalisé des mesures d'élévation de température de l'eau (tests de cuisson) afin de remonter aux consommations énergétiques des appareils étudiés. Le détail de l'installation et des appareils de mesures utilisés sont présentés dans la partie III.3.1. Nous présentons ici les résultats obtenus et en déduisons le rendement énergétique de chaque appareil.

La valeur théorique d'une montée en température (E_{th}) a été calculée grâce à Eq III-1. En partant de cette valeur nous avons calculé le rendement η qui correspond au ratio de la valeur théorique sur la valeur expérimentale E_{exp} , comme montré par Eq III-2.

$$\eta = \frac{E_{th}}{E_{exp}} \quad \text{Eq III-2}$$

Plaque à induction : Pour réaliser les tests de cuisson nous avons utilisé la plaque à induction Servin KP 1071 avant qu'elle ne soit démontée pour réaliser l'inventaire. La consommation électrique a été relevée toutes les deux minutes pendant la montée en température, grâce à un compteur électrique (Polier MM32LM, précision de 10^{-2} kWh). Ainsi, nous avons pu calculer l'énergie totale utilisée pour atteindre 90 °C.

Pour la plaque à induction, les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-1. On peut remarquer que la durée de montée en température diminue systématiquement avec l'augmentation du thermostat : on divise la durée par presque 5 en passant du thermostat 2 au thermostat 10. La consommation énergétique par unité de temps augmente elle aussi ; celle-ci dépend directement du thermostat utilisé. L'augmentation de la consommation par unité de temps est franche entre les thermostats 2 et 5, puis très faible entre le 5 et le 7, pour être à nouveau forte entre le 7 et le 9. Enfin l'énergie consommée évolue peu entre le 9 et le 10. Finalement entre les thermostats 2 et 10 un facteur de 3,4 est observé. Cependant, lorsque E_{exp} (consommation mesurée sur la montée en température) est calculée, il est possible de remarquer une diminution avec l'augmentation des thermostats. Cela indique que la baisse du temps de chauffe contrebalance l'augmentation de la consommation, ce qui indique que le rendement est bon avec cet appareil. Sachant que l'énergie théorique pour une montée en température vaut 0,151 kWh, le rendement thermique de la plaque induction est donc meilleur avec l'augmentation du thermostat. Le rendement maximum est obtenu pour une consommation totale de 0,204 kWh et atteint 74%.

Tableau III-1 : Résultats des tests de cuisson pour la plaque à induction pour des montées en température entre 25 °C et 90 °C de 2 L d'eau dans une casserole couverte.

	Temps de montée (min)	Consommation électrique (kWh/min)	E_{exp} (kWh)	η (%)
Thermostat 2	30,82	0,009	0,265	57,0
Thermostat 4	12,66	0,017	0,211	72,6
Thermostat 5	10,27	0,021	0,215	70,2
Thermostat 6	9,59	0,022	0,211	71,6
Thermostat 7	8,53	0,024	0,208	72,6
Thermostat 8	7,83	0,027	0,209	72,3
Thermostat 9	6,94	0,030	0,208	72,6
Thermostat 10	6,48	0,031	0,204	74,0

Plaque électrique : Le même protocole que précédemment a été réalisé pour mesurer la consommation électrique de la plaque électrique et déterminer son rendement. La seule différence est, qu'ici, on ne retrouve que 6 niveaux de puissance.

Pour cet appareil, les résultats des tests de cuisson sont présentés dans le Tableau III-2. Tout comme pour la plaque à induction le temps pour atteindre 90 °C diminue nettement avec l'augmentation des thermostats. Le facteur de diminution du temps de montée entre le

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

thermostat 2 et le thermostat 6 est de 4 alors qu'au thermostat 1 seulement 86 °C ont pu être atteints. Toujours dans la même logique qu'avec la plaque à induction la consommation électrique augmente avec l'augmentation du thermostat. Ici, l'augmentation suit une tendance plus linéaire que précédemment même si un palier est observable entre le thermostat 3 et le 7 en passant de 0,007 à 0,012 kWh/min. Là aussi E_{exp} diminue avec l'augmentation du thermostat ; tout comme la plaque à induction, la diminution du temps de montée compense l'augmentation de la consommation de la plaque. Ceci induit une augmentation du rendement avec l'augmentation du thermostat. En effet, η passe de 34,09% (0,443 kWh consommé) au thermostat 1 à 63,18% au thermostat 6 (0,239 kWh consommé).

Tableau III-2 : Résultats des tests de cuisson pour la plaque électrique pour des montées en température entre 25 °C et 90 °C de 2 L d'eau avec l'utilisation d'un couvercle.

	Temps de montée (min)	Consommation électrique (kWh/min)	E_{exp} (kWh)	η (%)
Thermostat 1	147,82 (86°C seulement)	0,003	0,443	34,09
Thermostat 2	56,39	0,005	0,282	53,55
Thermostat 3	36,08	0,007	0,253	59,68
Thermostat 4	20,53	0,012	0,246	61,38
Thermostat 5	16,14	0,015	0,242	62,40
Thermostat 6	14,05	0,017	0,239	63,18

Le brûleur à gaz : Dans ce cas, comme le laboratoire ne dispose pas de connexion au réseau de gaz de ville et pour des raisons de sécurité, nous avons réalisé les expériences sur une gazinière d'un particulier raccordée au réseau de la ville. Il s'agissait d'une gazinière avec 4 brûleurs de différentes tailles, un grand (repéré par la lettre L), deux moyens (M) et un petit (S). Pour chaque brûleur étudié 4 positions de leur vanne permettent différents débits. Cependant, certaines configurations étaient redondantes en termes de débit de gaz et elles ont donc été exclues. Afin d'être dans la même plage de cas étudiés que précédemment, nous avons sélectionné les sept débits les plus représentatifs et les résultats sont présentés dans l'ordre croissant des débits. Pour passer des consommations en volume aux valeurs énergétiques nous avons utilisé le coefficient de conversion pour la ville de Toulouse fourni par GRDF : 11,34 kWh/m³.

Dans un premier temps il est possible de remarquer que le débit et le temps de montée sont liés. En effet, plus le débit est faible plus le temps de montée est long avec un maximum de 99,06 min pour un débit de 0,43 L/min. Ce débit est 11,32 fois plus faible que le maximal qui vaut 4,87 L/min et cette différence est reportée sur le temps de montée en température qui est 11,8 fois plus faible. Bien que ces deux paramètres évoluent de la même manière, il en est différemment pour E_{exp} . En effet, l'évolution de la valeur de l'énergie mesurée en fonction du débit révèle un maximum pour un débit moyen de 1,4 L/min et non pour le débit maximal.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Nous supputons que ce changement de tendance est dû aux diamètres des brûleurs qui influent sur l'efficacité du processus. En effet, lorsque les brûleurs moyen et grand sont utilisés, il est possible de constater qu'une partie de la chaleur s'échappe le long des bords de la casserole. Avec le grand brûleur, il est même possible de voir les flammes du brûleur s'échapper sur les bords. Ce comportement augmente fortement les pertes et donc diminue l'efficacité de la chauffe.

La plus faible des valeurs de E_{exp} vaut 0,293 kWh : elle est obtenue pour la position la plus ouverte du petit brûleur. Cette valeur correspond à un rendement de 51,54%.

Tableau III-3 : Résultats des tests de cuisson pour le brûleur à gaz pour des montées en température entre 25 °C et 90 °C de 2 L d'eau avec l'utilisation d'un couvercle.

Brûleur	Position	Temps de montée (min)	Débit de gaz (L/min)	Consommation (L)	E_{exp} (kWh)	η (%)
Petit	1	99,06	0,43	42,59	0,483	31,26
	2	61,57	0,56	36,60	0,415	36,39
	3	28,94	0,93	26,92	0,305	49,51
	4	18,52	1,40	25,84	0,293	51,54
Moyen	4	11,6	2,68	31,03	0,352	42,90
Grand	3	10,87	2,90	31,52	0,357	42,30
	4	8,43	4,87	41,05	0,466	32,40

Comparaison : Les valeurs de rendements sont primordiales pour l'ACV puisqu'elles conditionnent les quantités d'électricité ou de gaz nécessaires pour remplir l'unité fonctionnelle. Les Figure III-7-a, Figure III-7-b et Figure III-7-c présentent respectivement l'évolution des rendements de la plaque à induction, de la plaque électrique et du brûleur à gaz en fonction de leurs thermostats placés dans l'ordre croissant de débit d'électricité ou de gaz.

Les tendances observées sont similaires pour les deux appareils électriques avec une nette augmentation sur les premiers thermostats puis une augmentation faible proche d'un plateau par la suite. Pour l'appareil au gaz, la tendance est franchement différente : nous observons en effet un extrémum pour une valeur intermédiaire de débit de gaz. Cette comparaison montre également que la plaque à induction a le meilleur rendement avec 74,02%, suivie par la plaque électrique avec 63,18 % puis par le brûleur à gaz avec 51,54%.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

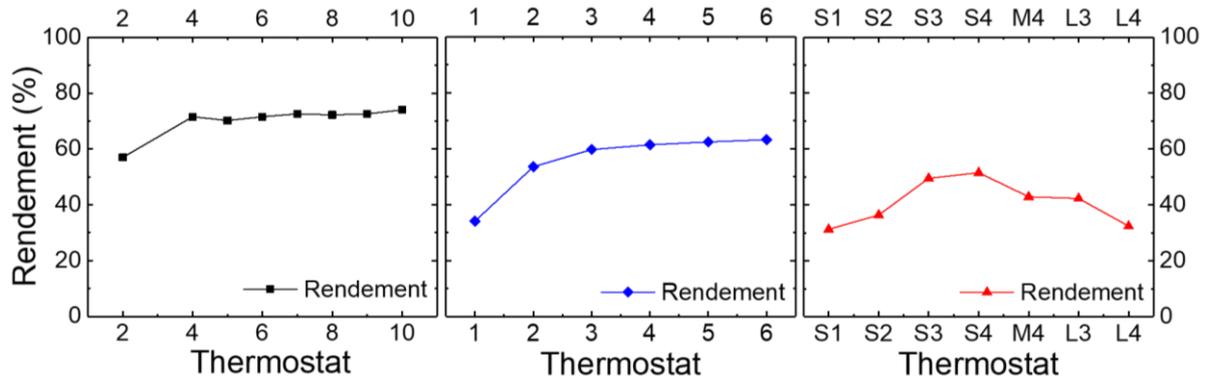


Figure III-7 : Comparaison de l'évolution des rendements de (a) la plaque à induction, (b) de la plaque électrique et (c) du brûleur à gaz en fonction de leurs thermostats classés dans l'ordre croissant du débit électrique ou de gaz fourni. Pour le gaz, les lettres permettent d'identifier les brûleurs : S – petit, M – moyen et L – grand.

Nous avons donc utilisé les valeurs de rendements précédentes pour calculer la consommation d'énergie sur toute la durée de l'unité fonctionnelle. Le Tableau III-4 présente les valeurs utilisées dans les calculs ainsi que le temps de montée et la consommation correspondante.

Tableau III-4 : Consommations, temps de montée en température et rendements de chaque appareil de cuisson conventionnel dans le meilleurs cas (rendement le plus élevé).

Appareils	Consommation d'une chauffe (kWh)	Temps de montée (min)	η (%)
Plaque induction	0,20	6,5	74,0
Plaque électrique	0,24	14,0	63,2
Brûleur à gaz	0,29	18,5	51,5

Une fois les tests de cuisson réalisés, toutes les données nécessaires à la réalisation de l'inventaire sont réunies. Ce sera l'objet de la prochaine partie, dans un premier temps de manière descriptive puis quantitative.

III.3. L'inventaire de cycle de vie

La réalisation de l'inventaire de cycle de vie est une étape cruciale lors d'une ACV, la présentation de cette étape et la méthode utilisée sont respectivement présentées en partie I.4.2.3 (page 86) et II.4.3 (page 124). Dans cette partie, l'inventaire de cycle de vie sera d'abord présenté de manière descriptive avec les équivalences ecoinvent, puis les masses de toutes les parties et composants seront présentées.

III.3.1. Inventaire descriptif et équivalences ecoinvent

Ici, les descriptifs détaillés des appareils seront présentés, tout comme les équivalences dans la base de données ecoinvent. Les équivalences seront présentées telles qu'elles sont trouvées dans

la base de données donc en anglais. De plus, pour chaque activité, son type (*unit* ou *result*) et sa zone géographique seront spécifiés (cf partie II.4.1, page 115).

III.3.1.1. Les cuiseurs solaires

Comme expliqué partie III.1.2.1 (page 128), les cuiseurs solaires sont décomposés en trois parties : la structure, le collecteur et le support de la casserole. L'ensemble des procédés considérés et leurs correspondances dans la base de données sont présentés Ici, pour le traitement des réflecteurs, nous n'avons pas pu trouver le procédé air-vide-air de dépôt physique en phase gazeuse et celui de revêtement de bobine dans la base de données. Afin de représenter ce traitement, nous avons pris le procédé d'anodisation dans la base de données. L'ensemble des équivalences ecoinvent sont présentées Tableau III-5.

Tableau III-5 : Tableau récapitulatif de l'inventaire descriptif des cuiseurs solaires et des équivalences ecoinvent de chaque procédé

Parties	Procédés	Equivalences ecoinvent	Type	Zone ¹	Note ¹
Structure	Production d'aluminium	Aluminium production, primary, ingot	Result	CN, CA	
	Extrusion d'aluminium	Section bar extrusion, aluminium	Unit	RoW	Mix électrique CN ou CA
Support de la casserole	Production d'aluminium	Aluminium production, primary, ingot	Result	CN, CA	
	Extrusion d'aluminium	Section bar extrusion, aluminium	Unit	RoW	Mix électrique CN ou CA
Réflecteurs	Production d'aluminium	Aluminium production, primary, ingot	Result	CN, CA	
	Laminage	Sheet rolling, aluminium	Unit	RoW	Mix électrique CN ou CA
	Traitement de surface	Anodising, aluminium sheet	Result	RER	
Matière première pour les variantes des structures	Production d'aluminium recyclé	Aluminium production, secondary, from new scrap, at plant	Result	RER	Ecoinvent 3.2.2 utilisée avec le mix électrique CN ou CA
		Aluminium production, secondary, from old scrap, at plant	Result	RER	Ecoinvent 3.2.2 utilisée avec le mix électrique CN ou CA
	Production de bois	Lath, softwood, raw, air drying to $u = 20\%$	Result	Europe without Switzerland	u : taux d'humidité

1 : FR : France, CN : Chine, CA : Canada, DE : Allemagne, IN : Inde, RoW : Rest of the World, GLO : Global, RER : Europe

III.3.1.2. La plaque à induction

La plaque à induction est présentée partie III.1.2.2 (page 130) et chacune des parties composant la plaque seront décrites ici. Certaines ont été regroupées : la plaque vitrocéramique et le carter ont été regroupés sous l'appellation de « Carter » ; le ventilateur et l'alimentation ont été regroupés sous l'ensemble « Câblage ». Les parties sont donc les suivantes :

Le carter : comme présenté Figure III-3 dans la partie III.1.2.2 (page 130), le carter est composé d'une partie inférieure en polypropylène noir moulé, d'une partie supérieure qui est la plaque vitrocéramique et d'une fixation en polymères ABS (acrylonitrile butadiène styrène) moulée et collée sur la plaque vitrocéramique. Les parties inférieure et supérieure sont assemblées grâce à des vis en acier inoxydable.

La plaque électronique : la plaque électronique est faite de nombreux composants : 6 ressorts ; 9 capacités électrolytiques ; 4 capacités de type film ; 1 afficheur ; 4 DEL ; 8 résistances ; 3 mémoires CI ; 1 transformateur ; 6 diodes et 1 pont redresseur ; 3 transistors ; 1 fusible ; 1 dissipateur de chaleur et 1 potentiomètre. L'ensemble de ces composants sont exposés Figure III-8 sur le circuit imprimé. De plus, sur le verso du circuit imprimé on retrouve des composants montés en surface : 12 capacités ; 24 résistances ; 2 diodes et 3 transistors. L'ensemble des composants sont soudés à l'étain et la plaque électronique est fixée sur le carter inférieur avec des vis.

L'assemblage de la bobine : la bobine est réalisée en fils de cuivre enroulés sur un support en polypropylène noir moulé. Ce support comprend aussi des barres de conduite de champ en ferrite placées de manière verticale au centre et à l'extérieur de la bobine, et horizontalement sous la bobine. Au total 12 barres verticales sont présentes et 6 horizontales. Au centre de la bobine sont positionnés une résistance et un fusible dans une protection en caoutchouc. Finalement, un disque en aluminium est placé sous la bobine afin d'isoler l'extérieur de la plaque des champs magnétiques, cet isolant n'est pas visible sur la Figure III-8.

L'alimentation : L'alimentation est réalisée via un câble électrique et une prise. De plus un ventilateur, présenté Figure III-8, est utilisé pour refroidir l'ensemble de la plaque. Pour les trois composants précédents (prise, câble et ventilateur), ecoinvent fournit des activités de production spécifiques que nous avons utilisées. De plus, un filtre en ferrite est placé juste avant que le câble ne soit branché sur la plaque électronique.

Au niveau de la modélisation, plusieurs manques ont été observés dans la base de données. Premièrement, ecoinvent ne fournit pas de procédé pour la production de plaque vitrocéramique ; nous l'avons donc modélisée comme du verre trempé. Ensuite, pour les pièces en ferrite (barre de conduite de champ et filtre) nous n'avons pas trouvé de procédé de mise en forme convenable ou similaire, cette étape a donc été négligée. Finalement, aucune activité se rapprochant de la production de fusible n'a été trouvée dans ecoinvent ; ce composant a donc été négligé.

Pour le reste des composants et pièces, tous les procédés ont pu être modélisés. Nous avons également modélisé tous les fils électroniques de la même manière : fil de cuivre et gaine isolante en polymère. L'ensemble des équivalences ecoinvent sont listées dans le Tableau III-6.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

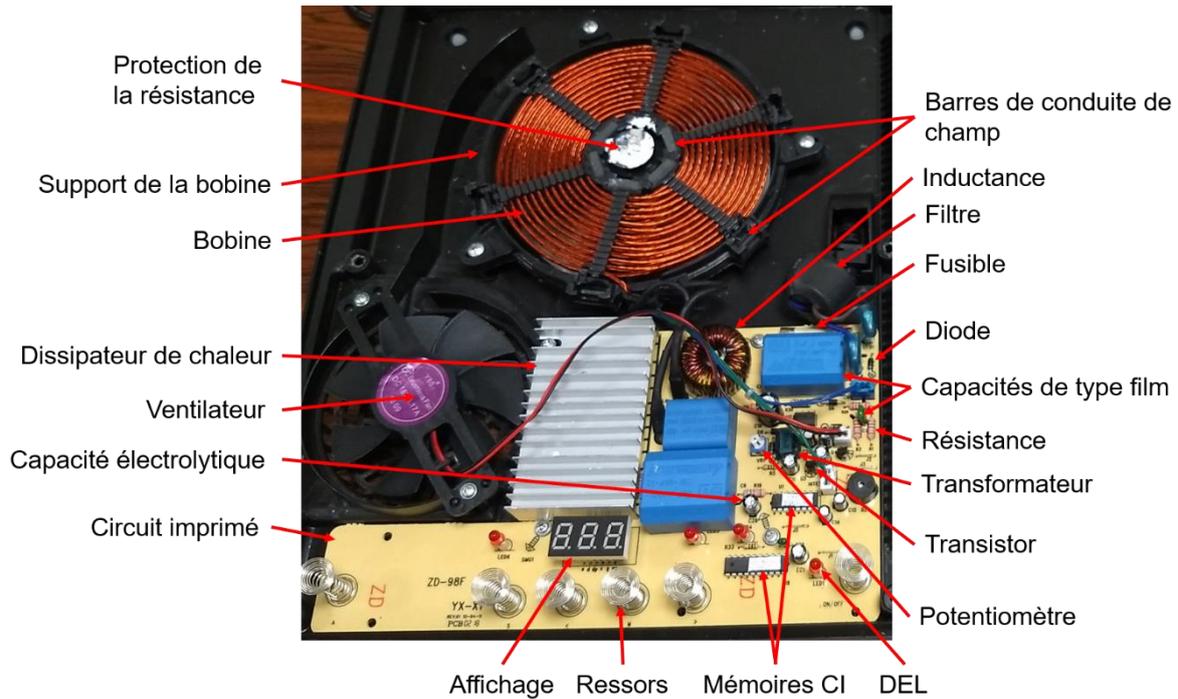


Figure III-8 : Détail de la composition de la plaque électronique et de l'assemblage de la bobine pour la plaque à induction analysée.

Tableau III-6 : Tableau récapitulatif de l'inventaire descriptif de la plaque à induction et des équivalences ecoinvent de chaque procédé.

Parties	Procédés	Equivalences ecoinvent	Type	Zone ¹	Note ¹
Carter	Cater inférieur	Polypropylène (PP) production, granulate	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Fixation de la plaque	Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) copolymer production	Result	RoW	
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Vitrocéramique	Flat glass production, uncoated	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Tempering, flat glass	Result	RoW	
Assemblage de la bobine	Bobine	Copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process	Unit	GLO	Mix électrique et ammoniacque CN
		wire drawing, copper	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Support de la bobine	PP production, granulate	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Barre de conduite de champs magnétique	Ferrite production	Unit	GLO	Mix électrique CN
	Isolant magnétique	Aluminium production, primary, ingot	Unit	RoW	Mix électrique CN

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

		Sheet rolling, aluminium	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Laser machining, metal, with YAG-laser, 200W power	Result	RoW	[171]	
	Protection de la résistance	Synthetic rubber production	Unit	RoW	Mix électrique et azote CN	
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN	
	Résistance	Resistor production, metal film type, through-hole mounting	Result	GLO		
Carte électronique	Capacité électrolytique	Capacitor, electrolytic type, < 2 cm height	Result	GLO		
	Capacité de type film	Capacitor production, film type, for through-hole mounting	Result	GLO		
	Capacité	Capacitor production, surface-mounted	Result	GLO		
	Circuit imprimé		Printed wiring board production, for through-hole mounting, Pb containing surface	Unit	GLO	Mix électrique CN
			Printed wiring board production, for surface mounting, Pb containing surface	Unit	GLO	Mix électrique CN
	Affichage	Liquid crystal display production, minor components, auxiliaries and assembly effort	Unit	GLO	Mix électrique et ammoniac CN	
	DEL	Diode production, glass-, for through-hole mounting	Result	GLO		
	Résistance		Resistor production, metal film type, through-hole mounting	Result	GLO	
			Resistor production, surface-mounted	Result	GLO	
	Potentiomètre	Potentiometer production, unspecified	Result	GLO		
	Mémoire CI	Integrated circuit production, memory type	Unit	GLO	Mix électrique CN	
	Transformateur	Transformer production, low voltage use	Result	GLO		
	Inductance	Inductor production, ring core choke type	Result	GLO		
	Transistor		Transistor production, wired, small size, through-hole mounting	Result	GLO	
			Transistor production, wired, big size, through-hole mounting	Result	GLO	
		Transistor production, surface-mounted	Result	GLO		

	Diode	Diode production, glass-, for through-hole mounting	Result	GLO	
		Diode production, surface-mounted	Result	GLO	
	Dissipateur de chaleur	Aluminium production, primary, ingot	Result	CN	
		Impact extrusion of aluminium, 3 strokes	Result	RoW	
	Ressorts	Steel production, chromium steel 18/8, hot rolled	Result	RoW	
		Metal working, average, for chromium steel product manufacturing	Result	RoW	
Câblage	Alimentation	Cable production, connector for computer, without plugs	Result	GLO	
		Plug production, inlet and outlet, for computer cable	Result	GLO	
		Fan production, for power supply unit, desktop computer	Result	GLO	
	Filtre	Ferrite production	Unit	GLO	Mix électrique CN
	Fil	Polyvinylchloride production, bulk polymerisation	Result	RoW	
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
		Wire drawing	Unit	RoW	Mix électrique CN
Energie	Production d'électricité	Market group for electricity, low voltage	Result	FR	
<p>1 : FR : France, CN : Chine, CA : Canada, DE : Allemagne, IN : Inde, RoW : Rest of the World, GLO : Global, RER : Europe</p>					

III.3.1.3. La plaque électrique

La plaque électrique est présentée partie III.1.2.3 (page 131). Elle est composée de trois parties qui seront présentées ci-après. Le détail des composants de la plaque électrique est présenté Figure III-9.

Le carter : le carter est construit en deux parties en tôle d'acier emboutie et revêtue pour mieux résister à l'environnement extérieur. Un relai permet de réguler la puissance ; il est piloté par un potentiomètre en plastique moulé. De plus un boîtier en polypropylène noir moulé est fixé sur le carter inférieur ce qui permet la protection du lien entre le câble d'alimentation et les fils électriques. Finalement 4 pieds en caoutchouc moulés sont fixés sous le carter inférieur.

La plaque chauffante : la plaque chauffante est constituée dans un premier temps d'une plaque en fonte moulée ; la plaque est nervurée ce qui permet l'inclusion de la résistance

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

chauffante en spirale. La résistance est composée de trois parties : un « fil » intérieur en acier allié à du nickel, entouré d'une poudre réfractaire le tout placé dans un tube en acier. Afin de la maintenir en place, un ciment réfractaire est moulé sur la résistance. Ensuite un disque d'isolant en fibre d'alumine est placé et maintenu via un carter en acier galvanisé embouti. Enfin, tout cet assemblage est protégé par un carter général en tôle d'acier emboutie et revêtue. L'assemblage se fait grâce à une tige filetée en acier inoxydable qui se visse dans la plaque en fonte et traverse tous les composants. Un écrou est visé de l'autre côté ce qui permet le serrage.

Le câblage : les fils électriques sont différents du précédent appareil. En effet, ici ils sont constitués d'un fil de cuivre, d'une gaine d'isolation en silicone extrudé et d'une protection textile synthétique. Le câble d'alimentation a une activité ecoinvent dédiée, nous l'avons donc utilisée.

Au niveau des absences d'activités, ici, la fibre d'alumine constituant l'isolant n'est pas disponible, nous avons donc utilisé l'activité de production de laine de verre. Par ailleurs, le ciment réfractaire n'est pas spécifiquement disponible non plus, et nous avons donc utilisé une activité de production générale de matériaux réfractaire. Pour la résistance, comme le « fil » intérieur à un diamètre plus important que ceux des activités proposées, une activité générale de travail des métaux a été utilisée.

L'ensemble des équivalences ecoinvent des procédés est disponible dans le Tableau III-7.

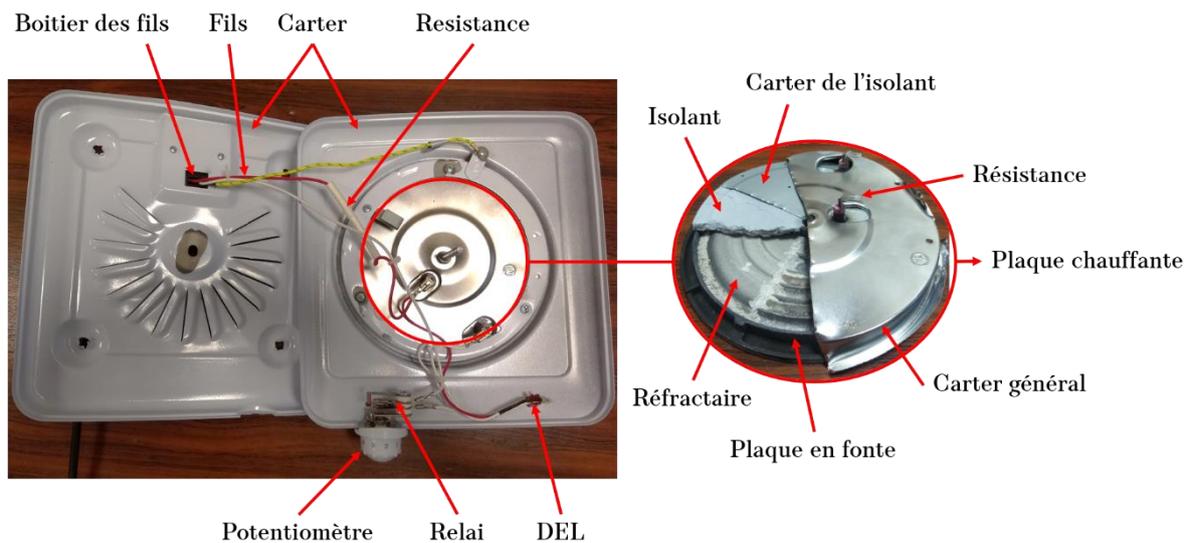


Figure III-9 : Détail de la composition de la plaque électrique

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-7 : Tableau récapitulatif de l'inventaire descriptif de la plaque électrique et des équivalences ecoinvent de chaque procédé.

Parties	Procédés	Equivalences ecoinvent	Type	Zone ¹	Note ¹	
Carter	Carter	steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Sheet rolling, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Deep drawing, steel, 3500 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Powder coating, steel	Unit	RoW	Mix électrique et eau décarbonatée CN	
	Thermostat	Nylon 6 production	Result	RoW		
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN	
	Relai	Switch, toggle type	Result	RoW		
	Boitier	PP production, granulate	Result	RoW		
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN	
	Pied	Synthetic rubber production	Result	RoW	Mix électrique et azote CN	
		Injection moulding	Result	RoW	Mix électrique CN	
	Plaque chauffante	Plaque	Cast iron production	Unit	RoW	Mix électrique et charbon CN
			Casting, steel, lost-wax	Unit	RoW	Mix électrique CN
Résistance chauffante		Steel production, converter, low-alloyed	Result	RoW	Partie extérieure de la résistance, mix électrique CN	
		Section bar extrusion	Result	RoW		
		Refractory production, basic, packed	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Iron-Nickel-Chromium alloy production	Unit	RoW	Partie intérieure de la résistance, mix électrique CN	
		Metal working, average for steel product manufacturing	Result	RoW		
Ciment réfractaire		Refractory production, basic, packed	Unit	RoW	Mix électrique CN	
Isolant		Glass wool mat production	Unit	RoW	Mix électrique, ammoniac et urée CN	
Carter de l'isolant		Steel production, converter, low alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Sheet rolling, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Deep drawing, steel, 3500 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Zinc coating, pieces	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN	
Carter général		Steel production, converter, low alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN	
		Sheet rolling, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN	

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

		Deep drawing, steel, 3500 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Powder coating, steel	Unit	RoW	Mix électrique et eau décarbonatée CN
Câblage	Alimentation	cable production, connector for computer, without plugs	Unit	GLO	Mix électrique CN
		plug production, inlet and outlet, for computer cable	Unit	GLO	Mix électrique CN
	DEL	Light emitting diode production	Result	GLO	
	Résistance	Resistor production, metal film type, through-hole mounting	Result	GLO	
	Fil électrique	Silicone product production	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process	Unit	GLO	Mix électrique et ammoniac CN
		Wire drawing, copper	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Glass fibre production	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Weaving of synthetic fibre, for industrial use	Unit	GLO	Mix électrique CN
Energie	Production d'électricité	Market group for electricity, low voltage	Result	FR	
1 : FR : France, CN : Chine, CA : Canada, DE : Allemagne, IN : Inde, RoW : Rest of the World, GLO : Global, RER : Europe					

III.3.1.4. Brûleur à gaz

Le brûleur à gaz est présenté partie III.3.1.4 (page 146). Les deux parties de l'appareil seront présentées dans le détail ci-dessous avec, dans un premier temps, le carter puis l'assemblage du brûleur.

Afin de déterminer les matériaux composant les pièces du brûleur nous avons utilisé plusieurs techniques de caractérisation comme la microscopie électronique à balayage, la spectroscopie à énergie dispersive et la diffraction aux rayons X.

Le carter : le détail des pièces composant le carter est présenté Figure III-10. Les premières pièces composant le carter sont les parois et la partie supérieure. Elles sont réalisées en fine tôle d'acier qui a été chromé afin de le protéger de l'environnement extérieur et pour des raisons esthétiques. Les renforts quant à eux sont réalisés en acier galvanisé, soit recouvert d'une couche de zinc. Le but étant là aussi d'améliorer la résistance à la corrosion et donc à l'humidité. Dans la même optique, le support du brûleur est réalisé en acier galvanisé à partir

d'une tôle plus épaisse pliée plusieurs fois. La mise en forme des pièces du carter est simple, les tôles sont pliées ou embouties dans la forme voulue.

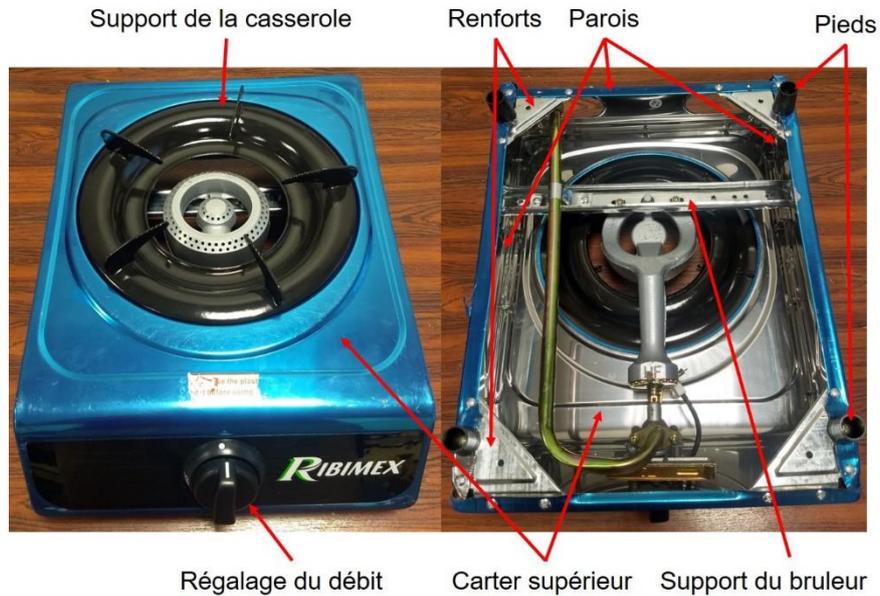


Figure III-10 : Description détaillée des pièces composant le carter du brûleur à gaz.

L'assemblage du brûleur : L'assemblage du brûleur est composé de nombreuses pièces afin d'assurer l'étanchéité et le réglage du débit de gaz ; la plupart des pièces sont présentées Figure III-11. Le brûleur lui-même est une pièce monobloc en fonte moulée et revêtue. En amont de ce brûleur se trouvent deux rondelles pour régler la quantité d'air en entrée du brûleur. Ces deux rondelles sont en acier revêtu de zinc comme protection contre la corrosion. Les rondelles sont embouties avant d'être plongées dans un bain de zinc permettant le dépôt d'une fine couche. Ensuite, s'enchaînent plusieurs pièces de distribution du gaz en laiton usiné. Ces pièces de distribution permettent de gérer le débit de gaz grâce à la pièce de réglage en acier galvanisé qui ressort de l'assemblage et est emboîté dans un bouton en plastique. Le système de réglage de débit est placé dans un carter en aluminium moulé sur lequel est fixé le tube rigide. Le tube rigide est lui aussi réalisé en acier galvanisé. Finalement un embout permettant d'encastrer le tube souple est placé à l'autre extrémité du tube rigide. Cet embout est moulé et revêtu de zinc. La dernière partie de l'assemblage est le système d'allumage piézoélectrique. Les céramiques piézoélectriques sont tassées dans un carter en polymère moulé aux extrémités duquel sont placées des petites pièces en acier usiné. Le marteau en ferrite frappe une des extrémités ce qui crée une tension électrique conduite dans un câble jusqu'à une pointe produisant un arc électrique pour allumer le gaz. Finalement, plusieurs joints en polymère sont identifiés pour permettre l'étanchéité. La céramique piézoélectrique n'était pas disponible dans ecoinvent, nous avons donc choisi une activité générique de production de céramique. Mise à part cette approximation, l'ensemble des procédés ont pu être trouvés dans la base de données. Dans certains cas le procédé est générique, comme pour les ressorts qui sont modélisés avec une activité générale de travail du métal.

L'ensemble des équivalences ecoinvent sont listées dans le

Tableau III-8.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

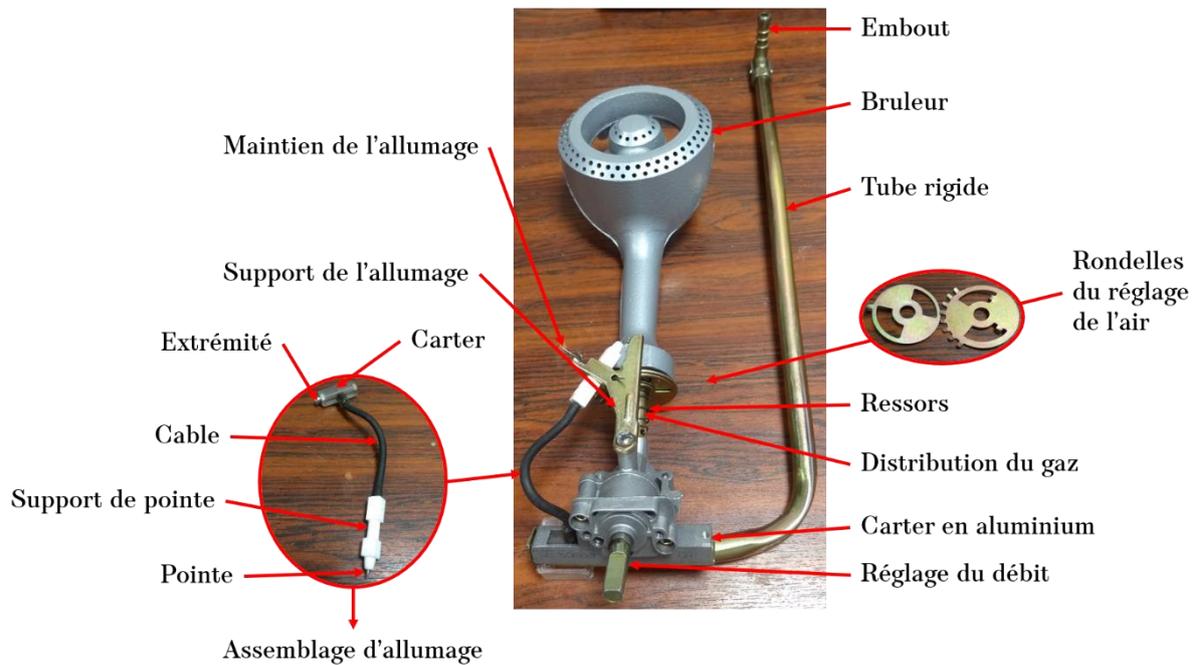


Figure III-11 : Composition détaillée de l'assemblage du brûleur

Tableau III-8 : Tableau récapitulatif de l'inventaire descriptif du brûleur à gaz et des équivalences ecoinvent de chaque procédé.

Parties	Procédés	Equivalences ecoinvent	Type	Zone ¹	Note ¹
Carter	Paroi et carter supérieur	Steel production, chromium steel 18/8, hot rolled	Result	RoW	
		Sheet rolling, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Deep drawing, steel, 650 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Hard chromium coating, electroplating, steel substrate, 0.14mm thickness	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Renfort et support du brûleur	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Sheet rolling, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Deep drawing, steel, 650 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Zinc coating, pieces	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
	Pied et réglage du débit	Acrylonitrile-butadiene-styrene	Result	RoW	

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

		(ABS) copolymer production			
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
Support de la casserole		Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Sheet rolling, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Impact extrusion of steel, cold, deformation stroke	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Laser machining, metal, with CO ₂ -laser, 2000 W power	Unit	RoW	Mix électrique CN, [172]
Assemblage du brûleur	Brûleur	Cast iron production	Unit	Row	Mix électrique et charbon CN
		Casting, steel, lost-wax	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Powder coating, steel	Unit	RoW	Mix électrique et eau décarbonatée CN
	Embout	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Casting, steel, lost-wax	Unit	RoW	Mix électrique et alumine CN
		Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
	Tube rigide	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Section bar rolling, steel	Result	RoW	
		Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
	Pièce de réglage du gaz	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Steel turning, average, computer numerical controlled	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
	Rondelle percée	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Deep drawing, steel, 650 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
	Rondelle de réglage de l'ouverture de l'air	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Deep drawing, steel, 650 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Protection de l'allumage	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Deep drawing, steel, 650 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
Support de l'allumage	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Deep drawing, steel, 650 kN press, automode	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Zinc coating	Unit	RoW	Mix électrique et ammoniac CN
Ressors	Steel production, chromium steel 18/8, hot rolled	Result	RoW	
	Metal working, average for chromium steel product manufacturing	Result	RoW	
Joint	Synthetic rubber production	Unit	RoW	Mix électrique et azote CN
	Injection moulding [RoW]	Unit	RoW	Mix électrique CN
Carter en aluminium	Aluminium production, primary, ingot	Result	CN	
	Casting, aluminium, lost-wax	Unit	RoW	Mix électrique, aluminium, ammoniac et acide nitrique CN
Pièces de distribution du gaz	Brass production	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Casting, brass	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Brass turning, average, computer numerical controlled	Unit	RoW	Mix électrique CN
Tube	Synthetic rubber production	Unit	RoW	Mix électrique et azote CN
	Extrusion, plastic pipes	Unit	RER	Mix électrique CN
Goupille	steel production, chromium steel 18/8, hot rolled	Result	RoW	
	chromium steel turning, average, computer numerical controlled	Result	RoW	Mix électrique CN
Assemblage de l'allumage (piézoélectrique)	steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Wire drawing, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN

	Support de la pointe	Sanitary ceramics production	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Câble	Cable production, unspecified	Result	RoW	
	Carter	PP production, granulate	Result	RoW	Mix électrique CN
		Injection moulding	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Céramique piézométrique	Sanitary ceramics production	Unit	RoW	Mix électrique CN [171]
	Marteau	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Casting, steel, lost-wax	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Extrémité du carter	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Steel turning, average, computer numerical controlled	Unit	RoW	Mix électrique CN
	Maintien du système piézoélectrique	Steel production, converter, low-alloyed	Unit	RoW	Mix électrique CN
		Wire drawing, steel	Unit	RoW	Mix électrique CN
Gaz	Production et distribution du gaz naturel	Market for natural gas, high pressure	Result	FR	

1 : FR : France, CN : Chine, CA : Canada, DE : Allemagne, IN : Inde, RoW : Rest of the World, GLO : Global, RER : Europe

III.3.1.5. Procédés généraux

Finalement, certaines pièces et procédés sont généraux et utilisés pour tous les appareils.

La visserie est toujours réalisée en acier inoxydable en Chine ou en Allemagne : les mêmes activités ont été utilisées en spécifiant la zone géographique. De même, la production d'électricité sera modélisée par le même procédé pour tous les appareils mais elle dépend de la zone géographique où l'activité est réalisée ; ces zones géographiques seront spécifiées. Le transport est réalisé soit par voie maritime depuis la Chine ou le Canada, soit par voie routière une fois en Europe. Nous avons donc utilisé les mêmes activités pour tous les modèles. Enfin, le traitement de fin de vie a été réalisé en traitant les matériaux, donc les procédés sont les mêmes pour les matériaux identiques. Dans le cas où le traitement de fin de vie se divise en plusieurs activités nous les avons réparties ainsi : 32% en enfouissement, 68% en incinération pour ce qui n'est pas recyclé et ce d'après ecoinvent. Et pour ce qui est du recyclage, nous avons aussi considéré les niveaux actuels, à savoir : 25% de recyclage pour les plastiques [173], 83% pour l'acier d'après ArcelorMittal et 79% pour l'aluminium [174]. L'ensemble des activités ecoinvent communes sont présentées dans le Tableau III-9.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-9 : Equivalence ecoinvent des procédés communs dans les modèles des appareils

Parties	Procédés	Equivalences ecoinvent	Type	Zone ¹	Note ¹
Vis	Mise en forme des têtes de vis	Impact extrusion of steel, cold deformation stroke	Unit	RER or RoW	Mix électrique CN ou DE
	Filetage	Hot rolling, steel	Unit	Europe without Austria or RoW	Mix électrique CN ou DE
Energies	Production d'électricité	Market group for electricity, medium voltage	Result	CA, CN, DE, FR	
		Market group for electricity, high voltage	Result	CA, CN, DE, FR	
		Market group for electricity, low voltage	Result	CA, CN, DE, FR	
Transport	Maritime	Transport, freight, sea, container ship	Result	GLO	
	Routier	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	Result	RER	
Traitement de fin de vie	Acier	Treatment of scrap steel, inert material landfill	Result	Europe without Switzerland	
		Sorting and pressing of iron scrap	Unit	RER	Mix électrique FR
	Plastique et polymères	Treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill	Unit	RoW	Mix électrique FR
		Plastic flake production, consumer electronics, for recycling, by grinding/shredding, formal sector	Result	IN	
		Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration	Unit	RoW	
		Treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration	Unit	Europe without Switzerland	Eau décarbonatée FR
	Composants électronique	Treatment of waste electric and electronic equipment, shredding	Unit	GLO	Mix électrique FR
		Treatment of scrap printed boards, shredding and separation	Result	RoW	
	Isolant	Treatment of waste mineral wool, collection for final disposal	Result	Europe without Switzerland	
		Treatment of waste mineral wool, inert material landfill	Result	Europe without Switzerland	

Câblages électriques et électroniques	Treatment of waste, electrical and electronic cables, open burning	Result	RoW	
Verre	Treatment of waste glass, municipal incineration	Result	RoW	
	Treatment of waste glass, sanitary landfill	Unit	GLO	Mix électrique FR
Cuivre	Treatment of scrap copper, municipal incineration	Result	Europe without Switzerland	
Aluminium	Treatment of waste aluminium, sanitary landfill	Unit	RoW	Mix électrique FR
	Treatment of aluminium post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing	Unit	RER	Mix électrique FR
Déchets inertes	Treatment of inert waste, sanitary landfill	Unit	Europe without Switzerland	Mix électrique FR
Bois	Treatment of waste wood, post-consumer, sorting and shredding	Result	RoW	

1 : FR : France, CN : Chine, CA : Canada, DE : Allemagne, IN : Inde, RoW : Rest of the World, GLO : Global, RER : Europe

III.3.2. Inventaire quantitatif

Une fois que tous les matériaux, composants, procédés et échanges ont été identifiés, vient l'étape de la quantification. Pour ce faire, comme expliqué dans la partie II.4.3 (page 124), nous avons décomposé et pesé tous les pièces et composants de chaque appareil. Nous avons également évalué les surfaces des pièces revêtues ou peintes. Ci-après seront présentés les résultats de ces pesées pour tous les appareils étudiés. Le détail de l'inventaire et des masses est disponible ici : <https://doi.org/10.48531/JBRU.CALMIP/GJHIII>.

III.3.2.1. Les cuiseurs solaires

Au total, la parabole SK-14 de E.G. Solar pèse 14 kg. Dans cette masse totale, 11 kg viennent de la structure (avec le porte casserole), 2,7 kg des réflecteurs et 0,3 kg de la visserie. Dans le cas où la structure est composée de bois, sa masse est beaucoup plus importante : 25,75 kg. Le bois représente 19,86 kg, les réflecteurs toujours 2,7 kg, et le porte casserole 2,75 kg. Enfin, la visserie représente 0,41 g en raison des vis supplémentaires nécessaires pour le maintien des réflecteurs. Dans les deux cas, nous avons été en mesure de considérer toutes les pièces des concentrateurs.

Au niveau du transport, l'aluminium provient soit de Chine soit du Canada. Dans le premier cas la distance entre les ports de Shanghai en Chine et celui de Rotterdam aux Pays-Bas a été utilisée (19175 km) et dans le deuxième celle entre les ports de Vancouver au Canada et celui

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

de Rotterdam (16557 km). Ensuite, deux voies routières différentes sont prises par les tôles et les barres. Les tôles sont envoyées à Ennepetal en Allemagne depuis Rotterdam pour être revêtues (294 km), ensuite de Ennepetal à Pocking en Allemagne pour être découpées (650 km) et finalement à Altötting en Allemagne, le site d'emballage de la parabole (58 km). Les barres, quant à elles, sont envoyées de Rotterdam à Braunau en Autriche (965 km) puis à Neuötting en Allemagne (28,5 km) et finalement à Altötting (2,4 km). Les vis sont produites à Sarrebrück en Allemagne et envoyées directement à Altötting (521 km). Une fois que tout est réuni à Altötting, la parabole est emballée et, pour notre étude, envoyée à Toulouse en France (1372 km).

Les masses correspondant à chaque partie ou composant présentées précédemment sont listées dans le Tableau III-10 ainsi que les masses de traitement de fin de vie. A noter que toutes les masses présentes ici ne représentent qu'un seul concentrateur à chaque fois, mise à part celles de la fin de vie qui considèrent déjà l'ensemble des exemplaires sur les 40 ans de l'unité fonctionnelle. Les valeurs pour le transport correspondent au trajet total pour chaque partie (structure, support de la casserole et collecteur) sans le remplacement sauf indications contraires.

Tableau III-10 : Récapitulatif des masses, distances et surfaces utilisées pour la construction du modèle des cuiseurs solaires.

	Partie	Quantité	Unité	Valeur	Commentaire
Cuiseur en aluminium	Structure	1	kg	11	Avec le support de la casserole
	Collecteur	4	kg	2,7	Aire d'ouverture : 1.57 m ²
	Visserie		kg	0,3	
	Fin de vie	1	kg	4,58	
		1	kg	17,22	Aluminium recyclé
		1	kg	0,25	Acier recyclé
1		kg	0,05		
Cuiseur en bois	Structure	4	kg	19,86	Volume total de bois : 72140.2 cm ³
	Collecteur	4	kg	2,7	
	Support casserole	1	kg	2,75	
	Visserie		kg	0,41	
	Fin de vie	4	kg	19,86	Bois
		1	kg	2,85	
		1	kg	10,7	Aluminium recyclé
		1	kg	0,37	Acier recyclé
1		kg	0,07		
Transport	Maritime	1	kgkm	210924	Structure : Shanghai-Rotterdam
		1	kgkm	182126	Structure : Vancouver-Rotterdam
		4	kgkm	51772	Réflecteur : Shanghai-Rotterdam
		4	kgkm	44704	Réflecteur : Vancouver-Rotterdam
		1	kgkm	52731	Support casserole : Shanghai-Rotterdam
		1	kgkm	45532	Support casserole : Vancouver-Rotterdam

Routier	1	kgkm	10955	Structure aluminium : Rotterdam-Altötting
	4	kgkm	2705	Réflecteur : Rotterdam-Altötting
	1	kgkm	2739	Support casserole : Rotterdam-Altötting
	1	kgkm	156	Visserie pour structure Aluminium jusqu'à Altötting
	1	kgkm	211	Visserie pour structure en bois jusqu'à Altötting
	1	kgkm	30321	Parabole en aluminium avec 4 jeux de réflecteurs : Altötting-Toulouse
	1	kgkm	18591	4 jeux de réflecteurs et un support de casserole : Altötting-Toulouse

III.3.2.2. La plaque à induction

La plaque à induction pèse au total 2,07 kg. Au niveau de la répartition des masses, le carter représente 61,9% de cette masse avec 1,28 kg ; l'assemblage de la bobine 16,0% (330 g) ; la carte électronique 12,0% (249 g) ; l'alimentation 9,5 % (196 g) et les vis 0,6% (13 g). Pour cet appareil plusieurs composants (polymères indéterminés et petites pièces métalliques) ont été négligés en raison de l'absence d'équivalence ou de difficultés à les identifier ; au total la masse des éléments négligés représente 6 g soit 0,3 % de la masse totale.

Au sein du carter, la plaque vitrocéramique pèse 971 g, suivie par le carter inférieur (238 g) puis la fixation de la plaque (73 g). Pour l'assemblage de la bobine ce sont les ferrites de conduites de champs qui représentent la plus grosse partie de la masse (128,4 g - 38,9%) suivies de près par le bobinage de cuivre (112,02 - 33,9%). Sur la carte électronique, le dissipateur de chaleur en aluminium domine avec 58,27 g représentant 23% de la masse de la carte, suivi de près par le circuit imprimé avec 52,69 g ainsi que les capacités de type film pour 52,05 g. Pour l'alimentation, le câble avec la prise domine la participation avec 121,94 g ce qui représente 62,2%, suivi de loin par le ventilateur avec 42,26 g ce qui représente 21,6%.

Globalement, c'est la plaque vitrocéramique qui contribue le plus à la masse de l'appareil avec 46,9% de la masse totale à elle seule.

En termes de consommation d'énergie nécessaire pour remplir sa fonction sur la durée de l'unité fonctionnelle, elle représente 8935 kWh. Pour rappel, avec un rendement de 74% environ, la plaque à induction a le meilleur rendement parmi les appareils conventionnels étudiés.

Pour le trajet, nous avons considéré un transport de Shanghai en Chine jusqu'à Rotterdam aux Pays-Bas par voie navale (19175 km), ensuite de Rotterdam à Toulouse en France par voie routière (1142 km).

Les masses correspondant à chaque partie ou composant présentés précédemment sont listées dans le Tableau III-11 ainsi que les masses de traitement de fin de vie. A noter que toutes les masses présentes ici ne représentent qu'une seule plaque à induction à chaque fois. Elles sont donc à multiplier par quatre pour avoir les masses totales sur le cycle de vie, mises à part

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

celles de la fin de vie qui considèrent déjà les 4 exemplaires pour faciliter les calculs en raison du regroupement par matériaux. Les valeurs pour le transport correspondent au trajet total pour chaque partie sans le remplacement.

Tableau III-11 : Récapitulatif des masses, distances et surfaces utilisées pour la construction du modèle de la plaque à induction.

Partie	Composant	Quantité	Unité	Valeur	Commentaire
Carter	Carter inferieur	1	g	237,85	
	Fixation plaque vitrocéramique	1	g	73,24	
	Plaque vitrocéramique	1	g	971,34	
Assemblage de la bobine	Bobine	1	g	112,02	
	Support de la bobine	1	g	62,04	
	Barre de conduite de champ	18	g	128,39	
	Isolent magnétique	1	g	23,69	
	Protection résistance	1	g	4,1	
	Résistance	1	g	0,08	
Carte électronique	Capacité électrolytique	9	g	5,05	
	Capacité de type film	4	g	52,05	
	Capacité montée en surface	12	g	0,12	
	Circuit imprimé	1	cm ²	209,46	Montage à travers, 51 g
		1	cm ²	0,29	Montage en surface, 1,69 g
	Affichage	1	g	3,9	
	DEL	4	g	0,94	
	Résistance	8	g	1,71	
	Resistance montée en surface	24	g	0,16	
	Résistance variable	4	g	0,32	
	Mémoire CI	3	g	2,89	
	Transformateur	1	g	2,80	
	Inductance	1	g	49,36	
	Transistor	2	g	0,32	Petit
		1	g	6,12	Grand
	Transistor monté en surface	3	g	0,03	
	Diode	24	g	7,02	Comprend un pont redresseur de tension
	Diode montée en surface	2	g	0,03	
	Dissipateur de chaleur	1	g	58,27	
	Ressors	12	g	5,52	
Câblage	Alimentation	1	cm	115,5	121,94 g
	Prise électrique	1	unité	1	
	Ventilateur	1	unité	1	42.26 g

	Filtre	1	g	28,4	
	Fil	3	g	1,62	Isolant
		3	g	1,41	Conducteur
Visserie	Vis	18	g	13,1	Total
Energie	Electricité	1	kWh	8935	Sur 40 ans
Transport	Maritime	1	kgkm	39773	Shanghai à Rotterdam
	Routier	1	kgkm	2369	Rotterdam à Toulouse
End of life	Acier recyclé		g	61,8	Recyclé
			g	12,65	
	Plastiques et polymères		g	373,13	Recyclé [173]
			g	1119,39	
	Caoutchouc		g	16,4	
	Composants électroniques		g	700,70	
	Circuit imprimé		g	210,76	
	Fil et câblage		g	499,76	
	Cuivre		g	448,08	
	Aluminium		g	258,99	Recyclé [169]
			g	68,85	
	Verre		g	3885,36	

III.3.2.3. Plaque électrique

Au total, la plaque électrique pèse 2,33 kg dont notamment la plaque chauffante qui représente 63,9% avec 1,49 kg. Ensuite, vient le carter qui représente 680 g soit 29,2%, puis le câblage avec 129 g soit 5,5% et finalement les vis qui pèsent 28 g soit 1,2%. Pour cet appareil, 4,8 g (soit 0,21%) ont été négligés : essentiellement des polymères difficilement identifiables.

L'assemblage du carter est principalement composé des deux parties du carter lui-même qui représente 419,6 g soit 61,7% de la masse, suivi par le relai avec 220,2 g soit 32,4%. Pour la plaque chauffante, c'est logiquement la plaque en fonte qui pèse le plus avec 861,2 g soit 57,8% de la masse de la plaque chauffante. Ensuite vient le ciment réfractaire qui pèse 254 g soit 17%. Pour le câblage, comme pour la plaque à induction, c'est le câble et la prise électrique qui représentent en très grande partie la masse de ce groupe avec 112,16 g pour les deux soit 86,9%. Globalement, c'est la plaque en fonte qui représente la plus grosse partie de la masse de cet appareil, représentant 37% à elle seule suivie par les carters supérieurs et inférieurs représentant 18%.

La consommation d'énergie de la plaque électrique sur l'unité de fonctionnelle est de 10468 kWh, pour le thermostat avec le meilleur rendement d'environ 63%.

Similairement à la plaque à induction, nous avons considéré un transport de Shanghai en Chine jusqu'à Rotterdam aux Pays-Bas par voie navale (19175 km), ensuite de Rotterdam à Toulouse en France par voie routière (1142 km).

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Les masses correspondant à chaque composant de la plaque électrique ainsi que les surfaces nécessaires à la modélisation sont listées ci-dessous. Dans le tableau, les masses ne correspondent qu'à un seul exemplaire de la plaque électrique sauf pour celles de la fin de vie qui considèrent déjà les 4 exemplaires, donc il est nécessaire de les multiplier par quatre pour avoir les masses sur la durée de l'unité fonctionnelle. Il en est de même avec les transports.

Tableau III-12 : Récapitulatif des masses, distances et surfaces utilisées pour la construction du modèle de la plaque électrique.

Partie	Composant	Quantité	Unité	Valeur	Commentaire
Carter	Carter	1	g	419,59	Surface : 3605,6 cm ²
	Thermostat	1	g	9,4	
	Relai	1	g	220,22	
	Boitier des fils	1	g	20,16	
	Pied	3	g	10,8	
Plaque chauffante	Plaque	1	g	861,21	
	Résistance chauffante	1	g	90,34	Partie extérieure
		1	g	52,84	Matériaux réfractaire
		1	g	27,27	Partie intérieure
	Ciment réfractaire	1	g	253,99	
	Isolation	1	g	40,72	
	Carter de l'isolation	1	g	62,13	Surface : 478,2 cm ²
	Carter général	1	g	100,75	Surface : 753,2 cm ²
Câblage	Câble d'alimentation	1	cm	255	63,6 g
	Prise électrique	1	unité	1	48,56 g
	DEL	1	g	0,29	
	Résistance	1	g	0,08	
	Câble	3	g	5,65	Isolation
		3	g	6,92	Conducteur
3		g	3,46	Protection	
Visserie	Vis et écrous	11	g	28,37	Total
Transport	Maritime	1	kgkm	44625	Shanghai à Rotterdam
	Routier	1	kgkm	2658	Rotterdam à Toulouse
Fin de vie	Acier		g	5277,68	Recyclé
			g	1080,97	
	Polymères et plastiques		g	40,36	Recyclé [173]
			g	121,08	
	Composants électroniques		g	881,49	
	Réfractaires		g	1227,35	
	Laine de verre		g	162,88	
Câble et fil		g	502,37		

III.3.2.4. Brûleur à gaz

Le brûleur à gaz quant à lui pèse au total 1,93 kg répartis entre le carter (en comptant ses vis) : 818 g ; l'assemblage du brûleur : 1,1 kg ; l'assemblage d'allumage : 15,5 g. Du point de vue de la répartition, ces chiffres représentent 42,3% pour le carter et la visserie, 56,9% pour l'assemblage du brûleur et 0,8% pour l'assemblage de l'allumage. La masse négligée ici est de 7,8 g et correspond à des polymères et des métaux difficilement identifiables ; cela ne représente que 0,4% de la masse analysée.

Les parois et la partie supérieure du carter sont les plus lourdes dans l'assemblage du carter avec une masse de 486,7 g soit 59,5%, suivies par le support de la casserole avec 193,4 g soit 23,6%. Pour l'assemblage du brûleur, c'est le tube souple qui domine avec 480 g soit 43,6% de la masse de l'assemblage, suivi de très proche par le brûleur avec 443,1 g soit 40,3%. Enfin pour l'assemblage de l'allumage c'est le marteau qui est le plus lourd avec 5,54 g soit 35,7% de la masse, suivi de près par les céramiques piézoélectriques avec 5,03 g soit 32,4%.

L'énergie utilisée ici représente 12832 kWh pour le meilleur rendement du brûleur, environ 52%. Cette quantité représente 1131,6 m³ de gaz naturel.

Au niveau du trajet effectué par cet appareil, il est le même que celui des deux précédents à savoir un trajet de Shanghai en Chine vers Rotterdam aux Pays-Bas par voie navale (19175 km) et, par voie routière, de Rotterdam à Toulouse en France (1142 km).

L'ensemble des masses, surfaces, longueurs et quantités de chaque pièce et composant nécessaire à la modélisation du brûleur est listé dans le Tableau III-13. Les masses présentées comptent pour un seul exemplaire du brûleur, il est donc nécessaire de les multiplier par deux pour compléter l'unité fonctionnelle. De plus, le tube souple doit être multiplié par quatre. Cependant, les chiffres de la fin de vie comprennent les quatre exemplaires du cuiseur.

Tableau III-13 : Récapitulatif des masses, distances et surfaces utilisées pour la construction du modèle du brûleur à gaz.

Partie	Composant	Quantité	Unité	Valeur	Commentaire
Carter	Paroi et partie supérieure	4	g	486.69	Surface : 3843,27 cm ²
	Renforts et support du brûleur	5	g	80.37	Surface : 516,64 cm ²
	Pied et potentiomètre de réglage	5	g	23.6	
	Support de la casserole	1	g	193.4	Surface : 755,15 cm ²
	Visserie	52	g	34.34	
Assemblage du brûleur	Accouplement des tubes	1	g	22.23	Surface : 19,41 cm ²
	Tube rigide	1	g	60.91	Surface : 159,04 cm ²
	Pièce de réglage du gaz	1	g	12.12	Surface : 4,96 cm ²
	Rondelle percée	2	g	1.94	Surface : 5,12 cm ²
	Rondelle de réglage de l'air	2	g	12.55	Surface : 40,66 cm ²
	Protection de l'allumage	1	g	5.43	Surface : 20 cm ²
	Support de l'allumage	1	g	7.09	Surface : 29,89 cm ²
	Ressors	4	g	1.93	
Joint	2	g	0.32		

	Carter en aluminium	2	g	31.13	
	Pièce de distribution du gaz	2	g	11.69	
	Brûleur	1	g	443.1	Surface : 284,87 cm ²
	Tube souple	2	g	480	
	Goupille	1	g	0.72	
Assemblage d'allumage	Pointe	1	g	0.37	
	Céramique	2	g	5.03	
	Cable	1	g	2.21	
	Carter de la pointe	2	g	1.15	
	Carter des céramique	1	g	0.99	
	Marteau	1	g	5.54	
	Maintien de l'assemblage	1	g	0.23	
Energie	Gaz naturel	1	m ³	1131,6	
Transport	Naval	1	kgkm	46117	Shanghai à Rotterdam
	Routier	1	kgkm	2747	Rotterdam à Toulouse
Fin de vie	Acier		g	2274.37	Recyclé
			g	477.52	
	Plastiques et polymères		g	492.46	Recyclé [173]
			g	1477.37	
	Aluminium		g	49.19	Recyclé [169]
			g	13.07	
	Déchets inertes		g	33.44	
	Cable et fil		g	4.42	

III.4. Impacts environnementaux

Les appareils étudiés ont été présentés et détaillés dans l'inventaire, les équivalences ecoinvent ont été données et finalement, nous avons aussi détaillé la méthode de calcul utilisée et les indicateurs. Toutes ces informations permettent de réaliser les modèles et de calculer les impacts environnementaux. Dans cette partie nous allons présenter et discuter tous les impacts environnementaux *mid-point* et *end-point* des appareils conventionnels, puis ceux des cuiseurs solaires et, enfin, les comparer entre eux.

III.4.1. Méthodes conventionnelles

L'ensemble des résultats *mid-point* des appareils conventionnels sans traitement de fin de vie sont présentés en Annexe Tableau A-1 et ceux *end-point* Tableau A-3. Les répartitions entre la phase de construction et d'utilisation sont données en Annexe Tableau A-2 pour les *mid-point* et Tableau A-4 pour les *end-point*. Les impacts avec les limites *cradle-to-grave* sont en Annexe Tableau A-5 pour les *mid-point* et Tableau A-6 pour les *end-point*. Les prochaines parties auront pour but de détailler les impacts de chaque appareil conventionnel.

III.4.1.1. La plaque à induction

Ici seront détaillés les impacts environnementaux de la plaque à induction. D’abord les impacts *end-point* seront présentés puis ceux *mid-point* ; et dans les deux cas les contributions seront présentées. Il est important de noter que, dans cette partie, les limites *cradle-to-use* sont utilisées, c’est-à-dire que le traitement de fin de vie des appareils n’est pas pris en compte.

End-point :

La Figure III-12 présente les dommages *end-point* de la plaque à induction décomposés par phase du cycle de vie et regroupés par zones de protection : perte de ressources (RD), santé humaine (HH) et la qualité de l’écosystème (EQ). A première vue, il est possible de remarquer que, dans chaque catégorie, un impact domine. Pour la zone RD, c’est l’appauvrissement des ressources fossiles avec 30,48 points, pour la zone HH c’est le changement climatique avec 23,5 points, et pour la zone EQ, le changement climatique est également le dommage le plus important avec 14,82 points. Ces résultats montrent clairement que l’appauvrissement en ressources fossiles et le réchauffement climatique créent le plus de dommage sur les zones de protections. En effet, le réchauffement climatique représente 78% du dommage global sur la zone de qualité de l’écosystème (EQ) et il représente également 52,5% du dommage global sur la santé humaine (HH). L’appauvrissement des ressources fossiles représente quant à lui 62,5% du dommage sur l’appauvrissement des ressources. Globalement, le dommage total de la plaque à induction est de 112,4 points.

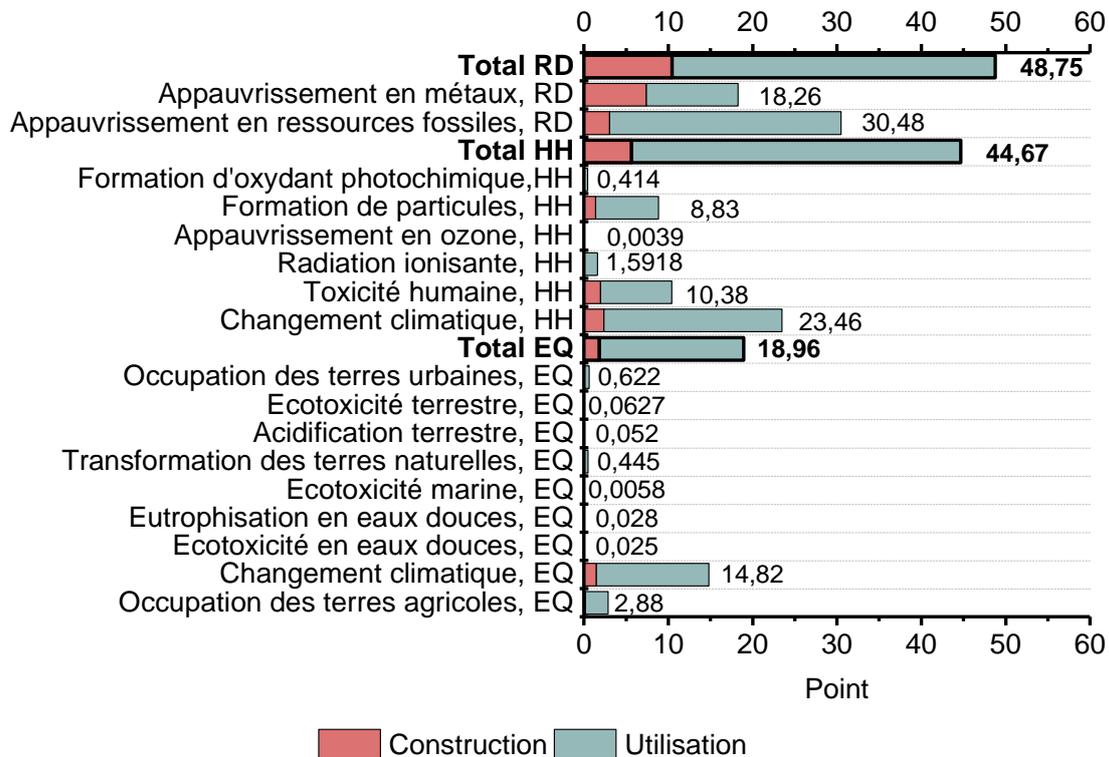


Figure III-12 : Dommages environnementaux ReCiPe end-point de la plaque à induction décomposés en une phase de construction (rouge) et une phase d’utilisation (vert). Les indicateurs sont regroupés par zone de protection : RD - Appauvrissement en ressources, HH - Santé humaine, EQ - Qualité de l’écosystème. Les valeurs correspondent aux totaux de chaque indicateur.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Lorsque l'on s'attarde sur la répartition entre les deux phases du cycle de vie, il est possible de remarquer une nette domination de la phase d'utilisation. Pour les dommages présentés précédemment, la phase d'utilisation vaut 27,5 points sur les 30,5 points pour l'appauvrissement en ressources fossiles (RD) ; 21,1 points sur les 23,5 points pour le changement climatique (HH) et 13,3 points sur les 14,8 points pour le changement climatique (EQ). Au niveau des totaux, la phase d'utilisation représente 90,5% du total de la zone de qualité de l'écosystème, 87,3% de la zone de santé humaine et 78,6% de la zone de perte des ressources. Ainsi, pour le dommage total, la phase d'utilisation représente 84%.

Mid-point :

De manière générale, pour la plaque à induction, la phase d'utilisation représente le principal facteur contribuant dans tous les facteurs d'impact, à l'exception de l'appauvrissement en métaux où la phase de construction domine.

L'ensemble des impacts ReCiPe *mid-point* est présenté Figure A-1 en Annexe. L'impact sur le changement climatique monte à 847 kgCO_{2eq} et celui de l'appauvrissement en ressources fossiles à 254 kgPetrole_{eq}. La Figure III-13 développe l'analyse de contribution de ces deux indicateurs ainsi que le détail de la contribution des procédés de la construction de l'appareil.

Dans un premier temps, il est possible de remarquer que, dans les deux cas, la phase d'utilisation représente à nouveau 90% de l'impact. Pour le réchauffement climatique cela correspond à 762 kgCO_{2eq} et pour l'appauvrissement en ressources fossiles cela correspond à 229 kgPetrole_{eq}. Cela montre l'impact de l'électricité utilisée et du rendement de l'appareil. Dans un second temps, la figure montre que la tendance de contribution de chaque procédé est similaire pour l'indicateur sur le changement climatique et celui sur l'appauvrissement en ressources fossiles.

En effet, le détail de la phase de construction montre que c'est la production d'électricité en Chine nécessaire pour différents procédés qui contribue le plus, à hauteur de 24% pour le changement climatique et 19% pour l'appauvrissement en ressources fossiles ce qui donne une indication sur l'impact écologique du mix électrique où l'appareil est construit. Ensuite, la production de condensateur de type film et de l'inductance contribuant respectivement autour de 10-12% dans chaque indicateur. Il est possible de remarquer une différence pour la quatrième contribution. Dans le cas du changement climatique, c'est le procédé de production d'aluminium pour le dissipateur de chaleur qui contribue le plus alors que dans le cas de l'appauvrissement en ressources fossiles, c'est le procédé de production de polypropylène. Cette différence provient du fait que les polymères sont produits à partir d'hydrocarbures, donc influent fortement sur l'appauvrissement des ressources fossiles.

Plusieurs choses peuvent être conclues de ces observations. D'abord, l'utilisation de l'appareil est responsable en très grande partie de ces impacts alors que le mix électrique français est faiblement carboné (52 gCO_{2eq}/kWh en 2022) et que le rendement de la plaque à induction est relativement bon (74,02%). Ensuite, le lieu de production de l'appareil a un fort impact sur la phase de construction puisque l'électricité produite en Chine est utilisée dans la quasi-totalité des procédés et est fortement carbonée (766 gCO_{2eq}/kWh). Cependant, lorsque ces impacts sont observés dans les limites *cradle-to-use*, leur influence diminue nettement : 2,7% pour l'impact sur le réchauffement climatique et 2% pour l'impact sur l'appauvrissement en ressources fossiles.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Pour les composants électroniques, on peut voir que les masses des composants sont directement liées à leurs impacts. En effet, les trois premiers composants représentés sont les condensateurs de type film, l'inductance et le dissipateur de chaleur qui sont tous les trois proches de 50 g et sont les plus lourds de la plaque.

Enfin, le transport de l'appareil jusqu'à l'utilisateur ne représente qu'une faible partie de l'impact de la construction avec seulement 3,6% de l'impact sur le réchauffement climatique soit 3,1 kgCO₂eq et 4,2% de l'impact sur l'appauvrissement des ressources fossiles soit, au total, 1,1 kgPétrole_{eq}. Sur l'impact global le transport représente 0,46% de l'impact sur l'appauvrissement en ressources fossiles et 0,40% de celui sur le réchauffement climatique.

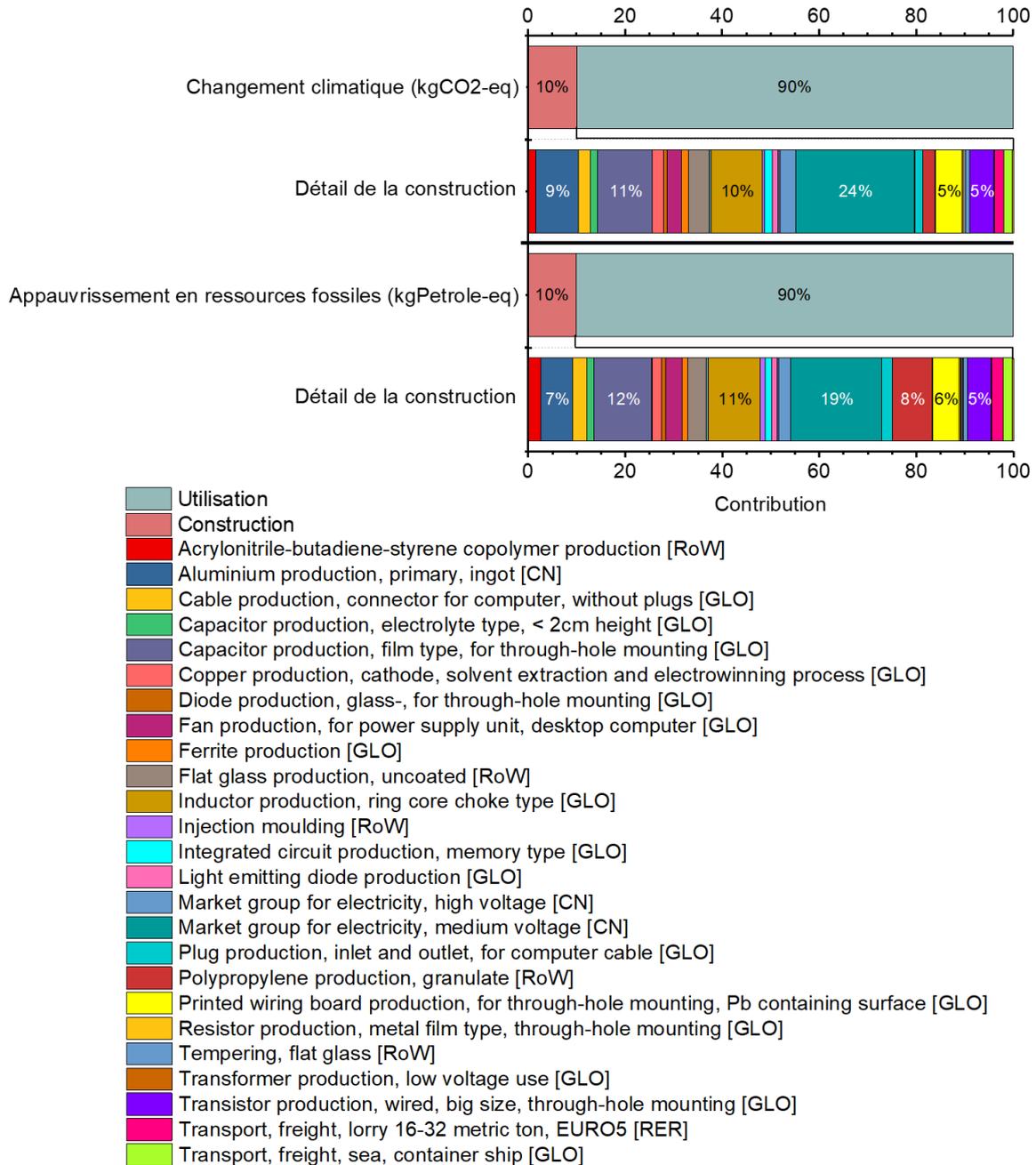


Figure III-13 : Analyse de contribution pour les indicateurs ReCiPe mid-point du changement climatique et de l'appauvrissement en ressources fossiles et détails de la contribution des procédés de

la phase de construction (équivalences ecoinvent). Les valeurs des contributions supérieures ou égales à 5% sont données.

III.4.1.2. La plaque électrique

Dans cette partie, les impacts environnementaux de la plaque électrique seront présentés en détails avec dans l'ordre les impacts *end-point* puis les impacts *mid-point*.

End-point :

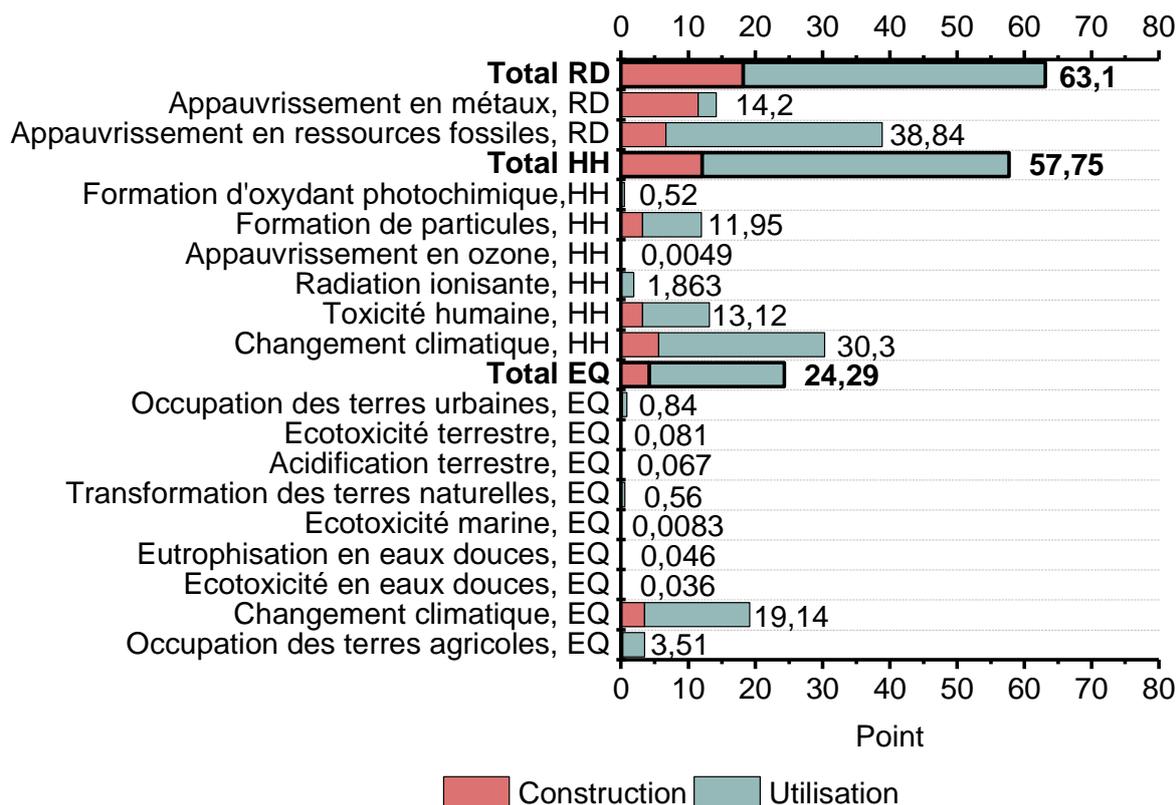


Figure III-14 : Dommages environnementaux ReCiPe end-point de la plaque électrique décomposés en une phase de construction (rouge) et en une phase d'utilisation (vert). Les indicateurs sont regroupés par zone de protection : RD - Appauvrissement en ressources, HH - Santé humaine, EQ - Qualité de l'écosystème. Les valeurs correspondent aux totaux de chaque indicateur.

Comme pour la plaque à induction, certains dommages dominent chaque zone de protection comme le montre la Figure III-14. Premièrement, dans la zone de perte des ressources (RD) c'est le dommage sur l'appauvrissement des ressources fossiles qui domine avec 38,8 points suivi par l'appauvrissement en métaux avec 14,2 points. Deuxièmement, c'est l'impact sur le changement climatique qui domine majoritairement avec 30,3 points suivi par la toxicité humaine avec 13,1 points pour la zone de protection de la santé humaine (HH). Finalement, pour la zone de protection de qualité de l'écosystème (EQ), c'est aussi le dommage sur le changement climatique qui domine avec 19 points loin devant les dommages de l'occupation des terres agricoles.

De la même manière que pour la plaque à induction, c'est le dommage sur le réchauffement climatique et celui sur l'appauvrissement en ressources fossiles qui contribuent

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

le plus aux dommages sur les zones de protection. Globalement, le dommage total de la plaque électrique est de 145,1 points. Cette valeur est composée à hauteur de 34,1% par le dommage sur le changement climatique (HH et EQ) et à hauteur de 26,8% par le dommage sur l'appauvrissement en ressources fossiles.

Lorsque l'attention est portée sur les contributions des grandes phases du cycle on constate que c'est la phase d'utilisation qui représente la plus grande partie avec en moyenne 76%. Cela reste néanmoins nettement plus faible que pour la plaque à induction. Plus précisément, pour les dommages dominants, la phase d'utilisation représente 82,8% du dommage sur l'appauvrissement en ressources fossiles et 82% du dommage sur le réchauffement climatique aussi bien pour la zone de la qualité de l'écosystème que pour la zone de santé humaine.

Mid-point :

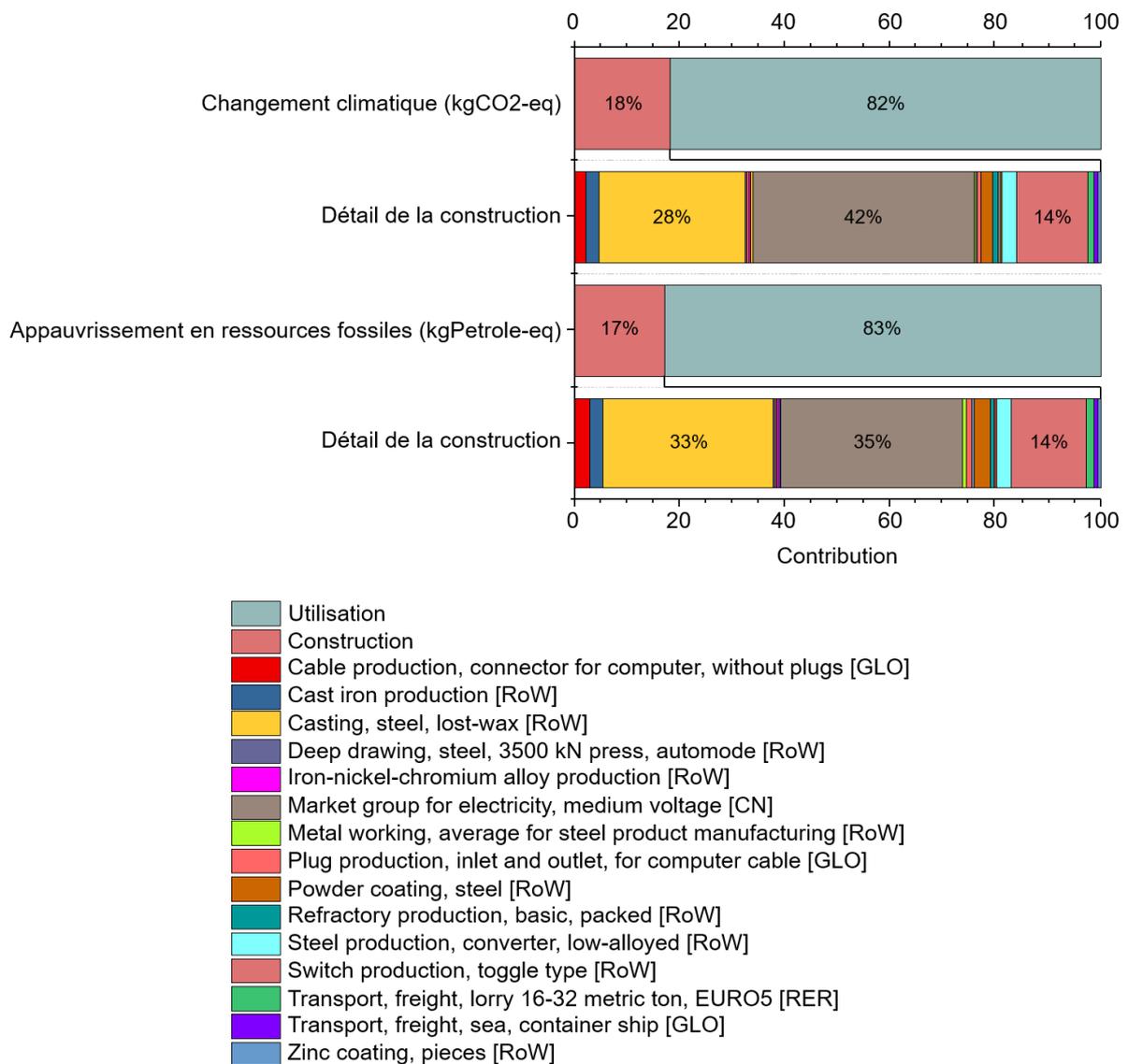


Figure III-15 : Analyse de contribution des procédés pour les impacts ReCiPe mid-point sur le changement climatique et l'appauvrissement en ressources fossiles et détail de la contribution des procédés pour la phase de construction de la plaque électrique.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

De manière général, lorsque les indicateurs *mid-point* sont étudiés, c'est la phase d'utilisation qui contribue le plus aux impacts et ce pour tous les indicateurs.

Au même titre que pour la plaque à induction, la Figure III-15 présente la contribution de la phase de construction et d'utilisation de la plaque électrique pour les impacts ReCiPe *mid-point* des deux dommages principaux : le changement climatique et l'appauvrissement en ressources fossiles. De plus, cette figure donne le détail des contributions de chacun des procédés pour la phase de construction de la plaque électrique. L'impact sur le réchauffement climatique représente 1093 kgCO_{2eq} au total et celui sur l'appauvrissement en ressources fossiles vaut 324 kgPetrole_{eq}, l'ensemble des valeurs des impacts *mid-point* est présenté Figure A-2 en annexe.

De prime abord, on peut remarquer une tendance similaire à celle de la plaque à induction entre la phase de construction et la phase d'utilisation. En effet, la phase de construction correspond à 18% et 17% de l'impact sur le changement climatique (201 kgCO_{2eq}) et l'appauvrissement en ressources fossiles respectivement (56 kgPetrole_{eq}).

La tendance de répartition de la contribution entre les indicateurs est similaire à la plaque à induction, c'est-à-dire que la répartition des impacts est similaire entre l'indicateur sur le changement climatique et celui sur les ressources fossiles. Cependant, contrairement à la plaque à induction, la contribution des procédés dans la phase de construction n'est pas répartie mais elle est plutôt dominée par trois procédés. En effet, la production d'électricité en Chine représente 42% de l'impact de la phase de construction soit 84 kgCO_{2eq}. Dans le cas de l'appauvrissement en ressources fossiles, la production d'électricité en Chine représente 35% de l'impact de la phase de construction soit 19 kgPetrole_{eq}. Le deuxième procédé qui contribue le plus à l'impact de la construction est la mise en forme de la plaque en fonte par moulage. Cet impact représente 28% dans le cas du réchauffement climatique et 32% dans le cas de l'appauvrissement en ressources fossiles soit 56 kgCO_{2eq} et 18 kgPetrole_{eq} respectivement. Enfin, le dernier procédé qui contribue majoritairement est celui de la production du relai permettant le réglage de la puissance : il représente 14% dans les deux indicateurs soit 27 kgCO_{2eq} et 8 kgPetrole_{eq}. Ensuite, les procédés contribuent de manière bien plus faible.

Tout comme pour la plaque à induction, c'est la phase d'utilisation qui crée le plus d'impact sur le changement climatique avec 922 kgCO_{2eq} soit 135 kgCO_{2eq} de plus que la phase d'utilisation de la plaque à induction. Cette différence provient du rendement de la plaque électrique qui vaut 63,2% donc 11% plus faible que celui de la plaque à induction. Ensuite, encore une fois, le lieu de production de l'appareil prend une grande place dans l'impact de la phase de construction. Ici cela est observable via l'impact de la production d'électricité en Chine. Cependant, lorsque les limites *cradle-to-use* sont utilisées, l'influence de cette phase sur l'impact global n'est que de 7,7%, non négligeables mais à relativiser vis-à-vis de l'utilisation.

Les impacts du transport pour cette plaque sont relativement faibles : l'ensemble du transport ne représente que 3,42 kgCO_{2eq} et 1,2 kgPetrole_{eq} soit 0,3% de l'impact sur le réchauffement climatique et 0,4% de l'impact sur l'appauvrissement en ressources fossiles. En termes d'*end-point*, le transport vaut 0,04 et 0,1 points pour le changement climatique dans la zone de protection EQ et HH respectivement, et 0,09 points sur l'appauvrissement en ressources fossiles pour la zone de protection RD. Globalement, les transports représentent 0,23 points sur les 145 points totaux donc 0,15%.

Pour conclure sur la plaque électrique, il apparaît clairement qu'une amélioration du rendement peut améliorer nettement son bilan d'impacts. Dans le même sens, produire la

plaque dans un pays avec un mix de production électrique impactant moins le changement climatique et l'appauvrissement en ressources fossiles serait globalement bénéfique. Bien que, l'utilisation de méthode de production d'électricité renouvelable les impacts écologiques font naître de nouveaux impacts écologiques sur les indicateurs comme l'occupation des terres agricoles et l'appauvrissement en métaux par exemple.

III.4.1.3. Le brûleur à gaz

De la même manière que pour les précédents appareils, les impacts *end-point* seront décomposés entre la phase de production et d'utilisation. Ensuite, les impacts *mid-point* correspondant aux dommages *end-point* les plus importants seront présentés et décomposés en détail.

End-point :

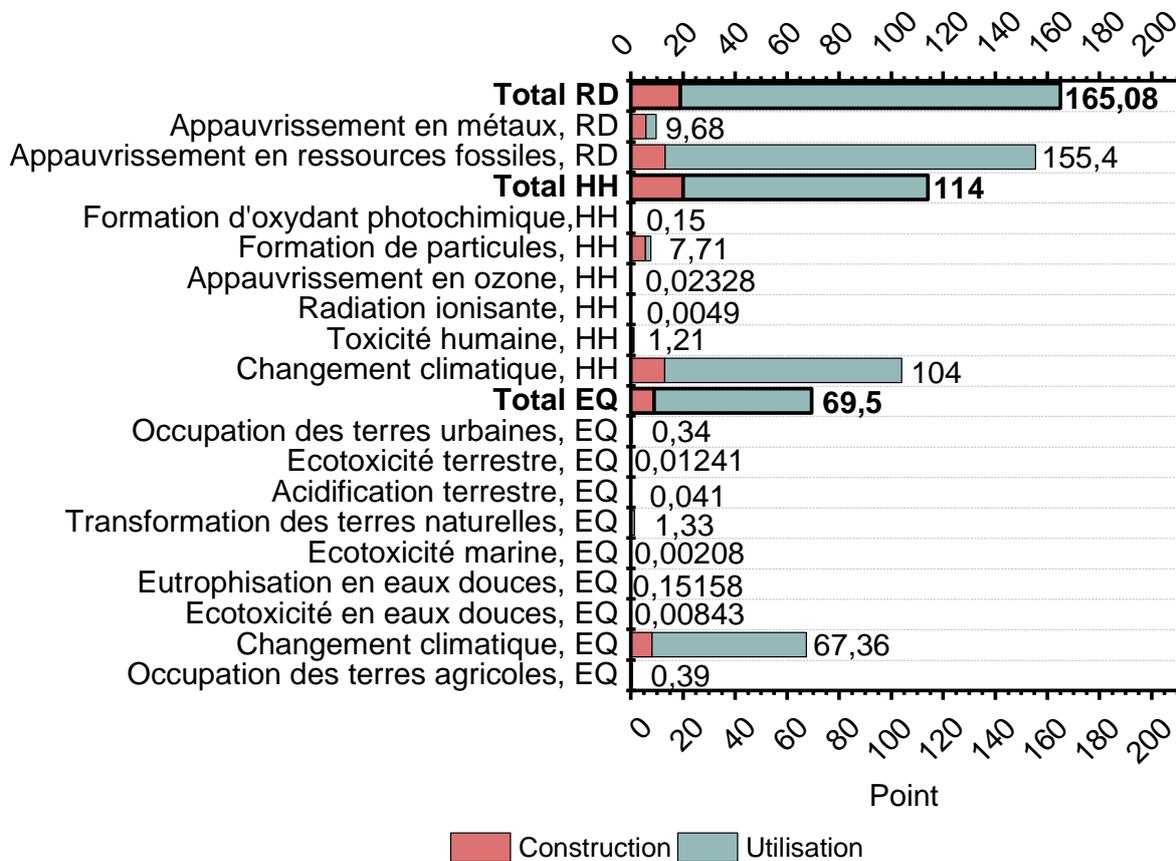


Figure III-16 : Dommages ReCiPe end-point du brûleur à gaz décomposés entre la phase de construction (rouge) et la phase de d'utilisation (vert). Les indicateurs sont regroupés par zone de protection : RD - Appauvrissement en ressources, HH - Santé humaine, EQ - Qualité de l'écosystème. Les valeurs correspondent aux totaux de chaque indicateur

Une fois de plus ce sont les dommages sur le réchauffement climatique et sur l'appauvrissement en ressources fossiles qui dominent comme le montre la Figure III-16. En détail, pour la zone d'appauvrissement des ressources (RD), le dommage de l'appauvrissement en ressources fossiles représente 94,1%. Pour la zone de la santé humaine, le changement climatique représente 93,9% et, pour la zone de la qualité de l'écosystème, il représente 97%. C'est pour cet appareil que les écarts sont les plus importants.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Contrairement à ce que la Figure III-16 laisse penser, lors que l'on regarde en détail la contribution dans chaque indicateur, en moyenne, la phase d'utilisation représente 49,8% des dommages. En observant la Figure III-16 et à la vue de ce pourcentage, il est possible de conclure qu'il y a de grands écarts de contribution entre les deux phases dans les indicateurs. En effet, pour le dommage sur la formation d'oxydants photochimiques, la phase d'utilisation ne représente que 6,7% du dommage total alors que pour l'appauvrissement en ressources fossiles, elle représente 91,5%. Plus précisément, la phase d'utilisation représente 88% et 87,5% du dommage sur le changement climatique pour les zones de protection EQ et la zone HH respectivement. Dans le cas de la dernière zone, RD, la phase d'utilisation représente 91,5% du dommage total.

Au niveau des totaux, la phase d'utilisation représente 88,5% du dommage sur la zone RD, 82,1% du dommage sur la zone HH et 87,3% pour la zone EQ. Au total, le dommage sur l'environnement du brûleur à gaz vaut 348,5 points.

Mid-point :

Ici, 13 des 18 indicateurs *mid-point* sont dominés par la phase de construction, les 5 impacts restants étant le changement climatique, la transformation des terres naturelles, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'appauvrissement en ressources fossiles et la formation d'oxydants photochimiques. Ils sont tous dus à utilisation du gaz naturel.

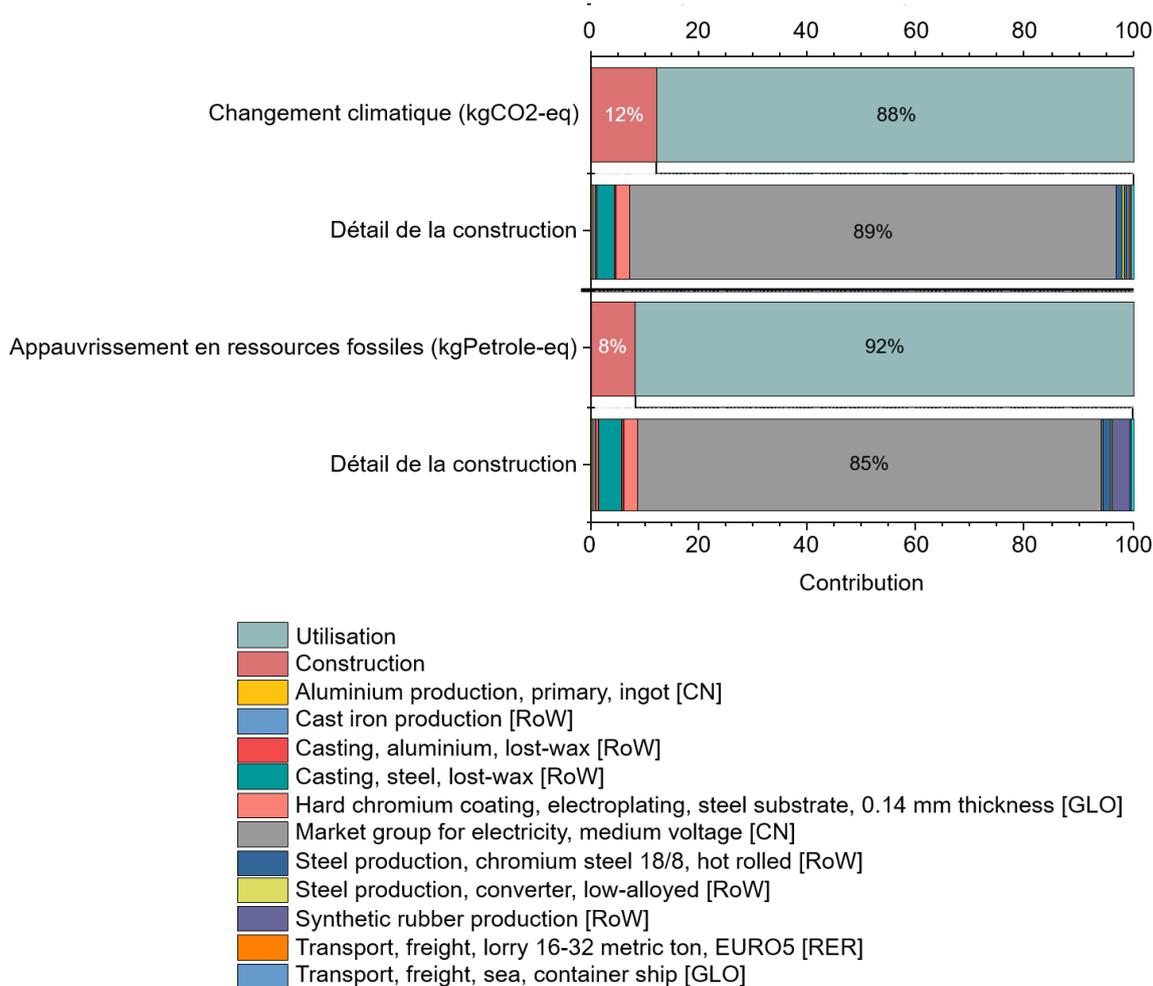


Figure III-17 : Analyse de contribution des procédés pour les impacts ReCiPe mid-point sur le changement climatique et l'appauvrissement en ressources fossiles et détail de la contribution des procédés pour la phase de construction du brûleur à gaz.

La Figure III-17 présente les résultats des impacts *mid-point* correspondant aux dommages dominants précédemment présentés : l'impact sur le réchauffement climatique et sur l'appauvrissement en ressources fossiles. Ces deux indicateurs valent respectivement 3740 kgCO_{2eq} et 1296 kgPetrole_{eq}. L'ensemble des impacts du brûleur sont présentés en annexe sur la Figure A-3. Comme pour les appareils précédents, la Figure III-17 présente la contribution de la phase de construction et de la phase d'utilisation. Le détail de la contribution des procédés de la phase de construction est également développé.

Premièrement, la phase d'utilisation représente la plus grosse contribution aux deux impacts. Pour le réchauffement climatique la phase d'utilisation représente 88% de l'impact, soit 3278 kgCO_{2eq}. Dans le cas de l'appauvrissement en ressources fossiles, elle représente 92% avec un impact de 1186 kgPetrole_{eq}. Il est important de noter que dans le cas de l'impact sur le réchauffement climatique, le fait de brûler le gaz représente 77% de l'impact avec 2862 kgCO_{2eq} émis à la combustion.

Pour ce qui est de la phase de construction, les contributions des impacts sont nettement moins distribuées que dans les deux appareils précédents. En effet, les impacts sur le réchauffement climatique et sur l'appauvrissement en ressources fossiles sont respectivement de 89% et 85% suite à la production d'électricité en Chine qui représente 412,5 kgCO_{2eq} et 94,4 kgPetrole_{eq}. L'utilisation d'électricité se fait en grande majorité lors de la dépose du chrome sur les parois du brûleur. Cependant, lorsque les limites *cradle-to-use* sont utilisées, la contribution de la production d'électricité ne représente plus que 11% pour le réchauffement climatique et 7% pour l'appauvrissement en ressources fossiles. Ensuite, pour le changement climatique, c'est la production du brûleur qui vient avec 15,2 kgCO_{2eq} soit environ 3,2% puis le procédé de revêtement des parois avec 12,6 kg CO_{2eq} soit 2,7%. Pour l'impact sur l'appauvrissement des ressources, l'ordre est similaire avec la production du brûleur à 4,95 kgPetrole_{eq} soit 4,5%, puis le procédé de revêtement des parois à 2,87 kgPetrole_{eq} soit 2,6% de l'impact.

Ici, il est possible de conclure que l'utilisation de gaz représente, à elle seule, la contribution majoritaire de cet appareil. L'optimisation du rendement du brûleur est donc un point clé pour limiter ses impacts. De plus lorsque l'appareil est utilisé en intérieur, les émissions peuvent entraîner des problèmes de santé sur les utilisateurs. Ensuite, comme pour les deux premiers appareils, le lieu de production a une grande importance puisque, comme présenté précédemment, l'utilisation d'électricité produite en Chine représente 85% et 88% des impacts. Donc un changement de lieu de production peut avoir une forte influence sur la part de l'impact dû à la production.

Pour le transport, la contribution du transport routier est de 0,3% sur l'impact de l'appauvrissement en ressources fossiles et de 0,2% sur le réchauffement climatique sur la phase de construction. Pour ce qui est du transport maritime, les contributions aux impacts sont similaires. Lorsque cet impact est comparé à celui *cradle-to-grave* il représente au total 0,2‰ de l'impact sur l'appauvrissement en ressources fossiles et 0,5‰ de l'impact sur le réchauffement climatique.

Pour conclure, pour améliorer le bilan du brûleur il est possible de changer le lieu de production afin d'avoir une électricité moins carbonée, mais cela ne concerne qu'environ 10% du total. L'optimisation de la combustion et notamment choisir de travailler au débit optimal

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

au détriment de la durée de chauffe aura une grande influence sur l'impact de la phase d'utilisation.

III.4.1.4. Comparaison des appareils conventionnels

Afin de comparer les appareils conventionnels facilement, les impacts *mid-point* ont été normalisés par rapport à la plus grande valeur de chaque indicateur ; la Figure III-18 présente cette normalisation.

D'abord, il est possible de remarquer que la plaque électrique et le brûleur à gaz se partagent les premières positions sur tous les indicateurs : la plaque électrique en domine 14 et le brûleur les quatre restants. Les quatre indicateurs qui sont dominés par le gaz sont le changement climatique, la transformation des terres naturelles, l'appauvrissement de la couche d'ozone et en ressources fossiles, tous en relation avec l'utilisation ou la production de gaz naturel donc la phase d'utilisation du produit. Pour les autres indicateurs, la différence avec les appareils électriques varie fortement d'un indicateur à l'autre.

Il est également possible de remarquer que la tendance des impacts de la plaque électrique est similaire à celle de la plaque à induction ; comme expliqué précédemment, la phase d'utilisation est la plus impactante pour les deux appareils électriques : c'est donc l'impact de l'électricité qui ressort.

D'un point de vue *end-point*, les totaux de chaque zone de protection sont tous dominés par le brûleur à gaz de même que le total général avec 389 points contre 145 pour la plaque électrique et 112 pour la plaque à induction. Ceci vient du fait que l'impact sur le réchauffement climatique est nettement plus élevé que pour les deux autres appareils, aussi bien dans la zone de qualité de l'écosystème (EQ) que dans celle sur la santé humaine (HH). En effet, le dommage sur le réchauffement climatique de la zone EQ vaut 67 points pour le brûleur contre 19 et 14 pour la plaque électrique et à induction respectivement. Pour la zone de la santé humaine l'impact vaut 103 points pour le brûleur à gaz contre 19 et 15 points pour la plaque électrique et à induction. Lorsque le reste des indicateurs *end-point* est analysé, c'est la plaque électrique qui domine le plus d'indicateurs : 6 sur les 8 de la zone EQ, 4 sur les 6 de la zone HH et le second de la zone RD. La plaque à induction, elle, ne domine aucun impact.

Lorsque le lien est fait entre les *mid-point* et les *end-point*, une tendance intéressante ressort. En effet, bien que la plaque électrique domine la quasi-totalité des indicateurs *mid-point*, la valeur de son dommage *end-point* agrégé n'est pas supérieur à celui du gaz. Cela implique que les catégories *mid-point* dominées par la plaque à induction (quart bas gauche de la Figure III-18) ne sont pas celle qui entraînent le plus dommage ou que la valeur de leur impact n'est pas assez importante pour entraîner de gros dommage.

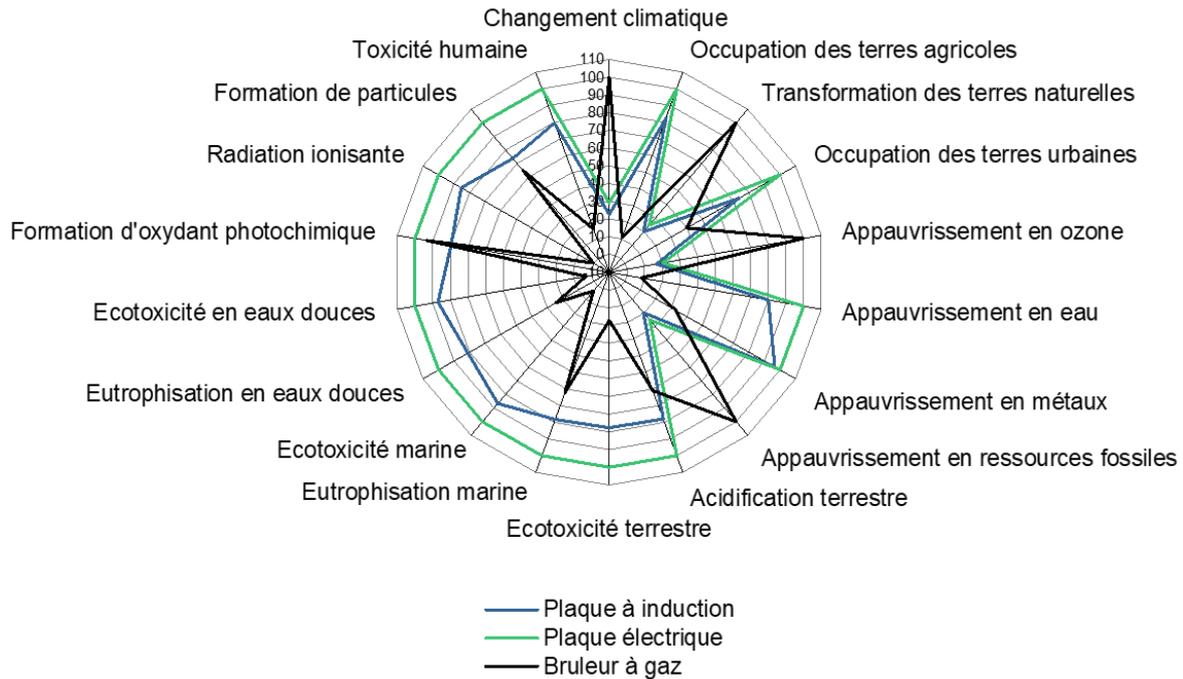


Figure III-18 : Comparaison des impacts mid-point des appareils conventionnels normalisés par l'impact le plus grand de chaque indicateur.

III.4.1.5. Influence du traitement de fin de vie

Lorsque le traitement en fin de vie est pris en considération et que les résultats *mid-point* des appareils conventionnels sont décomposés entre les étapes de construction, d'utilisation et de fin de vie, les indicateurs d'impact sont dominés soit par la plaque électrique, soit par le brûleur à gaz, à l'exception de l'écotoxicité marine et de l'écotoxicité en eaux douces, dominés par la plaque à induction, ce qui est dû à l'étape de fin de vie. Pour l'impact de la fin de vie, comme le montre le tableau Tableau III-14, la plupart des impacts de la plaque à induction ont moins de 2% de variation. Cependant 3 indicateurs varient nettement : l'écotoxicité terrestre augmente de 138% en raison du traitement des câbles électriques, l'écotoxicité marine et en eaux douces augmentent également de 51% et 52% respectivement, en raison du traitement du cuivre et de l'aluminium. Concernant la plaque électrique, le Tableau III-15 montre que comme pour la plaque à induction, la plus grande partie des impacts ne varient pas de plus de 1%. Il est quand même possible de remarquer que certains impacts diminuent : le changement climatique diminue de 7% et celui sur l'appauvrissement en métaux de 3% en raison des matériaux recyclé et donc de la baisse des extractions de matériaux primaires. De plus, l'impact sur l'écotoxicité terrestre augmente fortement, de 108%, en raison du traitement des câbles. Enfin, dans le cas du brûleur à gaz, le Tableau III-16 montre que 13 des indicateurs varient de moins d'1% mais 2 indicateurs diminuent et 3 indicateurs augmentent. Les indicateurs qui diminuent sont l'appauvrissement en métaux et l'eutrophisation en eaux douces avec 4% et 2,2% de diminution respectivement, en raison de la production d'acier et d'aluminium primaire évitée. Ensuite, les indicateurs augmentant sont l'écotoxicité terrestre, marine et en eaux douces avec une augmentation respectivement de

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

5,6%, 6,1% et 7,6%. Cette augmentation est due au traitement des câbles électriques et électroniques pour le premier et au traitement de l'aluminium non recyclé pour les deux autres.

Tableau III-14 : Impacts mid-point cradle-to-grave de la plaque à induction décomposé entre la phase de construction (C), d'utilisation (U) et de fin de vie (F). De plus, les impacts totaux (T) sont présentés et marqués en rouge lorsqu'ils dominent l'indicateur devant les autres appareils conventionnels.

Phase	Plaque à induction			
	C	U	F	T
Changement climatique (kgCO ₂ -eq)	85	762	0,29	846,6
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	3,66	74,29	0,12	78,07
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,01	0,15	1,86E-04	0,16
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	2,01	11,48	0,068	13,56
Appauvrissement en ozone (kgCFC11-eq)	4,32×10 ⁻⁶	7,03×10 ⁻⁵	4,66×10 ⁻⁸	7,47×10 ⁻⁵
Appauvrissement en eau (m ³)	0,53	24	-3,10×10 ⁻³	24,09
Appauvrissement en métaux (kgFe-eq)	147,76	133,51	-3,00×10 ⁻³	281,27
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole-eq)	25,30	228,95	-1,16	253,1
Acidification terrestre (kgSO ₂ -eq)	0,55	3,55	-0,026	4,07
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB-eq)	0,024	0,18	0,28	0,48
Eutrophisation marine (kgN-eq)	0,14	1,04	-6,14×10 ⁻⁴	1,18
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB-eq)	35,11	176,29	108,4	320
Eutrophisation en eaux douces (kg-P-eq)	0,10	0,27	-1,90×10 ⁻³	0,36
Ecotoxicité en eaux douces (kg-1,4-DCB-eq)	40,21	201,11	126,2	368
Formation d'oxydant photochimique (kgNMVOC)	0,49	2,22	-7,56×10 ⁻³	2,69
Radiation ionisante (kg6U235-eq)	5,56	4 880	-0,10	4 885
Formation de particules (kg-PM ₁₀ -eq)	0,26	1,42	0,04	1,72
Toxicité humaine (kg1,4-DCB-eq)	140,43	661,20	0,22	802

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-15 : Impacts mid-point cradle-to-grave de la plaque électrique décomposés entre la phase de construction (C), d'utilisation (U) et de fin de vie (F). De plus, les impacts totaux (T) sont présentés et marqués en rouge lorsqu'ils dominent l'indicateur devant les autres appareils conventionnels.

Phase	Plaque électrique			
	C	U	F	T
Changement climatique (kgCO ₂ -eq)	201	892	-7,95	1 085
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	7,65	87,04	-0,076	94,61
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,03	0,17	-6,28×10 ⁻⁴	0,20
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	4,90	13,45	-0,078	18,27
Appauvrissement en ozone (kgCFC11-eq)	8,51×10 ⁻⁶	8,23×10 ⁻⁵	-3,69×10 ⁻⁷	9,04×10 ⁻⁵
Appauvrissement en eau (m ³)	2,47	27,61	-0,016	30,06
Appauvrissement en métaux (kgFe-eq)	135	156	-8,75	282,25
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPetrole-eq)	55,59	268,24	-2,16	322
Acidification terrestre (kgSO ₂ -eq)	1,09	4,16	-0,024	5,23
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB-eq)	0,05	0,21	0,28	0,54
Eutrophisation marine (kgN-eq)	0,29	1,21	-6,66×10 ⁻³	1,49
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB-eq)	37	207	-0,18	243,82
Eutrophisation en eaux douces (kg-P-eq)	0,14	0,31	-4,09×10 ⁻³	0,45
Ecotoxicité en eaux douces (kg-1,4-DCB-eq)	42	236	-0,17	278
Formation d'oxydant photochimique (kgNMVOC)	0,80	2,60	-0,038	3,36
Radiation ionisante (kg6U235-eq)	10	5 717	-0,13	5 727
Formation de particules (kg-PM ₁₀ -eq)	0,61	1,66	0,015	2,29
Toxicité humaine (kg1,4-DCB-eq)	234	775	-2,38	1 007

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-16 : Impacts mid-point cradle-to-grave du brûleur à gaz décomposés entre la phase de construction (C), d'utilisation (U) et de fin de vie (F). De plus, les impacts totaux (T) sont présentés et marqués en rouge lorsqu'ils dominent l'indicateur devant les autres appareils conventionnels.

Phase	Brûleur à gaz			
	C	U	F	T
Changement climatique (kgCO ₂ -eq)	462	3278	-2,99	3 737
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	9,38	1,06	-0,050	10,39
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,03	0,78	-3,23×10 ⁻⁴	0,81
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	5,45	1,88	-0,043	7,29
Appauvrissement en ozone (kgCFC11-eq)	5,66×10 ⁻⁶	4,40×10 ⁻⁴	-1,73×10 ⁻⁷	4,45×10 ⁻⁴
Appauvrissement en eau (m ³)	2,13	0,31	-6,02×10 ⁻³	2,43
Appauvrissement en métaux (kgFe-eq)	77,93	16,87	-3,80	91
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPetrole-eq)	110	1 186	-1,97	1 294
Acidification terrestre (kgSO ₂ -eq)	1,96	1,24	-0,019	3,18
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB-eq)	0,030	0,014	2,45×10 ⁻³	0,046
Eutrophisation marine (kgN-eq)	0,55	0,38	-1,55×10 ⁻³	0,93
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB-eq)	6,86	2,34	0,56	9,76
Eutrophisation en eaux douces (kg-P-eq)	0,10	0,01	-2,40×10 ⁻³	0,11
Ecotoxicité en eaux douces (kg-1,4-DCB-eq)	7,39	1,52	0,67	9,58
Formation d'oxydant photochimique (kgNMVOC)	1,52	1,65	-0,023	3,15
Radiation ionisante (kg6U235-eq)	10,08	4,98	-0,13	14,93
Formation de particules (kg-PM ₁₀ -eq)	1,06	0,43	-0,017	1,473
Toxicité humaine (kg1,4-DCB-eq)	143	18	-1,51	159

III.4.2. Les paraboles solaires

Dans cette partie seront présentés les impacts des paraboles solaires étudiées. Les impacts *end-point* et *mid-point* de la parabole de référence seront présentés suivis de l'influence de l'origine de l'aluminium pour finir avec l'influence du choix d'une structure en bois. Aucune discussion ne portera sur la phase d'usage puisqu'elles n'enregistrent aucun impact écologique.

III.4.2.1. La parabole de référence

Étant donné que la plus grande partie de l'aluminium est produite en Chine, nous avons décidé de considérer la parabole en aluminium produit en Chine comme celle de référence. Le Tableau III-17 présente les deux dommages les plus importants de chaque zone de protection (Qualité de l'écosystème - EQ, Santé humaine - HH, Appauvrissement en ressources - RD) de la parabole de référence et l'ensemble des résultats est présenté en Annexe Figure B-1. Ces résultats montrent la même tendance que pour les cuiseurs conventionnels, à savoir la domination des zones de protection par deux indicateurs. En effet, pour les zones EQ et HH le dommage sur le réchauffement climatique est, respectivement, environ 22 et 2 fois supérieures que les deux suivants qui sont l'occupations des terres agricoles pour la zone EQ et la formation de particules pour la zone HH. Dans le cas de la zone RD, c'est le dommage de l'appauvrissement en ressources fossiles qui est environ 11 fois supérieur à celui de l'appauvrissement en métaux. D'un point de vue général, le dommage agréé *cradle-to-use* de la parabole de référence est de 52 points.

Tableau III-17 : Les dommages end point les plus importants de la parabole de référence dans les trois zones de protection.

Indicateurs	Qualité de l'écosystème (points)		Santé humaine (points)		Appauvrissement en ressources (points)	
	Changement climatique	Occupation des terres agricoles	Changement climatique	Formation de particules	ARF ¹	AM ¹
Parabole de référence	9,77	0,44	15,5	6,77	15,3	1,42

¹ : ARF : Appauvrissement en ressources fossiles, AM : Appauvrissement en métaux

Du point de vue des impacts *mid-point*, l'indicateur sur le réchauffement climatique vaut 558 kgCO_{2eq} et celui en appauvrissement en ressources fossiles vaut 128 kgPétrole_{eq} (l'ensemble des impacts *mid-point* est présenté en Annexe Figure B-2. La Figure III-19 présente la contribution des procédés à la construction de la parabole. Ici la phase d'utilisation des paraboles n'est pas présentée puisqu'elle ne représente aucun impact. À première vue, le procédé qui domine largement les deux impacts est le procédé de production d'aluminium. En effet, il représente 86% de l'impact sur l'appauvrissement en ressources fossiles et 89% de celui sur le changement climatique. Les procédés suivants sont le procédé d'anodisation des tôles d'aluminium et la production d'électricité en Chine.

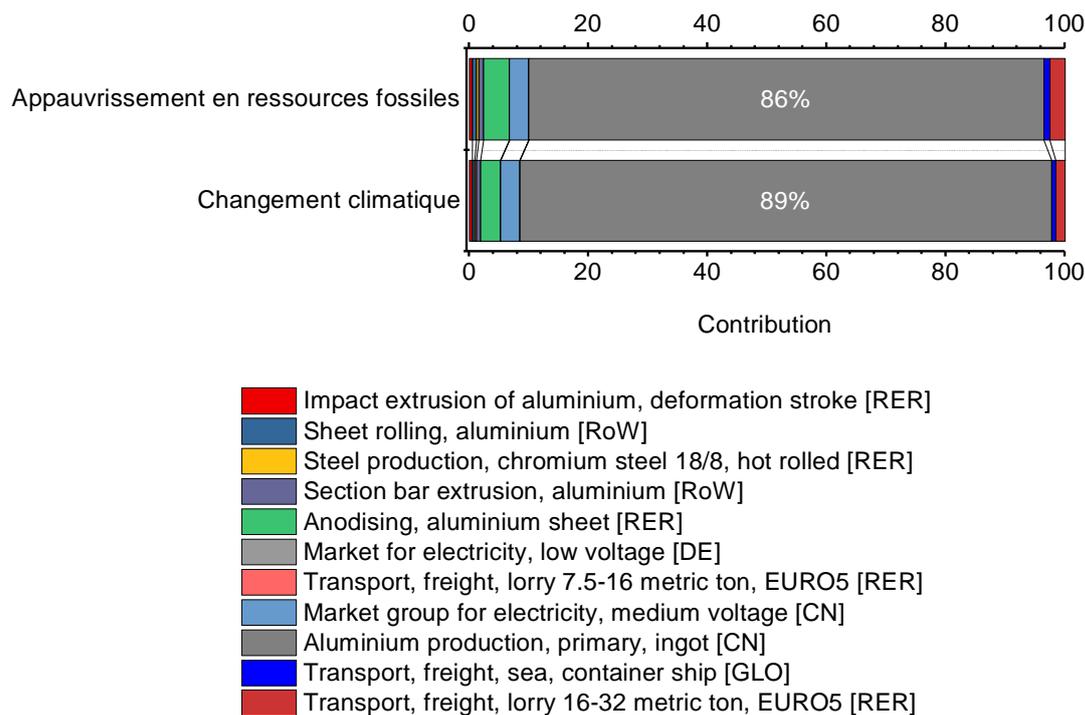


Figure III-19 : Contribution relative des procédés de production aux impacts mid-point sur le réchauffement climatique et l'appauvrissement en ressources fossiles.

III.4.2.2. Influence de la provenance de l'aluminium et de l'utilisation du bois

Cette partie présentera l'évolution des impacts en fonction des matériaux utilisés pour la construction de la structure de la parabole et l'origine de ces matériaux. La Figure III-20 présente les impacts *mid-point* des dix variantes de paraboles normalisés par l'impact le plus important de chaque catégorie.

A première vue, les résultats montrent que la parabole de référence domine 15 des 18 indicateurs. Les impacts restants sont ceux des radiations ionisantes, l'occupation des terres agricoles et la transformation des terres naturelles. Le premier est dominé par les paraboles produites au Canada en raison d'une plus forte utilisation de l'énergie nucléaire dans le mix électrique canadien. Ensuite, l'impact sur l'occupation des terres agricoles est largement dominé par les paraboles avec une structure en bois en raison d'un très fort impact de la production de bois. Pour le dernier, l'impact sur la transformation des terres naturelles, ce sont les paraboles produites en aluminium canadien en raison d'une plus grande quantité de pétrole utilisée pour fournir la chaleur au procédé de production d'aluminium au Canada.

Dans un second temps, les résultats montrent que la parabole en bois (structure) et aluminium recyclé (réflecteurs et support de casserole) a l'impact le plus faible dans 16 des 18 indicateurs. Les deux impacts qu'elle ne minore pas sont ceux de l'occupation des terres agricoles et urbaines. Dans les deux cas, cela est dû à l'utilisation du bois qui fait beaucoup augmenter ces impacts. En effet, la production du bois représente 156 des 159 m²/an de l'impact sur l'occupation des terres agricoles et 1,75 des 2,6 m²/an de l'impact sur l'occupation des terres

urbaines. A titre de comparaison, l'impact de la parabole de référence sur ces deux catégories est de 11 m²/an et 6 m²/an dont 5,2 m²/an dus à la production d'aluminium primaire et lorsque l'aluminium recyclé est utilisé l'impact de la parabole passe à 1,01 m²/an. Ces résultats montrent la forte influence du bois sur ces impacts.

Cette analyse démontre clairement l'intérêt d'utiliser de l'aluminium recyclé et du bois pour améliorer l'impact global des paraboles. Les résultats des impacts *mid-point* des paraboles en aluminium et en bois avec des limites *cradle-to-use* (sans fin de vie) sont respectivement présentés en Annexe Tableau B-1 et Tableau B-2.

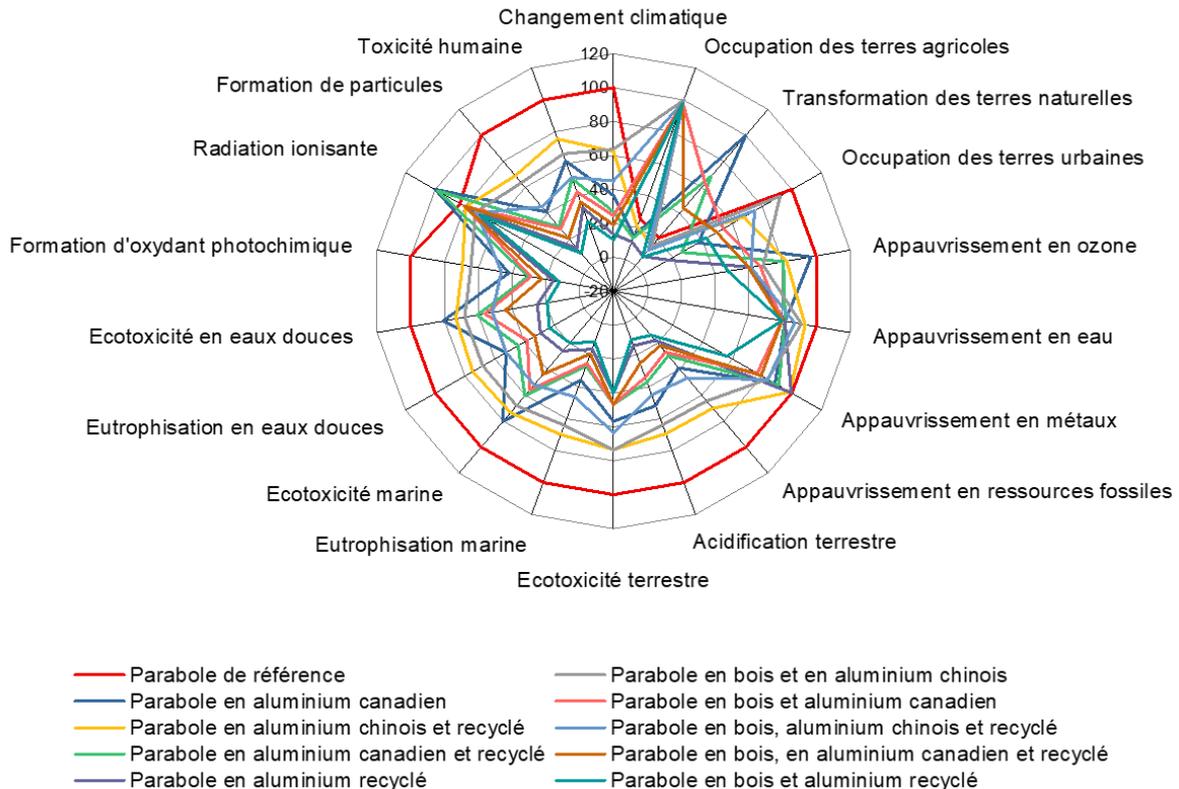


Figure III-20 : Comparaison des impacts *mid-point* de toutes les variantes de parabole solaire ainsi que la parabole de référence. Les impacts *mid-point* sont normalisés par l'impact maximum de chaque indicateur.

Comme expliqué précédemment, l'indicateur sur le changement climatique est généralement utilisé comme base de comparaison pour l'impact sur l'environnement. Nous avons donc porté une attention particulière à cet indicateur.

La Figure III-21 compare les impacts sur le réchauffement climatique de chacune des paraboles solaires étudiées et présente leur valeur. Lorsque l'on compare la parabole en aluminium chinois et celle en aluminium canadien l'impact diminue fortement en passant de 558 kgCO_{2eq} à 203 kgCO_{2eq}. La différence entre ces deux valeurs provient de la différence d'impact des mix énergétiques du Canada et de la Chine, le mix énergétique chinois émet 766 gCO_{2eq}/kWh et celui canadien 166 gCO_{2eq}/kWh. Les résultats montrent aussi que l'utilisation du bois diminue fortement l'impact. Par exemple, l'impact de la parabole de référence chute d'environ 200 kgCO_{2eq} lorsque la structure est réalisée en bois. Cette tendance est similaire pour toutes les paraboles : lorsque le bois est utilisé, l'impact diminue à chaque fois. Cette diminution est

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

plus faible lorsque la parabole est initialement en aluminium canadien et encore plus faible lorsqu'elle est en aluminium recyclé.

Finalement, l'impact le plus faible sur le réchauffement climatique est celui de la parabole en bois et en aluminium recyclé avec un impact de 57 kgCO_{2eq} soit environ 10 fois moins que celui de la parabole de référence.

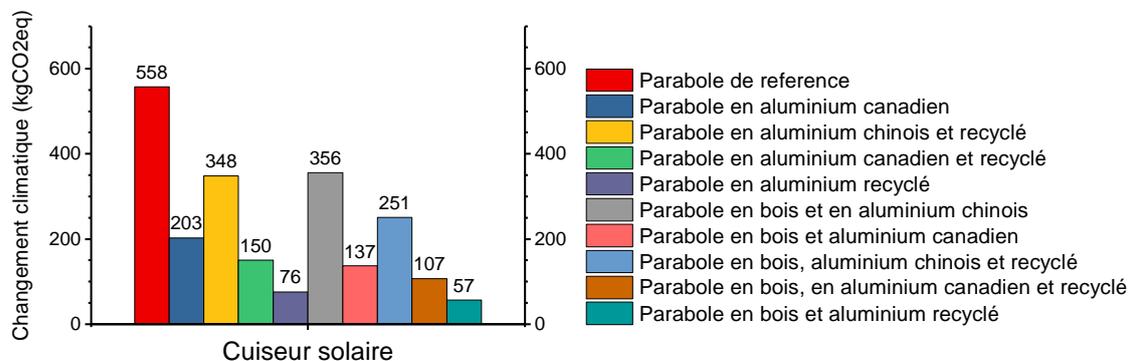


Figure III-21 : Impact sur le réchauffement climatique de toutes les variantes de cuisneur solaire avec les limites *cradle-to-use*.

Afin d'avoir une comparaison plus complète, nous avons étudié les dommages *end-point* sur les trois zones de protection : la qualité de l'écosystème (EQ), la santé humaine (HH) et l'appauvrissement des ressources (RD). La Figure III-22 présente les dommages de chaque variante de parabole regroupés dans chaque zone ; les données avec les limites *cradle-to-use* sont disponibles en Annexe Tableau B-5 pour les paraboles en aluminium et Tableau B-6 pour celles en bois et aluminium.

La figure montre que la parabole de référence domine largement les catégories RD et HH. Ce résultat vient de l'utilisation de charbon dans le mix énergétique chinois et les émissions associées à cette utilisation. Ces impacts sont réduits lorsque i) de l'aluminium canadien – produit avec une énergie et une électricité moins émettrice – est utilisé, ii) de l'aluminium recyclé est utilisé en plus ou moins grande quantité dans les paraboles et iii) du bois est utilisé pour la structure. En définitive, les paraboles contenant de l'aluminium chinois ont des dommages supérieurs aux autres même lorsque du bois ou de l'aluminium recyclé sont utilisés. La Figure III-22 montre qu'en combinant les trois options précédentes (bois, aluminium canadien et/ou aluminium recyclé) les dommages des paraboles chutent fortement dans les zones RD et HH.

Pour la zone de protection EQ la tendance est différente. C'est la parabole constituée de bois et d'aluminium chinois qui induit le plus grand dommage en raison de l'utilisation du bois ; ensuite vient la parabole de référence. Dans cette zone de protection, l'utilisation du bois augmente toujours le dommage de la parabole peu importe l'origine de l'aluminium. Cette augmentation est due aux dommages sur l'indicateur de l'occupation des terres agricoles qui est très important pour le bois. Le dommage de la zone EQ de l'aluminium canadien et de celui recyclé est plus faible que celui en provenance de Chine. Donc, lorsque que l'on substitue ce dernier par les deux autres le dommage chute.

Finalement, c'est la parabole réalisée en aluminium recyclé uniquement qui a le dommage global le plus faible avec 9,1 points suivie de près par la parabole construite en bois et aluminium recyclé avec 12,1 points. Cependant, lorsque l'on s'attarde sur le détail des

indicateurs, d'aucun peut remarquer que la parabole en bois et aluminium recyclé est la plus faible sur 15 des 17 indicateurs.

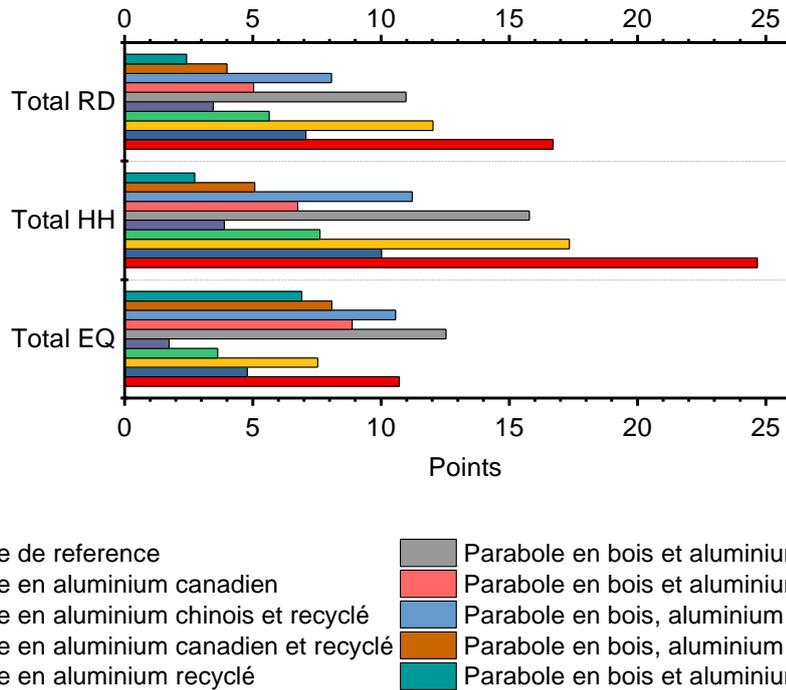


Figure III-22 : Dommages end-point totaux des variantes de parabole solaire classés par zone de protection sur la qualité de l'écosystème (EQ), la santé humaine (HH) et l'appauvrissement en ressources (RD).

III.4.2.3. Influence du traitement de fin de vie

Le cycle de vie complet comprend un traitement de fin de vie. Ce traitement peut être réalisé de trois façons principales : l'incinération, la mise en décharge/l'enfouissement et le recyclage. Parmi ces options, le recyclage permet d'améliorer le bilan environnemental de la plupart des paraboles.

La Figure III-23 présente le résultat de l'analyse de cycle de vie de la parabole de référence ; les valeurs négatives représentent l'impact évité grâce au recyclage. Dans le cas de la parabole de référence, la valeur finale de l'impact diminue de 14% à 56% sauf pour l'écotoxicité marine et en eaux douces. En effet, le traitement de fin de vie de l'aluminium non recyclé induit une grosse augmentation de ces impacts : l'écotoxicité marine augmente d'un facteur 30 en passant de 7 à 206 kg1,4-DCB_{eq} et l'écotoxicité en eaux marines augmente d'un facteur 34 en passant de 7 à 239 kg1,4-DCB_{eq}. La Figure III-23 montre également que les autres procédés de la phase de fin de vie n'ont que très peu d'influence sur la valeur des impacts.

Pour la parabole construite en bois et aluminium recyclé (résultats *cradle-to-grave* disponibles en Annexe Tableau B-4) – qui a l'impact le plus faible – certains impacts diminuent et d'autres augmentent nettement en comparaison avec les impacts *cradle-to-use*. Par exemple, les impacts sur l'appauvrissement en métaux et sur la toxicité humaine diminuent de 35% et 18% respectivement en raison des quantités d'aluminium primaires évitées. Au contraire, l'écotoxicité marine et en eaux douces augmentent fortement de 1,4 à 127 kg1,4-DCB_{eq} pour le

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

premier et de 1,4 à 147 kg_{1,4-DCB_{eq}} pour le deuxième : là aussi c'est en raison du traitement de l'aluminium non recyclé. Cependant, dans tous les cas, les impacts restent plus faibles que ceux de la parabole de référence après le traitement de fin de vie. Au niveau de l'impact sur le réchauffement climatique, il diminue de 53% dans le cas de la parabole de référence alors que pour la parabole en bois et aluminium recyclé il augmente de 2%. Ceci est dû au fait que lorsque les matériaux initiaux sont des matériaux recyclés, l'avantage du recyclage suivant diminue et peut être dépassé par le poids écologique des procédés eux même.

Globalement ces tendances sont similaires pour les autres paraboles solaires. C'est-à-dire que le recyclage permet de diminuer les impacts *mid-point* et que le traitement de l'aluminium non recyclé augmente fortement l'écotoxicité marine et en eaux douces. De plus, la diminution de l'impact est plus importante quand l'aluminium chinois est utilisé et la différence entre les impacts avec et sans traitement de fin de vie diminue avec l'utilisation de l'aluminium canadien recyclé et du bois.

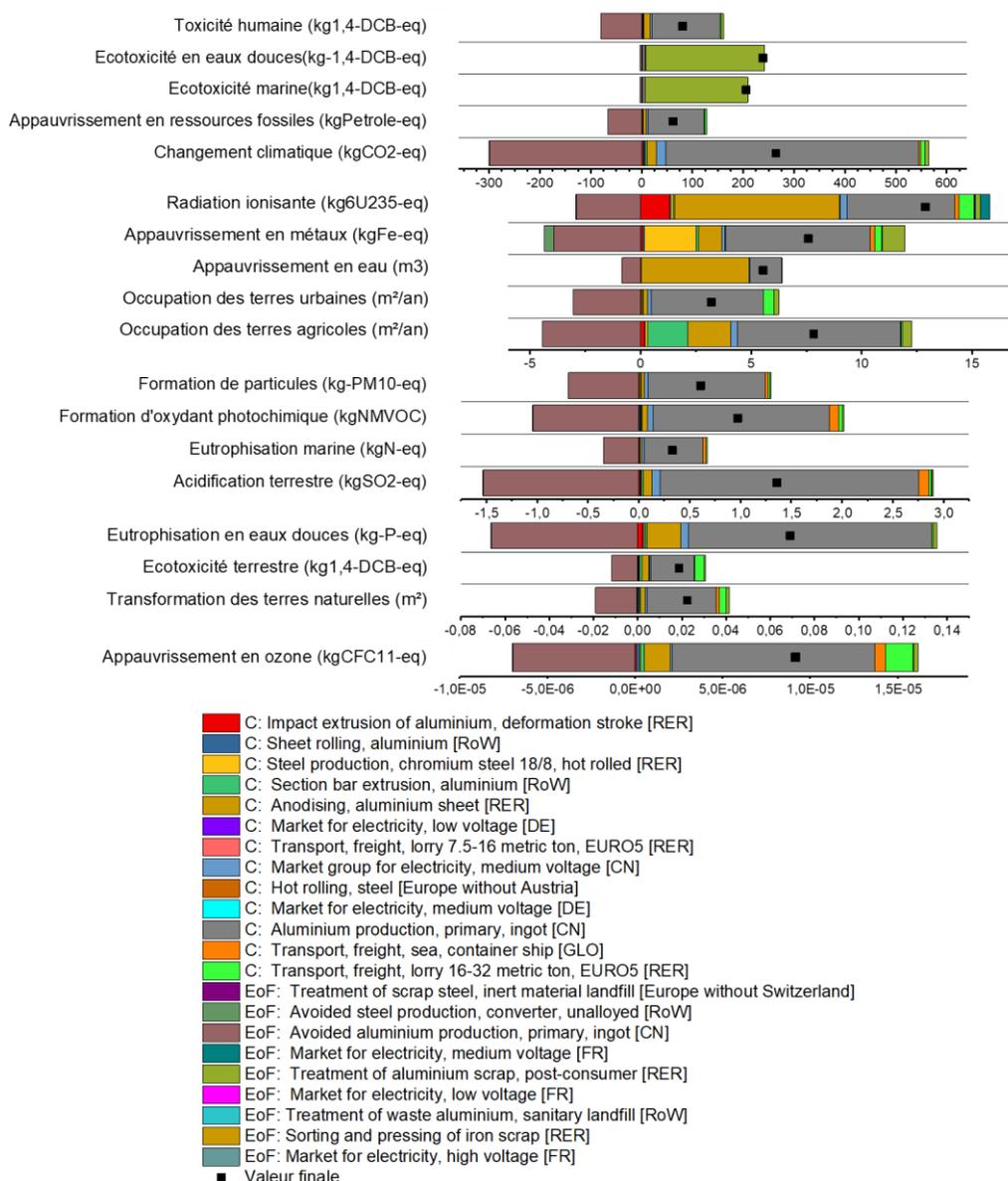


Figure III-23 : Détail de la contribution de la parabole de référence avec le traitement de fin de vie (C : Construction et EoL : Fin de vie).

D'un point de vue *end-point*, le dommage global de la parabole de référence (résultats des dommages *cradle-to-grave* disponibles en Annexe Tableau B-7) passe de 52,1 points à 25,2 points et globalement, la diminution des impacts varie entre 35% et 50%. Pour la parabole en bois et en aluminium recyclé, 10 des 17 indicateurs *end-point* augmentent et le reste diminue. La plus grosse augmentation est de 16% pour l'écotoxicité marine en raison du traitement de l'aluminium non recyclé et la diminution la plus importante est de 22% pour l'appauvrissement en métaux grâce au recyclage de l'aluminium. Globalement, le dommage ne diminue que très peu en passant de 12,1 à 11,9 points. Pour les autres paraboles seules la parabole en aluminium recyclé et celle en bois et aluminium canadien et recyclé ont des impacts qui augmentent. Pour la première, 5 indicateurs augmentent (occupation des terres agricoles, écotoxicité en eaux douces et marines, occupation des terres urbaines et formation d'oxydants photochimiques) et pour la seconde seulement 3 (écotoxicité terrestre, occupation des terres urbaines et radiations ionisantes).

Ces résultats montrent que le traitement de fin de vie diminue fortement les impacts quand des ressources primaires sont utilisées grâce au recyclage qui permet d'éviter d'extraire et de transformer des ressources minérales primaires. Cependant, quand l'aluminium recyclé et/ou le bois sont utilisés lors de la construction des paraboles, le recyclage induit une diminution de l'impact plus faible voire absente. Cela est dû au démantèlement et au traitement de fin de vie qui produisent des impacts supplémentaires non négligeables lorsque l'analyse porte sur des paraboles qui ont déjà un impact relativement faible.

III.4.3. Comparaison générale

Ici nous allons comparer les appareils de cuisson conventionnels et les paraboles solaires. Parmi les paraboles, nous avons sélectionné la parabole de référence parce qu'elle a l'impact le plus important et la parabole en bois et en aluminium recyclé parce qu'elle a l'impact sur l'environnement le plus faible sur la plupart des catégories *mid-point* (15 sur les 18) et *end-point* (15 des 17 indicateurs et 2 des zones de protection).

Lorsque seule la phase de construction est considérée (tons rouges sur la Figure III-24), la parabole de référence domine 11 des 18 indicateurs *mid-point*, la plaque électrique en domine 4, la plaque à induction 1 (appauvrissement en métaux) et la parabole en bois et aluminium recyclé le dernier (occupation des terres agricoles). Comme expliqué précédemment, l'utilisation du bois induit un gros impact sur l'occupation des terres agricoles avec 159 m²/an contre 12, 9, 8 et 4 m²/an pour la parabole de référence, le brûleur à gaz, la plaque électrique et la plaque à induction respectivement. La plaque à induction domine l'appauvrissement en métaux en raison du cuivre et des composants électroniques avec 148 kgFe_{eq} suivie de près par la plaque électrique avec 135 kgFe_{eq}.

La phase d'utilisation est représentée avec différents tons de bleu sur la Figure III-24. Pour les cuiseurs solaires il n'y a pas d'impact pour la phase d'utilisation alors que pour les appareils conventionnels, comme expliqué précédemment, la nécessité d'utiliser de l'électricité et du gaz implique un impact : cette phase d'utilisation augmente drastiquement leurs impacts (voir les parties III.4.1.1 – page 161 , III.4.1.2 – page 164 et III.4.1.3 – page 167). En considérant ces deux phases (construction et utilisation), la parabole en bois et aluminium recyclé a l'impact le plus faible dans toutes les catégories mise à part l'occupation des terres agricoles. La plaque électrique domine 13 des 17 indicateurs et le brûleur à gaz les 4 restants. Plus spécifiquement, l'impact sur le réchauffement climatique des paraboles solaires vaut 558 et 57kgCO_{2eq} pour,

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

respectivement, celle de référence et celle en bois et aluminium recyclé, contre 846 kgCO_{2eq} pour la plaque à induction, 1093 kgCO_{2eq} pour la plaque électrique et 3739 kgCO_{2eq} pour le brûleur à gaz. Un second indicateur qui augmente drastiquement avec la phase d'utilisation, notamment pour les appareils électriques, est celui des radiations ionisantes : il passe de 5,6 à 4880 kg6U235_{eq} pour la plaque à induction et de 10 à 5717 kg6U235_{eq} pour la plaque électrique. Cette augmentation résulte de l'utilisation d'électricité française qui est majoritairement produite par des centrales nucléaires.

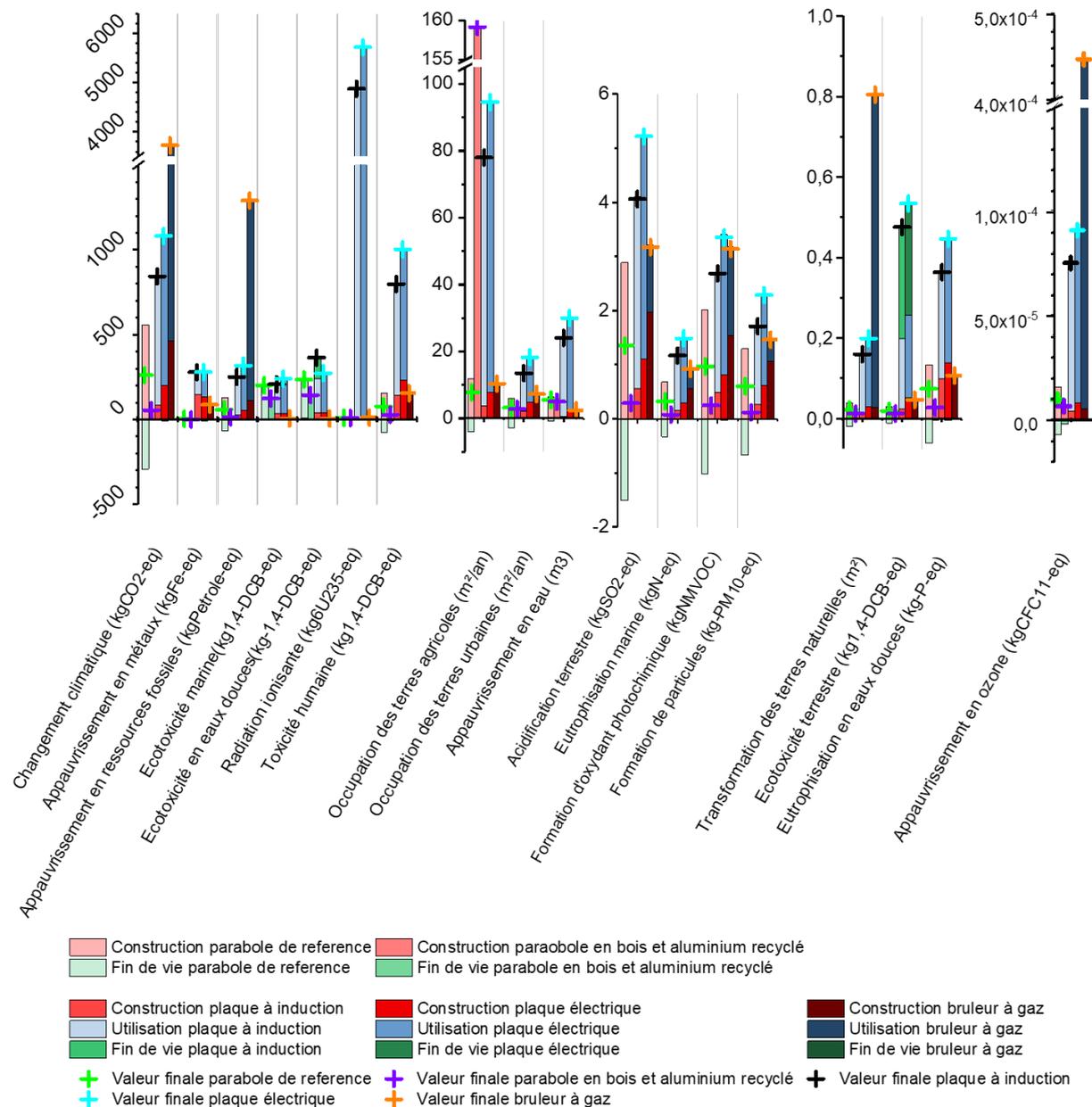


Figure III-24 : Valeurs finales et valeurs cradle-to-use des impacts mid-point pour les appareils de cuisson conventionnels, la parabole de référence et la parabole en bois et aluminium recyclé.

Comme le montre la Figure III-24, la phase de traitement de fin de vie (différents tons de vert) n'a d'impact significatif que sur la parabole de référence et ce pour la plupart des indicateurs. Pour les plaques à induction et électrique, l'indicateur de l'impact sur l'écotoxicité terrestre

augmente comme discuté précédemment. Les valeurs de l'impact de l'écotoxicité en eaux douces et marines augmentent aussi fortement pour la parabole de référence et celle en bois et aluminium, cependant leurs valeurs finales restent inférieures à celles des appareils conventionnels électriques. D'ailleurs, pour les appareils conventionnels, le traitement de fin de vie n'a que peu d'impact notamment parce que les masses traitées sont faibles ce qui ne permet pas d'avoir une réduction d'impact ou un impact supplémentaire significatif devant celui du reste du cycle de vie.

Enfin, pour les valeurs finales *cradle-to-grave*, comme la fin de vie n'a pas beaucoup d'impact sur les appareils conventionnels et comme le montre le Tableau III-18, c'est toujours la plaque électrique qui domine le plus d'indicateurs avec 11 indicateurs dominés puis le brûleur à gaz qui domine 4 indicateurs. La plaque à induction domine quant à elle 2 indicateurs en raison du traitement de fin de vie et la parabole en bois et aluminium domine toujours l'indicateur sur l'occupation des terres agricoles en raison de l'utilisation du bois. A noter que la parabole de référence ne domine aucun indicateur. Comme lors de la comparaison des appareils conventionnels, le brûleur à gaz domine les impacts liés à l'utilisation et la combustion d'énergies fossiles. Il est important de garder en tête que ces résultats sont calculés avec le mix électrique français qui a une intensité carbone très faible. L'influence de cette dernière sera discutée en détails dans la partie III.4.4.3, page 188.

Avec l'approche dommage, les catégories de dommages sont dominées soit par la plaque électrique soit par le brûleur à gaz sauf l'indicateur du dommage d'occupation des terres agricoles dans la zone de protection de la qualité de l'écosystème. Globalement, comme le montre la Figure III-25, les zones de protection EQ, HH et RD sont largement dominées par le brûleur à gaz, suivi par la plaque électrique, ensuite, proche, par la plaque à induction, puis, plus bas, vient la parabole de référence et, plus bas encore, la parabole en bois et aluminium recyclé. Au niveau du traitement de fin de vie, comme pour les *mid-point*, seule la parabole de référence est impactée de manière significative. Pour le dommage total, logiquement, la même tendance que dans chaque zone est observée avec un dommage final de 347 points pour le brûleur et de 142, 112, 25 et 12 pour la plaque à induction, la plaque électrique, la parabole de référence et la parabole en bois et en aluminium recyclé respectivement. Il est important de noter que la parabole avec le dommage *cradle-to-grave* le plus faible est celle en aluminium recyclé (avec 8,3 points), bien que 10 des 17 indicateurs *end-point* soient minorés par la parabole en bois et aluminium recyclé, 5 des catégories restantes sont minorées par la parabole en aluminium recyclé. Sur ces 5 catégories, la différence entre les deux paraboles est due à l'utilisation du bois qui augmente fortement les dommages de la parabole en bois et en aluminium recyclé. De plus, le recyclage lors du traitement de fin de vie permet de faire légèrement diminuer l'impact de la parabole en aluminium recyclé sur les indicateurs de la perte en ressources fossiles, de l'appauvrissement en ozone et de la transformation des terres naturelles, ce qui fait qu'elle les minore.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-18 : Impacts cradle-to-grave de la parabole de référence, de la parabole en bois et en aluminium recyclé, de la plaque à induction, de la plaque électrique et du brûleur à gaz. Les impacts maximums sont colorés en rouge.

Appareils	Parabole de référence	Paraboles en bois et aluminium recyclé	Induction	Plaque électrique	Brûleur à gaz
Changement climatique (kgCO ₂ -eq)	264,5	58,23	846,6	1 085	3 737
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	7,83	159	78,1	94,6	10,4
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,020	0,012	0,16	0,20	0,81
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	3,20	2,86	13,6	18,3	7,29
Appauvrissement en ozone (kgCFC11-eq)	9,2×10 ⁻⁶	5,9×10 ⁻⁶	7,5×10 ⁻⁵	9,0×10 ⁻⁵	4,5×10 ⁻⁴
Appauvrissement en eau (m ³)	5,55	5,01	24,1	30,1	2,43
Appauvrissement en métaux (kgFe-eq)	7,59	3,98	281	282	91,0
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPetrole-eq)	62,03	17,16	253,1	322	1 294
Acidification terrestre (kgSO ₂ -eq)	1,4	0,3	4,1	5,2	3,2
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB-eq)	0,02	0,013	0,48	0,54	0,046
Eutrophisation marine (kgN-eq)	0,33	0,086	1,18	1,49	0,93
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB-eq)	206	127	320	244	9,76
Eutrophisation en eaux douces (kgP-eq)	0,07	0,03	0,36	0,45	0,11
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB-eq)	239	147	368	278	9,58
Formation d'oxydant photochimique (kgNMVOC)	0,97	0,26	2,69	3,36	3,15
Radiation ionisante (kg6U235-eq)	12,88	12,10	4 885	5 727	14,93
Formation de particules (kgPM ₁₀ -eq)	0,61	0,12	1,72	2,29	1,473
Toxicité humaine (kg1,4-DCB-eq)	80,49	30,8	802	1 007	159

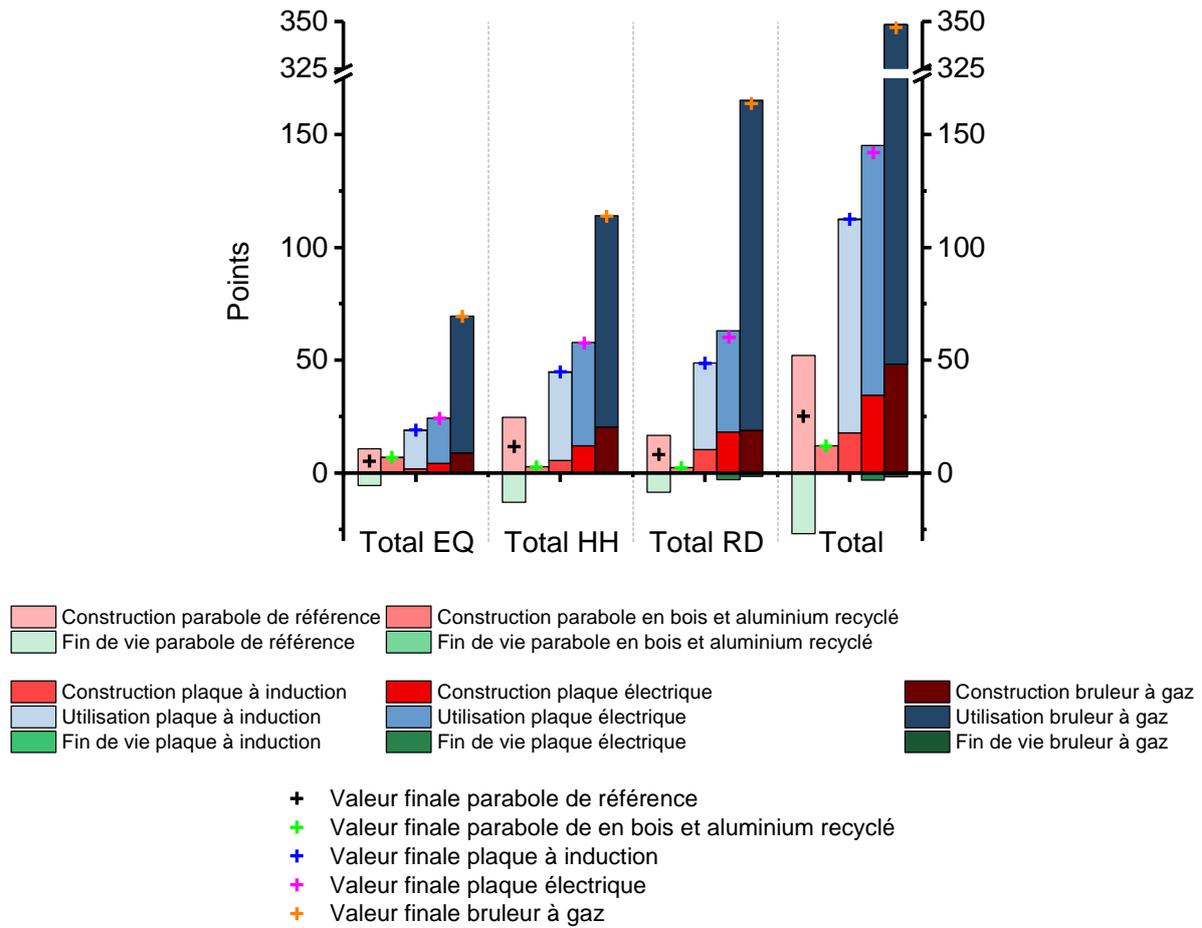


Figure III-25 : Dommage final et contribution de chaque phase sur le dommage end-point pour les zones de protection de la qualité de l'écosystème (EQ), la santé humaine (HH), l'appauvrissement en ressources (RD) et le total agrégé pour la parabole de référence, la parabole en bois et aluminium recyclé, la plaque à induction, la plaque électrique et le brûleur à gaz.

III.4.4. Analyse de sensibilité

Plusieurs paramètres de l'étude ont été déterminés par nos soins et peuvent être considérés comme non représentatifs de la réalité. On peut citer par exemple l'unité fonctionnelle, la durée de vie des paraboles ou encore le lieu d'utilisation des appareils. Dans cette partie, l'influence de ces paramètres sera présentée. De plus, les paramètres induisant le plus d'incertitudes seront également variés pour observer leur influence.

III.4.4.1. L'énergie utilisée pour la cuisson

L'unité fonctionnelle choisie est « chauffer 2L d'eau de 25 °C à 90 °C, trois fois par jour, tous les jours pendant 40 ans », elle sera discutée ici. La valeur théorique de notre unité fonctionnelle représente 165 kWh/an. Une fois divisée par les rendements des appareils conventionnels nous accédons à la valeur consommée : ces valeurs de consommation valent 223 kWh/an, 261 kWh/an et 320 kWh/an pour la plaque à induction, la plaque électrique et le brûleur à gaz, respectivement. Les données de consommation du gouvernement français

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

indiquent que la consommation annuelle pour la cuisine vaut 665 kWh/an, cette valeur inclue les appareils autres que les plaques de cuisson (bouilloire, four et autres) [175]. Lorsque ces appareils sont exclus la valeur estimée de la consommation se trouve entre 300 et 400 kWh/an pour un foyer de deux adultes [176]. Les valeurs de consommation réelles liées à notre unité fonctionnelle sont ainsi proches de la limite basse de la valeur de consommation moyenne d'un foyer français.

Afin d'explorer d'autres profils de consommation, trois autres unités fonctionnelles ont été étudiées. La première consiste au double de l'unité de fonctionnelle donc 330 kWh/an. En prenant en compte les rendements cela correspond à des consommations de 444 kWh/an, 522 kWh/an et 640 kWh/an pour la plaque à induction la plaque électrique et le brûleur à gaz. La seconde correspond à la moitié de notre unité fonctionnelle initiale donc une consommation très faible de 82,5 kWh/an. En prenant en compte les rendements des appareils cela correspond à 111 kWh/an, 131 kWh/an, 160 kWh/an pour la plaque à induction la plaque électrique et le brûleur à gaz. Ces valeurs représentent environ la moitié de la consommation d'un ménage. La troisième correspond à quatre fois notre unité fonctionnelle soit 660 kWh/an ce qui permet d'évaluer les impacts pour une famille nombreuse. En prenant en compte les rendements cela correspond à des valeurs de consommation de 891 kWh/an, 1045 kWh/an et 1281 kWh/an pour la plaque à induction la plaque électrique et le brûleur à gaz soit environ 3 fois la consommation typique.

La Figure III-26 présente l'évolution de l'impact sur le changement climatique pour les différentes consommations annuelles. Les résultats montrent une augmentation de l'impact avec l'augmentation de la consommation annuelle pour les appareils conventionnels. De plus, l'augmentation est plus forte pour le gaz que pour les appareils électriques comme nous pouvions nous y attendre. Il est également montré que, pour la consommation la plus faible, l'impact de la parabole de référence est dans l'ordre de grandeur de celui des appareils électriques et, que celui de la parabole en bois et en aluminium recyclé reste bien plus faible que les autres pour toutes les consommations. Avec l'augmentation de la consommation, la différence nette entre les deux appareils électriques augmente légèrement en raison de leur différence de rendement. Pour la valeur de consommation la plus probable d'un foyer français (330 kWh/an), les deux paraboles ont un impact sur le changement climatique sur 40 ans bien plus faible que ceux des appareils électriques : 557 et 57 kgCO_{2eq} pour la parabole de référence et celle en bois et aluminium recyclé contre 1797 kgCO_{2eq} en moyenne pour les appareils électriques. Le brûleur à gaz quant à lui est nettement supérieur aux autres appareils avec environ 7000 kgCO_{2eq} sur 40 ans.

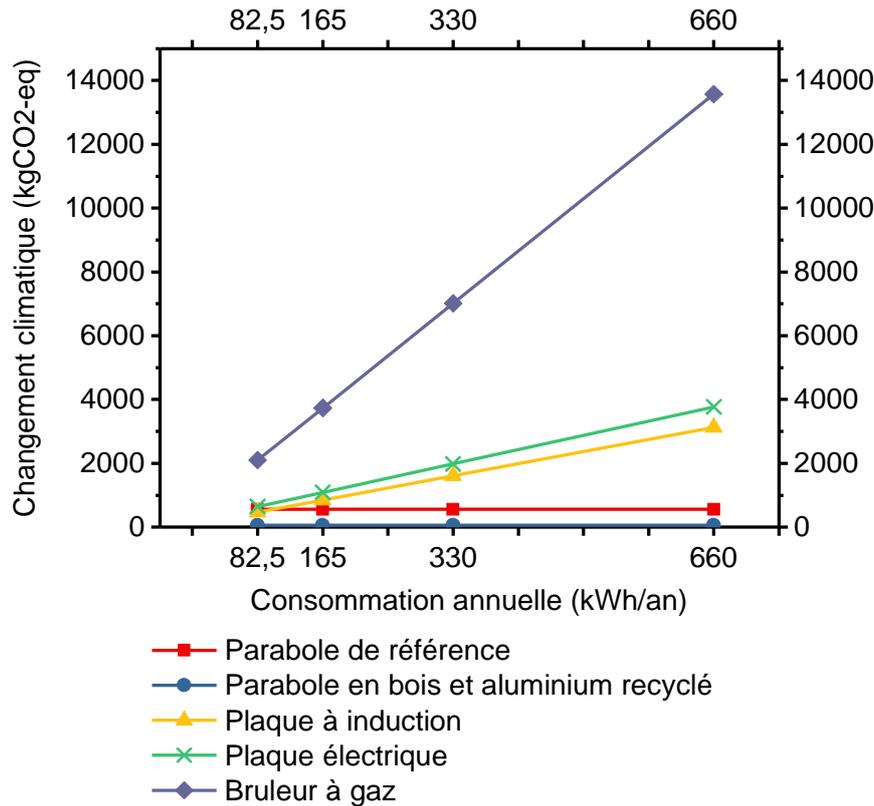


Figure III-26 : Evolution de l'impact sur le réchauffement climatique pour l'unité fonctionnelle de la parabole de référence, de la parabole en bois et aluminium recyclé, de la plaque à induction, de la plaque électrique et du brûleur à gaz pour différentes consommations annuelles en énergie vouée à la cuisine : 82,5, 165, 330 et 660 kWh/an

III.4.4.2. La durée de vie de la parabole de référence

La durée de vie de la structure de la parabole de référence a été choisie de la manière la plus cohérente possible. Un changement dans cette durée de vie a un impact important sur les résultats puisque la structure représente la majeure partie du poids de la parabole et que la phase de construction est la seule contributrice à l'impact. Pour la suite, nous nous concentrons sur l'impact sur le changement climatique. Le Tableau III-19 présente son évolution pour différentes durées de vie la structure de la parabole (pour rappel, la durée de vie des réflecteurs reste 10 ans). Les données complètes sont disponibles en Annexe Tableau C-1. L'impact augmente d'un facteur 1,5 et 2,5 par rapport au cas de référence quand la durée de vie passe à 20 et 10 ans respectivement. Lorsque le traitement de fin de vie est considéré, la tendance est similaire : l'impact *cradle-to-grave* pour 10, 20 et 40 ans de durée de vie est 647, 388 et 264 kgCO_{2eq} respectivement. Il est à noter que, même dans le cas le moins favorable (10 ans), l'impact *cradle-to-grave* reste inférieur à celui de la plaque à induction qui totalise 847 kgCO_{2eq}. Cette observation reste vraie même dans le cas où la durée de vie de la plaque à induction serait 40 ans au lieu de 10 ans puisque la phase d'utilisation seule représente 762 kgCO_{2eq} (voir Annexe Tableau A-1).

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-19 : Impact sur le changement climatique de la parabole de référence pour différentes durées de vie de la structure (40, 20 et 10 ans). Le cas de référence est une durée de vie de 40 ans.

	Construction seule			Valeur finales <i>cradle-to-grave</i>		
Durée de vie (années)	40	20	10	40	20	10
Changement climatique (kgCO _{2eq})	558	830	1384	264	388	647

Pour les cuiseurs conventionnels, la phase de construction représente au plus 18% de l'impact *cradle-to-grave* et les phases d'utilisation seules donnent le même classement d'impact que celui sur l'entiereté du cycle de vie. Ceci implique que lorsqu'un allongement des durées de vie des appareils conventionnels est réalisé aucun changement ne sera observé dans le classement des impacts.

Cette analyse montre que, bien que la durée de vie ait un gros impact, le classement des appareils demeure inchangé dans le cas des impacts *cradle-to-grave*. Dans le cas de l'impact *cradle-to-use*, celui de la parabole de référence avec une durée de vie de 20 ans est supérieur à celui de la plaque à induction mais reste inférieur à celui de la plaque électrique et du gaz et, dans le cas de la durée de vie de 10 ans l'impact devient supérieur à celui de la plaque à induction et de celle électrique. Ici, c'est l'impact sur le réchauffement climatique qui est présenté mais il faut garder en tête que tous les indicateurs seront impactés par le changement de durée de vie (l'occupation des terres agricoles, l'appauvrissement en ressources fossiles ou encore l'appauvrissement en métaux, par exemple).

III.4.4.3. Mix électrique

La phase d'utilisation est réalisée en France, pays qui a un mix électrique reposant en grande partie sur l'énergie nucléaire, ce qui en fait un mix électrique peu émetteur (86 gCO_{2eq}/kWh [177]). Ainsi, les impacts des appareils électriques (plaque à induction et plaque électrique) seront très différents s'ils sont utilisés dans d'autres pays, c'est-à-dire avec d'autres mix électriques. Afin d'observer l'influence de ce paramètre sur nos résultats, et notamment sur le changement climatique, nous avons fait varier le pays d'utilisation. Le bilan est présenté sur la Figure III-27. La partie gauche présente les impacts sur le changement climatique de la plaque à induction avec le mix espagnol (330 gCO_{2eq}/kWh [178]), allemand (516 gCO_{2eq}/kWh [179]) et australien (943 kgCO_{2eq}/kWh [180]) et les compare à nos autres résultats. Dans les pays où le mix électrique est plus carboné, on peut observer que i) la phase de construction devient négligeable devant la phase d'utilisation (environ 1% dans le cas de l'Australie), ii) l'avantage des cuiseurs solaires sur les appareils électriques s'accroît fortement. En effet, l'usage de la parabole de référence conduit à des émissions de gaz à effet de serre 15 fois inférieures à celles de la plaque à induction avec le mix australien et pour le cuiseur en bois et aluminium recyclé, la différence atteint un facteur 150. Dans le cas où l'on compare l'impact du brûleur à gaz qui est le plus important dans le mix français, avec ceux de la plaque à induction utilisée avec un mix électrique carboné, il est possible de voir que l'impact de la

plaque à induction est plus important. Cette constatation met en perspective l'intérêt d'utiliser de l'électricité carbonée devant les énergies fossiles pour la cuisine. La partie droite de la Figure III-27 montre l'évolution de l'impact sur le changement climatique de la plaque à induction en fonction de l'intensité carbone du réseau électrique. Les résultats montrent une relation linéaire avec une augmentation raide de l'impact.

Ces résultats montrent qu'une utilisation, même modérée (voir ci-dessous), du cuiseur solaire est bénéfique dans les pays ayant un mix électrique à forte intensité carbone. Dans les pays ayant un mix électrique moins carboné, les avantages des cuiseurs solaires sont clairs si i) ils sont utilisés fréquemment ou ii) s'ils sont réalisés en matériaux bas carbone : bois et/ou aluminium recyclé. Cet aspect est discuté dans la section III.4.5.

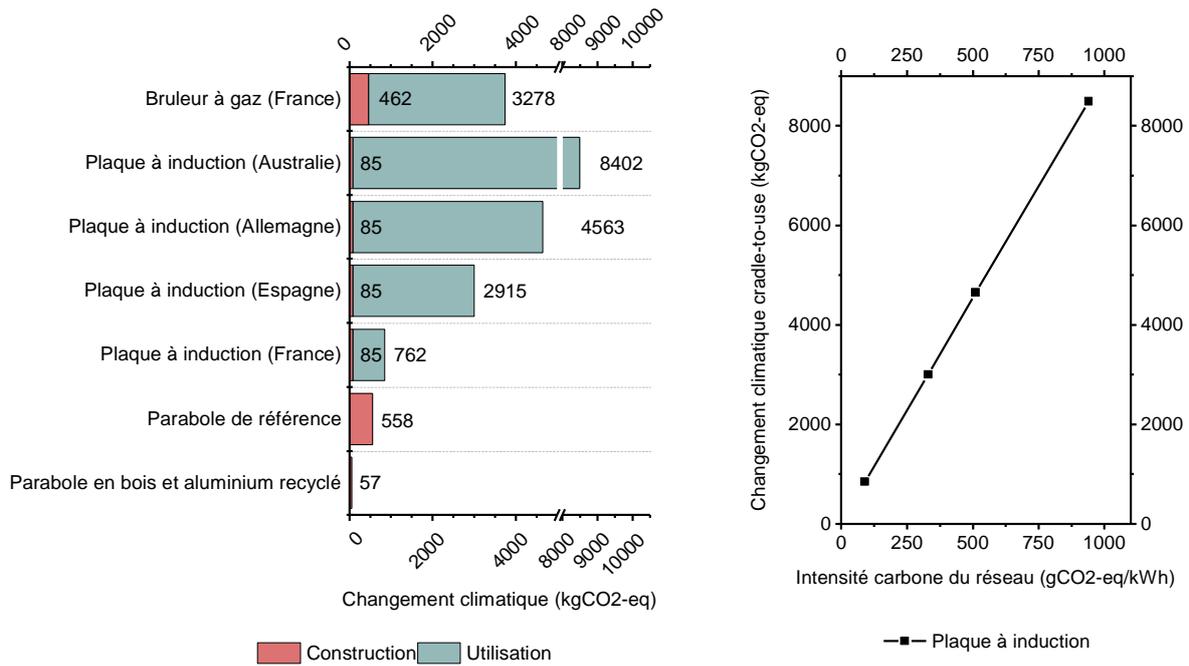


Figure III-27 : (Gauche) impact sur le changement climatique de la plaque à induction avec le mix électrique français, espagnol, allemand et australien comparé celui du brûleur à gaz, de la parabole de référence et de la parabole en bois et aluminium recyclé. La phase de construction est montrée en rouge et n'a pas été changée. Les valeurs affichées sont celles de chaque phase. (Droite) évolution de l'impact de la plaque à induction en fonction de l'intensité carbone du réseau électrique.

III.4.4.4. Incertitudes

Les incertitudes dans ce travail proviennent de deux sources : les données obtenues ici (*foreground inventory*) et celles obtenues dans la base de données ecoinvent (*background inventory*).

Foreground inventory :

Le paramètre ayant le plus de chances d'être incertain est le transport, particulièrement, le chemin d'acheminement des matériaux pour la structure des paraboles aussi bien celles en aluminium que celles en bois. Pour celles en bois, notre hypothèse, pour l'essentiel, est que le bois est récupéré proche du lieu d'utilisation donc avec une contribution négligeable du

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

transport. Pour celles en aluminium, le chemin des barres a été demandé aux industriels mais aucune réponse précise n'a pu être obtenue : nous avons donc utilisé les plus gros pôles d'échanges commerciaux. Les hypothèses de transports sont discutées par la suite.

Nous avons tout d'abord considéré que le bois était transporté depuis le lieu d'assemblage de la parabole jusqu'au lieu d'utilisation ; dans ce cas, l'impact augmente fortement. Par exemple, pour la parabole en bois et aluminium recyclé, l'impact sur le réchauffement climatique et sur l'appauvrissement en ressources fossiles augmente de 36% (de 58 à 76 kgCO_{2eq}) et de 40% (de 17 à 24 kgPétrole_{eq}), respectivement. En termes d'*end-point*, le score total augmente de 12 à 14 points. Malgré ces augmentations, l'utilisation du bois pour la structure permet un bilan écologique plus faible que celui des paraboles en aluminium et le classement des appareils en fonction des impacts n'est pas changé.

Pour la structure des paraboles en aluminium, nous avons étudié un chemin d'approvisionnement plus court. Le port de Venise en Italie a été considéré pour sa proximité avec le lieu d'assemblage des paraboles. La nouvelle distance de transport maritime est 15557 km (soit 171127 kgkm) entre Shanghai et Venise, suivi par 528 km (soit 9206 kgkm) de transport routier entre Venise et Altötting. Ce changement n'influe pas de manière significative sur les résultats aussi bien *cradle-to-use* que *cradle-to-grave*. En effet, la diminution maximale des impacts se fait pour l'indicateur sur la toxicité humaine : elle est de 2%. Il en va de même pour les résultats *end-point* avec une augmentation de 2,3% pour l'indicateur *cradle-to-use* sur la transformation des terres naturelles.

Dans le cas des appareils conventionnels, le transport a également été varié en voyageant de Shanghai à Marseille (15870 km) puis de Marseille à Toulouse (403 km). Les impacts dépendent ici de chaque appareil. Néanmoins, les résultats de cette variation montrent que le changement dans les valeurs des impacts est du même ordre de grandeur que pour les paraboles.

Les résultats complets de l'étude du transport du bois à partir du lieu d'assemblage de la parabole jusqu'au lieu d'utilisation sont disponibles en Annexe Tableau C-2 et Tableau C-3 pour les *mid-point* avec et sans traitement de fin de vie respectivement et Tableau C-4 et Tableau C-5 pour les *end-point* avec et sans fin de vie respectivement. Les données de l'étude pour le trajet des barres d'aluminium plus court sont disponibles en Annexe Tableau C-6 pour les *mid-point* et Tableau C-7 pour les *end-point*.

Par ailleurs, des incertitudes pourraient résider dans les quantités des matériaux et pièces composants les appareils aussi bien que dans la justesse de leur composition. Ainsi, des méthodes de caractérisation ont été utilisées pour déterminer la composition des différents matériaux après les avoir pesés précisément (10⁻² g). Les observations de microscopie électronique accompagnés de mesure de spectroscopie à énergie dispersive ont permis la caractérisation complète et fiable des pièces.

Background inventory :

Les données sélectionnées dans ecoinvent ont été choisies de manière à être cohérentes avec l'origine géographique des différents composants ou matériaux des appareils. Les incertitudes sur ces choix peuvent être discutées sur la base de l'analyse de contribution en considérant l'incertitude du plus gros contributeur au résultat final. Les contributeurs les plus importants sont listés Tableau C-8. Pour les paraboles solaires, comme montré précédemment, c'est la production d'aluminium qui contribue le plus à l'impact sur le réchauffement

climatique. Cette activité est géographiquement précise et les données qui la compose sont complètes et fiables comme expliqué par ecoinvent. L'estimation de l'intervalle d'incertitude (95,5% de confiance) est de 0,5%. Cela s'applique également aux appareils conventionnels avec moins de 7%, sauf dans le cas de composants spécifiques comme la production de l'inductance ou des résistances pour la plaque à induction qui à intervalle de 20% mais une très faible contribution (2%) à l'impact sur le réchauffement climatique (annexe Tableau C-8). Toujours pour les appareils conventionnels, la plus grosse contribution est la phase d'utilisation et ne dépend que de la production d'énergie comme l'électricité ou le gaz naturel. La production d'énergie est géographiquement précise et les données en entrée sont fiables et complètes comme montré par ecoinvent. L'intervalle d'incertitude est de 2% pour l'utilisation de l'électricité et de 20% pour le gaz naturel en France. Cependant, la plus grosse partie de l'impact sur le réchauffement climatique (77%) du bruleur n'est pas la production de gaz naturel mais sa combustion. L'ordre de grandeur de l'incertitude a été estimé pour chaque appareil : 1% pour les paraboles solaires, environ 2% pour les appareils conventionnels, 5% et 7% pour la parabole en aluminium recyclé et celle en bois et aluminium recyclé respectivement (voir en annexe Tableau C-8).

Globalement, le niveau d'incertitude reste plus faible que 10% et ne change pas le classement des appareils étudiés pour l'impact sur le réchauffement climatique.

III.4.5. Conditions des avantages écologiques des cuiseurs solaires

Les résultats de l'ACV ont été calculés pour un usage exclusif d'un des appareils. En réalité, les propriétaires de cuiseurs solaires les utilisent en complément d'au moins un appareil conventionnel, pour les jours sans éclaircie au moins. Cette partie a pour but de déterminer les conditions dans lesquelles il est avantageux d'avoir un cuiseur solaire d'un point de vue du changement climatique uniquement. Un simple calcul montre que, pour que le cuiseur solaire soit avantageux, la condition suivante doit être remplie (détail du calcul est en Annexe partie D.) :

$$x > \frac{C_{solaire}}{U_{standard}},$$

où x est la fraction de repas cuisiné avec le cuiseur solaire, $C_{solaire}$ est l'impact *cradle-to-grave* sur le changement climatique du cuiseur solaire et $U_{standard}$ est l'impact de l'utilisation d'un appareil conventionnel.

Le Tableau III-20 montre les valeurs de x pour des cuiseurs solaires construits en différents matériaux, et pour les différentes méthodes de cuisson conventionnelles dans les différents mix électriques étudiés précédemment. Les couleurs du tableau correspondent aux différentes fourchettes d'utilisation. A Toulouse en France, 45% des journées sont ensoleillées d'après Météo France [181], cela implique que la valeur de x ne peut pas dépasser 45%. Aucun des cas calculés ici n'a eu une valeur de x supérieure ou égale à 45%, ce qui montre que l'achat d'une parabole solaire est toujours intéressant d'un point de vue écologique. Les cases telles que $22,5\% < x < 45\%$ sont en orange. Ce sont les cas où acheter un cuiseur solaire fait sens, toujours d'un point des émissions de gaz à effet de serre, uniquement si le cuiseur solaire est utilisé entre un repas sur deux à tous les repas, lors des journées ensoleillées. Les cases remplies en jaune correspondent à des utilisations plus rares du cuiseur : entre un repas sur deux et

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

proche d'un repas par semaine, ce qui peut correspondre à un style de vie occidental typique (par exemple le weekend). Finalement, les cases remplies en vert correspondent à une valeur de x inférieure à 4,25%, ce qui est proche d'un repas solaire par semaine sur une année à Toulouse. A noter que, même avec une utilisation si faible, il serait intéressant d'acheter un cuiseur solaire dans deux cas : i) avec un mix électrique très carboné (mix australien dans le Tableau III-20), ii) si l'impact du cuiseur solaire est faible (les deux dernières colonnes du Tableau III-20). Finalement, les cases jaunes représentent une utilisation que nous qualifions d'assidue, avec $4,25\% < x < 22,5\%$, par ceux qui cuisineront des repas solaires aussi pendant la semaine.

Tableau III-20 : Pourcentage de plats cuisinés au-dessus duquel un foyer réduit son impact sur le réchauffement climatique en utilisant un cuiseur solaire en complément d'un appareil conventionnel. Les émissions de la construction et de l'utilisation sont exprimées en $kgCO_{2eq}$. Les calculs ont été réalisés pour des cuiseurs solaires construits en différents matériaux, pour les différents appareils conventionnels, et pour différents mix électriques. Les couleurs correspondent à différente fourchette d'utilisation : orange pour $22,5\% < x < 45\%$; jaune pour $4,25\% < x < 22,5\%$ et vert pour $x < 4,25\%$. L'ensemble des valeurs des émissions des appareils conventionnels (avec le mix français) sont disponibles Tableau A-1 en annexe. Celles des émissions de la construction des paraboles en aluminium et en bois et aluminium sont respectivement disponibles Tableau B-3 et Tableau B-4 en annexe.

		Aluminium chinois	Aluminium chinois et 35% recyclé	Bois et aluminium chinois	Aluminium canadien	Aluminium canadien et 35 % recyclé	100% aluminium recyclé	Bois et aluminium recyclé
Emissions de la construction →		264	183	178	114	87	72	58
Emissions de l'utilisation ↓								
Plaque à induction en France	762	35%	24%	23%	15%	11%	9,4%	7,6%
Plaque électrique en France	892	30%	21%	20%	13%	10%	8,1%	6,5%
Plaque à induction en Espagne	2915	9,1%	6,3%	6,1%	3,9%	3,0%	2,5%	2%
Brûleur à gaz en France	3278	8,1%	5,6%	5,4%	3,5%	2,7%	2,2%	1,8%
Plaque à induction en Allemagne	4563	5,8%	4,0%	3,9%	2,5%	1,9%	1,6%	1,3%
Plaque à induction en Australie	8402	3,1%	2,2%	2,1%	1,4%	1%	0,9%	0,7%

III.4.6. Considérations économiques et accessibilité

Ici seront rapidement discutés les aspects économiques de l'accessibilité des cuiseurs solaires en France. D'abord, en terme d'accessibilité, le cuiseur solaire en aluminium vaut 400 € [182] et celui en bois 250 €, la plaque à induction 75 € [183], la plaque électrique et le brûleur tous deux 30 € [184], [185]. De plus, pour les cuiseurs, un jeu de réflecteur vaut 139 € et, pour ceux en bois, le prix du bois de la structure est de 16 € [186]. L'investissement à l'achat est donc bien supérieur pour les cuiseurs solaires. Le coût de l'utilisation a été évalué pour chaque valeur de consommation des appareils conventionnels en France d'après les valeurs du ministère de la transition énergétique de 2021 : 0,193 €/kWh pour l'électricité et 0,077 €/kWh pour le gaz naturel [151], [187].

Le Tableau III-21 présente le prix à l'achat sur 40 ans, le prix de l'utilisation sur 40 ans et le coût annuel des appareils conventionnels, de la parabole de référence et de la parabole en bois et aluminium chinois. De plus, deux unités fonctionnelles ont été considérées : celle de référence (165 kWh/an) et celle la plus réaliste (330 kWh/an). Les calculs pour la parabole de référence avec les variations de durée de vie sont disponibles en Annexe Tableau E-1.

Les résultats montrent clairement que, même si l'investissement à l'achat des cuiseurs solaires est nettement supérieur, pour notre unité fonctionnelle, le coût annuel est plus faible pour les cuiseurs solaires. Pour les cuiseurs conventionnels c'est le brûleur à gaz qui coûte le moins cher en raison du prix du gaz qui est 2,5 fois inférieur à celui de l'électricité, ainsi que du prix à l'achat qui est aussi plus faible. Les résultats montrent aussi que l'utilisation de la plaque électrique revient plus cher que celle de la plaque à induction bien que le prix d'achat de cette dernière soit plus de 2 fois supérieur. Cette différence est due à la différence de rendement des deux appareils.

Lorsque l'unité fonctionnelle plus réaliste est considérée, la différence de coût annuel entre les cuiseurs solaires et les appareils conventionnels s'accroît logiquement puisque seuls les appareils conventionnels ont une phase d'utilisation payante.

En considérant les différentes durées de vie de la structure en aluminium de la parabole de référence la tendance change pour notre unité fonctionnelle. En effet, avec une durée de vie de 20 ans le coût annuel de la parabole monte à 27 €/an et à 40 €/an pour une durée de vie de 10 ans (voir Annexe Tableau E-1). Dans ces cas, l'utilisation du brûleur à gaz est avantageuse d'un point de vue économique. Cependant, lorsque l'on considère l'unité fonctionnelle réaliste, le coût annuel des appareils conventionnels redevient nettement supérieur à celui des paraboles solaires peu importe la durée de vie de celles-ci.

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

Tableau III-21 : Considérations économiques pour les appareils conventionnels et les cuiseurs solaires.

		Investissement à l'achat total (€)	Coût d'utilisation sur 40 ans (€)	Coût annuel (€/an)
Unité fonctionnelle de référence : 165 kWh/an	Plaque à induction	300	1724,5	50,6
	Plaque électrique	120	2020,4	53,5
	Brûleur à gaz	60	988,1	26,2
	Cuiseur solaire de référence	817		20,4
	Cuiseur solaire en bois et aluminium chinois	745		18,6
Unité fonctionnelle la plus réaliste : 330 kWh/an	Plaque à induction	300	3449	93,7
	Plaque électrique	120	4041	104
	Brûleur à gaz	60	1976,2	50,9
	Cuiseur solaire de référence	817		20,4
	Cuiseur solaire en bois et aluminium chinois	745		18,6

III.5. Conclusion

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée et reconnue qui permet d'identifier les lieux les plus impactants du cycle de vie d'un produit et de proposer des pistes d'amélioration. Cette méthode se déroule en 4 étapes : définition d'un objectif, définition du champ d'étude, réalisation de l'inventaire de cycle de vie et calcul des impacts et interprétations. L'utilisation de l'ACV permet aussi la comparaison de plusieurs produits remplissant la même fonction de référence sur la base d'une unité fonctionnelle (UF) qui quantifie cette fonction. Ici, l'objectif était de comparer des appareils de cuisson conventionnels (plaque à induction, plaque électrique et brûleur à gaz) avec des cuiseurs solaires pour la fonction de référence de fournir de la chaleur et pour l'unité fonctionnelle qui quantifie l'énergie nécessaire pour chauffer 2 L d'eau de 25 °C à 90 °C, 3 fois par jour, tous les jours pendant 40 ans en utilisant la casserole adaptée à chaque technologie avec un couvercle. Afin d'avoir une étude la plus juste et concrète possible la réalisation de l'inventaire s'est fait en démontant et pesant tous les composés des appareils. Par ailleurs, il a été nécessaire de réaliser des tests d'ébullition pour remonter aux rendements des appareils conventionnels et donc, à leur consommation. Une fois l'inventaire complet, la modélisation et les calculs d'impacts ont été

réalisés à l'aide du logiciel Umberto LCA+ et de la méthode ReCiPe avec la perspective culturelle hiérarchisée (Cf partie I.4.2.4.2, page 90) pour les approches problème et dommage (*mid-point* et *end-point*). De cette analyse les points suivants ont pu être conclus :

- L'influence de l'origine de l'aluminium sur les impacts et dommages environnementaux est importante. Lorsque l'aluminium produit en Chine est remplacé par celui produit au Canada ou par un aluminium recyclé les impacts diminuent fortement (jusqu'à un facteur 10 au maximum).
- Lorsque du bois est utilisé pour la structure de la parabole, les impacts et les dommages diminuent de nouveau, mis à part l'indicateur *end-point* et *mid-point* sur l'occupation des terres agricoles qui augmente fortement en raison de la production du bois.
- Parmi tous les appareils étudiés, les plus impactants d'un point de vue *mid-point* sont la plaque électrique et le brûleur à gaz qui se répartissent les indicateurs (13 indicateurs pour la plaque électrique et 4 pour le brûleur), seul l'indicateur sur les terres agricoles n'est pas dominé par ces appareils mais par la parabole réalisée en bois et en aluminium produit en Chine. Pour l'approche dommage, c'est le brûleur à gaz qui a, de loin, le dommage total le plus élevé. Ces conclusions sont valables quand les appareils conventionnels sont utilisés en France.
- Les cuiseurs conventionnels ont toujours des impacts *mid-point* plus importants que les cuiseurs solaires principalement en raison de l'énergie utilisée pendant leur phase d'utilisation. En revanche, si seule la phase de construction est considérée leurs impacts *mid-point* sont plus faibles ou de l'ordre de celui des paraboles.
- Le traitement de fin de vie diminue les impacts et dommages des paraboles solaires pour presque tous les indicateurs, mise à part l'écotoxicité marine et en eaux douces en raison du traitement de l'aluminium. Pour le cuiseur réalisé en bois et en aluminium les indicateurs qui ne diminuent pas sont plus nombreux. Ces résultats montrent que l'impact du traitement de fin de vie est plus important lorsque des matériaux primaires et non renouvelables sont utilisés. Dans le cas des appareils conventionnels, le traitement de fin de vie n'a pas d'influence sur les tendances globales des résultats. Seuls quelques indicateurs font exceptions : l'écotoxicité marine, terrestre et en eaux douces augmente en raison des traitements des déchets métalliques alors que ceux sur l'appauvrissement en métaux et de formation de particules diminuent grâce aux productions de matière première évitées par le recyclage.
- Les conclusions précédentes ont été tirées avec le mix électrique français donc avec une faible intensité carbone en raison de l'utilisation d'énergie nucléaire. Les impacts de la plaque électrique et de la plaque à induction sont fortement modifiés si un autre mix électrique est pris lors de l'utilisation. Dans ces cas, la phase de construction des appareils électriques devient négligeable devant l'impact total (1% avec le mix électrique australien). Les autres paramètres qui ont été variés lors de l'étude de sensibilité sont la valeur de l'unité fonctionnelle et la durée de vie de la structure en aluminium. Dans le premier cas, des valeurs d'unité fonctionnelle plus proches de la réalité ont été étudiées et les résultats montrent un avantage des cuiseurs solaires grandissant avec la valeur de la consommation annuelle. Seule une consommation proche du quart d'une consommation typique d'un foyer français permet d'avoir des impacts du solaire du même ordre de grandeur que ceux des appareils électriques. Ceux du brûleur à gaz restent supérieurs pour toutes les consommations. Dans le second cas, la durée de vie de la structure influe fortement sur les résultats *cradle-to-use* de la parabole de référence. Par exemple l'impact sur le réchauffement climatique va jusqu'à augmenter d'un facteur 2,5 quand la durée de vie est

Procédé solaire à basse température : Analyse de Cycle de vie (ACV) des différentes méthodes de cuisson

de 10 ans. Cependant, lorsque les limites *cradle-to-grave* sont considérées, l'impact n'augmente que peu et ne change pas le classement des appareils.

- Une utilisation régulière du cuiseur solaire permet la réduction des impacts même lorsque l'on considère la parabole de référence faite en aluminium d'origine chinoise. Cependant, le soleil n'est pas forcément disponible partout et tout le temps, donc une technologie complémentaire est souvent nécessaire. Dans ces cas, l'utilisation de la parabole solaire peut entraîner une augmentation de l'impact si l'intensité carbone du mix électrique est faible. A l'inverse si l'intensité carbone du mix est élevée alors la parabole offre toujours un avantage.
- D'un point de vue économique, les cuiseurs solaires sont presque toujours avantageux. Bien que leur coût initial soit bien plus élevé, le fait que la phase d'utilisation ne génère aucun coût permet un coût global bien plus faible sur 40 ans. Le seul cas pour lequel le cuiseur n'est pas avantageux est lorsque la valeur de l'unité fonctionnelle est de 165 kWh/an et que sa durée de vie est considérée de 10 ans. Dans ce cas, son coût annuel est plus élevé que celui du brûleur à gaz.

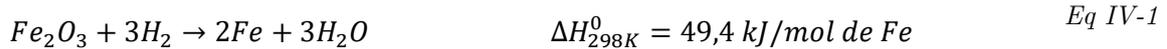
Grâce à l'ensemble de ces conclusions, il est possible de statuer que l'utilisation d'une parabole solaire pour la cuisine offre presque tout le temps un avantage écologique devant l'utilisation d'un appareil conventionnel. Cependant, pour que le solaire à concentration soit utilisé il est nécessaire d'avoir un espace extérieur suffisamment grand pour accueillir un cuiseur. Il est également nécessaire de changer ses habitudes de cuisine pour pouvoir utiliser au mieux le cuiseur. En effet, l'intermittence de l'énergie solaire et sa disponibilité variable nécessite un changement dans l'utilisation en organisant la cuisine autour de la disponibilité du solaire.

D'un point de vue plus large, il a été montré que pour un procédé basse température n'utilisant que peu d'énergie le solaire à concentration permettait la réduction de l'impact de ce procédé. La disponibilité de sa ressource et sa facilité de mise en œuvre lui offre un gros potentiel à travers le monde. Comme expliqué dans la partie I.3.1 (page 55), le solaire à concentration peut être utilisé pour d'autres procédés basse température utilisant de l'énergie thermique comme la mise en conserve de produits alimentaires, la stérilisation de liquides, la pasteurisation ou encore la production d'eau chaude domestique. Dans tous ces cas, étant donné que l'énergie thermique est généralement produite à partir d'électricité ou de ressources fossiles, le solaire reste une alternative intéressante pour diminuer l'impact écologique, d'autant plus si l'électricité est elle-même produite à partir de ressources fossiles. Par ailleurs, comme montré dans cette étude, c'est le fait que la phase d'utilisation ne consomme pas d'énergie qui permet d'avoir des impacts et dommages écologiques bien plus faibles. Ainsi, il est possible de faire l'hypothèse que dans le cas de procédés consommant de grandes quantités d'énergie, le gain écologique sera toujours présent même si l'installation solaire sera nettement plus grande. Par conséquent, le solaire permet de réduire l'impact écologique de la production d'énergie, donc représente une alternative intéressante pour une société pérenne. Il est cependant important de garder en tête que l'utilisation du solaire implique un changement dans l'intensité de la production puisque la ressource est intermittente, et donc un certain niveau de sobriété.

Chapitre IV. Procédé solaire à haute température : Expériences

IV.1. Introduction

L'analyse de cycle de vie s'inscrit dans la démarche d'évaluation des impacts environnementaux du solaire à concentration et a pour but d'étudier un procédé solaire à concentration basse température. Comme expliqué dans la partie I.3.1 (page 55), les procédés solaires à concentration ont également vocation à être utilisés pour des procédés à haute température comme la métallurgie, cf. partie I.3.1.4 (page 65). En effet, la réduction de minerai de fer sous hydrogène est une réaction qui est connue et qui permet de drastiquement réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elle se déroule selon l'équation principale ci-dessus :



Les expériences ont consisté en la réduction de minerai de fer sous un flux lumineux avec le dispositif expérimental présenté partie II.1 (page 109). Dans cette partie, il est important de noter que toutes les pressions présentées ici sont exprimées en pression relative et non absolue.

Ce chapitre aura pour but de présenter les principaux résultats de ces expériences. Dans un premier temps, les résultats d'expériences de réduction sous hydrogène seront présentés, suivis par ceux sous ammoniac. Enfin, des résultats préliminaires de réduction de l'urée sous flux lumineux seront présentés.

IV.2. Réduction sous hydrogène

Dans un premier temps, des tests préliminaires sur poudre ont été réalisés pour observer le déroulement des réductions. Ensuite, plusieurs paramètres ont été variés pour essayer de caractériser la réduction. Finalement, plusieurs expériences ont été réalisées pour optimiser le temps de réduction. C'est dans cet ordre que seront articulées les prochaines parties.

IV.2.1. Tests préliminaires sur poudres

IV.2.1.1. Diffraction de rayons X *in situ*

Afin d'avoir une base d'expériences de réduction dans des conditions connues et contrôlées avant de réaliser des réactions sous flux lumineux, nous avons réalisé des expériences de diffraction de rayons X *in situ* à l'aide d'une chambre réactionnelle. Le montage est présenté dans la partie II.2.1, page 111.

Deux types d'analyses complémentaires ont été réalisées : des rampes et des plateaux de température. Ces deux analyses ont toutes deux été réalisées dans une atmosphère d'hydrogène et d'azote dans un ratio 5:95%_{mol} sous 1 bar de surpression.

Rampe : L'analyse en rampe consiste à étudier l'évolution des phases d'un échantillon en fonction de la température. Pour ce faire, la montée en température de la chambre réactionnelle est étagée et des acquisitions longues sont réalisées à des températures données. Il sera donc possible d'observer les phases présentes dans l'échantillon pour chaque température à laquelle les scans sont réalisés.

La rampe a été réalisée à partir de 30 °C jusqu'à 800 °C avec une montée en température de 150 °C/min ; deux scans sont réalisés à 30 °C avant et après la rampe afin d'avoir les compositions initiales et finales de l'échantillon à température ambiante. La rampe est composée de deux parties distinctes : de 30 °C à 400 °C et de 400 °C à 800 °C. Dans la première, un scan est réalisé tous les 100 °C et dans la seconde les scans sont réalisés tous les 50 °C. Le profil des températures d'une rampe est présenté Figure IV-1. Ici, chaque scan a une durée de 50 min, cette durée a été choisi pour permettre d'observer l'ensemble des phases à la température où le scan est réalisé. Au total, 14 scans ont été réalisés pour une durée totale de l'analyse de 850 min. Les paramètres utilisés sont ceux présentés dans la partie II.2.1, Tableau II-1 à droite (page 112).

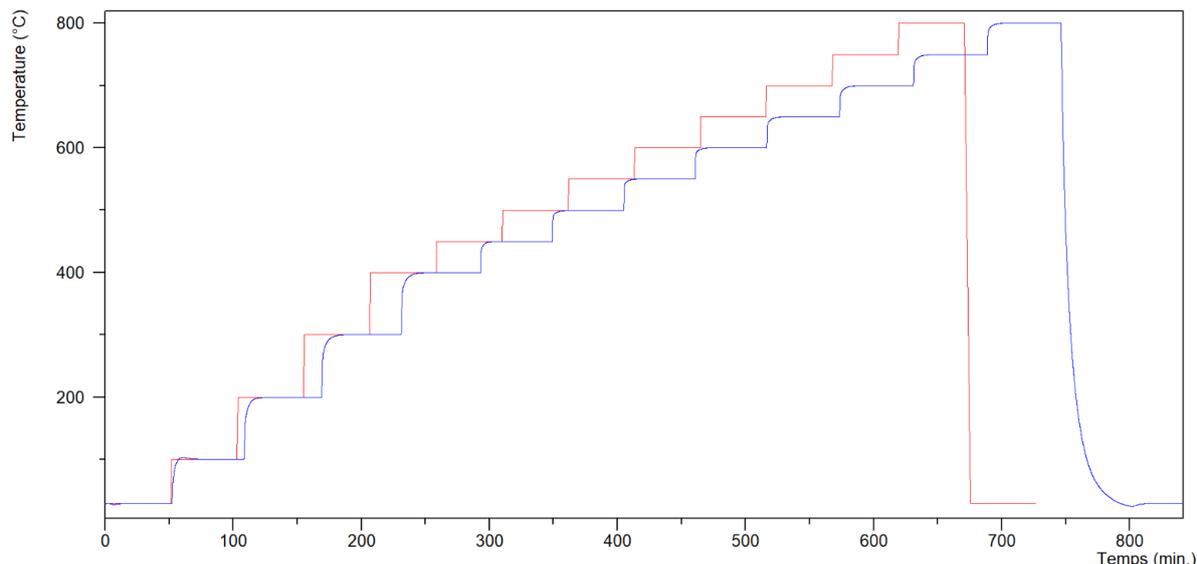


Figure IV-1 : Profil de l'évolution des températures lors d'une étude de DRX in situ en rampe entre 30 °C et 800 °C avec en rouge la consigne et en bleu les températures mesurées.

Les résultats de cette analyse sont présentés Figure IV-2. Ils montrent plusieurs changements de phase. Entre 30 °C et 200 °C aucun changement n'est observé : seule est présente la phase d'hématite initiale. Ensuite, à 300 °C, il est possible de voir l'apparition de la phase de magnétite qui devient majoritaire à 400 °C. A cette température, le diffractogramme retranscrit l'apparition de la phase de fer. A 450 °C, la phase de magnétite s'observe en quantité largement moindre qu'avant pour laisser place à la phase de fer. Cette dernière devient la seule phase ferreuse à partir de 500 °C. Il est également possible de détecter une phase de quartz dans certains diffractogrammes.

Cette analyse permet de dire que la transformation de l'hématite vers la magnétite se fait à basse température (aux alentours de 300 °C) et que l'apparition de la phase de fer est également possible à basse température (à partir de 400 °C). De plus, l'absence de wuestite est observée, ce qui est cohérent avec la littérature puisque l'échantillon est totalement transformé en fer à 500 °C donc avant 570 °C. En effet, dans la littérature il est montré que la wuestite n'est pas une phase stable en dessous de 570 °C et que dans ce cas la réduction produit du fer directement depuis la magnétite [47]. A noter que lorsque l'échantillon redescend en température (diffractogramme non affiché), aucun changement de phase n'est observé.

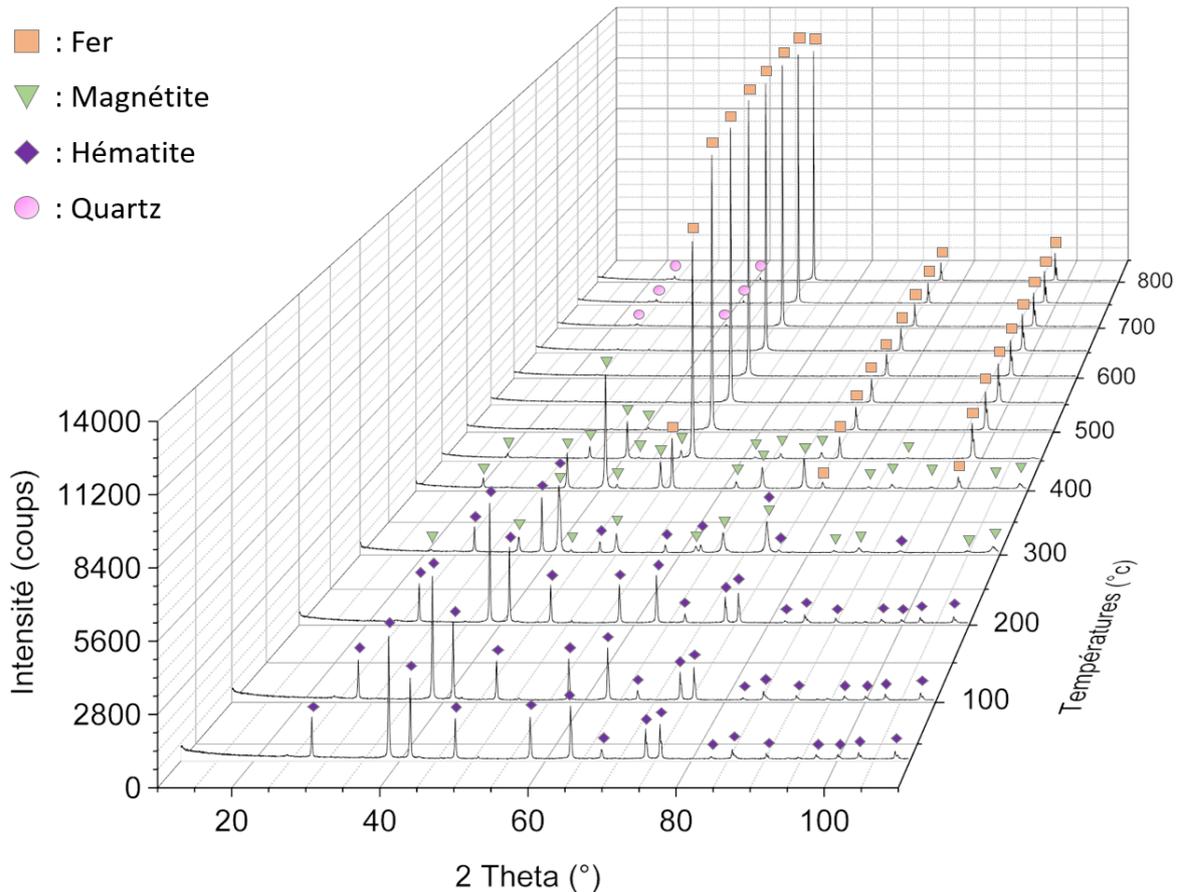


Figure IV-2 : Diffractogrammes de l'analyse de réduction d'une poudre d'hématite pure à 98% sous une atmosphère d' H_2/N_2 à 5:95 % $_{mol}$ dans une rampe de température allant de 30 °C à 800 °C. Les phases sont l'hématite (losange violet), la magnétite (triangle vert), le fer (carré orange) et le quartz (rond rose).

Plateaux : Les plateaux ont pour but d'observer l'évolution des phases de l'échantillon à une température donnée et donc d'avoir une idée de la cinétique de réduction. L'échantillon est donc rapidement monté en température puis est maintenu à cette température pendant que plusieurs scans s'enchaînent, sachant qu'un scan dure 20 min. Il sera donc possible d'observer l'évolution des phases en fonction du temps.

Les plateaux ont été réalisés avec de la poudre pure d'hématite (Fe_2O_3) dans un premier temps et de la poudre de pellet de minerai de fer dans un second temps. Pour la poudre pure, les températures des plateaux réalisés ont été de 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C et 550 °C ; les évolutions des phases lors de ces plateaux sont respectivement présentées dans les Figure IV-3-a-e. Tout d'abord, une observation est commune à toutes les températures : l'hématite disparaît entre le début de la réaction et les 20 premières minutes, ce qui confirme la rapidité de transformation observée Figure IV-2 et dans la littérature. Ensuite, ces résultats permettent de montrer que la phase de fer est présente dès 350 °C après 60 min de réaction ; sa quantité augmente de manière linéaire pour atteindre un maximum proche de 11%, le reste étant de la magnétite. A 450 °C, l'augmentation de la phase de fer est nettement plus rapide puisque cette dernière est présente dès 20 min de réduction et devient majoritaire à environ 90 minutes de réaction. En fin d'expérience, le fer représente 80,5%, complété par 19,5% de magnétite. L'augmentation de la phase de fer est de plus en plus rapide avec l'augmentation de la température : la conversion est totale après 80 min à 500 °C, et après 40 min à 550 °C. A cette

température, il est également possible d'observer l'apparition de wuestite en faible quantité (11%) après 20 min de réduction, mais elle disparaît directement puisqu'elle n'est pas stable à cette température [47].

Ces expériences nous permettent de retrouver les principales conclusions de la littérature qui sont que la transformation de l'hématite vers la magnétite est très rapide, que la cinétique de réduction dépend fortement de la température et que la phase de wuestite n'est pas stable à ces températures. Il est également possible d'observer que la cinétique reste lente même à 550 °C puisque la phase de fer n'est majoritaire qu'après 40 min de réduction de la poudre.

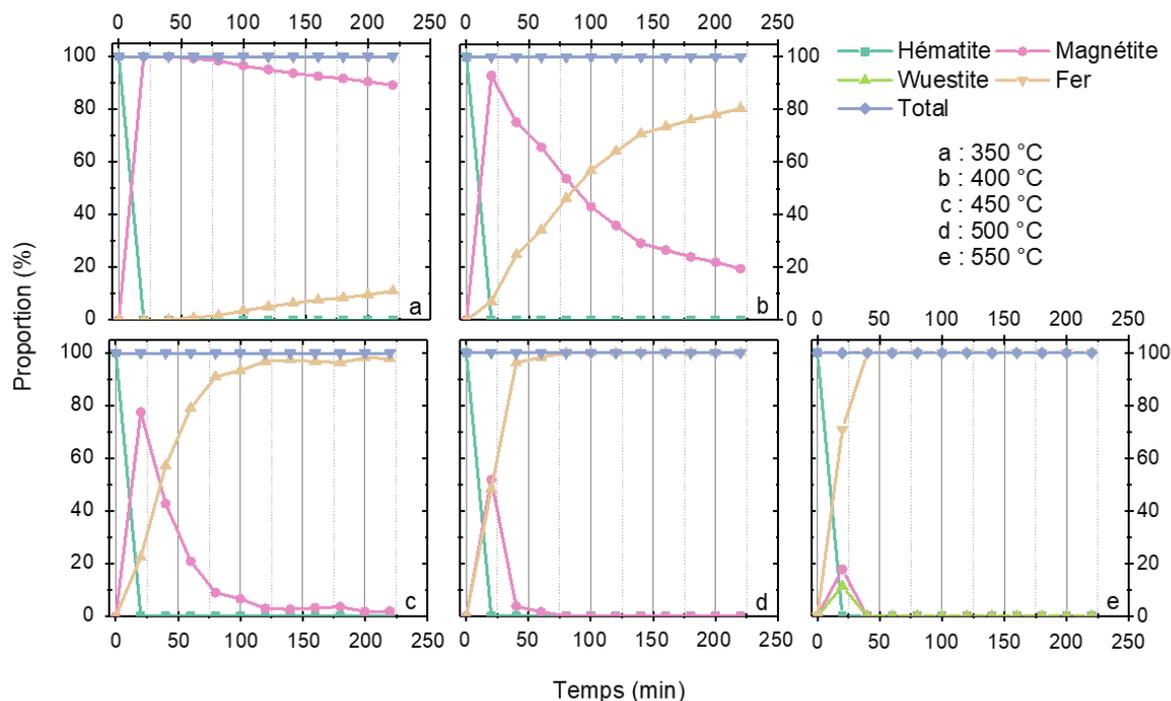


Figure IV-3 : Résultats des analyses de plateau de DRX in situ à (a) 350 °C, (b) 400 °C, (c) 450 °C, (d) 500 °C et (e) 550 °C pour la réduction de poudre d'hématite pure sous hydrogène. Les phases identifiées sont l'hématite (vert), la magnétite (rose), la wuestite (vert) et le fer (orange). Le total des phases est représenté en bleu.

Ensuite, pour ce qui est de la poudre industrielle, les plateaux ont été réalisés à 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C et 700 °C. Lors de ces expériences, le plateau à 350 °C a été exclu, l'évolution de phase observée avec la poudre pure n'étant pas significative. En revanche, des températures supplémentaires ont été étudiées pour observer l'évolution de la cinétique pour des températures plus proches de celles auxquelles les réductions sont classiquement réalisées. De plus, entre 600 °C et 700 °C, un ralentissement a été observé par Turkdogan et Vinters ce qui a également justifié les températures supplémentaires [51]. L'évolution des phases pour différentes températures est présentée Figure IV-4-a-g. A 400 °C, il est possible de voir que la transformation de l'hématite en magnétite est lente puisque même après 240 min de réduction, l'hématite n'est pas complètement transformée. En effet, après le plateau, il reste près de 1,5% d'hématite, le reste étant majoritairement de la magnétite (95,7%) et du fer. Ensuite, à 450 °C, l'hématite a complètement disparu après 80 min de réduction et il est également possible de voir que l'évolution de la phase de fer est quasi-linéaire pour atteindre 27,4% au maximum. Les tendances sont similaires à 500 °C, sauf que l'hématite a disparu après 20 min de réduction et que le fer atteint 35,8% à la fin du plateau. A partir de

550 °C l'apparition de la wuestite est observée mais, comme pour la poudre industrielle, elle disparaît vite car instable : elle n'a donc aucun effet sur la cinétique. Dans ce cas, la phase de fer atteint 94,3%, le reste étant de la magnétite. Ensuite, à 600 °C, un changement est observé puisqu'à la fin du plateau il ne reste que du fer (95,8%) et de la wuestite (4,2%) ; c'est à cette température que le fer atteint son taux de réduction maximal. A 650 °C et 700 °C, un ralentissement de la cinétique est observé en parallèle d'une nette augmentation de la quantité de wuestite. Les quantités de fer sont respectivement de 87,4% et 87,6% pour 650 °C et 700 °C. Par ailleurs, il est possible de voir qu'après 20 min de réduction, la quantité de wuestite à 700 °C est plus importante qu'à 650 °C avec 48,8% et 43,5% respectivement.

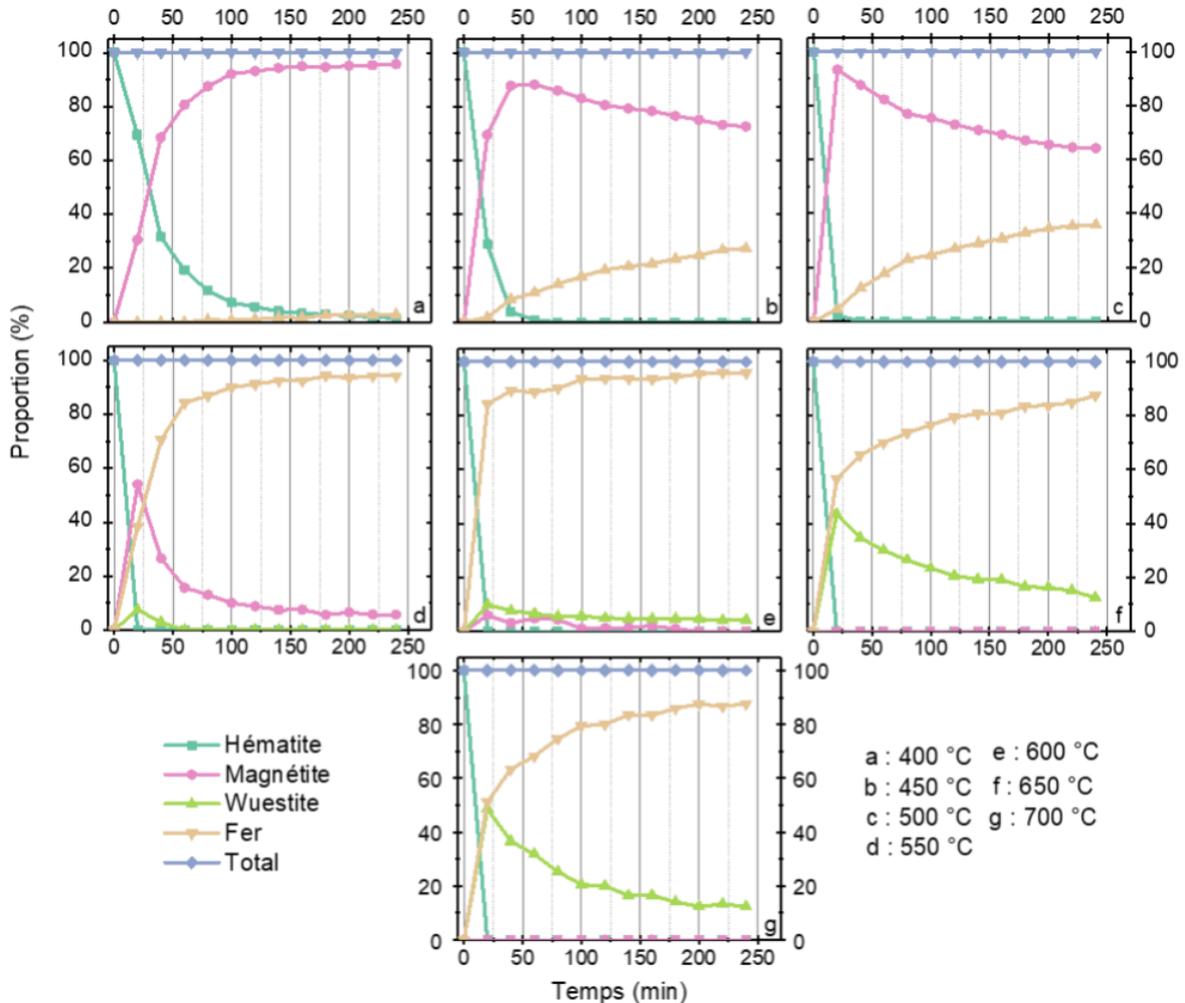


Figure IV-4: Résultats des analyses de DRX *in situ* pour des plateaux de température de (a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C, (d) 550 °C, (e) 600 °C, (f) 650 °C et (g) 700 °C pour la réduction de poudre d'hématite industrielle sous hydrogène. Les phases identifiées sont l'hématite (vert foncé), la magnétite (rose), la wuestite (vert clair) et le fer (jaune). Le total des phases est représenté en bleu.

Ces expériences nous permettent d'observer que la cinétique de réduction avec la poudre de pellet est plus lente qu'avec la poudre pure. En effet, à 400 °C par exemple, 80,5% de fer sont trouvés après 220 min de réduction avec la poudre pure et seulement 2,3% avec la poudre industrielle. De plus, aucune des températures ne permet de réduire complètement la poudre industrielle alors que la poudre pure est complètement réduite à 500 °C et 550 °C. Cela peut être dû aux différences de dimension entre les particules puisque la poudre industrielle est

micrométrique et celle industrielle est réalisée avec un pilon et un mortier donc sa taille est plus importante.

Par ailleurs, comme avec la poudre pure, l'apparition de la wuestite se produit à 550 °C et elle disparaît rapidement en raison de son instabilité. Dans le cas de la poudre industrielle, la wuestite ne disparaît pas et ralentit fortement la cinétique. Néanmoins, la quantité de fer finale reste plus importante à 700 °C qu'à 650 °C ; cela montre que le ralentissement dû à la wuestite est compensé par l'accélération due à l'augmentation de températures. Ce type de ralentissement de la cinétique de réduction à petite taille a déjà été observé dans la littérature [51].

Les expériences de DRX *in situ* nous ont permis de reproduire les résultats principaux de la littérature ainsi que de montrer que la réduction à basse température est effectivement possible. La suite de cette partie portera sur la réduction de minerai sous flux lumineux concentré.

IV.2.1.2. Réduction de poudre sous irradiation

Les premières expériences solaires ont été réalisées sur de la poudre sous flux lumineux concentré en utilisant le banc de test solaire présenté partie II.1 (page 109), l'objectif est de réaliser les réglages préalables à la réduction des pellets. La Figure IV-5 présente le schéma optique du banc de test solaire. Il est possible de remarquer le premier foyer (F1) proche du sommet du miroir et le second (F2) de l'autre côté.

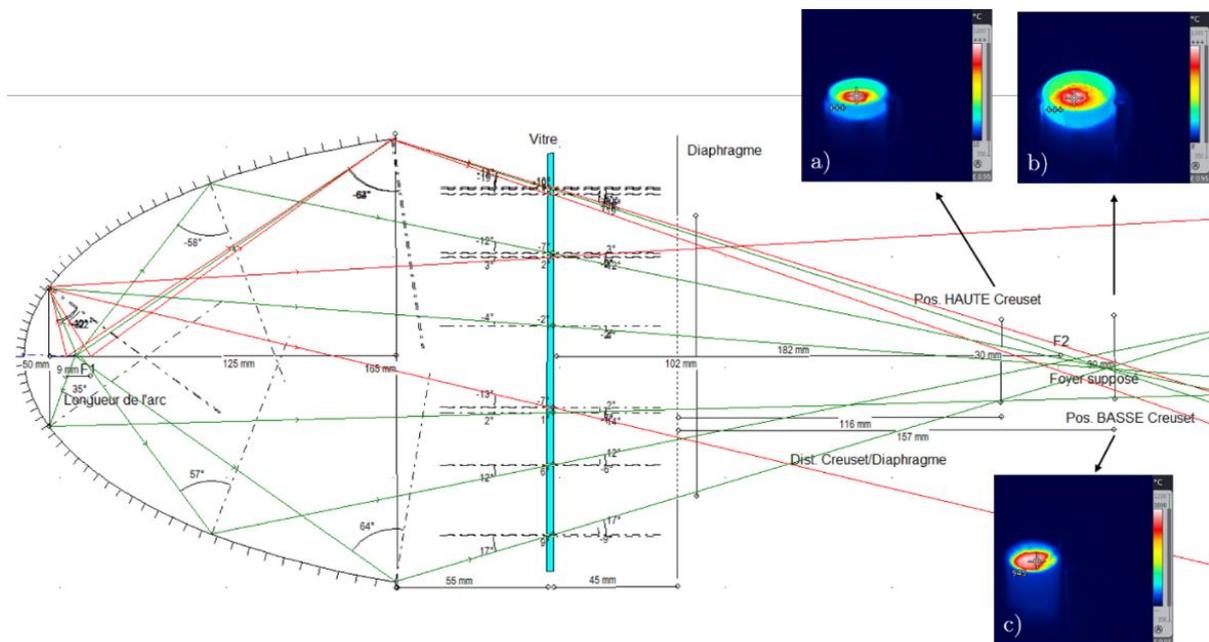


Figure IV-5 : Schéma optique du simulateur solaire ainsi que photo thermique d'un creuset de diamètre 30 mm de diamètre en position (a) haute et (b) basse. (c) Photo thermique d'un creuset de 20 mm de diamètre en position basse.

La source lumineuse étant un arc les rayons lumineux ne convergent pas en un point mais en une tache au second foyer. Afin d'avoir une irradiation du creuset la plus homogène possible, deux positions ont été déterminées grâce au schéma pour éclairer le creuset de manière

plus homogène que s'il était placé au foyer où la tâche est plus petite : la position haute légèrement au-dessus du foyer et la position basse légèrement en dessous. L'image thermique du creuset placé à la position haute est présentée Figure IV-5-a et celle à la position basse Figure IV-5-b.

Il est possible de remarquer qu'aussi bien en position haute que basse, pour le grand creuset (diamètre 30 mm), l'entière du creuset est éclairée mais pas de façon complètement homogène, comme le montre la variation de température dans le diamètre. Il est également possible de voir que le maximum de température est supérieur à 1200 °C, qui est la limite de la caméra. Si un creuset plus petit est utilisé (diamètre 20 mm) l'observation à la caméra thermique (Figure IV-5-c) montre une irradiation bien plus homogène.

Afin de mieux observer la différence de température en fonction de la position choisie nous avons mesuré la température sous le creuset aux trois positions ; les mesures sont présentées Figure IV-6. Sur ces mesures il est possible de voir une nette différence de température entre les positions. La température à la position focale est logiquement la plus élevée avec un maximum de 416 °C après 16,3 min d'exposition. A ce moment la température à la position basse est de 395 °C environ soit 21 °C d'écart et de 359 °C pour la position haute soit 57 °C d'écart. Il est donc plus intéressant de se positionner à la position basse afin d'avoir une température la plus élevée possible.

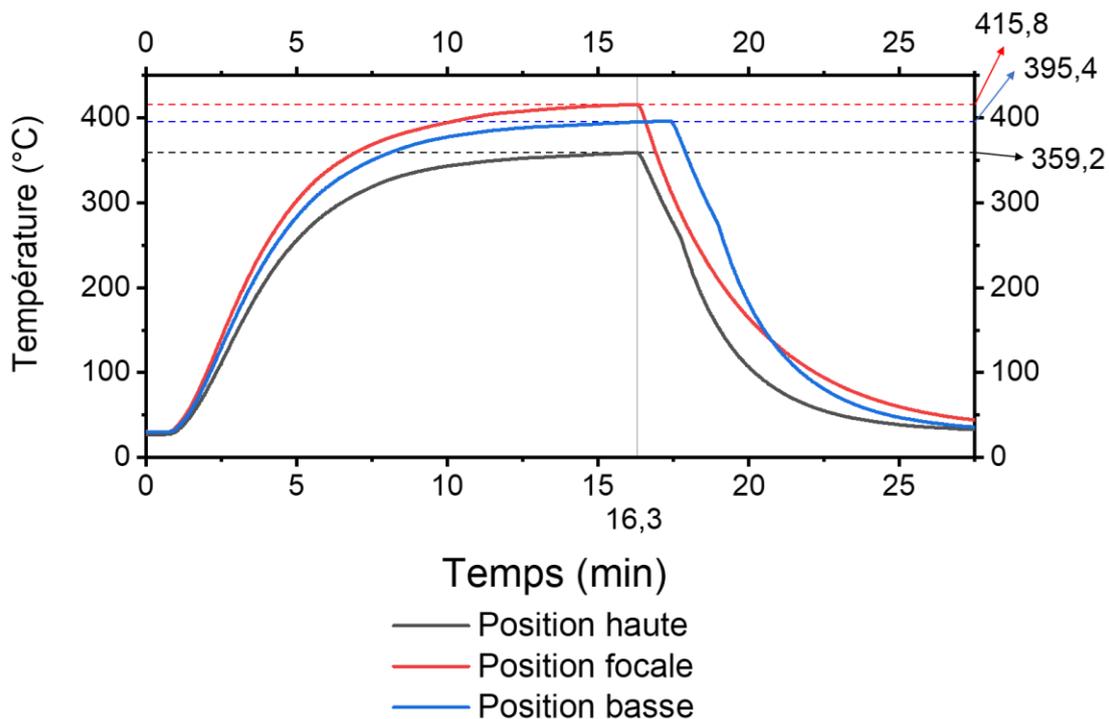


Figure IV-6 : Evolution de la température sous le creuset pour la position haute (noir), focale (rouge) et basse (bleu).

Une fois la position du creuset déterminée, nous avons réalisé les premières réductions sous hydrogène de poudre d'hématite pure sous un flux lumineux faible. Lors de ces expériences, deux problématiques se sont posées : un gradient de température dans l'échantillon et la réoxydation de la poudre.

Gradient de température :

Lors de ces réactions nous avons remarqué que la réduction du fer ne se faisait que sur une très faible épaisseur de poudre, grâce au changement de couleur de la poudre de rouge (oxyde) à gris (fer réduit) Cela peut être dû à la mauvaise diffusion du gaz dans l'échantillon ou à la mauvaise diffusion thermique. La première étant difficile à mesurer nous avons réalisé des expériences afin d'observer la diffusion thermique.

Pour ce faire, un creuset a été percé sur le côté en haut et en bas de sa hauteur ; les trous étaient à 9 mm l'un de l'autre puis il a été rempli avec de la poudre d'hématite pure. Les trous latéraux ont été faits de manière à mesurer la température juste sous la surface de la poudre irradiée et au niveau du fond du creuset. La Figure IV-7 présente un schéma des positions des thermocouples.

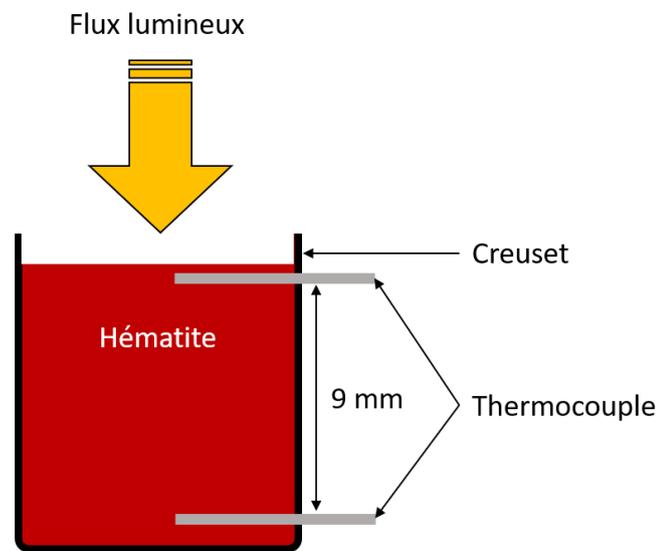


Figure IV-7 : Représentation schématique du creuset utilisé pour la mesure du gradient de température ainsi que la position des thermocouples.

La poudre a été exposée pendant environ 48 min afin d'atteindre l'équilibre en température. De plus, afin de rester dans une gamme de températures mesurables, notamment au sommet du creuset, la puissance du flux lumineux était de 24 W₁. Les résultats des mesures sont présentés Figure IV-8 avec la température mesurée au sommet du creuset en rouge et celle au fond en noir. De plus, la Figure IV-8 présente la mesure de la température sous le creuset en bleu ainsi qu'une mesure pyrométrique de la surface de la poudre en vert. Ces mesures montrent que, d'après le pyromètre, la température à la surface de la poudre est très élevée, elle dépasse 900 °C en environ 30 s, ensuite la mesure s'arrête puisque l'on dépasse la température maximale de fonctionnement du pyromètre.

A première vue, il est aussi possible de remarquer que l'augmentation de la température est nettement supérieure au sommet du creuset avec une température maximale de 812 °C contre 292 °C au fond du creuset. Les mesures montrent aussi que le plateau est logiquement atteint légèrement plus tard au fond qu'au sommet du creuset et que la redescente en température est nettement plus rapide au sommet du creuset. La différence de température entre les deux zones est donc de 520 °C sur une distance de 9 mm, soit 58 °C/mm. Ceci implique qu'il est nécessaire de réduire l'épaisseur de l'échantillon pour permettre la réduction.

De plus, il est possible de voir que le creuset isole thermiquement la poudre puisque la température maximale atteinte sous ce dernier est inférieure d'environ 117 °C.

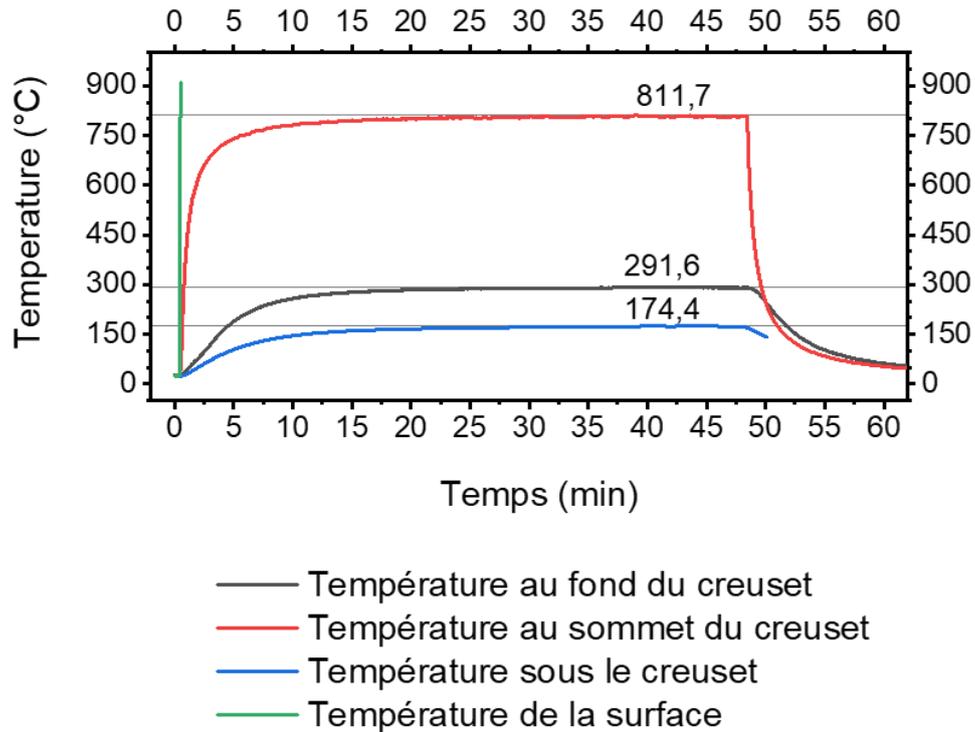


Figure IV-8 : Evolution de la température en fonction du temps à la surface de la poudre (vert), au sommet du creuset (rouge) au fond du creuset (noir) et sous le creuset (bleu).

Réoxydation :

Lors de la réduction des poudres nous avons remarqué que lorsque la poudre est remise dans l'atmosphère ambiante sa température augmente. Pour vérifier cette observation nous avons réalisé une réduction sous hydrogène d'un creuset plein de poudre d'hématite pure jusqu'à atteindre une température stable. Ensuite, l'échantillon a été refroidi sans changement d'atmosphère jusqu'à environ 35 °C. Et, comme le montre la Figure IV-9, lors de la remise en atmosphère ambiante, une forte augmentation de la température est observée, montant jusqu'à environ 205 °C. Cette montée en température témoigne d'un dégagement de chaleur de l'échantillon. L'explication la plus probable est que lors de la remise en atmosphère ambiante, la surface des particules se réoxyde et, étant donné que cette réaction est exothermique, cela augmente sa température. Cette chaleur transmise jusqu'au cœur de la particule et permet sa réoxydation. Cette observation permet de dire que l'utilisation de poudre micrométrique n'est pas adaptée à la réduction directe, ou nécessite des précautions pour éviter une réoxydation spontanée.

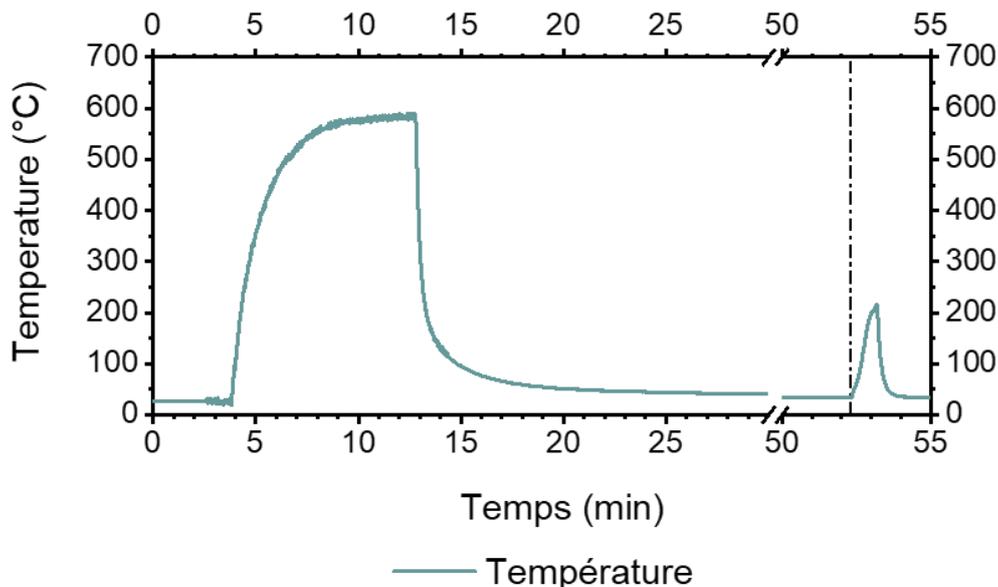


Figure IV-9 : Evolution de la température de la poudre en fonction du temps et effet de la remise de l'échantillon à l'atmosphère ambiante. La réouverture correspond à la ligne pointillée verticale.

Grâce aux expériences préliminaires deux observations majeures peuvent être faites. La première est que l'utilisation du flux lumineux concentré et orienté (arrivant du haut) induit un fort gradient de température entre le sommet et le fond de l'échantillon. La seconde est que l'utilisation de particules fines, bien qu'elles améliorent la cinétique à haute température comme montré dans la littérature, n'est pas adaptée à la réduction en raison d'une réoxydation. Il est donc nécessaire de changer de format d'échantillon. Pour ce faire, nous avons réalisé des réductions sur des pellets de minerai et sur des graviers réalisés à partir des pellets.

IV.2.2. Réduction de pellets et influence de la pression, du temps de réduction et de la puissance de la lampe

Dans cette partie, nous présenterons les réductions effectuées sur les pellets fournis par ArcelorMittal.

Nous avons d'abord réduit sous 3,5 bars d'hydrogène un pellet de 1,7 g pendant 28 minutes sous 318 W₁ (watt lumineux), ce qui correspond à 85,6% de la puissance de la lampe qui est son réglage par défaut. L'échantillon a ensuite été réduit en poudre et analysé par diffractométrie aux rayons X. Un affinement de Rietveld nous a permis de calculer un taux de réduction de 83,8%. Dans cet échantillon, les phases présentes en fin de réduction étaient le fer, la wuestite et la magnétite.

Par ailleurs, comme le flux lumineux est concentré et orienté sur le sommet du pellet, les conditions de réduction sont drastiquement différentes d'un four classique. Nous avons donc coupé en deux des pellets à différents moments de réduction pour observer l'aspect de la réduction et son avancement. La Figure IV-10 présente les photos des deux pellets de minerai réduits 2 min (gauche) et 7 min (droite) sous 2 bars d'hydrogène et sous 329 W₁.

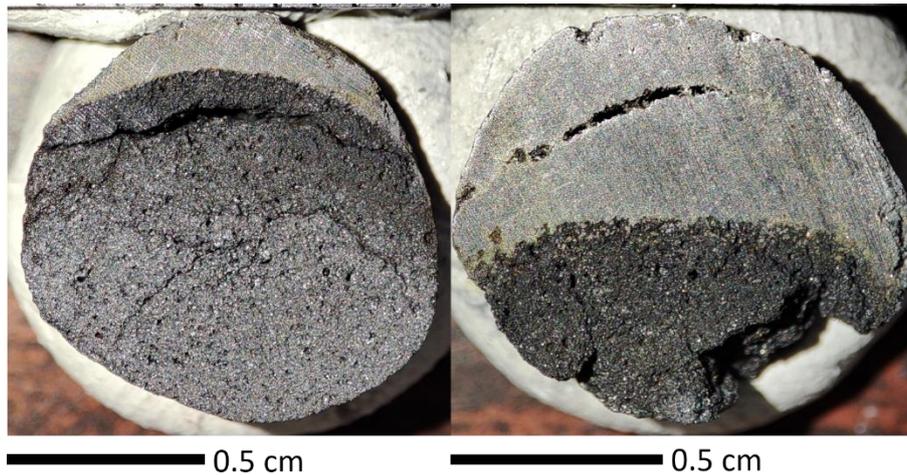


Figure IV-10 : Image de pellet de minerai après une réduction (gauche) de 2 minutes et (droite) de 7 minutes. La réduction a été réalisée sous 2 bars d'hydrogène et 329 W_l. Les pellets ont été illuminés par le sommet et découpés en deux après la réduction.

Classiquement, comme expliqué dans la partie I.2.3.1.1 (page 43), la réduction procède selon le modèle du cœur rétrécissant, c'est-à-dire que la réduction débute par la surface extérieure et progresse vers le cœur, formant une coquille de fer. Ici, comme le montre la Figure IV-10, étant donné que flux lumineux arrive sur sommet du pellet, la réduction débute depuis le sommet irradié et se dirige vers le bas du pellet qui est ombragé. Comme la réduction est directement dépendante de la température, cela révèle un gradient de température dans le pellet. Nous avons vu lors de nos études de diffraction des rayons X in situ et dans la littérature que la limite de transformation se situe aux alentours de 500 °C [188]. La délimitation que l'on peut voir en Figure IV-10 correspond donc au front de réduction. Lors des expériences préalables nous avons mesuré la température de la surface sous le flux lumineux à plus de 900°C. Par ailleurs, lors de la réduction de 28 min présentée précédemment, la température maximale mesurée sous le creuset était de 371°C. Bien que, comme expliqué précédemment, il y ait une différence entre la température sous le creuset et celle du bas du pellet, il y a un fort gradient de température dans le pellet. Sachant que la limite de transformation est à 500 °C, il est possible de faire l'hypothèse que le front de réduction représente l'isotherme à cette valeur. Par conséquent, il est possible d'interpréter le schéma de réduction montré Figure IV-10 comme limité par la température et non par la diffusion du gaz. Cette interprétation est appuyée par l'image MEB présentée Figure IV-11, où la partie de encore oxydée du fer reste visiblement très poreuse.

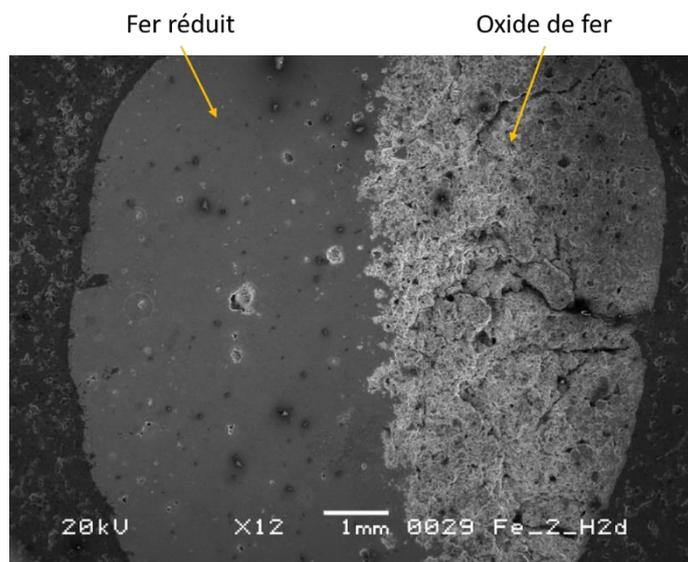


Figure IV-11 : Photo MEB d'un pellet réduit pendant 8 minutes sous 2 bars d'hydrogène et sous 318 W_1 .

Afin d'avoir une meilleure idée de la taille du front de réduction, des observations MEB ainsi que des analyses EDS ont été réalisées. La Figure IV-12 présente à gauche une photo MEB d'un pellet semi-réduit pendant 8 minutes sous 2 bars d'hydrogène et sous 318 W_1 . Sur cette photo, chaque rectangle jaune correspond à une zone où les analyses EDS quantitatives ont été réalisées. A droite de l'image, sont présentées les évolutions des proportions de fer (rouge) et d'oxygène (bleu) selon le rayon du pellet ; chaque valeur correspond aux valeurs moyennes mesurées au sein d'un des rectangles jaunes. Grâce cette analyse, il est possible de remarquer que la transition entre la zone réduite et la zone d'oxyde est très nette. En effet, sur environ 0,5 mm la proportion de fer baisse de 80% à environ 40% et, celle d'oxygène passe de moins de 20% à environ 60%.

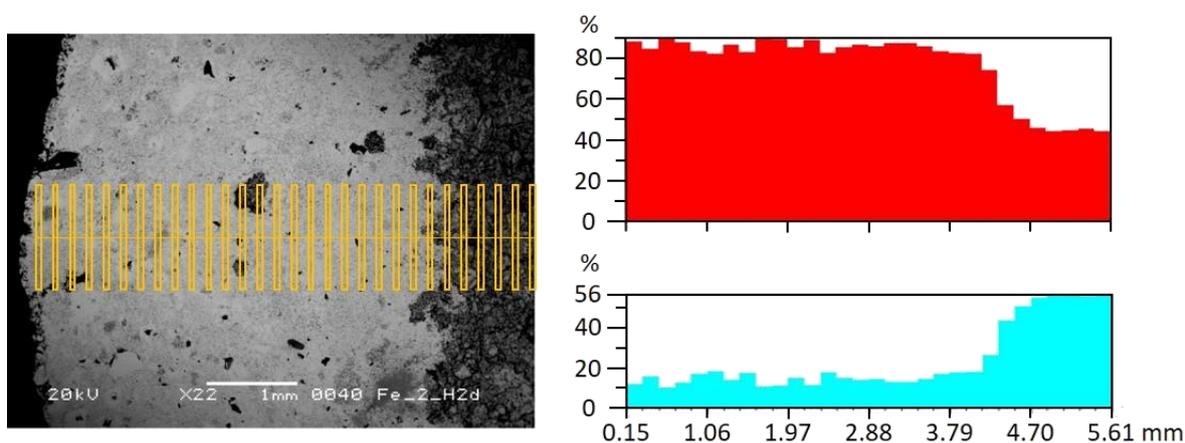


Figure IV-12 : (Gauche) Image MEB en mode électrons rétrodiffusés d'un pellet réduit pendant 8 minutes sous 2 bars d'hydrogène et 318 W_1 , Les rectangles jaunes correspondent aux zones où l'analyse EDS quantitative a été réalisée. (Droite) Evolution de la proportion d'oxygène (bleu) et de fer (rouge) depuis la surface extérieure (gauche) vers l'intérieur du pellet le long du peigne jaune.

La Figure IV-13 présente la cartographie EDS du pellet pour différents éléments : fer, oxygène, magnésium, calcium, silice et aluminium pour les cases c), d), e), f), g) et h) respectivement. La Figure IV-13 présente aussi l'origine en mode électrons rétrodiffusés et

secondaires, cases a) et b) respectivement, ainsi que la cartographie composée de tous les éléments case i). Sur la Figure IV-13, il est possible de voir que de nombreux éléments d'impuretés sont présents dans la zone réduite. Étant donné que dans la composition de la boulette aucun de ses éléments n'est présent pur, il est raisonnable d'estimer qu'ils le sont sous forme d'oxyde (MgO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 et autres). Donc une partie de l'oxygène résiduel mesuré par EDS dans la partie réduite est liée à ces éléments et non à du fer, bien que lors des observations du MEB des oxydes résiduels aient été observés très localement.

Afin de bien comprendre comment la réduction s'opère, nous avons observé l'influence de différents paramètres. Dans la partie suivante, seront présentés l'influence de la pression, suivie par celle du temps de réduction puis par celle de la puissance de la lampe.

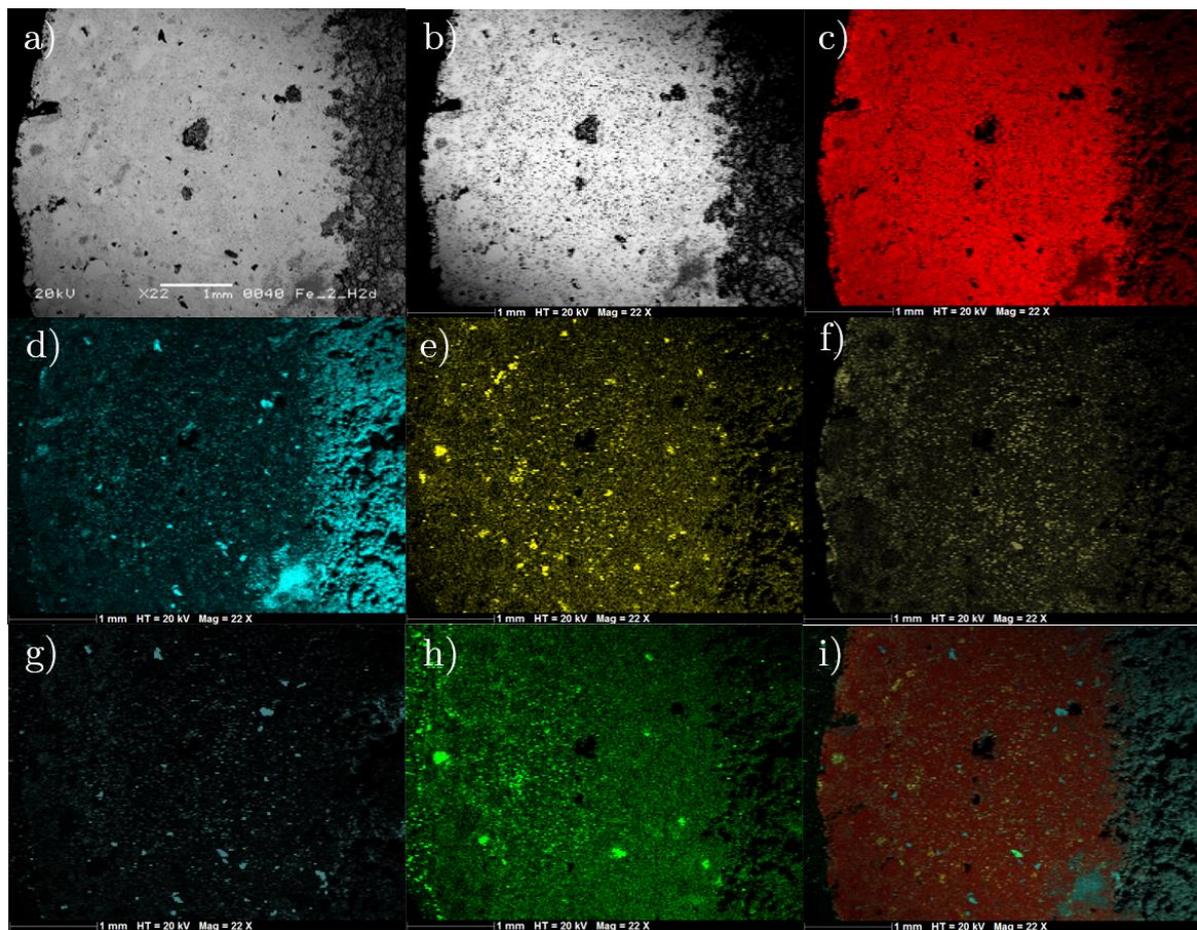


Figure IV-13 : Cartographie EDS de la partie réduite d'un pellet sous 2 bars d'hydrogène et sous 318 W. La figure a) correspond à l'image MEB en mode électrons rétrodiffusés, b) la même image mais en mode électrons secondaires, et cartographie c) du fer, d) de l'oxygène, e) du magnésium, f) du calcium, g) de la silice, h) de l'aluminium et i) de tous.

IV.2.2.1. Influence du temps de réduction

Pour évaluer l'influence du temps, nous avons réalisé deux séries de réduction de pellets avec des masses similaires dans chaque série, sous 2 bars d'hydrogène et sous 318 W₁ pendant différents temps : 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13 et 16 min. Les conditions expérimentales sont présentées Tableau IV-1.

Tableau IV-1 : Conditions expérimentales des réductions pour observer l'influence du temps sur la réduction.

Série	Masse moyenne (g)	Temps (min)	Puissance (W ₁)	Atmosphère
1	2,15 ± 0,04	0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13 et 16	318	2 bars - H ₂ - 100%
2	2,335 ± 0,045			

Afin de quantifier l'avancement de la réduction, la surface de fer réduit une fois que le pellet est coupé en deux a été mesurée grâce au logiciel ImageJ. Les images de tous les pellets sont présentées en Annexe Figure F-1 et Figure F-2 et les résultats des mesures Figure IV-14. Ces résultats montrent que la vitesse de réduction suit une décroissance exponentielle, avec un plateau atteint à 10 minutes de réduction. Ceci intervient avant que la réduction ne soit totale. Les photos des échantillons permettent d'estimer une vitesse de réduction en termes d'épaisseur de fer par minute : au début, entre 30 secondes et 1 minute, elle est de 2 mm/min environ et chute à 0,3 mm/min entre la 7^{ème} minute et la 10^{ème} minutes. Ce genre de comportement de la réduction a déjà été observé dans la littérature par Bonalde *et al.* et par Wagner *et al.* [63], [67]. Cependant, l'irradiation anisotrope dans notre cas a une forte influence : la réduction totale n'est pas atteinte même après 17 minutes de réductions alors que, dans la littérature, elle l'est.

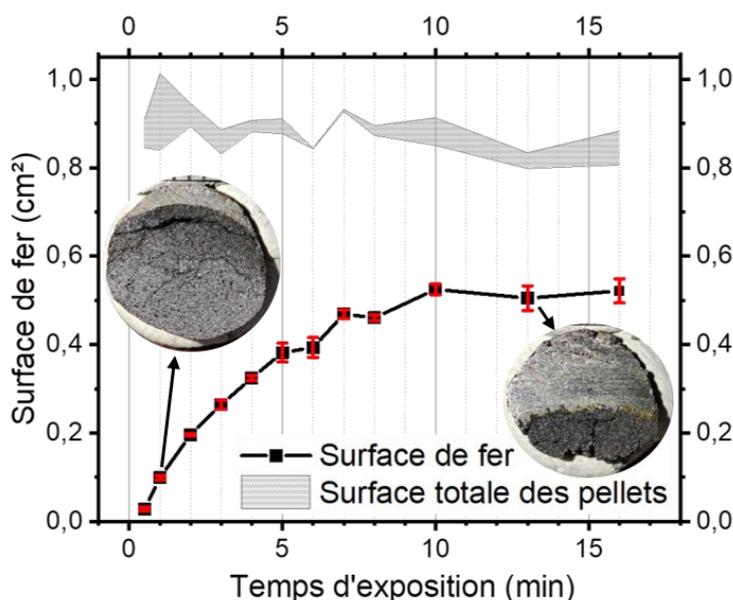


Figure IV-14 : Evolution de la surface de fer en fonction de la durée réduction sous 2 bars d'hydrogène et sous 318 W₁. La surface totale du pellet est indiquée par la surface grise. Les photos des pellets réduits pendant 2 min et 13 min sont présentées sur la figure.

IV.2.2.2. Influence de la puissance de la lampe

Le second paramètre étudié est la puissance de la lampe utilisée pour les réductions. De la même manière que précédemment, la surface de fer a été mesurée après une réduction de 4 min, sous 2 bars d'hydrogène et sous différentes puissances lumineuses : 260, 298, 318, 334 et 372 W₁. Ces conditions expérimentales sont présentées Tableau IV-2. Les photos des pellets coupés en deux de la série 1 sont disponibles en Annexe Figure G-1 et celles de la série 2 Figure G-2.

Tableau IV-2 : Conditions expérimentales des réductions pour observer l'influence de la puissance lumineuse.

Série	Masse moyenne (g)	Temps (min)	Puissance (W ₁)	Atmosphère
1	2,215 ± 0,035	4	260, 298, 318, 334 et 372	2 bars - H ₂ - 100%
2	2,355 ± 0,025			

La Figure IV-15 présente l'évolution de la surface de fer en fonction de la puissance lumineuse incidente sur l'échantillon. Sur la figure, les photos des pellets réduits sous 260 W₁ et 372 W₁ sont présentées. Lorsque la réduction est réalisée sous 260 W₁, la température mesurée sous le creuset est de 258 °C alors que, lorsque la puissance est de 372 W₁, la température mesurée est de 354 °C. Ceci montre bien que plus la puissance est élevée, plus la température l'est aussi. Et, comme attendu, lorsque la puissance augmente, la surface de fer augmente.

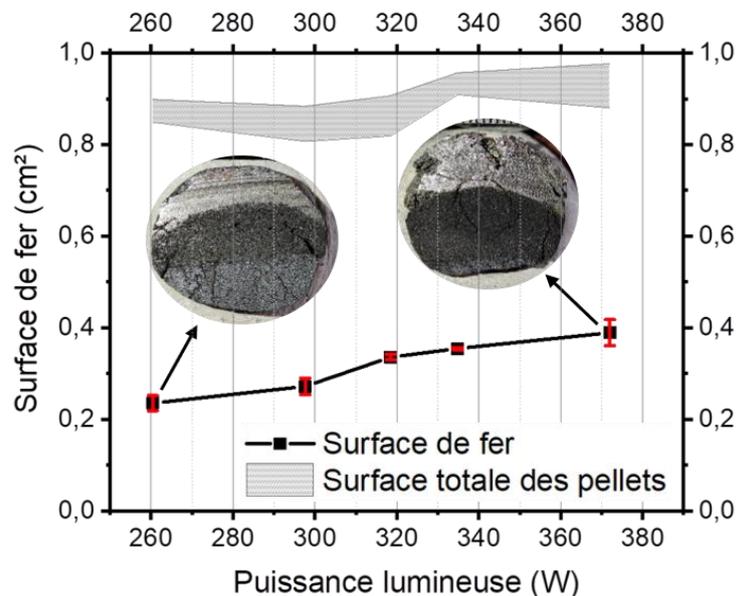


Figure IV-15 : Evolution de la surface de fer en fonction de la puissance (269, 298, 318, 334 et 372 W₁) sous 2 bars d'hydrogène et pendant 4 minutes. La surface totale du pellet est indiquée par la surface grise, pour chaque point, les surfaces totales des deux pellets ont été mesurées d'où l'intervalle. Les photos des pellets réduits à 269 W et 372 W sont présentées sur la figure.

IV.2.2.3. Influence de la pression

Ici, l'objectif est de présenter l'influence de la pression sur le déroulement de la réduction. Pour l'observer, des expériences ont été réalisées sous une atmosphère d'hydrogène pur et sous une irradiation de 318 W₁ dans le creuset en alumine (diamètre : 20 mm). Au niveau de la pression, des valeurs de 1, 2 et 4 bars ont été utilisées, avec des masses de pellets autour de 2,83 g et 2,82 g, et des temps d'exposition de 1, 2, 4, 8, 12, et 16 minutes. Le détail des conditions expérimentales est présenté Tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Conditions expérimentales des expériences d'influence de la pression.

Pression (bars)	Masse moyenne (g)	Temps (min)	Puissance (W)	Atmosphère
1	2,83	1, 2, 4, 8, 12 et 16	318	H ₂ - 100%
2	2,82			
4	2,83			

En amont des expériences, les pellets ont été séchés dans une étuve à 110 °C pendant au moins trois jours. Pour mesurer la performance de la réduction, les échantillons ont été pesés avant la réduction, M_i , et après la réduction, M_f , la différence entre les deux représentant la masse d'oxygène perdue grâce à la réduction. Afin d'avoir la quantité d'oxygène n_o , il suffit de diviser cette valeur par la masse molaire d'oxygène m_o . Le tout est présenté Eq IV-2. A noter que cette déduction est possible uniquement parce que les pellets sont secs et donc que la masse initiale exclue déjà l'humidité ; il ne serait pas possible d'utiliser cette méthode avec des pellets humides. Une fois la quantité d'oxygène déterminée, il est possible de remonter à un taux de réduction en faisant le rapport entre n_o et la quantité d'oxygène perdue maximale théorique $n_{o,th}$, comme montré par l'Eq IV-3. Cependant, il existe une limite à cette méthode : lorsque les oxydes sont réduits ils passent par plusieurs oxydes intermédiaires de masses différentes, comme expliqué dans la littérature. Or, cette méthode que toute la masse d'oxygène perdue produit du fer ; ceci peut maximiser le taux de réduction puisque la masse de fer est plus faible.

$$n_o = \frac{M_i - M_f}{m_o} \quad \text{Eq IV-2}$$

$$\text{Taux de réduction} = \frac{n_o}{n_{o,th}} \quad \text{Eq IV-3}$$

La Figure IV-16 présente l'évolution du taux de réduction en fonction du temps pour différentes pressions : 1, 2 et 4 bars. A première vue il est possible de voir que le taux augmente fortement pendant les 4 premières minutes sans que la pression n'ait d'influence significative. Ensuite, et jusqu'à 8 minutes, il est possible de remarquer un adoucissement de la pente, la pression n'ayant toujours pas d'impact significatif. Après 8 minutes, les courbes des différentes pressions se séparent : celle de la réduction sous 4 bars continue d'augmenter lentement. La courbe représentant la réduction sous 2 bars montre un plateau et, finalement, celle à 1 bar admet un maximum à 8 minutes avant de redescendre. Cette séparation des courbes est attribuée à la consommation d'hydrogène durant la réduction qui a des conséquences différentes en fonction de la pression initiale. En théorie, pour complètement réduire un cation Fe³⁺ il faut

1,5 équivalents d' H_2 . Au début de la réaction, les ratios H_2 : Fe sont 1,55 : 1, 2,35 : 1 et 3,89 : 1 pour les pressions de 1, 2 et 4 bars respectivement. Donc, à 1 bar, l'excès d'hydrogène pour la réduction est faible lorsqu'on le compare avec la valeur théorique. Lorsque la réduction avance, la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente et rentre en compétition avec l'hydrogène. Comme la réduction dépend directement de l'activité de l'hydrogène, de sa diffusion et de sa pression partielle, lorsque ces paramètres diminuent, la vitesse de réduction diminue aussi. Ce ralentissement a déjà été observé dans littérature (Lorent *et al.* [68]) comme expliqué dans la partie I.2.3.2.3 (page 52). Par ailleurs, en rapport avec la réoxydation observé à 1 bar, il a été montré dans la littérature que la présence de vapeur peut réoxyder le fer aux alentours de 500 °C, comme expliqué dans la partie I.2.3.2.3 (page 52).

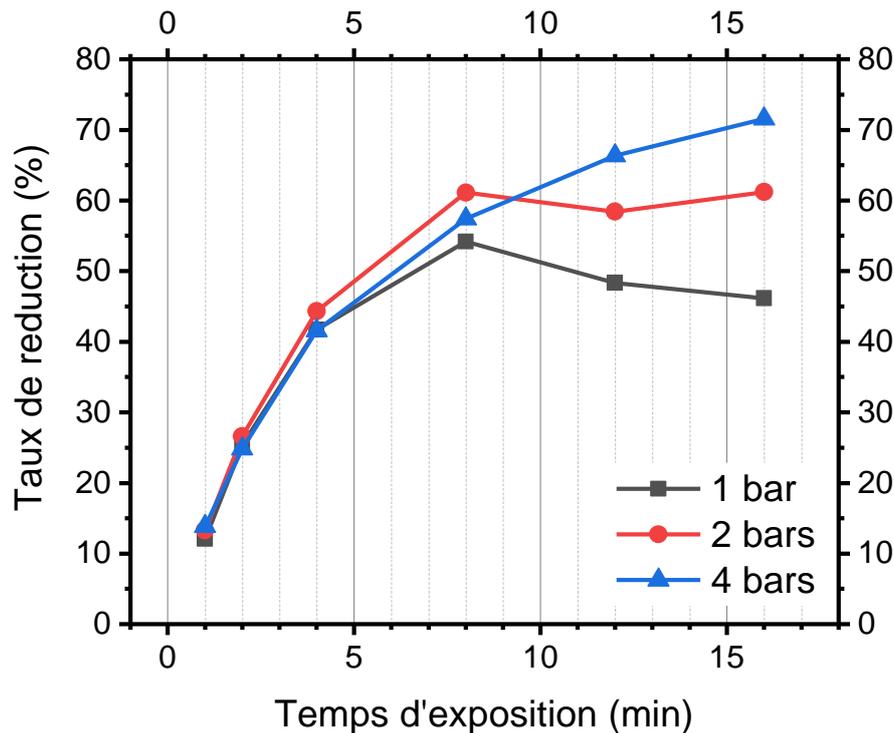


Figure IV-16 : Taux de réduction en fonction du temps d'exposition pour différentes pressions d'hydrogène (noir : 1 bar, rouge : 2 bars et bleu : 4 bars) après réduction d'un pellet de fer sous 318 W_i.

La pression initiale de gaz réducteur a donc une forte influence sur la cinétique une fois celle-ci déjà bien avancée. Cela montre, qu'en batch, une attention particulière doit être donnée à la pression choisie pour le gaz réducteur, ainsi qu'à la quantité de vapeur formée lors de la réaction en regard de la pression initiale de gaz réducteur.

IV.2.2.4. Conclusion

Lors de ces différentes expériences il a été montré que la réduction sous flux lumineux concentré procédait de manière très différente par rapport aux réactions dans un four classique. En effet, ces réductions se déroulent à partir de la surface illuminée vers la partie dans l'ombre et non à partir de toute la surface extérieure. La cinétique de réduction dépend du temps de réduction, de la puissance du flux lumineux et de la pression du gaz réducteur.

Étant donné que la vitesse de réduction ralentit fortement avec le temps en raison d'un fort gradient de température dans le pellet, nous avons décidé d'essayer d'optimiser le temps de réduction en changeant la forme des échantillons et/ou en générant un mouvement sous le flux lumineux. Les résultats de ces expériences seront présentés dans la prochaine partie.

IV.2.3. Optimisation de la cinétique de réduction

Ici, en raison de la nécessité d'être précis au niveau de l'évolution de phases, les taux de réduction ont été calculés avec une autre méthode que celle de la perte de masse. En effet, précédemment, ces sont les tendances globales qui étaient observées alors qu'ici il est important d'avoir accès aux phases restantes à la fin de la réduction. Donc, comme expliqué dans la partie II.2.1 (page 111), la diffraction aux rayons X et la méthode des affinements de Rietveld ont été utilisées afin de remonter aux proportions de chaque phase dans l'échantillon. Ensuite pour remonter au taux de réduction, le rapport entre la proportion de fer métallique et la somme des proportions des masses contenant du fer (oxyde et métallique) a été calculé, comme le montre Eq IV-4.

$$\text{Taux de réduction} = \frac{\%_{Fe(0)}}{\%_{Fe_2O_3} + \%_{Fe_3O_4} + \%_{FeO} + \%_{Fe(0)}} \quad \text{Eq IV-4}$$

IV.2.3.1. Pellets

Comme expliqué précédemment, les performances de la réduction dépendent fortement de l'orientation du flux lumineux. Les temps de réduction observés ici sont du même ordre que ceux observés dans la littérature lors de réductions de pellets sous hydrogène atteignant 100% de réduction. Par exemple, dans ces travaux de thèse, Wagner a atteint une réduction complète d'un pellet réduit à 800 °C après environ 30 minutes de réduction dans un four classique et, après plus de 80 min à 500 °C [189]. Dans notre cas, les temps de réduction observés sont limités par le gradient température puisqu'après 28 min de réduction cette dernière n'est pas complète. Dans l'optique de réduire le temps de réduction et d'atteindre des taux de réduction proche de 100%, plusieurs expériences ont été réalisées. D'abord, nous avons essayé de retourner le pellet, de 180 ° ou de 90 °, une ou plusieurs fois durant les expériences. L'objectif étant de changer la surface directement exposée au flux. Les résultats des réductions des pellets sont présentés Tableau IV-4.

Tableau IV-4 : Résultats principaux des expériences de réduction de pellet sous flux lumineux et sous hydrogène avec ou sans retournement.

Echantillon	Masse initiale (g)	Temps d'exposition (min)	Pression (bars)	Taux de réduction (%)	Commentaire
P1	1,70	28	3,5	84,4	Sans retournement
P2	1,71	2 × 14	3,5	97,3	Retournement de 180° environ
P3	1,90	2 × 8	2	96,3	Retournement de 180° environ
P4	1,92	3 × 4 + 1 × 5	2,4	99,0	Retournement de 90° environ
P5	1,94	4 × 3	2,4	95,1	Retournement de 90° environ

Sans retournement :

Dans un premier temps, une première réduction sans retournement a été réalisé sous une très forte pression d'hydrogène (3,5 bars) et sous un flux de 318 W₁ : échantillon P1 dans le Tableau IV-4. Lorsque l'échantillon a été transformé en poudre et étudié à la DRX après la réduction, les phases identifiées étaient : la magnétite, la wuestite, le fer et le quartz comme le montre le diffractogramme présenté Figure IV-17. On constate aussi l'absence d'hématite. Au niveau des proportions, le fer représente 83,4%_{masse}, la wuestite 13,6%_{masse}, la magnétite 1,9%_{masse} et le quartz 1,1%_{masse}. Cette réduction a permis d'atteindre 84,4% de réduction après 28 min de réduction, ce qui est environ 10% trop faible pour les exigences de l'industrie.

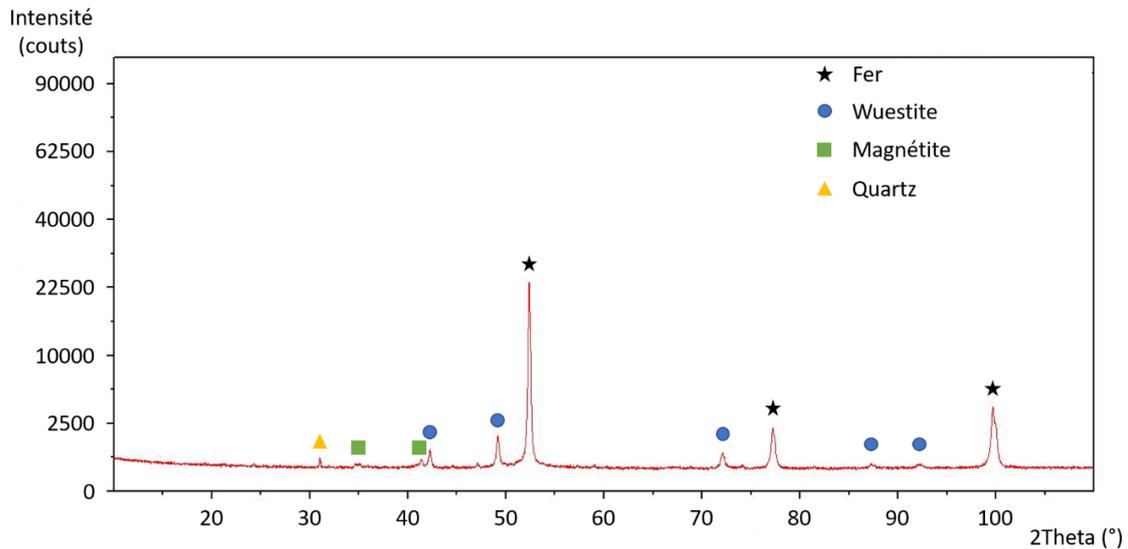


Figure IV-17 : Diffractogramme mesuré sur l'échantillon P1 après une réduction de 28 minutes sans retournement, sous 3,5 bars d'hydrogène et 318 W₁.

Avec retournement de 180° :

Pour opérer les retournements, le flux lumineux a d'abord été coupé pour permettre le refroidissement de l'échantillon. A noter que ce refroidissement s'est fait dans l'atmosphère de réduction jusqu'à atteindre 50 °C environ. Ensuite, le réacteur a été purgé et remis à l'atmosphère ambiante. Le retournement est opéré le plus précisément possible, comme montré sur la Figure IV-18, puis 3 purges du réacteur sont réalisées avant de remettre l'atmosphère réductrice à la pression voulue et de poursuivre la réduction.

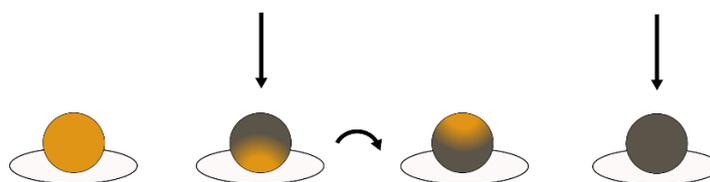


Figure IV-18 : Représentation schématique du retournement d'un pellet de 180°, une fois durant la réduction. La couleur orange représente la partie non réduite et la grise celle réduite. Les flèches verticales représentent la direction du flux lumineux.

Une expérience dans les mêmes conditions que P1 a été réalisée mais avec un retournement au milieu de l'exposition, l'échantillon en question est P2. Les mesures de DRX de P2, présentées Figure IV-19, permettent de remarquer la disparition de la phase de magnétite et la forte diminution de celle de wuestite puisque la proportion de cette dernière est de 2,7%_{masse}, le reste de l'échantillon étant du fer à 97,3%_{masse}. Le retournement permet donc d'augmenter le taux de réduction de 12,9% pour monter à 97,3% de réduction sans augmenter le temps de réduction total, ce qui rentre dans les exigences de l'industrie.

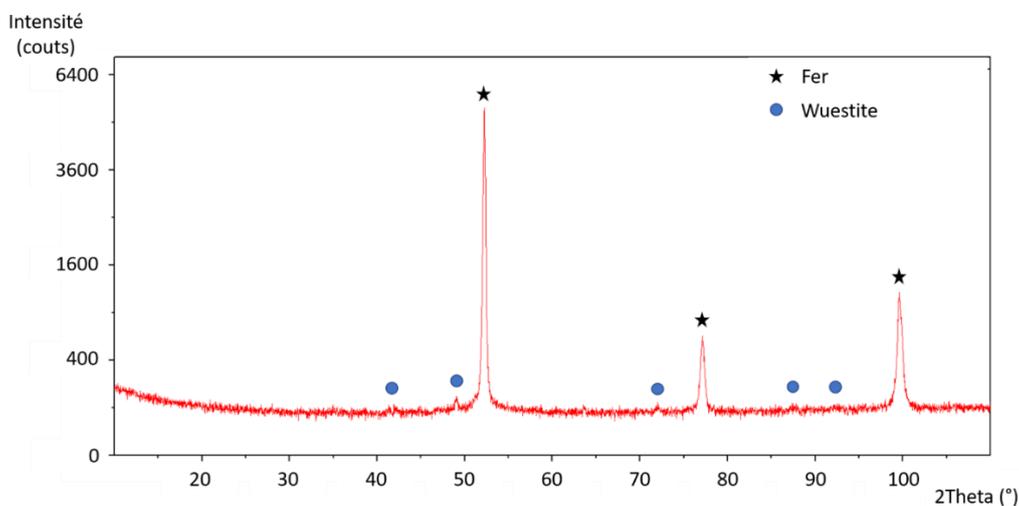


Figure IV-19 : Diffractogramme mesuré de l'échantillon P2 après une réduction de 28 min avec retournement, sous 3,5 bars d'hydrogène et 318 W_l.

Comme l'étude de l'effet de la pression a montré qu'à partir de 2 bars d'hydrogène il n'y avait pas de réoxydation et afin de se placer dans les conditions les plus économes en gaz, nous avons réalisé les réductions suivantes à 2 bars. La puissance maximale de la lampe (372 W_l) a aussi été utilisée toujours dans l'objectif de conserver des temps courts de réduction.

Par ailleurs, comme montré par la Figure IV-10 et la Figure IV-11, une réduction de 7-8 minutes permet de réduire, en fonction de sa taille, la moitié ou plus du pellet. Une réduction de 16 minutes au total avec un retournement au milieu de l'exposition a donc été réalisé (échantillon

P3). Le retournement a été opéré de la manière décrite au début de cette partie. Comme escompté, dans cette configuration le taux de réduction atteint a été de 96,3% soit légèrement inférieur au précédent. Au niveau de la composition de l'échantillon, seule de la wuestite accompagne le fer, cette dernière représentant 3,7%_{masse} comme le montre le diffractogramme mesuré (voir annexe Figure H-1).

Ces premiers résultats montrent sans conteste que le retournement du pellet permet de faire drastiquement chuter le temps de réduction. En effet, cela permet de passer de 28 minutes pour atteindre 88,4% à seulement 16 min pour atteindre 96,3% qui est un taux suffisant pour les exigences de l'industrie, cette dernière se situant pour rappel autour de 93-94% [11], [15].

Avec retournement de 90° :

Pour essayer d'encore améliorer le temps de réduction, les pellets ont été retournés trois fois de 90° environ, comme montré sur la Figure IV-20, les retournements ont été réalisés selon le même protocole que ceux de 180°. Deux expériences ont donc été réalisées sous 372 W₁ et sous 2,4 bars pour assurer une bonne activité de l'hydrogène.

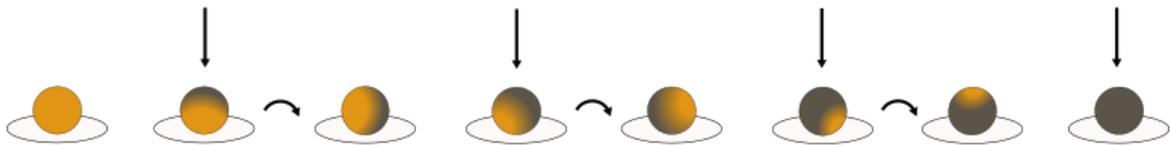


Figure IV-20 : Représentation schématique du retournement d'un pellet de 90°, 3 fois durant la réduction. La couleur orange représente la partie non réduite et la grise, celle réduite. Les flèches verticales représentent la direction du flux lumineux.

Lors de la première expérience, l'échantillon P4 a été exposé trois fois 4 minutes et une fois 5 minutes pour le dernier retournement. Cette configuration a permis le plus haut taux de réduction avec 98,99% de réduction, le diffractogramme mesuré est présenté Figure IV-21. En détails, l'échantillon final était composé uniquement de fer à 98%_{masse} et de wuestite à 1%_{masse} en termes de phases ferreuses, et la diffraction met aussi en avant du quartz évalué à hauteur de 1%_{masse}.

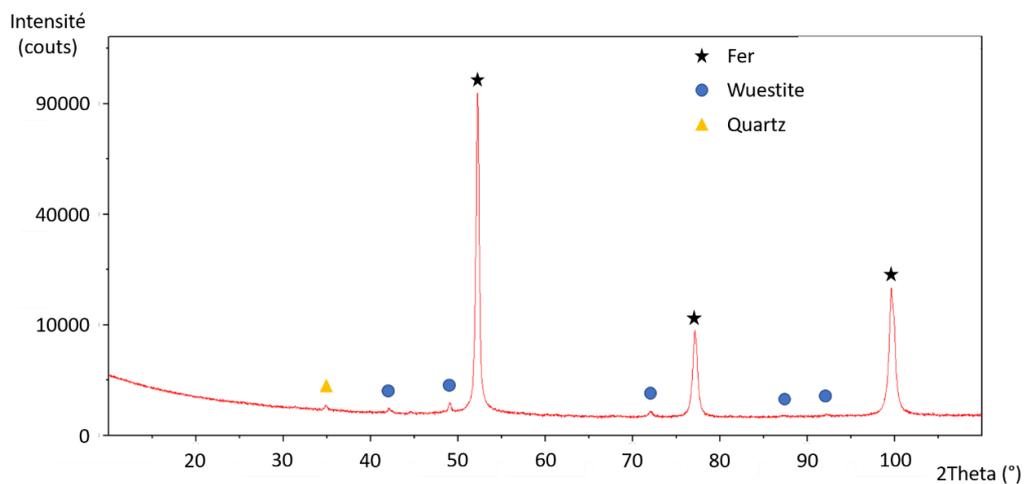


Figure IV-21 : Diffractogramme mesuré de l'échantillon P4 après une réduction de 17 min avec 3 retournements, sous 2,4 bars d'hydrogène et 372 W₁.

Étant donné le taux très élevé obtenu précédemment, le temps de chaque exposition a été réduit en passant à 4 expositions de 3 min pour un total de 12 minutes (échantillon P5). Le

taux de réduction atteint est de 95,1%_{masse} avec un échantillon composé de magnétite, de wuestite, de fer et de quartz à hauteur de 0,43%_{masse}, de 3,75%_{masse}, de 94,4%_{masse} et de 1,41%_{masse} respectivement. Le diffractogramme mesuré de l'échantillon P5 est présenté en Annexe Figure H-2.

Ces résultats montrent que, même si le taux de réduction est élevé et suffisant pour l'industrie (>95%), il reste des oxydes intermédiaires comme de la magnétite et de la wuestite. Les proportions en masse de la wuestite restent, logiquement, plus hautes que celles de la magnétite d'environ un facteur 2. Le temps de réduction quant à lui, a pu être fortement réduit grâce au retournement. En effet, en opérant trois retournements durant l'exposition le temps de réduction est passé de 28 min à 12 min.

De manière plus générale, ces premiers résultats montrent que l'utilisation du flux lumineux concentré implique de changer la surface directement exposée au flux durant la réduction. Afin d'améliorer encore le temps de réduction et de parcourir d'autres pistes pour le procédé de réduction, un autre type d'échantillons a été réduit : des graviers réalisés à partir de pellet de minerai industriel. L'objectif de la prochaine partie sera de présenter les résultats pour ce cas.

IV.2.3.2. Graviers

Les graviers utilisés durant ces expériences ont été réalisés en brisant manuellement des pellets de minerai de fer. La taille caractéristique des graviers était de l'ordre de 1-1,5 mm environ. Cette dimension a été choisie puisqu'elle est inférieure à la profondeur de fer réduite après quelques minutes de réduction d'après la Figure IV-10. Les premières expériences ont donc été réalisées dans le but de réduire les graviers sans retournement, le plus rapidement possible, avec comme objectif d'atteindre un taux de réduction supérieur à 95%. Puis nous avons tenté de diminuer ce temps par un retournement des graviers. L'ensemble des conditions expérimentales et des taux de réductions sont présentés Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Principaux résultats des expériences de réduction de gravier de minerai de fer sous flux lumineux et sous hydrogène avec ou sans retournement.

Echantillon	Masse initiale (g)	Temps d'exposition (min)	Pression (bar)	Taux de réduction (%)	Commentaire
G1	0,2	3	0	64,5	Sans retournement
G2	0,2	8		93,7	Sans retournement
G3	0,2	13		91,8	Sans retournement
G4	0,2	18		96,1	Sans retournement
G5	0,2	2 × 1,5	0	56	Retournement de 180° environ
G6	0,2	2 × 4		92,3	Retournement de 180° environ
G7	0,2	2 × 6,5		95,5	Retournement de 180° environ

Sans retournement :

Lors des réductions sans retournement, 0,2 g de gravier ont été placés sous 372 W₁ dans le creuset en alumine de 20 mm de diamètre et sous pression atmosphérique d'hydrogène. La pression atmosphérique permet d'avoir suffisamment d'hydrogène en raison de la très faible masse de gravier. En effet, le ratio H₂ : Fe est de 10,7 ce qui est nettement supérieur aux ratios observés dans les expériences précédentes pour éviter la réoxydation.

Comme expliqué précédemment, lors d'une réduction de 2 min, il a été possible de réduire environ 2 mm d'épaisseur des pellets. Les graviers ayant une taille de cet ordre de grandeur, nous avons choisi une première réduction de 3 minutes (échantillon G1 dans le Tableau IV-5). Les analyses DRX ont montré que l'échantillon était composé à hauteur de 1%_{masse} d'hématite, de 5,6%_{masse} de magnétite, de 28,5%_{masse} de wuestite, et de 64,5%_{masse} de fer, et de 0,4%_{masse} de quartz. Ces proportions donnent un taux de réduction de 64,8%, bien plus faible que le taux de 95% obtenu avec l'échantillon P5.

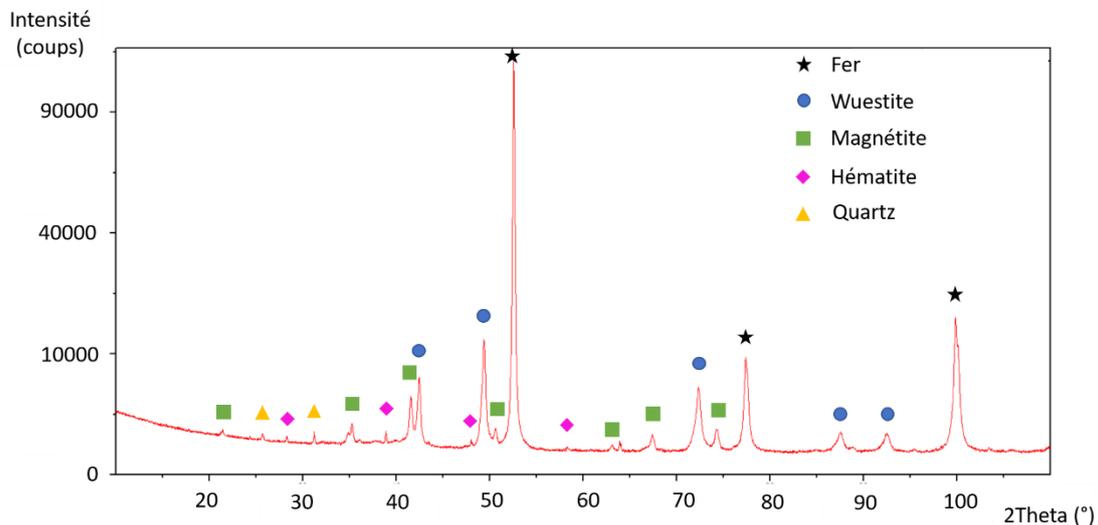


Figure IV-22 : Diffractogramme de l'échantillon G1 réduit sous hydrogène (pression atmosphérique) pendant 3 min sous 372 W₁ sans retournement.

Lors de la deuxième réduction (échantillon G2), l'exposition a duré 8 min au total pour atteindre 93,7% de réduction. Lors de cette expérience, il était toujours possible de voir la présence de magnétite à hauteur de 1,2%_{masse}, logiquement accompagné de wuestite (5,1%_{masse}) et de fer (93,5%_{masse}) avec environ 0,2%_{masse} de quartz. Cette composition permet d'atteindre un taux de réduction de 93,7%, ce qui est légèrement en dessous de l'objectif.

Étonnamment, lors de la réduction suivante (échantillon G3), qui a duré 13 min, le taux de réduction trouvé était inférieur de 1,9% au précédent puisque 91,8% de réduction ont été atteints. Ceci est lié à une plus grande proportion de wuestite dans l'échantillon, avec 6,8%_{masse}, alors que la magnétite n'est que légèrement plus présente (1,4%_{masse} contre 1,2%_{masse} précédemment). La proportion de fer totalement réduit était donc légèrement plus faible que pour G2 avec 91,5%_{masse} dans l'échantillon final. Le taux de quartz est de 0,4%_{masse}.

La différence entre G2 et G3 peut provenir de plusieurs points. D'abord il est possible que cela soit dû à la répartition des graviers dans le creuset qui était légèrement différentes. Par ailleurs, comme expliqué par Turkdogan et Vinters, lors de la réduction de petit échantillon il est

possible que de la wuestite se retrouve emprisonnée au sein d'une couche de fer dense, ce qui rend difficile la réduction [51]. Il est également possible que les graviers lors de cette expérience aient eu une taille moyenne plus faible ce qui augmente leurs ratios surface sur volume et donc favorise la réoxydation et défavorise la montée en température de l'échantillon (plus grande surface d'échange).

Finalement, seule la réduction de 18 min a permis d'atteindre 96,1% de réduction, avec une proportion de fer de 96,1%_{masse}, de wuestite de 3%_{masse}, et de magnétite 0,9%_{masse}. Le diffractogramme mesuré est présenté Figure IV-23. Cette dernière expérience nous permet de faire l'hypothèse que les faibles taux de réductions observés lors des premières expériences sont dus à la mauvaise température puisqu'avec plus de temps un haut taux de réduction est atteint. Donc ce serait le gradient de température qui limite la cinétique de réduction.

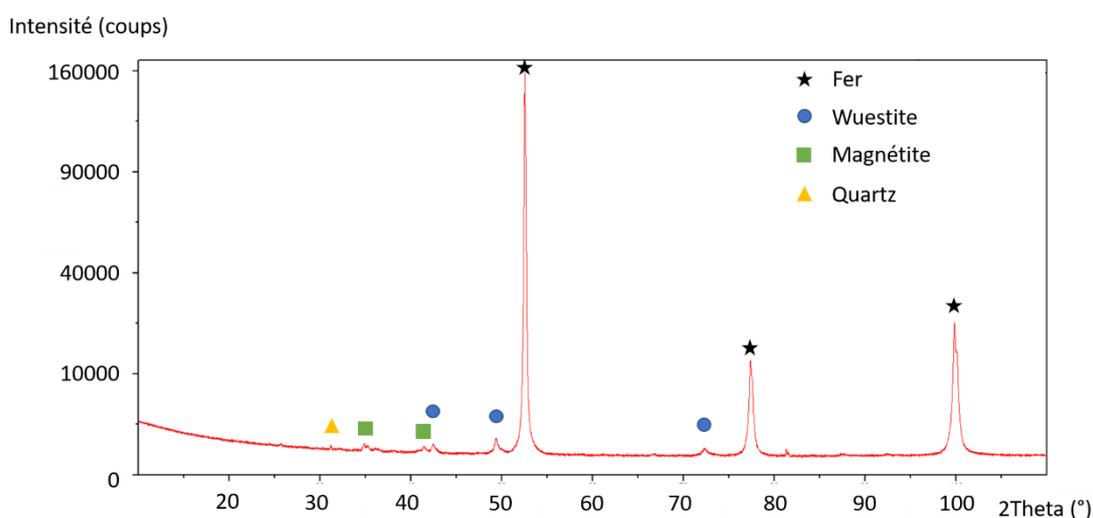


Figure IV-23 : Diffractogramme de l'échantillon G4 réduit sous hydrogène (0 bar relatif) pendant 18 minutes sous 372 W_i sans retournement.

Les cinq réductions précédentes ont permis de montrer que, sans retournement, les graviers ne permettaient pas d'améliorer le temps de réduction puisque les 95% de réduction ne sont dépassés qu'après 18 minutes de réduction, soit 6 minutes de plus que pour la plus courte réduction de pellets. Cette dernière ayant été réalisée avec le retournement du pellet, des expériences de graviers retournés ont été réalisées.

Avec retournement :

Les retournements des graviers ont été réalisés de la même manière que ceux des pellets : fermeture de la lampe, redescente en température de l'échantillon jusqu'à 50 °C, mise sous vide puis sous atmosphère ambiante, retournement, 3 purges avec le gaz réducteur et mise sous atmosphère réductrice pour la deuxième partie de la réduction. La seule différence est qu'il était difficile de retourner chaque gravier un à un ; le retournement a donc plutôt été réalisé en mélangeant les graviers avec une spatule. Un schéma du retournement des graviers est présenté Figure IV-24 .

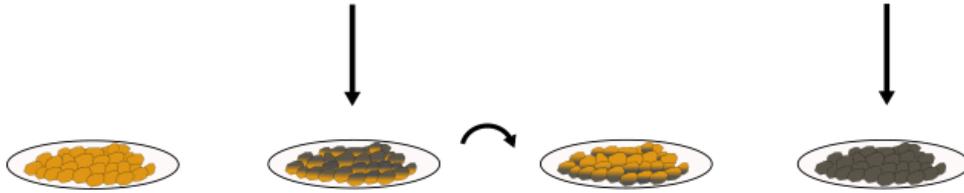


Figure IV-24 : Schéma du retournement des graviers.

La première réduction testée dans cette configuration a duré 3 minutes mais avec un retournement au milieu (échantillon G5). Le diffractogramme mesuré est présenté Figure IV-25. Étonnamment lors de cette réduction, le taux final était bien inférieur à celui sans retournement avec un taux de 56% et un échantillon composé de 1,7%_{masse} d'hématite, 9,7%_{masse} de magnétite, 32,6%_{masse} de wuestite, 55,9%_{masse} de fer et 0,2%_{masse} de quartz. La présence d'hématite indique qu'une partie de l'échantillon est resté dans son état initial, probablement au cœur des graviers.

Comme montré dans les expériences de DRX *in situ*, la transformation hématite vers magnétite est réalisée à faible température, autour de 350 °C. Donc, comme la température mesurée sous le creuset était de 307 °C avant le retournement, et de 313 °C après le retournement, et si l'on prend en compte l'influence du creuset, il est possible de dire qu'une température suffisamment élevée pour opérer cette transformation a été atteinte. De plus, l'échantillon contient de la wuestite en grande quantité qui nécessite une température supérieure à 570 °C. Il est possible de conclure que le temps de réduction était limitant : en 90 sec il n'était pas possible de réduire l'hématite au cœur des graviers.

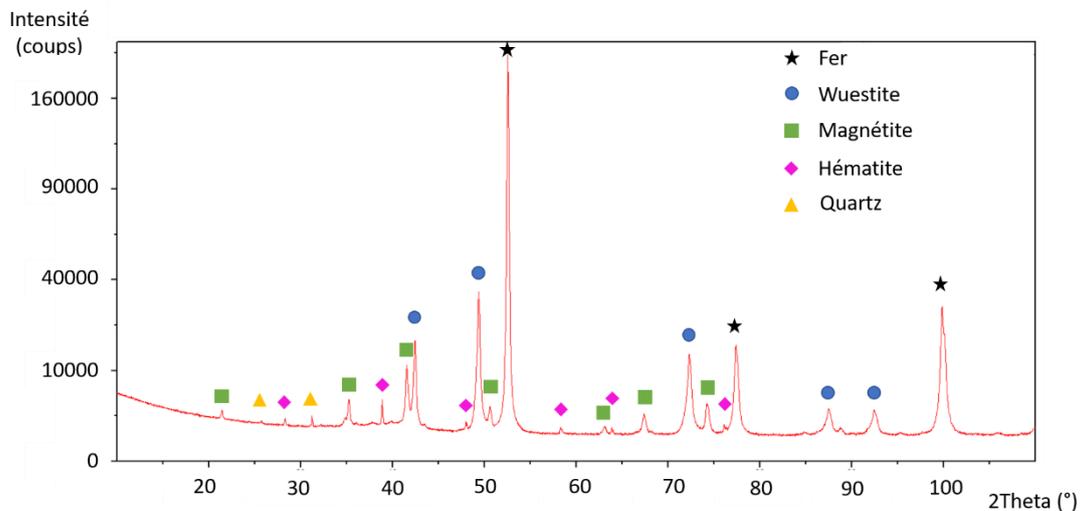


Figure IV-25 : Diffractogramme mesuré de l'échantillon G5 réduit sous hydrogène (0 bar relatif) pendant 3 min sous 372 W₁ avec retournement.

Ensuite lors d'une réduction de gravier pendant deux fois 4 min (échantillon G6), le taux de réduction final était, là aussi, très légèrement inférieur à celui sans retournement pour le même temps total. Ici, 93% de réduction ont été atteints contre 93,7% pour G2, ce qui est donc inférieur à l'objectif. Dans ce cas, l'hématite a complètement disparu et la quantité de magnétite a diminué en passant à 0,9%_{masse} contre 1,2%_{masse} précédemment. Le diffractogramme de G6 est présenté en annexe Figure H-5. Cependant, ce qui est intéressant est que la quantité de wuestite est plus importante : 6,1%_{masse} contre 5,1%_{masse} pour G2. Cette augmentation de la proportion de wuestite indique probablement que lors de la première partie de la réduction, le cœur du gravier a été transformé en wuestite et que lorsqu'ils ont été retournés, la formation de fer sur

la face supérieure a entravé la réduction et piégé de la wuestite au cœur des graviers, qui n'a pas pu être réduite.

Finalement, il a été possible d'atteindre 95,5% de réduction après 13 minutes de réduction totale, réalisée en deux fois avec un retournement au milieu. Ce taux de réduction a été atteint pour l'échantillon G7, avec une proportion de fer de 95%_{masse}, de wuestite de 3,4%_{masse} et de magnétite de 1,1%_{masse}. Le diffractogramme mesuré de l'échantillon G7 est présenté Figure IV-26. A noter que l'échantillon contenait aussi 0,5%_{masse} de quartz. Il est possible de remarquer une légère augmentation de la quantité de magnétite de 0,2%_{masse}, ce qui n'est pas significatif. En revanche, la quantité de wuestite diminue de 2,7%_{masse} ; ceci est dû à l'augmentation du temps de réduction qui permet de transformer le gravier plus profondément.

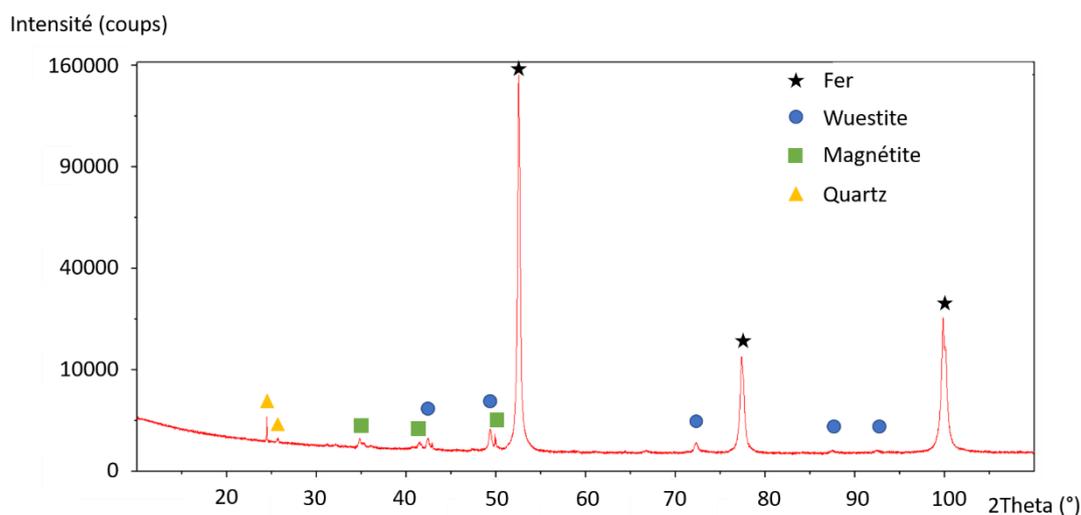


Figure IV-26 : Diffractogramme mesuré de l'échantillon G7 réduit sous hydrogène (pression atmosphérique) pendant 13 minutes sous 372 W_l avec retournement.

En conclusion, l'utilisation de graviers n'améliorent pas la cinétique de réduction. En effet, la seule configuration qui permet d'atteindre 95% de réduction est celle où les graviers sont réduits pendant 13 min au total avec retournement, ce qui fait 1 minutes de plus que lors des réactions avec les pellets. Ceci pourrait être expliqué par la forme de l'échantillon. En effet, les graviers étant petits, ils ont une surface extérieure plus grande devant leur volume, bien plus que dans le cas des pellets. Il est donc possible que lors de l'irradiation, le cœur des graviers monte moins vite en température et n'ait donc pas une cinétique de réduction suffisamment élevée pour améliorer le temps de réduction.

A la vue de ces conclusions, un nouveau type d'échantillon a été testé : des disques réalisés à partir de pellets de minerai. L'idée est la même que pour les graviers, c'est-à-dire d'avoir un échantillon suffisamment fin pour pouvoir être réduit en quelques minutes, mais en ayant un plus faible rapport surface sur volume et assurant aussi un bon transfert thermique sur tout l'échantillon.

IV.2.3.3. Disques

Comme expliqué précédemment, une réduction d'environ 2 min permet de réduire une épaisseur d'environ 2 mm d'après les observations réalisées sur les pellets. Les disques utilisés

ont été découpés à partir de pellets de minerai de fer avec une épaisseur proche de 2 mm grâce à une scie circulaire de précision présentée à la fin de la partie II.1. Afin de voir l'influence de la taille du disque, ils ont été découpés avec différents diamètres : environ 16 mm, environ 12 mm et environ 8 mm. Une fois découpé, les disques ont été placés sur un creuset spécifique usiné par nos soins à partir des creusets classiques de diamètre 20 mm ; le creuset et le dispositif sont présentés Figure IV-27. Dans tous les cas les réductions ont été réalisées avec 2 minutes d'exposition sans retournement, sous 2 bars d'hydrogène et sous 318 W₁. Les réductions n'ont pas été réalisées sous la puissance maximale afin de s'assurer que le disque ne se brise pas. L'absence de retournement est dû au fait que l'épaisseur étudiée devrait être suffisamment fine pour permettre une réduction rapide sans retournement. Toutes les conditions expérimentales des réductions réalisées sur des disques ainsi que les taux de réduction sont présentés Tableau IV-6.

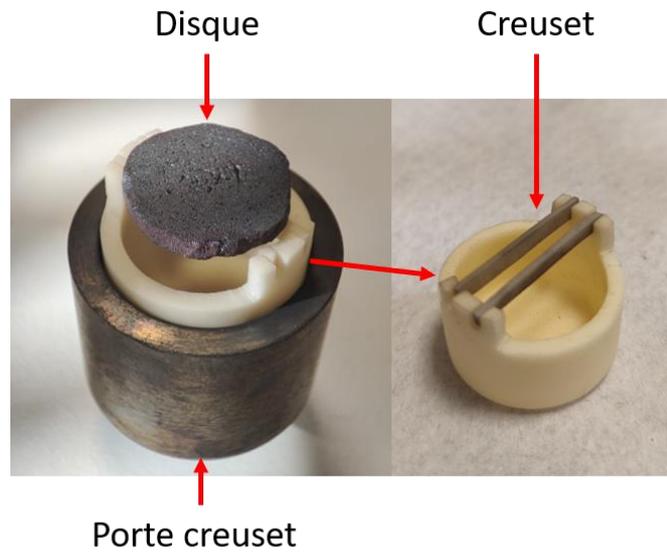


Figure IV-27 : Dispositif utilisé pour la réduction de disques sous hydrogène.

Tableau IV-6 : Conditions expérimentales et taux de réduction des disques de minerai de fer sous hydrogène et sous 318 W₁.

Echantillon	D1	D2	D3
Masse (g)	1,25	0,71	0,45
Diamètre moyen (mm)	15,4	11,8	9
Épaisseur (mm)	2	1,9	2,1
Pression (bar)	2		
Temps d'exposition (min)	2		
Taux de réduction (%)	73	96,1	92,7



La première réduction a été réalisée avec le disque le plus large de tous, échantillon D1 (15,4 mm de diamètre), son épaisseur était de 2 mm. Lors de la réduction, le disque a fortement changé d'aspect et s'est déformé jusqu'à se briser, comme le montre la dernière ligne du Tableau IV-6. Ce changement de forme est dû aux différentes contraintes mécaniques induites dans le disque avec le changement de température, et au changement de volume entre les phases, comme expliqué par Li *et al.* [56]. Le diffractogramme de l'échantillon final est présenté Figure IV-28. L'échantillon final est composé de magnétite (2,7%_{masse}), de wuestite (24%_{masse}), de fer (72,2%_{masse}) et de quartz (1,1%_{masse}) ce qui donne un taux de réduction de 73%, donc bien inférieur au 95% objectif. Cette faible réduction est probablement due au diamètre trop élevé du disque au regard de ce qui est directement illuminé par le flux lumineux. En effet, sur la photo du disque post-réduction présentée dans la dernière ligne du Tableau IV-6, il est possible de voir différentes teintes dans le diamètre du disque. La partie la plus claire (proche du blanc) est la zone directement illuminée par le flux ; ensuite une zone gris clair est repérable, correspondant au fer et, finalement, sur le bord du disque, une zone plus foncée est visible, attribuée à la wuestite et la magnétite qui sont difficilement différenciables. Donc, au cours des 2 minutes de réduction, les zones extérieures du disque n'ont pas eu le temps de suffisamment monter en température et ne sont donc pas transformées en wuestite ou en fer.

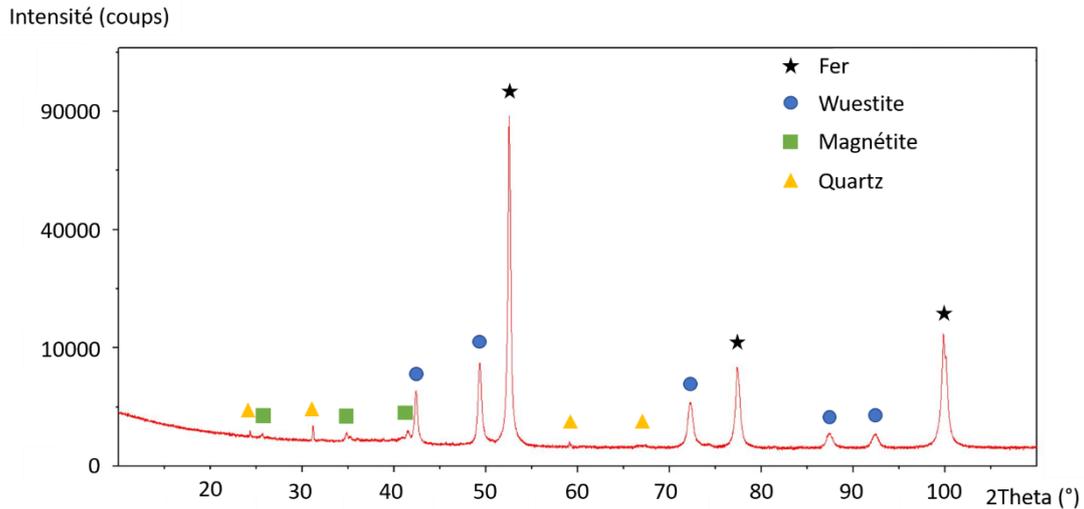


Figure IV-28 : Diffractogramme mesuré sur l'échantillon D1 après une réduction de 2 min sous 2 bars d'hydrogène.

La seconde réduction concerne le disque D2 de 11,8 mm de diamètre et de 1,9 mm d'épaisseur. Sur la photo de l'échantillon post-réduction, il est possible de voir que le disque se déforme moins et que la variation de couleur dans le diamètre est nettement moins importante et n'affiche plus la nuance noire présente lors de la réaction précédente. Il est donc possible de s'attendre à ce que la réduction soit bien plus complète que précédemment. En effet, lors de l'analyse de l'échantillon réduit, la quantité de fer vaut 95,9%_{masse} de l'échantillon, celle de wuestite 3,9%_{masse} et la magnétite n'est pas détectée ; les 0,2%_{masse} restant sont dus à la présence de quartz. Ces résultats donnent un taux de réduction de 96,1%, suffisant pour les exigences de l'industrie ; le diffractogramme mesuré est présenté Figure IV-29.

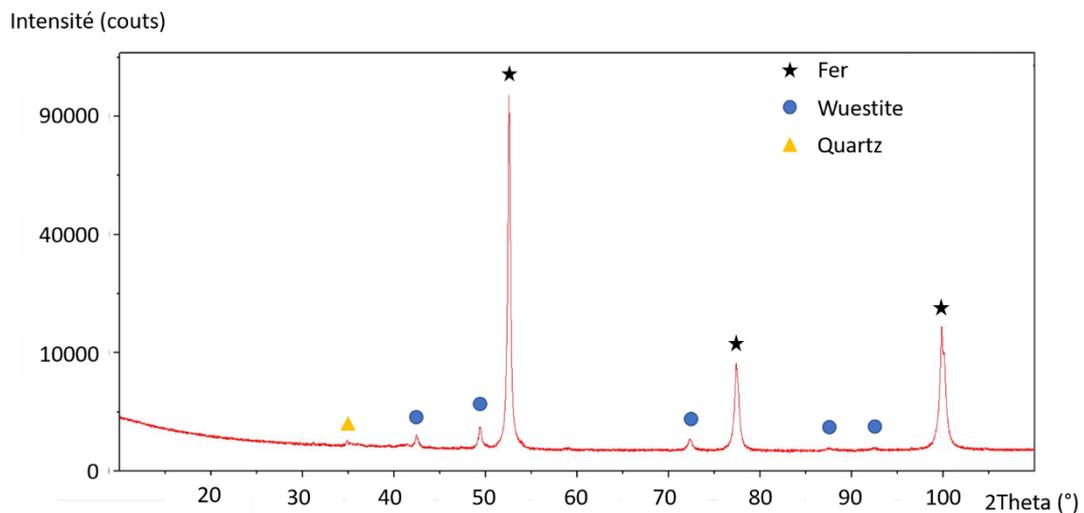


Figure IV-29 : Diffractogramme mesuré sur l'échantillon D2 après une réduction de 2 min sous 2 bars d'hydrogène.

Finalement, pour le dernier disque avec un diamètre de 9 mm et une épaisseur de 2,1 mm, le taux de réduction a été plus faible. En effet, un taux de 92,7% est mesuré, avec comme composition : 1%_{masse} de magnétite, 6,3%_{masse} de wuestite, 92,5%_{masse} de fer et 0,2%_{masse} de quartz (voir Figure H-6 en annexe). Ce résultat est étonnant puisque le disque est plus petit et plus léger, la seule différence étant son épaisseur légèrement plus importante. Cela peut induire

un plus grand gradient dans l'épaisseur et donc peut empêcher la réduction du bas du disque : c'est ce que l'augmentation de la proportion de magnétite laisse penser.

Afin d'observer plus précisément le déroulement de la réduction, nous avons réalisé une réduction similaire à l'échantillon D2 et réalisé des observations au MEB et des analyse EDS. La Figure IV-30 présente une reconstitution grâce à trois images MEB de la tranche d'un disque lorsqu'il est découpé dans le diamètre en passant par son centre. Sur Figure IV-30, la zone sous le rochet jaune correspond est celle où le flux lumineux est le plus concentrée, il est possible de voir que cette zone est très impactée et change de forme. Par ailleurs, il est possible d'observer une réduction très homogène dans la zone droite du disque avec une phase de fer dense alors qu'à gauche, la présence d'une partie très poreuse est remarquée.

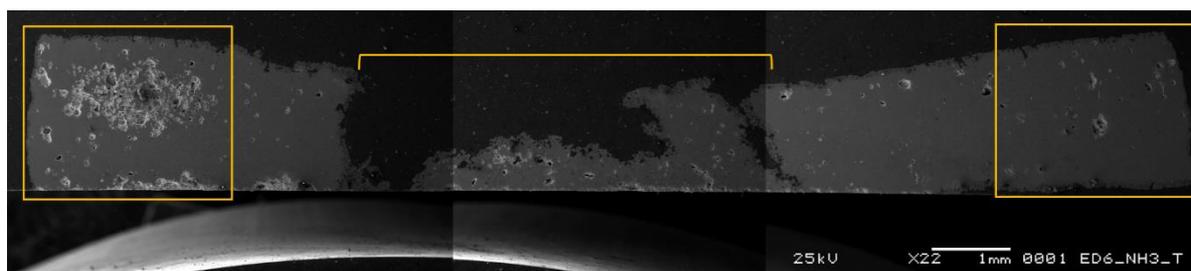


Figure IV-30 : Image MEB de la tranche médiane d'un disque réduit sous 2 bars d'hydrogène pendant 2 minutes, la surface supérieure est celle qui était directement illuminée par le flux. La zone sous le crochet jaune est celle où le flux est le plus intense, les deux zones rectangles sont les extrémités du disque où des analyses complémentaires ont été réalisées.

Nous avons réalisé un profil EDS dans la hauteur du disque dans chacune des deux zones encadrées en jaune sur la Figure IV-30. En plus des profils EDS, des cartographies EDS ont été réalisées sur toute la zone. Le profil est présenté en haut de la Figure IV-31 avec l'évolution de la quantité d'oxygène en bleu et celle du fer en rouge. Le profil est réalisé le long du peigne jaune en faisant la moyenne de chaque quantité dans les rectangles qui composent le peigne. Dans la partie inférieure de la Figure IV-31 sont présentées les cartographies EDS en mosaïque, les cases a) et b) présentant l'image de la zone réalisée avec les électrons rétrodiffusés et secondaires respectivement. Les cases a), b), c), d), e), f), g), h) et i) présentent les cartographies du fer, de l'oxygène, de la silice, du titane, du zinc, de l'aluminium et du calcium respectivement. Lorsque l'on s'attarde sur la case concernant le fer (c), il est possible de voir que le fer est réparti de manière homogène sur toute la zone étudiée. Il est aussi possible de voir que certains points de la zone sont particulièrement pauvres en fer et riche en oxygène souvent accompagnés de silicium. Par ailleurs, les autres cartographies montrent aussi la présence des autres éléments d'impuretés (Si, Al, Ti, Ca et Zn) dans l'ensemble de l'échantillon. Les analyses EDS quantitatives montrent que la quantité de fer est élevée (environ 80%_{atomique} en moyenne), avec une proportion d'oxygène variant entre 10%_{atomique} et 27%_{atomique}. Il est important de garder en tête que les profils des autres éléments ne sont pas présentés mais avec les autres cartographies il est possible de conclure que l'oxygène résiduel mesuré est reparti entre des oxydes de fer résiduels (wuestite) et les impuretés.

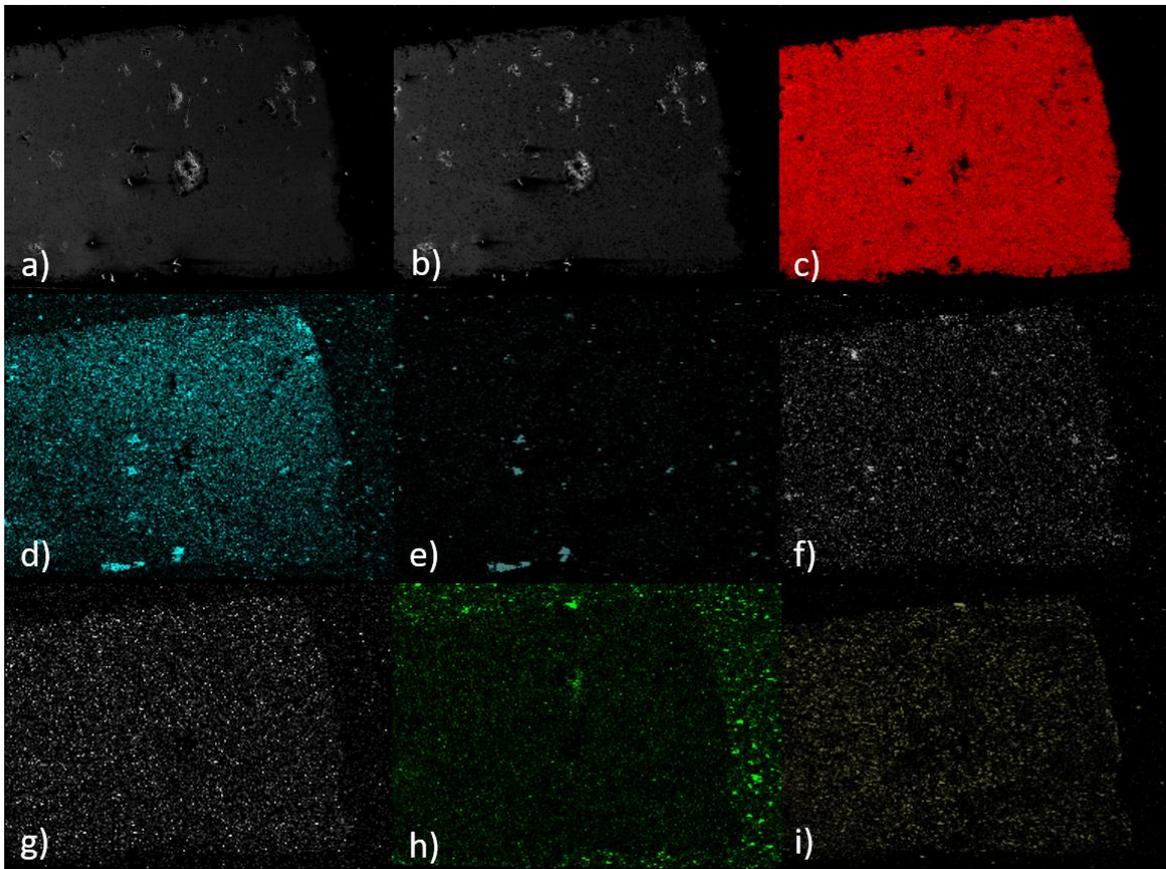
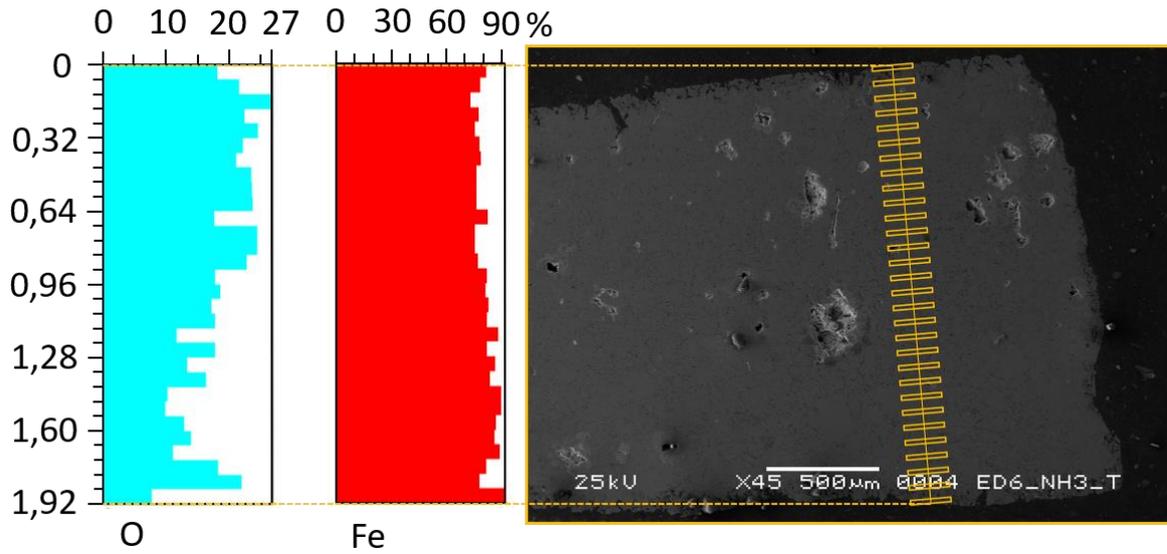


Figure IV-31 : (Haut) Zoom sur l'extrémité droite du disque et profil EDS sur le long du peigne jaune avec l'oxygène en bleu et le fer en rouge. Les analyses EDS ont été réalisées au sein des rectangles composant les peignes, chaque barre de l'histogramme représentant la moyenne des proportions mesurées dans les rectangles. (Bas) Cartographie EDS de la zone droite du disque avec a) l'image MEB avec les électrons rétrodiffusés, b) celle avec les électrons secondaires. Les cases suivantes présentent les cartographies des éléments suivants : c) fer d) oxygène e) silicium, f) titane g) zinc h) aluminium i) calcium.

Pour la partie gauche, la situation est différente. En effet, sur l'image MEB il a été remarqué qu'une zone était restée poreuse alors qu'au-dessus et en dessous, il semblerait que la même phase que pour la partie droite soit présente : du fer dense. Les mêmes analyses que pour la partie droite ont été réalisées selon les mêmes protocoles : analyse quantitatives et cartographies EDS comme le montre la Figure IV-32.

Lorsque l'on observe l'évolution des proportions de phases dans l'épaisseur de disque, une nette différence avec la partie droite est visible. En effet, contrairement à précédemment, il est possible de remarquer une variation dans les proportions d'oxygène et de fer. Au début, proche de la surface supérieure du disque, le taux de fer est le plus important mais diminue continuellement jusqu'à atteindre un minimum à environ 0,66 mm de la surface du disque. Ensuite, la proportion de fer augmente pour retrouver le même taux qu'au niveau de la surface du disque. La zone où la proportion d'oxygène est la plus élevée et celle de fer la plus faible se situe sur la partie poreuse. Nous attribuons donc ces résultats à la présence d'oxyde de fer non réduit dans la zone poreuse.

Sur les cartographies EDS, les mêmes conclusions que précédemment peuvent être tirées : de nombreux éléments d'impuretés sont présents dans l'échantillon (Si, Ca, Ti, Zn ou encore Al) sous forme d'oxydes. Lorsque l'on observe la cartographie de l'oxygène, il est possible de voir que la présence d'oxygène est nettement plus forte dans la zone correspondante à celle la plus poreuse. Dans la même zone, on observe une légère baisse dans la présence du fer. En recroisant ces deux observations, à savoir : une répartition homogène des éléments d'impuretés et une augmentation de la présence d'oxygène couplée à une diminution de la présence de fer, cela indique que la zone poreuse est bien composée d'oxyde de fer et donc, une zone moins réduite comparée au reste du disque.

La présence de cette zone d'oxyde peut aussi être due à un changement de régime de réduction. En effet, il est possible qu'en dessous d'une certaine taille, le gradient de température qui était à l'origine du nouveau mécanisme de progression de la réduction ne soit plus significatif. La température pourrait ainsi être suffisamment homogène dans le disque dès les premiers instants d'irradiation et donc permettre une réduction depuis la surface extérieure en contact avec le gaz réducteur. Sur ces temps courts de 2 min, si la diffusion des gaz limite la cinétique de réduction alors la présence d'un « cœur » d'oxyde de fer est effectivement probable.

Finalement, pour la partie du disque qui se trouve entre les deux cartes jaunes sur la Figure IV-30, le même aspect que celui dans la zone encadrée de droite ce qui veut dire que l'oxyde a bien été réduit en phase de fer dense.

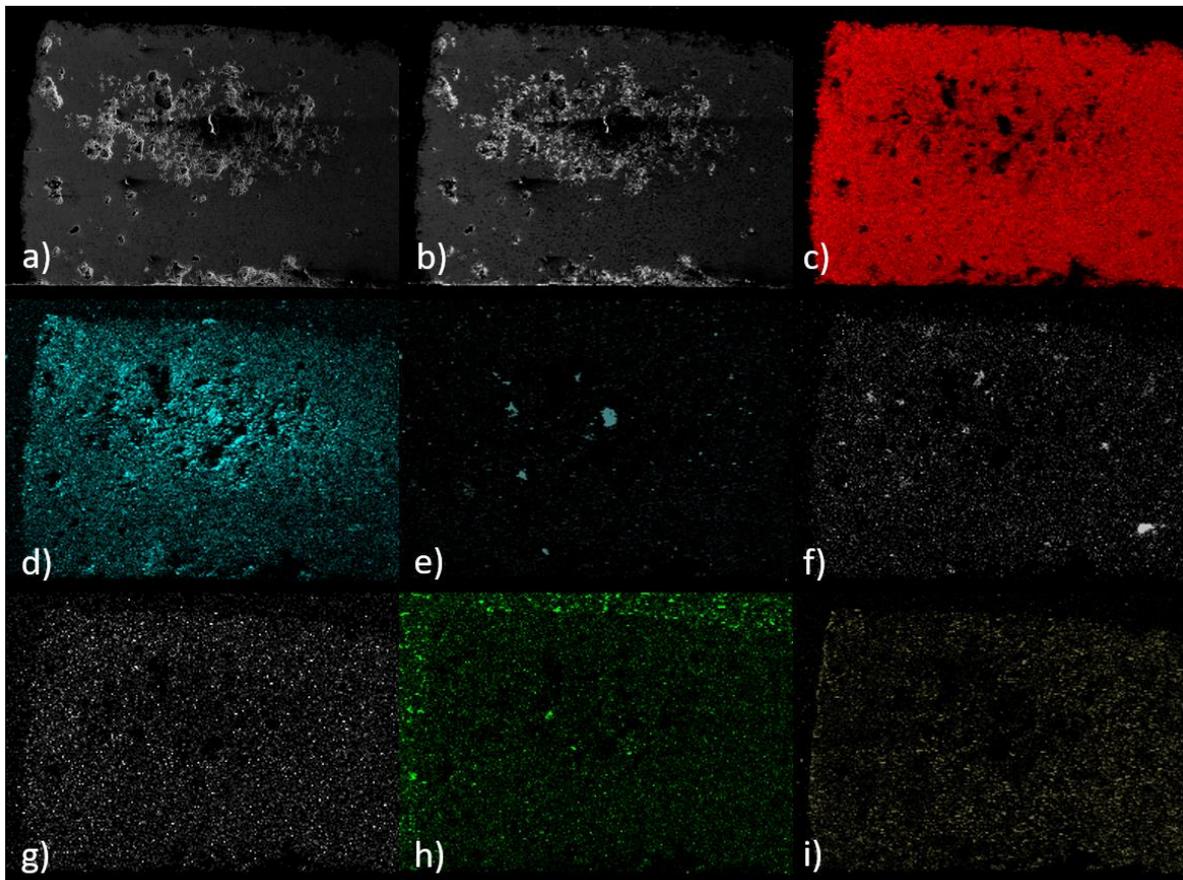
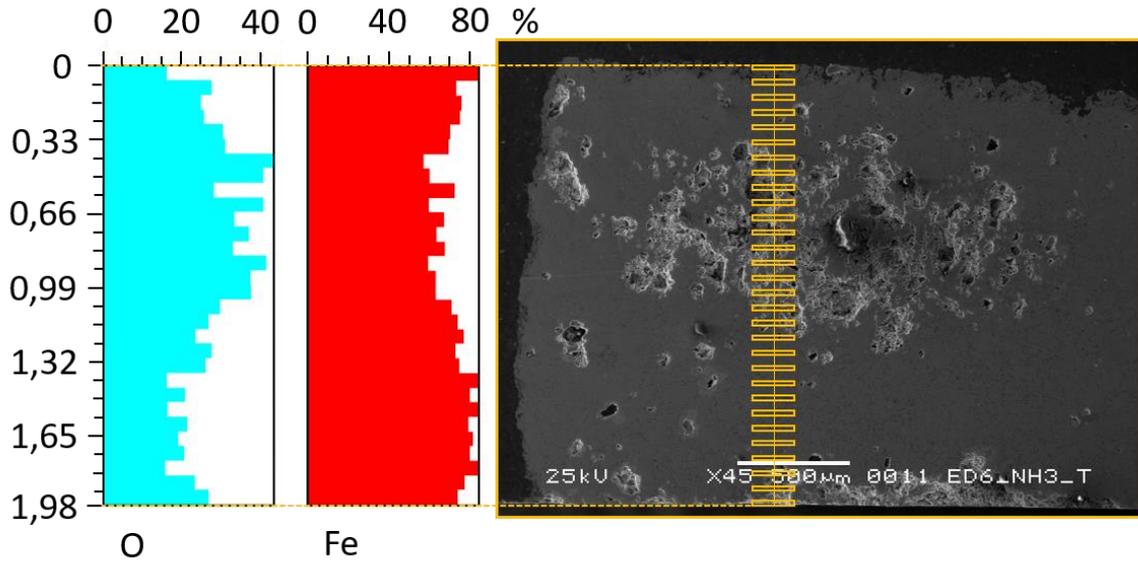


Figure IV-32 : (Haut) Zoom sur l'extrémité gauche du disque et profil EDS le long du peigne jaune avec l'oxygène en bleu et le fer en rouge. Les analyses EDS ont été réalisées au sein des rectangles composant les peignes, chaque barre de l'histogramme représentant la moyenne des proportions mesurées dans les rectangles. (Bas) Cartographie EDS de la zone gauche du disque avec a) l'image MEB avec les électrons rétrodiffusés, b) celle avec les électrons secondaires. Les cases suivantes présentent les cartographies des éléments suivants : c) fer d) oxygène e) silicium, f) titane g) zinc h) aluminium i) calcium.

Il est donc possible de conclure que le disque a permis de réduire le temps de réduction à 2 min, sans avoir besoin de réaliser un retournement, ce qui facilite fortement la réalisation des expériences. La dimension du disque a joué un rôle primordial dans la réduction des disques puisque, si le disque a une surface exposée trop grande devant celle que le flux irradie, alors un fort gradient de température se crée, ce qui peut induire des inégalités de réduction. Il en est probablement de même avec l'épaisseur bien que les données soient moins claires que pour le diamètre, donc d'autres expériences seraient nécessaires.

IV.2.4. Conclusion

Durant cette première partie, de nombreuses expériences de réduction de minerai de fer sous hydrogène et flux lumineux concentré ont été présentées. Les conclusions principales sont que la réduction sous flux lumineux et sous hydrogène est possible, puisque de forts taux de réduction ont été atteints.

Avec les pellets, il a été montré qu'un changement de surface directement exposée au flux lumineux était nécessaire. En effet, il a été possible de passer de 28 min de réduction à 12 min pour atteindre ou dépasser 95% de réduction. Les expériences sur le gravier et les disques ont montré que l'utilisation des graviers n'apportait pas d'avantage lors de la réduction, alors que les disques oui. En effet, ces derniers ont montré un net avantage grâce à leur grande surface exposée au flux, leur faible épaisseur et un meilleur transfert thermique sur tout l'échantillon. Cette caractéristique permet une bonne récupération du flux sans induire un gradient trop important dans l'échantillon. Lors de la réduction avec un disque, le temps de réduction pour atteindre 95% de réduction est de 2 min sans retournement. Le fait de ne pas avoir de retournement faciliterait grandement la mise en œuvre du procédé à une échelle plus importante. Par exemple, il est possible d'imaginer un procédé où des plaques de minerai de fer relativement fines passeraient sur un tapis roulant sous un flux solaire concentré adapté. Nous avons aussi pu montrer avec les analyses MEB et EDS que les zones réduites des échantillons le sont de manière homogène. Les parties des échantillons restées oxydées le sont en raison de la présence d'un gradient de température. Cependant, dans le cas d'échantillon de petites tailles où ce gradient serait négligeable, un changement de régime ralentissant la cinétique pourrait aussi expliquer la présence d'oxyde lors de nos réductions les plus courtes.

D'un point de vue plus large, ces résultats montrent que le solaire à concentration peut être utilisé pour des procédés à haute température comme la réduction du minerai de fer sous hydrogène. La question qui subsiste est la suivante : peut-on remplacer l'hydrogène tel qu'il est majoritairement produit aujourd'hui par une source d'hydrogène biosourcée ou émettant moins de gaz à effet de serre ? L'ammoniac est un vecteur d'hydrogène et il peut être trouvé dans des molécules naturelles comme l'urée ; cela a déjà été développé dans la partie I.3.2.1.2 (page 69). De plus, l'ammoniac est bien plus facile et sûr à transporter et à stocker que l'hydrogène. Cette option sera explorée dans la suite de ce chapitre.

IV.3. Réduction sous ammoniac

Ici sera étudiée la possibilité de remplacer l'hydrogène lors de la réduction de minerai de fer par l'ammoniac. Dans un premier temps, des analyses de diffraction aux rayons X ont été réalisées pour étudier la cinétique et la réduction sous ammoniac. Ensuite, des expériences de réduction sous flux lumineux concentré sur des pellets, du gravier et des disques ont été réalisées.

IV.3.1. Tests préliminaires sur poudres

Comme dans le cas de l'hydrogène, des expériences préliminaires de diffraction des rayons X *in situ* sur des poudres d'oxyde de fer ont été réalisées. Le montage est le même que celui pour l'hydrogène (voir partie II.2.1, page 111).

Tout comme pour l'hydrogène, des expériences avec une rampe de température et avec des plateaux de température ont été réalisées. Les deux analyses ont été réalisées dans une atmosphère réductrice d'ammoniac dans N₂, avec la proportion 5/95%_{mol} sous 1 bar relatif.

Rampe : De la même manière que pour l'hydrogène, l'analyse en rampe de température consiste à réaliser des scans de diffraction aux rayons X les uns après les autres à différentes températures.

Tout comme pour l'hydrogène, un scan de l'échantillon à 30 °C a été réalisé au début de la rampe. Ensuite, la chambre réactionnelle est montée graduellement jusqu'à 700 °C. Ici, les scans ont été réalisés plus régulièrement. Entre 100 °C et 300 °C tous les 100 °C, puis tous les 50 °C jusqu'à 400 °C et tous les 25 °C de 400 °C à 700 °C. Le profil de la rampe est présenté Figure IV-33 avec en rouge le profil consigne et en bleu celui mesuré. La durée de scans était légèrement plus courte que pour l'hydrogène en raison de leur plus grand nombre.

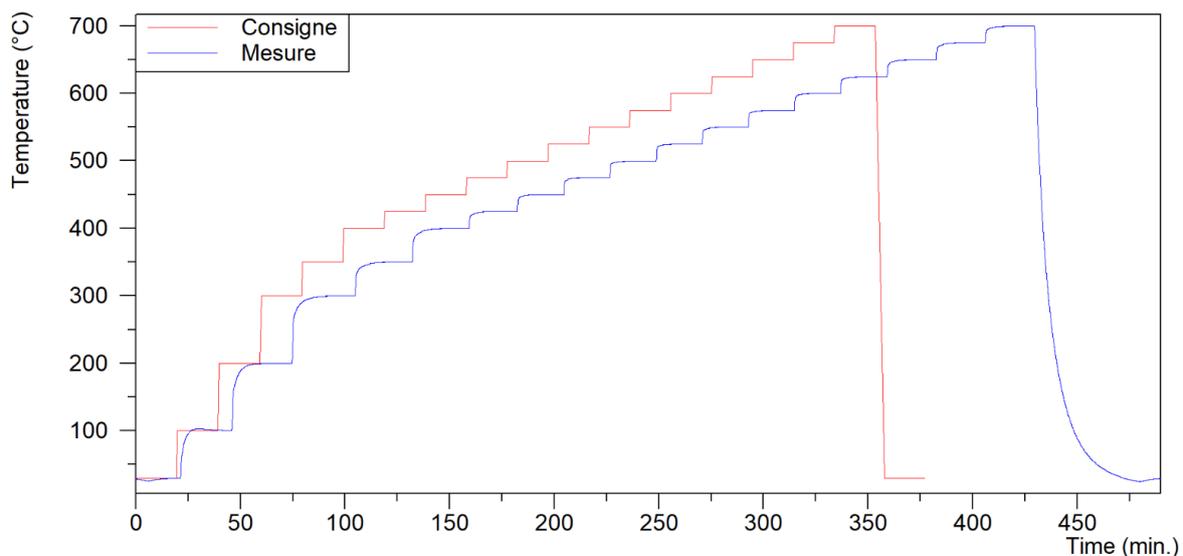


Figure IV-33 : Profil des températures de consignes et mesurées lors de l'expérience en rampe. En rouge le profil de la consigne et en bleu le profil mesuré.

Les diffractogrammes de la rampe sont présentés Figure IV-34. Pour des raisons de clarté, seul les diffractogrammes des températures communes avec la rampe sous hydrogène sont montrés.

Il est possible de remarquer que l'hématite est la seule phase de l'échantillon jusqu'à 300°C. La magnétite est visible à partir de 350 °C (non présenté) et jusqu'à 500 °C, après quoi elle disparaît complètement. A 450 °C, une phase de nitrure de fer Fe_2N apparaît ; elle n'est présente qu'à cette température et se transforme en Fe_4N à partir de 500°C jusqu'à 625 °C (non présenté). Le fer apparaît à 450 °C et devient la seule phase présente à partir de 650 °C et plus haut.

Avec ces observations, plusieurs différences sont à noter. D'abord, la phase de magnétite apparaît plus tard que sous H_2 ; cela est logique au vu des résultats de la littérature : il a ainsi été montré que la cinétique de réduction sous hydrogène est plus rapide comme présenté dans la partie I.3.2.3. Cette observation est corroborée par le fait qu'à 400 °C il n'y a plus d'hématite alors que, sous NH_3 , il en reste. De plus, le fer seul n'est observé qu'à partir de 625 °C contre 550 °C sous hydrogène. Ceci semble être dû à la présence des nitrures de fer. Au niveau des points communs, il est possible de remarquer l'absence de wuestite bien que le fer soit formé à plus de 570 °C.

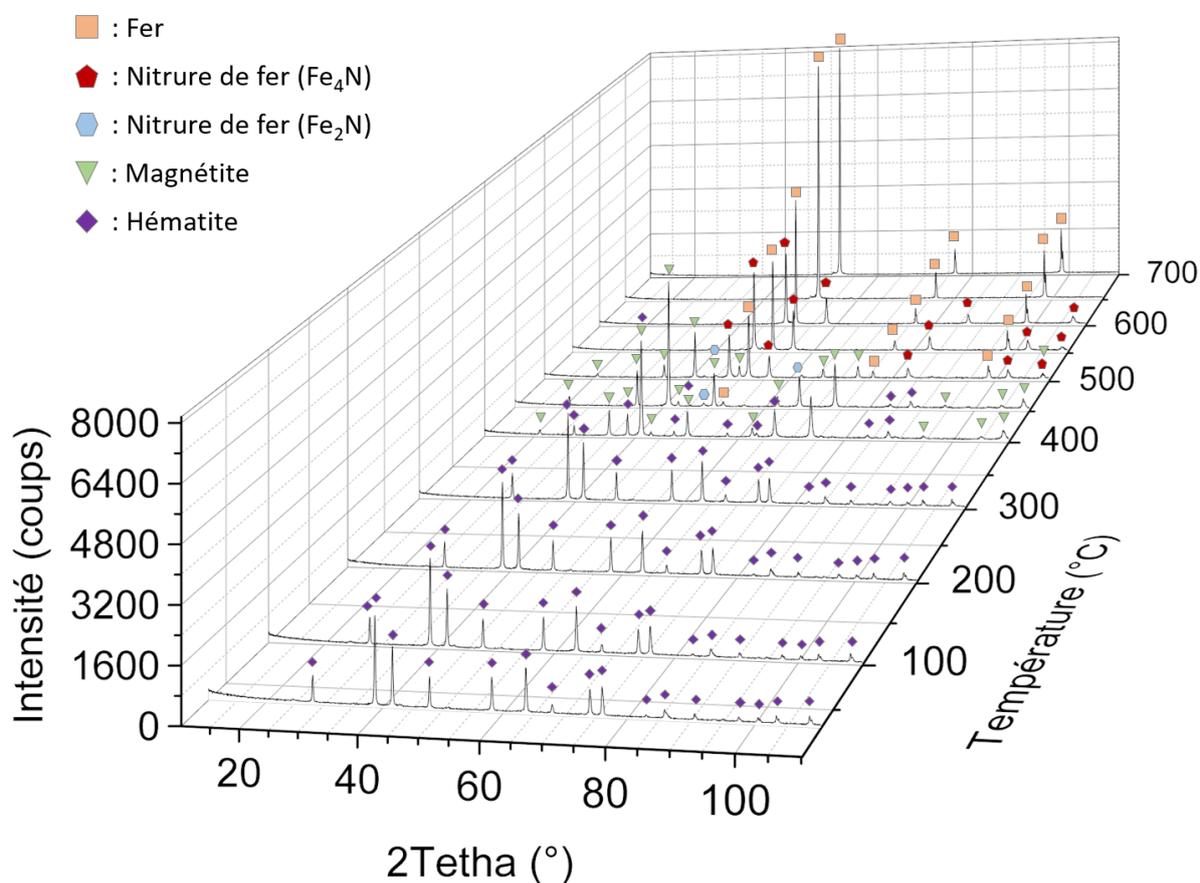


Figure IV-34 : Diffractogrammes de l'analyse de réduction d'une poudre d'hématite pure à 98% sous une atmosphère de NH_3/N_2 à 5/95%_{mol}. La rampe de température va de 30 °C à 700 °C. Les phases sont l'hématite (losange violet), la magnétite (triangle vert), les nitrures de fer (hexagone bleu - Fe_2N et pentagone bordeaux - Fe_4N) et le fer (carré orange).

Plateaux : Tout comme sous hydrogène, des mesures dynamiques à différentes valeurs de températures ont été réalisées sous ammoniac. L'objectif était le même : observer l'évolution temporelle des phases dans l'échantillon à une température donnée.

Les températures étudiées ici ont été réalisées d'abord sur de la poudre pure d'hématite puis sur de la poudre issue des minerais industriels, ces dernières étaient 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C et 600 °C, avec une atmosphère composée d'ammoniac et d'azote à hauteur de 5/95%_{mol}.

Les résultats sont présentés Figure IV-35-a-e. Les phases identifiées durant les différents plateaux sont l'hématite, la magnétite, les nitrures de fer (Fe_3N et Fe_4N), la wuestite et le fer. D'abord, à 400 °C, la transformation de l'hématite ne produit que de la magnétite, la transformation étant totale après 40 min. Ensuite, pour toutes les autres températures l'hématite est totalement transformée en 20 minutes de réduction ou moins. Par ailleurs, à 450 °C, 500 °C et 550 °C, la magnétite est présente de moins en moins longtemps : à 450 °C elle ne disparaît pas, même après 180 min, son taux minimal étant de 11,3%_{masse} ; pour les deux autres températures, la magnétite disparaît complètement après 60 et 40 min, respectivement. Toujours aux mêmes températures, la présence de deux types de nitrures est observée : Fe_3N et Fe_4N . L'évolution de ces deux phases montre que le Fe_3N est le premier à se former et celui dont la proportion augmente le plus rapidement. Il est également possible de voir qu'une fois que le pic de production Fe_3N est atteint et que sa proportion redescend, la diminution du Fe_3N est en lien avec l'augmentation du Fe_4N . Par exemple, à 550 °C après 80 min de réduction, la pente de la diminution du Fe_3N s'accroît nettement alors que celle du Fe_4N se raidit nettement au même moment.

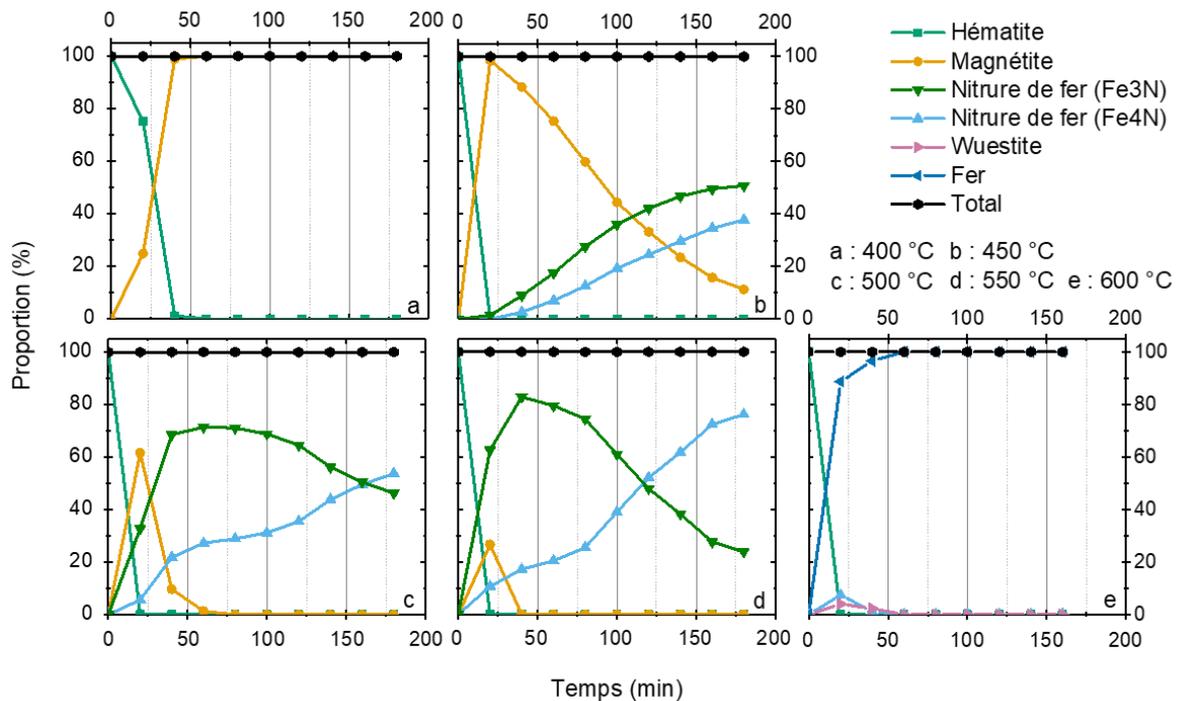


Figure IV-35 : Analyses plateaux de DRX *in situ* à (a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C, (d) 550 °C, (e) 600 °C pour la réduction de poudre d'hématite pure sous ammoniac et azote (5/95%_{mol}). Les phases identifiées sont l'hématite (émeraude), la magnétite (orange), les nitrures de fer (vert foncé – Fe_3N et bleu clair – Fe_4N) la wuestite (rose) et le fer (bleu foncé). Le total des phases est représenté en noir.

Enfin, à 600 °C, la réaction est très différente : on constate l'apparition de fer et de wuestite, alors que le Fe_3N est absent et le Fe_4N présent en très faible quantité. La proportion de fer atteint 96,6% en 20 min puis 100% en 60 min. Ces observations sont cohérentes avec le diagramme de Lehrer présenté dans la littérature partie I.3.2.4 (page 77). En effet, à 450 °C, 500 °C et 550 °C, l'évolution des phases présentées ici correspond à celle observée sur le

diagramme de phase Fe - N. En effet, pour les hautes proportions d'azote dans le fer, la phase est celle de Fe_3N qui devient du Fe_4N avec la diminution du taux puis du fer lorsque l'on arrive entre 0 et 0,1%_{masse} d'azote. A 600 °C, la phase de fer apparaît beaucoup plus tôt dans le diagramme de phase à des taux d'azote de 2,4%_{masse}. Cela est aussi confirmé avec le diagramme de Lehrer, présenté partie I.3.2.4 (page 77), qui montre que lorsque la proportion d'ammoniac diminue dans le mélange gazeux les phases formées sont d'abord le Fe_3N avec les hauts taux d'ammoniac, puis le Fe_4N et enfin le Fe pure.

Une comparaison entre ces résultats et ceux sous hydrogène montre que la cinétique de réduction sous hydrogène est plus rapide. En effet, à 400 °C sous hydrogène l'hématite est complètement transformée après 20 min alors que sous ammoniac cela prend 40 min. De plus, toujours à 400 °C, sous hydrogène le fer est présent à hauteur de 2,5%_{masse} après 180 min alors qu'il est absent sous ammoniac. Pour l'hydrogène, les 100% de réductions sont atteints à 500 °C alors que sous ammoniac ils ne le sont qu'à 600 °C. Une explication de l'absence de fer avant 600 °C sous ammoniac peut être la présence des nitrures de fer. En effet, comme la poudre pure est micrométrique les particules sont nitrurées jusqu'au cœur et non en surface comme cela peut être avec de plus grosses particules. Donc, la transformation de la magnétite vers le fer ne se fait pas et c'est celle de la magnétite vers des nitrures qui se fait. Ces nitrures se décomposent ensuite à 600 °C pour laisser place au fer.

Pour la poudre industrielle, les résultats sont présentés Figure IV-36-a-e. Ici, les mêmes phases que lors des réductions avec la poudre d'hématite pure sont identifiées, accompagnées de quartz dans certains cas. Au niveau de l'évolution des phases, des points communs sont visibles. D'abord, lorsque la proportion de Fe_3N diminue, celle de Fe_4N augmente. De plus, plus la température est élevée plus la réduction de l'échantillon en fer est rapide et, la wuestite est observée à 600 °C avec les deux poudres. Cependant, de nettes différences de cinétique sont également observées. Tout d'abord, à 400 °C, la transition de l'hématite vers la magnétite n'est pas complète avec la poudre industrielle alors qu'elle l'est en 40 min avec la poudre pure. A 450 °C, les deux nitrures (Fe_4N et Fe_3N) sont visibles lors de la réduction de la poudre d'hématite alors que seul le Fe_3N est visible avec la poudre industrielle. Il est aussi possible de voir que le fer apparaît bien plus tard avec la poudre d'hématite (600 °C) qu'avec celle de minerai (500 °C). Il est également intéressant de voir qu'avec la poudre d'hématite, la réduction complète est atteinte à 600 °C alors qu'avec celle de minerai, le fer atteint 96,6%_{masse} au maximum.

La différence de cinétique entre les deux poudres provient probablement de leur taille, la poudre d'hématite est plus fine que la poudre réalisée à partir des minerais, il est donc logique que la transformation de l'hématite en magnétite soit plus rapide. De plus, la petite taille des particules de poudre d'hématite permet la nitruration à cœur des particules. Pour la transformation en fer, la différence de tendance est probablement due au fait que, pour la poudre d'hématite, il y a moins de sites actifs avec une énergie suffisamment élevée pour permettre la décomposition des nitrures disponibles en raison de l'absence d'impuretés. Cela fait que la température de 600 °C doit être atteinte pour permettre de les décomposer alors qu'avec la poudre industrielle, certains sites avec des impuretés favoriseront la décomposition des nitrures et la nucléation du fer.

Lorsque ces résultats sont comparés à ceux sous hydrogène, il est possible de remarquer une différence notable de cinétique à basse température. Comme présenté ci-dessus, à 500 °C le taux de fer présent après 180 min sous ammoniac est de 19,5%_{masse} de réduction contre 32,9%_{masse} sous hydrogène. Par ailleurs, à 550 °C et à 600 °C, le taux de fer après 180 min de

réduction est supérieure avec l'utilisation de l'ammoniac. En effet, par exemple, à 600 °C, le taux de fer atteint après 180 min de réduction est de 95,4%_{masse} sous ammoniac contre 85,5%_{masse} sous hydrogène. Cette observation montre que l'ammoniac permet une meilleure réduction lors de réduction plus longues. Dans la littérature, il a été montré que la réduction se déroule d'abord avec l'ammoniac lui-même puis avec l'hydrogène issu de la décomposition de l'ammoniac, et qu'au début, la cinétique est plus faible. Ces constatations sont retrouvées ici. De plus, il a été montré que pour de long temps de réduction, les taux de réduction sont meilleurs sous ammoniac que sous hydrogène. La réduction sous ammoniac produit de la vapeur et de l'azote contre qu'uniquement de la vapeur sous hydrogène, il est donc possible que la vapeur produite affecte moins la cinétique de réduction sous ammoniac que sous hydrogène. De plus, la réaction est possible aussi bien avec l'ammoniac qu'avec l'hydrogène donc cela fait plus de gaz réducteur dans le mélange même en présence de vapeur, permettant d'avoir une meilleure activité de réduction.

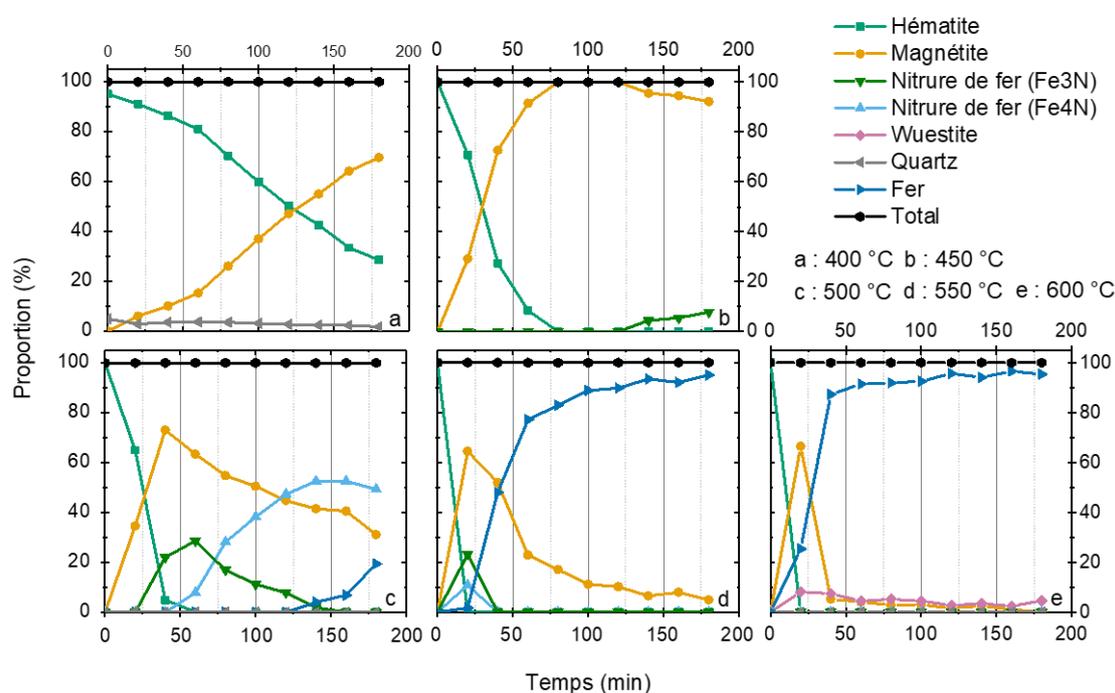


Figure IV-36 : Résultats des analyses de plateau de DRX *in situ* à (a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C, (d) 550 °C, (e) 600 °C pour la réduction de poudre de minerai industriel sous ammoniac et azote (5/95%_{mol}). Les phases identifiées sont l'hématite (émeraude), la magnétite (doré), les nitrures de fer (bleu clair – Fe₄N et vert foncé – Fe₃N) la wuestite (rose), le quartz (gris) et le fer (bleu foncé). La somme des proportions des phases est présentée en noir.

Ces premières expériences de DRX *in situ* de réduction de poudre d'hématite pure ou de minerai industriel sous ammoniac ont permis de mettre en avant que la poudre pure offre une meilleure cinétique de réduction de l'hématite en magnétite. Cependant, la présence de fer est observée à 500 °C avec la poudre industrielle alors qu'il faut attendre 600 °C pour en apercevoir avec la poudre pure. Cette différence a été attribuée aux impuretés présentes dans la poudre de minerai qui augmentent les énergies de surface des sites actifs, facilitant donc la décomposition des nitrures et la nucléation du fer. Au niveau des différences entre la réduction sous ammoniac et celle sous hydrogène, avec la poudre d'hématite pure, la différence notable est la température d'apparition du fer qui est de 350 °C sous hydrogène contre 600 °C sous ammoniac. Cette différence est attribuée à la formation de nitrures lors de la réduction sous ammoniac. Ces nitrures sont identifiés comme étant du Fe₃N et du Fe₄N, comme la montre le

diagramme de phase et Lehrer présenté I.3.2.4 (page 77). Lorsque la proportion d'ammoniac est élevée c'est le Fe_3N qui est formé alors que quand elle est plus faible c'est le Fe_4N . De plus, le diagramme de phase permet de voir que la décomposition du Fe_3N produit du Fe_4N . Ensuite, pour la poudre de minerai industriel, l'apparition du fer se fait aussi à une température plus basse sous hydrogène (400 °C) que sous ammoniac (500 °C), et les nitrures de fer sont également présents. De plus, là aussi la réduction sous hydrogène montre une meilleure cinétique au début de la réduction. Toutefois, après un certain temps de réduction, celle sous ammoniac atteint de plus haut taux de réduction pour un temps donné. Cette différence pourrait venir de la composition de l'atmosphère sous ammoniac qui permet de garder une activité réductrice plus élevée avec l'avancement.

IV.3.2. Réduction sous flux lumineux

Des premières expériences de réduction sous flux lumineux concentré dans une atmosphère d'ammoniac ont été réalisées. Malheureusement, par manque de temps, moins d'expériences ont pu être réalisées que lorsque l'hydrogène est utilisé. Cependant, les premiers résultats sont encourageants et sont présentés ci-après.

IV.3.2.1. Pellets

Tout d'abord, nous avons commencé par une réduction à faible puissance : 152 W₁ et sous 2 bars d'ammoniac. Le pellet réduit pesait 1,72 g et a été exposé pendant 28 minutes. Le taux de réduction atteint lors de cette expérience était de 69,7% avec une composition de l'échantillon comprenant de la wuestite (21%_{masse}) et de la magnétite (9,3%_{masse}). Cela montre que la réduction est bien possible. De plus, aucun nitrure de fer n'a été détecté : cela indique qu'une température suffisamment élevée a été atteinte dans la partie réduite pour ne pas les stabiliser, soit plus de 600 °C d'après les études de DRX *in situ*. Par ailleurs, la même progression de la réduction a été observé : début de la réduction par le coté illuminé du pellet qui se propage en direction de la partie non exposée.

Ensuite, nous avons voulu comparer les expériences sous ammoniac à celles sous hydrogène, et ce en fonction du temps sous différentes pressions. Deux séries de réduction de pellet de minerai de fer ont été réalisées. La première était sous 1,33 bar d'ammoniac : cette valeur a été choisie parce qu'elle correspond à 2 bars de pression partielle d'hydrogène si l'on considère que l'ammoniac se décompose complètement en N_2 et H_2 . La seconde a été réalisée à une valeur légèrement supérieure (2 bars), pour observer l'influence de la pression. Les conditions expérimentales sont résumées Tableau IV-7, le taux de réduction a été calculé de la même manière que pour les réductions sous hydrogène : en calculant la perte de masse des échantillons préalablement séchés après réduction (voir Eq IV-2 et Eq IV-3). Attention, sous ammoniac, la formation de nitrures rend plus complexe l'interprétation du taux de réduction tel qu'il est calculé précédemment. Nous nous limiterons à uniquement commenter les tendances dégagées.

Tableau IV-7 : Conditions expérimentales des réductions sous flux lumineux concentré de pellets de minerai de fer sous ammoniac à différentes pressions.

Pression (bars)	Masse moyenne (g)	Temps (min)	Puissance (W)	Atmosphère
1,33	2,83	1, 2, 4, 8, 12 et 16	318	NH ₃ - 100%
2	2,83			

Les résultats de ces expériences sont présentés Figure IV-37. Dans premier temps, il est possible de remarquer que l'évolution du taux de réduction sous ammoniac est franche durant les premières minutes de réduction, puis ralentit par la suite. Il est également possible de voir que, comme sous hydrogène, la pression n'a pas d'influence significative durant les premières minutes mais que la différence entre les deux s'accroît avec le temps bien qu'elle reste faible. Lorsque l'on compare la réduction sous 1,33 bar d'ammoniac et la réduction sous 2 bars d'hydrogène, celle sous hydrogène semble plus rapide. Une différence majeure entre les deux réductions est l'absence de plateau pour la réduction sous ammoniac, en tous cas, pendant les 16 premières minutes de la réduction. Il est probable qu'en prolongeant la réduction, un plateau serait également observé.

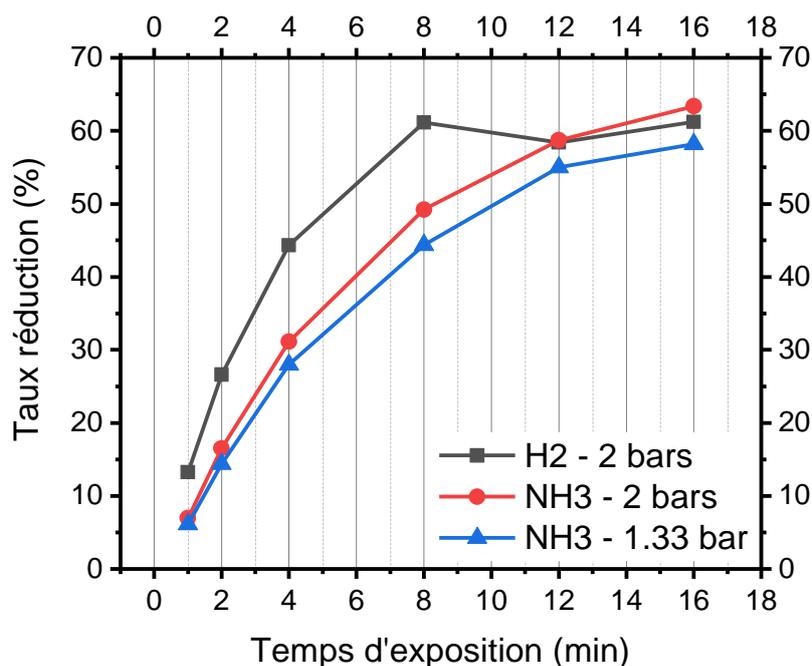


Figure IV-37 : Evolution du taux de réduction en fonction de temps lors d'une réduction sous flux lumineux concentré sous 1,33 bar d'ammoniac (bleu) et 2 bars d'ammoniac (rouge). A titre de comparaison, la courbe noire correspond à l'évolution en fonction du temps sous 2 bars d'hydrogène.

IV.3.2.2. Optimisation du temps de réduction

Pour rappel, grâce aux affinements de Rietveld, le taux de réduction n'est plus déduit de la perte de masse des échantillons mais du fer dans les différentes phases qui compose

l'échantillon. Ici, nous avons choisi de considérer les nitrures sur le même plan que les oxydes, c'est-à-dire que leurs contributions sont au dénominateur du calcul du taux de réduction.

Tout comme pour les réductions sous hydrogène, nous avons essayé de réduire le temps de réduction en retournant le pellet au milieu de l'exposition. Un pellet de 1,76 g a été réduit sous 2 bars d'ammoniac et sous 147 W_1 pour le comparer avec une réduction faite sans retournement. Lors de cette expérience, le taux de réduction atteint était de 90,7%, avec la composition d'échantillon suivante : 9,2%_{masse} de magnétite, 1,5%_{masse} de quartz et 89,3%_{masse} de fer. Bien que le taux atteint soit élevé, il ne remplit pas les exigences de l'industrie. Cependant, il augmente drastiquement pour le même temps d'exposition total en effectuant un retournement, comme nous l'avons vu dans le cas de l'hydrogène.

Nous avons ensuite décidé de nous placer au maximum de la puissance de la lampe. Nous avons également choisi de nous placer proche de 1,3 bar d'ammoniac pour avoir la même pression partielle d'hydrogène dans le cas de la décomposition complète de l'ammoniac. Par ailleurs, lors des expériences de réduction sous hydrogène, le pellet réduit pendant 16 min avec retournement sous la puissance maximale de la lampe a permis d'atteindre un taux de réduction suffisant pour les exigences de l'industrie ; nous avons donc choisi également ce temps de réduction pour les expériences sous ammoniac.

Un pellet de 1,91 g a été réduit sous 1,26 bar d'ammoniac sous 372 W_1 pendant 16 min avec un retournement au milieu de l'exposition. L'expérience de DRX présentée Figure IV-38 et les affinements de Rietveld, montrent que l'échantillon est composé à hauteur de 0,61%_{masse} de magnétite, de 2%_{masse} de wuestite, de 2,8%_{masse} de nitrure de fer (Fe_4N), de 94,3%_{masse} de fer et de 0,4%_{masse} de quartz. Ces proportions permettent d'atteindre un taux de réduction de 97,2%, ce qui remplit les exigences de l'industrie.

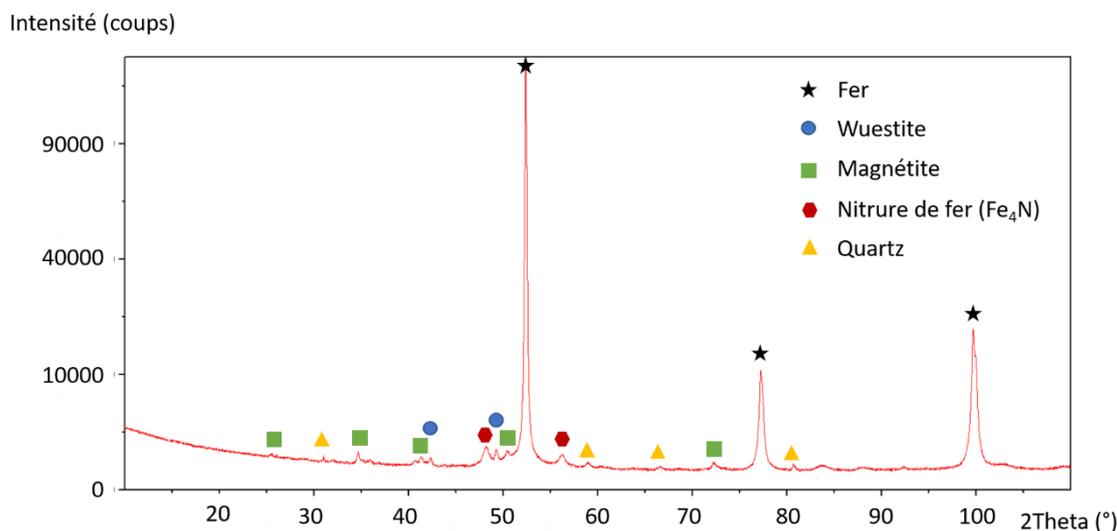


Figure IV-38 : Diffractogramme de la poudre d'un pellet après une réduction sous 1,26 bar d'ammoniac sous un flux lumineux concentré de 372 W_1 pendant 16 min avec un retournement au milieu de l'exposition.

Finalement, les échantillons les plus performants sous hydrogène - à savoir les disques - ont été testés sous ammoniac. Afin de pouvoir le comparer avec le disque qui a obtenu le meilleur taux de réduction sous hydrogène, le disque réduit ici était du même ordre de grandeur au niveau de la masse et des dimensions. Sa masse était de 0,76 g, son diamètre moyen de 11,3 mm et son épaisseur de 2,1 mm. Le taux de réduction atteint lors de cette réduction est seulement de

7,3%. La composition de l'échantillon était de 7,28%_{masse} de fer, 62%_{masse} de wuestite, 22,2%_{masse} de magnétite, 2,8%_{masse} de Fe_4N , 5,5%_{masse} de Fe_3N et, finalement, 0,3%_{masse} de quartz. Le diffractogramme est présenté Figure IV-39. Nous expliquons cette faible quantité de fer par la différence de cinétique de réduction entre NH_3 et H_2 pour de faibles temps de réduction, comme illustré précédemment (Cf Figure IV-37).

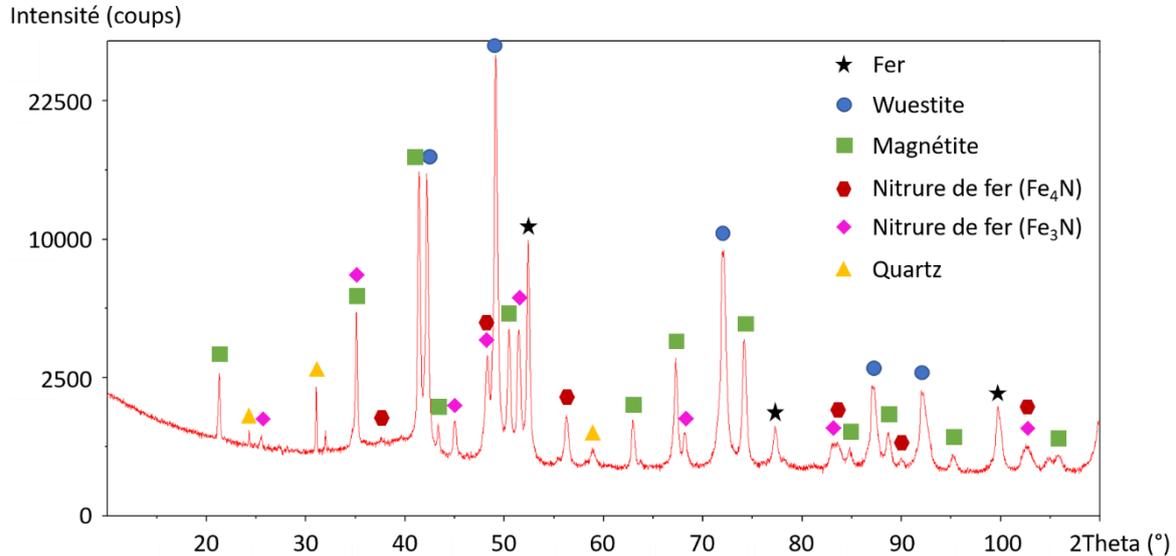


Figure IV-39 : Diffractogramme mesuré de D4 après une réduction de 2 min sous 1,33 bar d'ammoniac et 318 Wt.

Afin de confirmer le résultat précédent, un second disque, échantillon D5, a été réduit sous ammoniac dans les mêmes conditions que précédemment sauf pour le temps d'exposition qui est de 3 min ici. Sa masse initiale était de 0,75g, son diamètre moyen de 11,3 mm et son épaisseur de 2 mm. Le diffractogramme mesuré après réduction de D5 est présenté Figure IV-40. Sur ce dernier, il est possible de voir que le fer est bien plus présent et que la contribution de la magnétite est plus faible : leurs proportions finales étaient de 21,7%_{masse} pour le fer et de 2,9%_{masse} pour la magnétite. La proportion de wuestite reste du même ordre de grandeur : 62,6%_{masse}. Pour ce qui est des nitrures de fer, il est possible de voir la quasi disparition de la phase de Fe_3N (0,4%_{masse}) et une augmentation de l'intensité des pics de Fe_4N (12%_{masse}). La dernière phase identifiée est le quartz avec 0,4%_{masse}. Finalement, le taux de réduction est de 21,8% ce qui est environ 3 fois le précédent mais bien trop faible pour l'industrie.

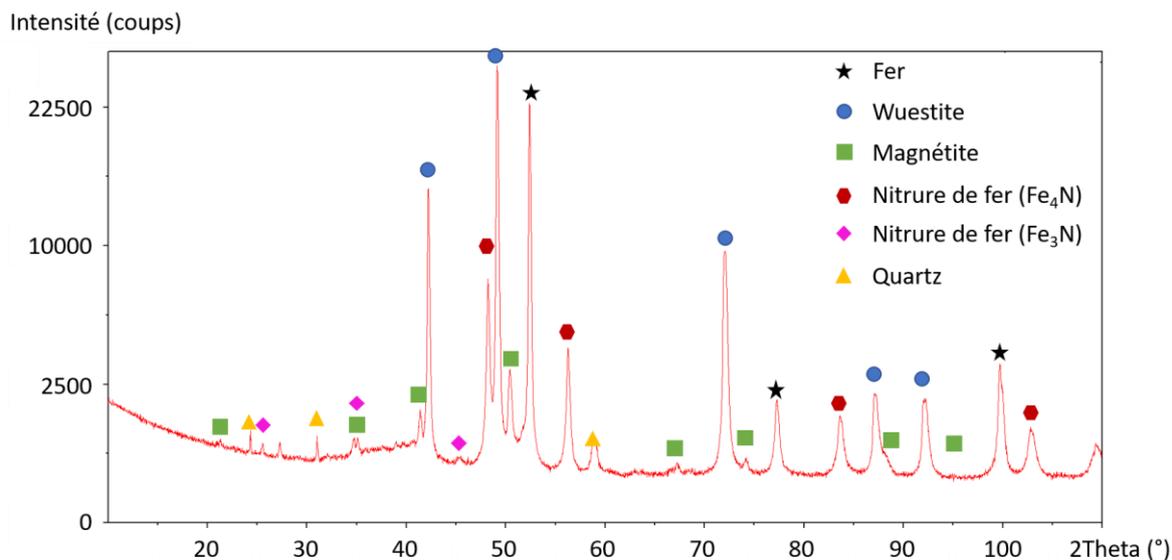


Figure IV-40 : Diffractogramme mesuré de D_4 après une réduction de 3 min sous 1,33 bar d'ammoniac et 318 W_l .

Ces réductions sous flux lumineux ont permis de montrer que la réduction sous ammoniac offrait un bon potentiel mais que la cinétique de réduction était bien plus lente surtout pour de courts temps de réduction. Par ailleurs, la nitruration du fer entrave également l'obtention rapide de haut taux de réduction. Néanmoins, si la présence de nitrures n'est pas rédhibitoire pour l'utilisation future du DRI, ils pourraient être compté positivement dans le taux de réduction.

De nombreuses expériences supplémentaires seront nécessaires pour bien comprendre le mécanisme de réduction sous ammoniac et améliorer sa cinétique.

IV.3.2.3. Discussions

Les résultats présentés précédemment soulèvent plusieurs points de discussion.

D'abord, la tendance la plus forte est celle de l'avantage de la cinétique de réduction de l'hydrogène devant l'ammoniac. Cet avantage a déjà été observé dans la littérature et a été appuyé par nos expériences de DRX *in situ* précédemment présentées [137]. Nous l'avons également observé pour tous les échantillons testés ci-dessus. Une explication possible est que la réduction sous ammoniac se déroule avec l'ammoniac lui-même et non avec l'hydrogène provenant de sa décomposition. Ce ne serait qu'ensuite, en présence de fer réduit dans les échantillons catalysant la décomposition de l'ammoniac en hydrogène et azote, que la réduction s'accélélerait [137], [138].

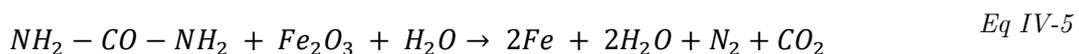
De plus, lors de l'étude de l'influence de la pression présentée Figure IV-37, le plateau observé sous hydrogène n'est pas visible sous ammoniac. Il a été montré que le plateau de réduction sous hydrogène provenait d'une baisse d'activité de l'hydrogène dans l'atmosphère lorsque de la vapeur d'eau est dégagée. Dans le cas de l'ammoniac, plus la réduction avance, plus l'ammoniac serait effectivement décomposé en hydrogène et en azote : dans ce cas le mélange de gaz est différent puisqu'il contient de la vapeur d'eau produite, de l'hydrogène mais aussi de l'azote et de l'ammoniac. L'activité de la vapeur d'eau en serait ainsi réduite par une plus forte dilution de celle-ci.

Lors de la réduction de pellets, les nitrures de fer n'ont été observés que lors de réduction courte. Effet, lorsqu'un pellet est réduit pendant 28 min avec un retournement, les nitrures ne sont pas détectés alors qu'avec 16 min de réduction avec un retournement ils le sont. Il est donc possible de constater que les longs temps de réduction permettent une décomposition totale des nitrures à l'inverse des temps courts qui ne le permettent pas. Cette observation est également réalisée lors de la réduction de disques. En effet, de très fortes quantités de nitrures ont été détectés montrant à nouveau que des faibles temps de réduction ne permettent pas la décomposition des nitrures. Cela peut aussi être dû aux températures moins élevées atteintes puisque que la cinétique de décomposition des nitrures est fortement liée à la température [137]. Par ailleurs, dans la littérature, il a été montré que la présence d'ammoniac lors du refroidissement pouvait entraîner une nitruration [138]. De plus, la littérature montre qu'à des températures autour de 550 °C, le fer produit lors de la réduction est directement nitruré en Fe₃N [137]. C'est dans cette gamme de température que sont réduits les disques puisque de la wuestite est également observées. Afin de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses des expériences de réduction de disques où l'atmosphère d'ammoniac est directement remplacée par une atmosphère neutre avant le refroidissement doivent être réalisées.

IV.3.3. Perspectives : réduction avec l'urée comme source d'ammoniac

Comme expliqué dans la partie I.3.2.1.2, (page 69), la décomposition de l'urée en présence de vapeur d'eau permet la production d'ammoniac en quantité relativement importante. La décomposition se déroule en deux temps i) décomposition thermique de l'urée et ii) hydrolyse de l'aide isocyanique (HNCO). Comme montré dans la partie I.3.2.2 (page 75) et I.3.2.3 (page 76), et comme montré précédemment dans cette partie, la réduction de minéral de fer sous ammoniac est possible sous flux lumineux concentré. Il est donc raisonnable de penser que l'urée peut être utilisée comme source de réducteur.

L'équation de la réaction potentielle est présentée Eq IV-5. Il est possible de voir que du côté des réactifs il y a de l'eau. Bien que sa présence puisse entraîner une réoxydation des échantillons, elle est nécessaire à l'hydrolyse du HNCO présentée partie I.3.2.1.2, (page 69) et donc à la récupération du maximum d'ammoniac à partir de l'urée. Par ailleurs, du côté des produits de cette réaction l'eau est également présente, ce qui veut dire qu'avec une bonne gestion de la stoechiométrie initiale, l'eau produite durant la réduction accompagnée de celle présente en début de réaction si nécessaire pourrait permettre l'hydrolyse du HNCO. Ce mécanisme pourrait permettre de limiter la réoxydation de l'échantillon tout en optimisant la production d'ammoniac à partir de l'eau. Il est également important de noter la présence de dioxyde de carbone et d'azote dans les produits de la réaction qui provient de l'hydrolyse du HNCO et de la réduction des oxydes respectivement.



Durant l'étude bibliographique sur l'urée (partie I.3.2.1.2), plusieurs points ont été soulevés qui permettent d'en faire un candidat idéal comme source d'ammoniac dans cette réduction :

- Il a été montré que le fer pouvait permettre une catalyse de la décomposition de l'urée en ammoniac.

- Il est connu que l'urée est trouvée dans l'urine des humains (environ 20 mg/L) et dans celle d'autres mammifères ; cette origine biosourcée pourrait permettre de s'affranchir des procédés de production d'ammoniac ou d'urée qui émettent de grandes quantités de gaz à effet de serre, au moins pour une partie de la production actuelle de fer.
- Son utilisation dans des mélanges solide/solide pour la réduction d'oxydes métalliques a été prouvée lors d'expériences de *Reductive Expansion Synthesis* de petites pièces métalliques.

Malgré ces observations encourageantes, aucune étude de réduction de minerai de fer avec de l'urée comme réducteur n'est publiée. Cette idée constitue donc une suite logique et une perspective intéressante de ce travail sur la réduction sous ammoniac.

IV.4. Conclusion

Lors de ce chapitre, des expériences de réduction de minerai de fer sous différentes formes (pellet, gravier, poudre, disque) sous flux lumineux concentré et dans des atmosphères réductrices d'hydrogène et d'ammoniac ont été réalisées. Ces études montrent avant tout que la réduction sous hydrogène et sous ammoniac est possible sous flux lumineux. Il a également été montré que la réduction en irradiation directe entraîne un changement du mécanisme de réduction en sortant du modèle du cœur rétrécissant et en allant vers un modèle où une couche de fer formée à la surface irradiée progresse en direction de la surface à l'ombre. De plus, il a été montré qu'en tournant la surface directement exposée au flux lumineux, les ralentissements liés à ce nouveau mécanisme (gradient de température principalement) pouvaient être contournés pour atteindre de très haut taux de réduction ($> 95\%$), suffisants pour l'industrie de la métallurgie. Un autre moyen de s'affranchir du gradient de température a été de changer le format de l'échantillon en passant du pellet à un disque. Cela a permis d'avoir une grande surface directement irradiée et ainsi une température rapidement homogène, tout en conservant un seul volume pour limiter une éventuelle réoxydation. Grâce à ce changement, le temps de réduction sous hydrogène a été réduit par 6 en passant de 12 min de réduction à 2 min toujours avec un taux suffisant pour l'industrie, soit 93-94% de réduction.

Sous ammoniac, un nombre plus réduit d'expériences a été réalisé, mais elles ont permis de mettre en avant certaines tendances. Pour des réductions courtes, l'hydrogène offre une meilleure cinétique mais, pour des temps plus longs, c'est l'ammoniac qui semble avantageux aux regards des résultats de DRX *in situ*. De nombreuses expériences supplémentaires seront nécessaires pour valider ou non cette observation. Ensuite, la présence de nitrure de fer dans les échantillons semble entraver l'obtention d'un taux de réduction élevé sur une durée de réduction courte. Cependant, un taux de réduction supérieur a été obtenu sous ammoniac lors d'une réduction sous flux concentré de 318 W_l de 16 min avec retournement au milieu de l'exposition que lors d'une réduction comparable sous hydrogène (97,2% de réduction contre 95,1%). Lorsque l'ammoniac est utilisé pour la réduction de disques sur des temps de réduction très courts, la différence de cinétique entre les deux gaz est en défaveur de l'ammoniac, ce qui ne permet pas d'obtenir des taux de réduction satisfaisant.

Ces résultats appuient le fait que l'ammoniac pourrait être un substitut intéressant à l'hydrogène pour la réduction de minerai de fer. Cependant, de nombreuses autres expériences seront nécessaires pour déterminer son réel potentiel : réductions de disque plus longues ou

avec retournement, réduction avec des pressions d'ammoniac plus élevées, voire décomposition l'ammoniac en amont de la réduction.

Conclusions générales

Ce travail a pour but d'apporter des éléments de réponse sur le potentiel du solaire à concentration comme brique élémentaire d'une société pérenne. Pour ce faire, deux axes de travail ont été suivis : i) l'impact environnemental du solaire à concentration d'un procédé solaire basse température (la cuisson), et ii) le potentiel du solaire à concentration pour un procédé haute température (la réduction directe de minerai de fer).

L'analyse de cycle de vie présentée Chapitre III est basée sur l'unité fonctionnelle suivante : « Chauffer 2 L d'eau de 25 °C à 90 °C trois fois par jours, tous les jours pendant 40 ans avec la casserole couverte la plus adaptée ». La valeur théorique est de 165 kWh pour une année et, lorsque les rendements des appareils sont considérés, la valeur de l'énergie consommée est de 223 kWh/an, 261 kWh/an et 320 kWh/an. Ces valeurs sont légèrement inférieures ou égales à la limite basse de la consommation d'énergie pour la cuisine des foyers français (300 kWh/an) d'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et le Syndicat National de l'Exploitation climatique (SNEC). Ceci montre que notre unité fonctionnelle est représentative des habitudes des ménages Français.

Pour réaliser cette étude, la base de données Ecoinvent a été utilisée pour l'inventaire et la modélisation. Pour les calculs, c'est la méthode ReCiPe2016 qui a été utilisée. Le tout sur le logiciel Umberto LCA+. Tout d'abord, lorsque les paraboles sont considérées, les résultats sans le traitement de fin de vie montrent que la parabole solaire de référence (construite en aluminium produit en Chine) a les impacts *mid-point* les plus importants sur l'environnement avec, par exemple, un impact sur le changement climatique de 558 kgCO_{2eq}. Par ailleurs, en étudiant l'influence des matériaux de construction, nous avons montré que l'utilisation de matériaux recyclés et renouvelables (le bois ici) diminue fortement tous les impacts *mid-point* sauf l'occupation des terres agricoles. Par exemple, la parabole solaire construite en bois et en aluminium recyclé a un impact sur le changement climatique de 57 kgCO_{2eq}.

Parmi les appareils conventionnels, c'est la plaque électrique qui domine 14 des 18 indicateurs *mid-point*, mais c'est le brûleur à gaz qui domine les 4 autres, y compris le réchauffement climatique avec 3739 kgCO_{2eq}. Lorsque l'on s'intéresse à la contribution des phases du cycle de vie, il est possible de voir que la phase d'utilisation est celle qui contribue le plus aux impacts. Elle représente 90%, 82% et 88% de l'impact *mid-point cradle-to-use* sur le changement climatique de la plaque à induction, de la plaque électrique et du brûleur à gaz respectivement. Un facteur qui influence beaucoup les impacts des appareils conventionnels est l'intensité carbone du mix électrique du lieu d'utilisation.

Lorsque l'on compare toutes les paraboles avec les appareils conventionnels, il est possible de voir que les paraboles ont toujours des impacts inférieurs à ceux des impacts conventionnels, à part pour l'indicateur sur l'occupation des terres agricoles qui est dominé par la parabole en bois et l'aluminium produit en Chine.

Au niveau des dommages *end-point*, les mêmes tendances sont observées : c'est le brûleur à gaz qui a le plus gros dommage total avec 349 points, suivi par la plaque électrique, la plaque à induction et la parabole de référence avec 145, 112 et 52,1 points respectivement. Le dommage le plus faible est celui de la parabole en aluminium recyclé avec 9,1 points suivi par la parabole

Conclusions générales

en bois et aluminium recyclé avec 12,1 points. Cependant, cette dernière a des dommages plus faibles dans 15 des 17 indicateurs *end-point*.

Lorsque le traitement de fin de vie est pris en compte, il est possible de voir que l'influence de cette phase du cycle de vie est très faible sur les appareils conventionnels. En revanche, elle influe fortement sur les paraboles qui sont composées de matériaux primaires (aluminium non recyclé).

Par ailleurs, au niveau du coût d'utilisation, il est possible de voir que la parabole solaire est à l'achat nettement plus chère, mais que l'absence de coût durant l'utilisation rend le prix de la parabole lissé sur toute la période d'utilisation plus faible.

Cette première étude montre que le solaire à concentration offre un réel avantage pour la cuisine par rapport aux méthodes conventionnelles. Il est possible d'extrapoler à la transformation alimentaire et aux méthodes de conservations puisque ces procédés se déroulent à faible température. Cet avantage est tout de même dépendant de plusieurs paramètres : l'intensité carbone de l'électricité où sont utilisés les cuiseurs solaires, la durée de vie du cuiseur et sa fréquence d'utilisation. Concrètement, plus ces paramètres sont élevés, plus l'avantage de la parabole est important. A noter que si le pays dans lequel le cuiseur est utilisé à un mix énergétique très carboné et est très peu ensoleillé. Alors, il est possible que l'utilisation limitée de la parabole ne permette pas de compenser sa fabrication dans un scénario où elle serait associée à une plaque à induction pour les jours sans soleil.

Le Chapitre IV portait sur la réduction directe de minerai de fer sous flux lumineux, avec l'hydrogène et l'ammoniac comme gaz réducteur. La caractérisation de la réduction a été réalisée grâce à de nombreuses méthodes : mesure de la perte de masse, mesure des surfaces de fer et quantification des phases grâce à la diffraction aux rayons X et aux affinements de Rietveld. Les premiers résultats ont montré que la réduction de minerai de fer sous flux lumineux concentré était possible mais que le mécanisme de réduction est drastiquement différent de la réduction dans un four classique. Ici, le pellet est placé sous un flux lumineux orienté qui illumine directement la surface supérieure du pellet. Cela entraîne un grand gradient de température et donc une réduction qui débute de la surface illuminée (zone chaude) avec un front de réduction qui se propage vers la zone inférieure (zone froide).

Par ailleurs, nous avons montré que la pression d'hydrogène n'a pas d'influence significative pour des temps de réduction courts mais qu'elle prend de l'importance pour des temps plus longs. Comme nos réductions ont été réalisées en batch, nous concluons que la quantité de vapeur d'eau formée peut entraver l'activité de l'hydrogène et ralentir la réduction, voire entraîner une réoxydation de l'échantillon. Les autres paramètres qui influent fortement sur les cinétiques de réduction sont la puissance de la lampe et la durée de réduction, qui améliorent tous les deux le taux de réduction lorsqu'ils augmentent.

Afin de réduire les temps de réduction quantitative, des expériences avec un ou plusieurs retournements de l'échantillon ont été réalisées. Grâce à cette méthode, dans des conditions par ailleurs identiques, le taux de réduction d'un pellet passe de 84,3% à 97,3% grâce à un retournement du pellet en milieu de réduction. Par ailleurs, le temps de réduction a pu être réduit de 28 min à 12 min avec 3 retournements.

Afin de diminuer encore le temps de réduction, d'autres types d'échantillons ont été réduits sous flux : des graviers et des disques. Ces expériences ont montré que l'utilisation de gravier n'améliore pas le temps de réduction, probablement parce que leur taille ne permet pas de monter suffisamment en température pour réaliser des réductions rapides. En revanche, des disques ont pu être réduits à 96,1% en 2 minutes. Ainsi, des échantillons sous forme de plaques d'oxyde de fer peu épaisses exposés à un flux lumineux adapté permettraient une réduction solaire rapide.

Les expériences sous ammoniac ont été moins nombreuses mais ont montré que la réduction était possible, bien que la cinétique de réduction et les phases observées soient différentes. D'abord, il a été montré que la réduction était aussi possible directement sous ammoniac : un taux de réduction de 97,2% a par exemple été atteint après une expérience de 16 minutes avec un retournement. Il a également été montré que la pression n'avait pas d'influence significative sur la réduction. Cependant, nous avons observé que la présence d'ammoniac induit la formation de nitrures ralentissant la réduction, ce qui fait que les taux de réduction obtenus sous hydrogène ne sont pour l'instant pas atteignables sous ammoniac pour des temps de réduction faibles.

Toutes ces études montrent que le procédé de réduction décarbonée sous flux lumineux concentré est possible dans des conditions de laboratoire. Nous avons pu atteindre des taux de réduction suffisamment élevés pour l'industrie avec des temps de réduction relativement faibles. Cependant, il reste un gros travail pour en faire un procédé à une échelle plus importante. De plus, un travail d'intégration dans les modèles de production actuels est à réaliser.

Globalement, ces études montrent que le solaire à concentration est une source de chaleur permettant la réalisation de procédés haute température et basse température. De plus, l'absence d'impact de sa phase d'utilisation assure un avantage écologique, en tout cas pour les procédés basse température. Il reste important de garder en tête que la fréquence d'utilisation joue un rôle important dans l'avantage écologique du solaire à concentration. La disponibilité de la ressource et la facilité d'utilisation du solaire à concentration en font un candidat idéal comme source de chaleur alternative. Cependant, l'utilisation du solaire à concentration implique un changement dans les industries utilisant de l'énergie thermique. En effet, avant tout, l'intermittence de sa ressource oblige à revoir les méthodes de production actuelles qui sont réalisées en continu de jour comme de nuit. Il est également possible de réfléchir à un procédé qui reprendrait les systèmes de stockage thermique utilisés lors de la production d'électricité avec le solaire à concentration. De plus, comme montré dans ce travail, le solaire à concentration peut être utilisé en irradiation directe comme source de chaleur orientée. Cette dernière chauffe alors la surface sur laquelle elle est projetée et non un volume dans lequel est plongé l'échantillon. Cela implique des changements techniques dans les procédés pour lesquels une telle source serait utilisée.

Perspectives

Les perspectives dégagées par ce travail sont nombreuses et de différentes natures.

D'abord, au niveau du travail sur l'ammoniac, de nombreuses expériences demandent encore à être réalisées afin de bien caractériser et optimiser la réduction de minerai de fer sous flux lumineux concentré. Par exemple, réaliser des réductions de disque plus longues ainsi que des réductions de pellets avec plus de retournements pourrait permettre d'atteindre de hauts taux de réduction. Par ailleurs, afin d'éviter une possible nitruration lors du refroidissement, réaliser des réductions avec un refroidissement dans une atmosphère inerte serait intéressant, bien qu'il soit aussi possible que le refroidissement dans le cas du solaire soit suffisamment rapide pour l'éviter. Quoi qu'il en soit, il reste toujours la possibilité de décomposer l'ammoniac en amont de la réduction, ce qui pourrait permettre de combiner les avantages de la réduction sous hydrogène et ceux du transport et du stockage de l'ammoniac. Finalement, reproduire ce travail avec un flux solaire réel dans un réacteur adapté serait une étape nécessaire pour valider en conditions réelles le potentiel de ce procédé.

Ensuite, la question de l'origine des réducteurs reste en suspens puisque la production actuelle d'ammoniac et d'hydrogène est énergivore et fortement émettrice de gaz à effet de serre. Des pistes pour produire de manière alternative ce gaz sont présentées dans ce travail. En effet, comme expliqué dans l'état de l'art, l'urée a un fort potentiel de production d'ammoniac et donc d'hydrogène. Il est donc possible d'imaginer une réduction de minerai de fer à l'urée. Cette question fait l'objet d'une thèse qui a commencé au LPCNO et est menée par Marion Luu. Par ailleurs, l'urée peut être un composant biosourcé si elle est récupérée dans l'urine des mammifères, donc des humains. Cela ferait de l'urine une matière première biosourcée d'intérêt renouvelé. Néanmoins, son utilisation pourrait entraîner des conflits d'usages entre une utilisation en tant qu'engrais « naturel » et son utilisation en tant que réducteur biosourcé.

Du point de vue industriel, l'utilisation de l'irradiation directe pour la métallurgie implique de gros changements techniques. Il serait possible d'imaginer que la matière première de réduction ne soit plus des pellets mais de fines plaques de minerai qui seraient rapidement réduites sous un flux solaire concentré adapté à leur taille. Les plaques pourraient se déplacer sur un tapis roulant sous flux d'ammoniac ou d'hydrogène. Les plus gros changements se trouveraient au niveau des installations elles-mêmes. En effet, il faudrait créer des installations adaptées au solaire à concentration et créer des concentrateurs solaires suffisamment grands pour assurer une production industrielle. De plus, il y a un enjeu important au niveau du stockage thermique pour permettre une production durant les périodes nuageuses.

Il sera nécessaire de réaliser des modèles théoriques de bilan de matière et d'énergie afin de projeter à plus grande échelle le procédé décrit ici. Ensuite, il faudra réaliser une ACV de ce dernier afin de vérifier que l'avantage écologique de grosses installations utilisant le solaire à concentration pour la métallurgie ou pour des procédés haute température est bien effective. Cet avantage est déjà observé pour des installations de production d'électricité, comme montré dans l'état de l'art. Dans cette démarche, le projet Métasol a déjà comme objectif de réaliser l'ACV du procédé de métallurgie solaire et de réaliser des tests sous flux solaire réel et à une échelle plus importante pour vérifier la faisabilité. De plus, ces essais pourront permettre d'évaluer les rythmes de production accessibles.

Au niveau de la transformation alimentaire, plusieurs perspectives sont possibles pour continuer ce travail. Tout d'abord, pour compléter l'étude, il serait très intéressant de continuer l'étude des scénarios d'utilisation combinée d'une parabole solaire et d'un appareil conventionnel, avec plus de précisions et d'alternative. Idéalement, cette étude devrait comprendre une étude sur l'influence de la zone géographique sur les impacts et le prix. De plus, il serait très intéressant de se pencher sur des considérations sociétales autour des cuiseurs solaires, à savoir la capacité de pénétration et d'acceptation. Finalement, une fois toutes ces choses déterminées, il faudrait évaluer le gain écologique potentiel à une échelle d'utilisation plus importante (ville par exemple) et pour des procédés de transformation alimentaire plus énergivores : mise en conserve ou préparation de repas à grande échelle (cantine, cafétéria professionnelle, restaurant universitaire).

D'un point de vue plus général, ce travail remet en question le système de production actuel du fer. En effet, il permet de montrer que le solaire à concentration est un procédé de production de chaleur offrant des températures de fonctionnement et des mises en applications compétitives avec celles actuelles. Cependant, son intermittence est un problème non négligeable qui implique de trouver des solutions de stockage thermique suffisamment performantes pour les gammes de température de la métallurgie. Ou alors, il faut sortir du paradigme actuel et produire uniquement quand le soleil est disponible. Une baisse de la consommation d'acier permettrait une adaptation bien plus facile du solaire à concentration puisque des installations plus petites ou en plus petit nombre seraient requises. La diminution de la consommation entraînerait ainsi une diminution des impacts liés à la construction. De plus, de plus petites unités de production permettraient de mieux répartir la production à travers le monde étant donné la disponibilité de la ressource solaire, et donc une production plus locale et moins intensive.

Bibliographie

- [1] E. Foote, « Circumstances affecting the heat of the sun's rays », *The american journal of science and arts*, vol. 22, n° 65, p. 382-383, sept. 1856.
- [2] GIEC, *Changement climatique: les évaluations du GIEC de 1990 et 1992: premier rapport d'évaluation du GIEC: aperçu général et résumés destinés aux décideurs et supplément 1992 du GIEC*. Genève: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 1992.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC - GIEC), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1^{re} éd. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009325844.
- [4] Ministère de la transition énergétique, « Datalab - Chiffres clés du climat », 2022.
- [5] A. Steinfeld, P. Kuhn, et J. Karni, « High-temperature solar thermochemistry: Production of iron and synthesis gas by Fe₃O₄-reduction with methane », *Energy*, vol. 18, n° 3, p. 239-249, 1993, doi: 10.1016/0360-5442(93)90108-P.
- [6] World Steel association, « World Steel in Figures », 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf>
- [7] L. Guevara opinska, M. Mahmoud, C. Bene, et K. Rademaekers, « Moving towards Zero-Emission Steel », *Production for the committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Policy Departement for Economics, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg*, p. 48, déc. 2021.
- [8] J. Philibert, A. Vignes, B. Yves, et C. Pierre, *Métallurgie - du minerai au matériau*. Liège: Dunod, 2002.
- [9] J. G. Peacey et W. G. Davenport, *The iron blast furnace: theory and practice*. in International series on materials science and technology, no. v. 31. Oxford New York: Pergamon Press, 1979.
- [10] S. L. de Moraes, J. R. B. de Lima, et T. R. Ribeiro, « Iron Ore Pelletizing Process: An Overview », in *Iron Ores and Iron Oxide Materials*, V. Shatokha, Éd., InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.73164.
- [11] A. Ghosh et A. Chatterjee, *Ironmaking and steelmaking: theory and practice*, 3. print. in Eastern economy edition. New Delhi: PHI Learning, 2010.
- [12] J.-M. Steiler, « Haut fourneau - Principes de fonctionnement », *Élaboration et recyclage des métaux*, déc. 2018, doi: 10.51257/a-v1-m7402.
- [13] Z. Fan et S. J. Friedmann, « Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy », *Joule*, vol. 5, n° 4, p. 829-862, avr. 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.02.018.
- [14] J. Astier, « Réduction directe », *Techniques de l'ingénieur Métaux ferreux: élaboration du métal primaire*, vol. base documentaire: TIB366DUO., n° ref. article: m7580. Editions T.I., 2005. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metaux-ferreux-elaboration-du-metal-primaire-42366210/reduction-directe-m7580/>
- [15] L. Lu, J. Pan, et D. Zhu, « Quality requirements of iron ore for iron production », in *Iron Ore*, Elsevier, 2015, p. 475-504. doi: 10.1016/B978-1-78242-156-6.00016-2.
- [16] S. Seetharaman, A. McLean, R. I. L. Guthrie, et S. Sridhar, *Treatise on process metallurgy*. Amsterdam Waltham Paris: Elsevier, 2014.

- [17] J. Xu et G. F. Froment, « Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics », *AIChE Journal*, vol. 35, n° 1, p. 88-96, janv. 1989, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690350109>.
- [18] Midrex, « World DRI statistics », Midrex. Consulté le: 17 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.midrex.com/insight/world-dri-production-reaches-119-2-mt-in-2021/>
- [19] R. J. Longbottom et L. Kolbeinsen, « Iron Ore Reduction with CO and H₂ Gas Mixtures – Thermodynamic and Kinetic Modelling », 2008.
- [20] V. Vogl, M. Åhman, et L. J. Nilsson, « Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking », *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, p. 736-745, déc. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
- [21] M. Kratz, « Fours à arc », *Énergies : Réseaux électriques et applications*, 1999, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42270210-d5920.pdf>
- [22] P. Ayed, C. Ouvradou, et J. Astier, « Aciérie électrique », 2005.
- [23] F. Patisson et O. Mirgaux, « Hydrogen Ironmaking: How It Works », *Metals*, vol. 10, n° 7, p. 922, juill. 2020, doi: 10.3390/met10070922.
- [24] J. Ivy, « Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report », sept. 2004.
- [25] IEA, « Global Hydrogen REVIEW 2021 », 2021.
- [26] P. Nikolaidis et A. Poullikkas, « A comparative overview of hydrogen production processes », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, p. 597-611, janv. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- [27] F. Giroudière et A. Le Gall, « Production des gaz de synthèse par vaporeformage », *Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*, févr. 2012, doi: 10.51257/a-v3-j5480.
- [28] J. R. Rostrup-Nielsen et J. Sehested, « Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO₂ reforming », *Advances in Catalysis*, vol. 47, p. 65-139, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(02\)47006-X](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(02)47006-X).
- [29] J. Ogden, « Review of Small Stationary Reformers for Hydrogen Production », *IEA*, 2202.
- [30] N. Muradov, « Hydrogen via methane decomposition: an application for decarbonization of fossil fuels », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 26, n° 11, p. 1165-1175, nov. 2001, doi: 10.1016/S0360-3199(01)00073-8.
- [31] A. Ersoz, « Investigation of hydrocarbon reforming processes for micro-cogeneration systems », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, n° 23, p. 7084-7094, déc. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.062.
- [32] J. Huang et I. Dincer, « Parametric analysis and assessment of a coal gasification plant for hydrogen production », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, n° 7, p. 3294-3303, févr. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.12.054.
- [33] S. Sircar et T. C. Golden, « Purification of Hydrogen by Pressure Swing Adsorption », *Separation Science and Technology*, vol. 35, n° 5, p. 667-687, janv. 2000, doi: 10.1081/SS-100100183.
- [34] P. L. Spath et M. K. Mann, « Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming », NREL/TP-570-27637, 764485, sept. 2000. doi: 10.2172/764485.
- [35] S. S. Seyitoglu, I. Dincer, et A. Kilicarslan, « Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n° 4, p. 2592-2600, janv. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.228.

- [36] J. D. Holladay, J. Hu, D. L. King, et Y. Wang, « An overview of hydrogen production technologies », *Catalysis Today*, vol. 139, n° 4, p. 244-260, janv. 2009, doi: 10.1016/j.cattod.2008.08.039.
- [37] M. Gräbner, Éd., « Chapter 4 - Fundamentals », in *Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal*, 1^{re} éd., Wiley, 2014, p. 107-128. doi: 10.1002/9783527336913.ch04.
- [38] M. Gräbner, Éd., « Chapter 2 - Coal Gasification in a Global Context », in *Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal*, 1^{re} éd., Wiley, 2014, p. 3-24. doi: 10.1002/9783527336913.ch02.
- [39] C. Raimbault et G. Lefebvre, « Vapocraquage des hydrocarbures », *Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*, sept. 1995, doi: 10.51257/a-v2-j5460.
- [40] J. Turner *et al.*, « Renewable hydrogen production », *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, n° 5, p. 379-407, avr. 2008, doi: 10.1002/er.1372.
- [41] A. Haryanto, S. Fernando, N. Murali, et S. Adhikari, « Current Status of Hydrogen Production Techniques by Steam Reforming of Ethanol: A Review », *Energy Fuels*, vol. 19, n° 5, p. 2098-2106, sept. 2005, doi: 10.1021/ef0500538.
- [42] D. M. F. Santos, C. A. C. Sequeira, et J. L. Figueiredo, « Hydrogen production by alkaline water electrolysis », *Quím. Nova*, vol. 36, n° 8, p. 1176-1193, 2013, doi: 10.1590/S0100-40422013000800017.
- [43] A. Damien, « Hydrogène par électrolyse de l'eau », *Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*, déc. 1992, doi: 10.51257/a-v1-j6366.
- [44] M. Ni, M. Leung, et D. Leung, « Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC) », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, n° 9, p. 2337-2354, mai 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.02.048.
- [45] A. Nechache et S. Hody, « Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: A short review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111322, oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111322.
- [46] Ademe, « Base Empreinte® ». Consulté le: 8 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://base-empreinte.ademe.fr/donnees/jeu-donnees>
- [47] L. von Bogdandy et H.-J. Engell, *The Reduction of Iron Ores*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1971. doi: 10.1007/978-3-662-10400-2.
- [48] O. Levenspiel, *Chemical reaction engineering. Hauptbd.*, 3. ed. New York Weinheim: Wiley, 1999.
- [49] D. Spreitzer et J. Schenk, « Reduction of Iron Oxides with Hydrogen—A Review », *steel research int.*, vol. 90, n° 10, p. 1900108, oct. 2019, doi: 10.1002/srin.201900108.
- [50] A. Heidari, N. Niknahad, M. Iljana, et T. Fabritius, « A Review on the Kinetics of Iron Ore Reduction by Hydrogen », p. 19, 2021.
- [51] E. T. Turkdogan et J. V. Vinters, « Gaseous reduction of iron oxides: Part I. Reduction of hematite in hydrogen », *Metall and Materi Trans B*, vol. 2, n° 11, p. 3175-3188, nov. 1971, doi: 10.1007/BF02814970.
- [52] E. T. Turkdogan, R. G. Olsson, et J. V. Vinters, « Gaseous reduction of iron oxides: Part II. Pore characteristics of iron reduced from hematite in hydrogen », *Metall and Materi Trans B*, vol. 2, n° 11, p. 3189-3196, nov. 1971, doi: 10.1007/BF02814971.
- [53] E. T. Turkdogan et J. V. Vinters, « Gaseous reduction of iron oxides: Part III. Reduction-oxidation of porous and dense iron oxides and iron », *Metall Trans*, vol. 3, n° 6, p. 1561-1574, juin 1972, doi: 10.1007/BF02643047.
- [54] Y. Ma *et al.*, « Hierarchical nature of hydrogen-based direct reduction of iron oxides », *Scripta Materialia*, vol. 213, p. 114571, mai 2022, doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114571.

- [55] C. Feilmayr, A. Thurnhofer, F. Winter, H. Mali, et J. Schenk, « Reduction Behavior of Hematite to Magnetite under Fluidized Bed Conditions », *ISIJ International*, vol. 44, n° 7, p. 1125-1133, 2004, doi: 10.2355/isijinternational.44.1125.
- [56] S.-H. Kim *et al.*, « Influence of microstructure and atomic-scale chemistry on the direct reduction of iron ore with hydrogen at 700°C », *Acta Materialia*, vol. 212, p. 116933, juin 2021, doi: 10.1016/j.actamat.2021.116933.
- [57] L. Himmel, R. F. Mehl, et C. E. Birchenall, « Self-Diffusion of Iron . In Iron Oxides and The Wagner Theory of Oxidation », *Journal of metals*, p. 827-843, juin 1953.
- [58] S. Hayashi et Y. Iguchi, « Morphology of Iron Reduced from Wüstite with H₂-H₂O-H₂S Mixtures », *ISIJ International*, vol. 29, n° 7, p. 596-604, 1989.
- [59] C. Wagner, « Mechanism of the Reduction of Oxides and Sulphides to Metals », *JOM*, vol. 4, n° 2, p. 214-216, févr. 1952, doi: 10.1007/BF03397678.
- [60] M. Bahgat, Y. Sasaki, S. Hijino, M. Iguchi, et K. Ishii, « The Effect of Grain Boundaries on Iron Nucleation during Wüstite Reduction Process », *ISIJ International*, vol. 44, n° 12, 2004.
- [61] W. Mao et W. G. Sloof, « Reduction Kinetics of Wüstite Scale on Pure Iron and Steel Sheets in Ar and H₂ Gas Mixture », *Metall Mater Trans B*, vol. 48, n° 5, p. 2707-2716, oct. 2017, doi: 10.1007/s11663-017-1037-2.
- [62] R. J. Fruehan, Y. Li, L. Brabie, et E.-J. Kim, « Final stage of reduction of iron ores by hydrogen », *Scand J Metallurgy*, vol. 34, n° 3, p. 205-212, juin 2005, doi: 10.1111/j.1600-0692.2005.00722.
- [63] D. Wagner, O. Devisme, F. Patisson, et D. Ablitzer, « A laboratory study of the reduction of iron oxides by hydrogen », août 2006.
- [64] H. Zuo, C. Wang, J. Dong, K. Jiao, et R. Xu, « Reduction kinetics of iron oxide pellets with H₂ and CO mixtures », *Int J Miner Metall Mater*, vol. 22, n° 7, p. 688-696, juill. 2015, doi: 10.1007/s12613-015-1123-x.
- [65] M. E. Choi et H. Y. Sohn, « Development of green suspension ironmaking technology based on hydrogen reduction of iron oxide concentrate: rate measurements », *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 37, n° 2, p. 81-88, févr. 2010, doi: 10.1179/030192309X12506804200663.
- [66] A. Zhang, B. J. Monaghan, R. J. Longbottom, M. Nusheh, et C. W. Bumby, « Reduction Kinetics of Oxidized New Zealand Ironsand Pellets in H₂ at Temperatures up to 1443 K », *Metall Mater Trans B*, vol. 51, n° 2, p. 492-504, avr. 2020, doi: 10.1007/s11663-020-01790-3.
- [67] A. Bonalde, A. Henriquez, et M. Manrique, « Kinetic Analysis of the Iron Oxide Reduction Using Hydrogen-Carbon Monoxide Mixtures as Reducing Agent », *ISIJ Int.*, vol. 45, n° 9, p. 1255-1260, 2005, doi: 10.2355/isijinternational.45.1255.
- [68] E. Lorente, J. Herguido, et J. A. Peña, « Steam-iron process: Influence of steam on the kinetics of iron oxide reduction », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, n° 21, p. 13425-13434, oct. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.111.
- [69] L. Brinkman, B. Bulfin, et A. Steinfeld, « Thermochemical Hydrogen Storage via the Reversible Reduction and Oxidation of Metal Oxides », *Energy Fuels*, vol. 35, n° 22, p. 18756-18767, nov. 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02615.
- [70] J. A. Peña, E. Lorente, E. Romero, et J. Herguido, « Kinetic study of the redox process for storing hydrogen », *Catalysis Today*, vol. 116, n° 3, p. 439-444, août 2006, doi: 10.1016/j.cattod.2006.05.068.
- [71] T. L. Joseph, « Porosity, Reducibility and Size Preparation of Iron Ores », *Metals technology*, p. 72-90, févr. 1936.

- [72] K. Higuchi et R. H. Heerema, « Influence of Artificially Induced Porosity on Strength and Reduction Behavior of Hematite Compacts », *ISIJ Int.*, vol. 45, n° 4, p. 574-581, 2005, doi: 10.2355/isijinternational.45.574.
- [73] A. Pichler, H. Mali, F. Plaul, J. Schenk, M. Skoriansz, et B. Weiss, « Reduction Behavior and Structural Evolution of Iron Ores in Fluidized Bed Technologies-Part 2: Characterization and Evaluation of Worldwide Traded Fine Iron Ore Brands », *steel research int.*, vol. 87, n° 5, p. 642-652, mai 2016, doi: 10.1002/srin.201500176.
- [74] O. A. Teplov, « Kinetics of the low-temperature hydrogen reduction of magnetite concentrates », *Russ. Metall.*, vol. 2012, n° 1, p. 8-21, janv. 2012, doi: 10.1134/S0036029512010132.
- [75] Solagris, « Solar resource maps ». Consulté le: 10 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>
- [76] A. Steinfeld et R. Palumbo, « Solar Thermochemical Process Technology », in *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Elsevier, 2003, p. 237-256. doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00698-0.
- [77] L. Evangelisti, R. De Lieto Vollaro, et F. Asdrubali, « Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109318, oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109318.
- [78] F. O. Wayua, M. W. Okoth, et J. Wangoh, « Design and performance assessment of a flat-plate solar milk pasteurizer for arid pastoral areas of kenya: design of a flat-plate solar milk pasteuriser », *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 37, n° 2, p. 120-125, avr. 2013, doi: 10.1111/j.1745-4549.2011.00628.x.
- [79] O. V. Ekechukwu et N. T. Ugwuoke, « Design and measured performance of a plane reflector augmented box-type solar-energy cooker », *Renewable Energy*, vol. 28, n° 12, p. 1935-1952, oct. 2003, doi: 10.1016/S0960-1481(03)00004-1.
- [80] S. Kumar, « Estimation of design parameters for thermal performance evaluation of box-type solar cooker », *Renewable Energy*, vol. 30, n° 7, p. 1117-1126, juin 2005, doi: 10.1016/j.renene.2004.09.004.
- [81] I. Edmonds, « Low cost realisation of a high temperature solar cooker », *Renewable Energy*, vol. 121, p. 94-101, juin 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.010.
- [82] S. Mahavar, N. Sengar, P. Rajawat, M. Verma, et P. Dashora, « Design development and performance studies of a novel Single Family Solar Cooker », *Renewable Energy*, vol. 47, p. 67-76, nov. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.04.013.
- [83] Y. Krishna, M. Faizal, R. Saidur, K. C. Ng, et N. Aslfattahi, « State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 152, p. 119541, mai 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119541.
- [84] F. J. Barba *et al.*, « Solar radiation as a prospective energy source for green and economic processes in the food industry: From waste biomass valorization to dehydration, cooking, and baking », *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, p. 1121-1130, mai 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.175.
- [85] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, et M. Pérez, « Parabolic-trough solar collectors and their applications », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 7, p. 1695-1721, sept. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.012.
- [86] W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong, et L. Linhua, « Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, p. 1314-1328, nov. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.174.

- [87] G. Saini, H. Singh, K. Saini, et A. Yadav, « Experimental investigation of the solar cooker during sunshine and off-sunshine hours using the thermal energy storage unit based on a parabolic trough collector », *International Journal of Ambient Energy*, vol. 37, n° 6, p. 597-608, nov. 2016, doi: 10.1080/01430750.2015.1023836.
- [88] S. Z. Farooqui, « Impact of load variation on the energy and exergy efficiencies of a single vacuum tube based solar cooker », *Renewable Energy*, vol. 77, p. 152-158, mai 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.021.
- [89] N. Huda, A. B. Abdullah, R. Saidur, et M. T. Islam, « A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, p. 987-1018, août 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.097.
- [90] S. Z. Farooqui, « A vacuum tube based improved solar cooker », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 3, p. 33-39, sept. 2013, doi: 10.1016/j.seta.2013.05.004.
- [91] M. Alhaj, A. Mabrouk, et S. G. Al-Ghamdi, « Energy efficient multi-effect distillation powered by a solar linear Fresnel collector », *Energy Conversion and Management*, vol. 171, p. 576-586, sept. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.082.
- [92] S. Alexopoulos et B. Hoffschmidt, « Advances in solar tower technology », *WIREs Energy Environ*, vol. 6, n° 1, p. e217, janv. 2017, doi: 10.1002/wene.217.
- [93] R. Li *et al.*, « Product distribution from solar pyrolysis of agricultural and forestry biomass residues », *Renewable Energy*, vol. 89, p. 27-35, avr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.071.
- [94] A. A. AlZahrani et I. Dincer, « Design and analysis of a solar tower based integrated system using high temperature electrolyzer for hydrogen production », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n° 19, p. 8042-8056, mai 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.103.
- [95] P. Chatterjee *et al.*, « Photovoltaic/photo-electrocatalysis integration for green hydrogen: A review », *Energy Conversion and Management*, vol. 261, p. 115648, juin 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115648.
- [96] I. Holmes-Gentle, S. Tembhurne, C. Suter, et S. Haussener, « Kilowatt-scale solar hydrogen production system using a concentrated integrated photoelectrochemical device », *Nat Energy*, avr. 2023, doi: 10.1038/s41560-023-01247-2.
- [97] R. Schäppi *et al.*, « Drop-in fuels from sunlight and air », *Nature*, vol. 601, n° 7891, p. 63-68, janv. 2022, doi: 10.1038/s41586-021-04174-y.
- [98] « EG Solar », EG solar. [En ligne]. Disponible sur: <http://energiesparwerk.de/en/>
- [99] G. O. Prado, L. G. M. Vieira, et J. J. R. Damasceno, « Solar dish concentrator for desalting water », *Solar Energy*, vol. 136, p. 659-667, oct. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.07.039.
- [100] A. Munir, O. Hensel, W. Scheffler, H. Hoedt, W. Amjad, et A. Ghafoor, « Design, development and experimental results of a solar distillery for the essential oils extraction from medicinal and aromatic plants », *Solar Energy*, vol. 108, p. 548-559, oct. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.07.028.
- [101] G. Schapers, « Agave syrup production – a sweet tradition goes solar », *International Solar Food Processing Conference*, p. 4, 2009.
- [102] C. Müller, F. EcoAndina, C. Arias, et S. S. de Jujuy, « Solar community bakeries on the Argentinean Altiplano », p. 6, 2009.
- [103] W. Scheffler, « Development of a solar crematorium », p. 2.

- [104] D. Fernández-González *et al.*, « Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy », *Solar Energy*, vol. 170, p. 520-540, août 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.05.065.
- [105] J. Kováčik *et al.*, « Preliminary Study on the Application of Concentrated Solar Power in Metallurgy of Titanium », *ChemEngineering*, vol. 3, n° 4, p. 84, oct. 2019, doi: 10.3390/chemengineering3040084.
- [106] A. Steinfeld et E. A. Fletcher, « Theoretical and experimental investigation of the carbonthermix reduction of Fe₂O₃ using solar energy », *Energy*, vol. 16, n° 7, p. 1011-1019, août 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(91\)90061-P](https://doi.org/10.1016/0360-5442(91)90061-P).
- [107] A. Steinfeld, P. Kuhn, et J. Karni, « High-temperature solar thermochemistry: Production of iron and synthesis gas by Fe₃O₄-reduction with methane », *Energy*, vol. 18, n° 3, p. 239-249, 1993, doi: 10.1016/0360-5442(93)90108-P.
- [108] J. Mochón *et al.*, « Transformations in the Iron-Manganese-Oxygen-Carbon System Resulted from Treatment of Solar Energy with High Concentration », *steel research int.*, vol. 85, n° 10, p. 1469-1476, oct. 2014, doi: 10.1002/srin.201300377.
- [109] D. Fernández-González, J. Prazuch, Í. Ruiz-Bustanza, C. González-Gasca, J. Piñuela-Noval, et L. Verdeja González, « Iron Metallurgy via Concentrated Solar Energy », *Metals*, vol. 8, n° 11, p. 873, oct. 2018, doi: 10.3390/met8110873.
- [110] I. Ruiz-Bustanza *et al.*, « Magnetite Production from Steel Wastes with Concentrated Solar Energy », *steel research int.*, vol. 84, n° 3, p. 207-217, mars 2013, doi: 10.1002/srin.201200145.
- [111] S. Li, H. Zhang, J. Nie, R. Dewil, J. Baeyens, et Y. Deng, « The Direct Reduction of Iron Ore with Hydrogen », *Sustainability*, vol. 13, n° 16, p. 8866, août 2021, doi: 10.3390/su13168866.
- [112] S. Ghavam, M. Vahdati, I. A. G. Wilson, et P. Styring, « Sustainable Ammonia Production Processes », *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 580808, mars 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.580808.
- [113] C. Philibert, « Electro fuels: Status and perspectives », *IEA and EC workshop on electrofuels*, 2018.
- [114] C. Smith, A. K. Hill, et L. Torrente-Murciano, « Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape », *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, n° 2, p. 331-344, 2020, doi: 10.1039/C9EE02873K.
- [115] International Energy Agency, *Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production*. OECD, 2021. doi: 10.1787/f6daa4a0-en.
- [116] S. Ivanova et R. Lewis, « Procédé PSA pour la production d’azote sur site », *Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*, déc. 2013, doi: 10.51257/a-v1-j3610.
- [117] A. R. Smith et J. Klosek, « A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes », *Fuel Processing Technology*, vol. 70, n° 2, p. 115-134, mai 2001, doi: 10.1016/S0378-3820(01)00131-X.
- [118] J. Benner, M. Van Lieshout, et H. Croezen, « Identifying breakthrough technologies for the production of basic chemicals, A long term view on the sustainable production of ammonia, olefins and aromatics in the European region », CE Delft, août 2013.
- [119] L. Wang *et al.*, « Greening Ammonia toward the Solar Ammonia Refinery », *Joule*, vol. 2, n° 6, p. 1055-1074, juin 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.04.017.
- [120] P. Simha, A. Zabaniotou, et M. Ganesapillai, « Continuous urea–nitrogen recycling from human urine: A step towards creating a human excreta based bio–economy », *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, p. 4152-4161, janv. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.062.

- [121] E. von Münch et M. Winker, « Technology review of urine diversion components - Overview on urine diversion components such as waterless urinals, urine diversion toilets, urine storage and reuse systems », Deutsche Gesellschaft für, Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Postfach 5180, 65726 Eschborn, Germany, mai 2011.
- [122] M. Koebel, M. Elsener, et M. Kleemann, « Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines », *Catalysis Today*, vol. 59, n° 3-4, p. 335-345, juin 2000, doi: 10.1016/S0920-5861(00)00299-6.
- [123] J. P. Chen et K. Isa, « Thermal Decomposition of Urea and Urea Derivatives by Simultaneous TG/(DTA)/MS », *Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan*, vol. 46, n° 4, p. 299-303, 1998, doi: 10.5702/massspec.46.299.
- [124] P. M. Schaber, J. Colson, S. Higgins, D. Thielen, B. Anspach, et J. Brauer, « Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open reaction vessel », *Thermochimica Acta*, vol. 424, n° 1-2, p. 131-142, déc. 2004, doi: 10.1016/j.tca.2004.05.018.
- [125] M. Eichelbaum, R. J. Farrauto, et M. J. Castaldi, « The impact of urea on the performance of metal exchanged zeolites for the selective catalytic reduction of NO_x Part I. Pyrolysis and hydrolysis of urea over zeolite catalysts », *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 97, n° 1-2, p. 90-97, juin 2010, doi: 10.1016/j.apcatb.2010.03.027.
- [126] A. Lundström, B. Andersson, et L. Olsson, « Urea thermolysis studied under flow reactor conditions using DSC and FT-IR », *Chemical Engineering Journal*, vol. 150, n° 2-3, p. 544-550, août 2009, doi: 10.1016/j.cej.2009.03.044.
- [127] D. Wang, S. Hui, et C. Liu, « Mass loss and evolved gas analysis in thermal decomposition of solid urea », *Fuel*, vol. 207, p. 268-273, nov. 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.06.117.
- [128] K. Mahalik, J. N. Sahu, A. V. Patwardhan, et B. C. Meikap, « Kinetic studies on hydrolysis of urea in a semi-batch reactor at atmospheric pressure for safe use of ammonia in a power plant for flue gas conditioning », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 175, n° 1-3, p. 629-637, mars 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.053.
- [129] S. D. Yim *et al.*, « Decomposition of Urea into NH₃ for the SCR Process », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 43, n° 16, p. 4856-4863, août 2004, doi: 10.1021/ie034052j.
- [130] Z. Chen, W. Yang, J. Zhou, H. Lv, J. Liu, et K. Cen, « HNCO hydrolysis performance in urea-water solution thermohydrolysis process with and without catalysts », *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 11, n° 11, p. 849-856, nov. 2010, doi: 10.1631/jzus.A0900798.
- [131] A. Lundström, T. Snelling, P. Morsing, P. Gabrielsson, E. Senar, et L. Olsson, « Urea decomposition and HNCO hydrolysis studied over titanium dioxide, Fe-Beta and γ -Alumina », *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 106, n° 3-4, p. 273-279, août 2011, doi: 10.1016/j.apcatb.2011.05.010.
- [132] G. Piazzesi, M. Devadas, O. Kröcher, M. Elsener, et A. Wokaun, « Isocyanic acid hydrolysis over Fe-ZSM5 in urea-SCR », *Catalysis Communications*, vol. 7, n° 8, p. 600-603, août 2006, doi: 10.1016/j.catcom.2006.01.022.
- [133] R. Asiain-Mira, C. Smith, P. Zamora, V. M. Monsalvo, et L. Torrente-Murciano, « Hydrogen production from urea in human urine using segregated systems », *Water Research*, vol. 222, p. 118931, août 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118931.
- [134] H. Zea, C. C. Luhrs, et J. Phillips, « Reductive/expansion synthesis of zero valent submicron and nanometal particles », *J. Mater. Res.*, vol. 26, n° 5, p. 672-681, mars 2011, doi: 10.1557/jmr.2010.66.
- [135] Z. Daniels, W. Rydalch, T. Y. Ansell, C. C. Luhrs, et J. Phillips, « Reduction Expansion Synthesis of Sintered Metal », *Materials*, vol. 12, n° 18, p. 2890, sept. 2019, doi: 10.3390/ma12182890.

- [136] S. Hosokai, Y. Kasiwaya, K. Matsui, N. Okinaka, et T. Akiyama, « Ironmaking with Ammonia at Low Temperature », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, n° 2, p. 821-826, janv. 2011, doi: 10.1021/es102910q.
- [137] N. Yasuda, Y. Mochizuki, N. Tsubouchi, et T. Akiyama, « Reduction and Nitriding Behavior of Hematite with Ammonia », *ISIJ International*, vol. 55, n° 4, p. 736-741, 2015, doi: 10.2355/isijinternational.55.736.
- [138] I. Iwamoto, A. Kurniawan, H. Hasegawa, Y. Kashiwaya, T. Nomura, et T. Akiyama, « Reduction Behaviors and Generated Phases of Iron Ores using Ammonia as Reducing Agent », *ISIJ Int.*, p. ISIJINT-2022-155, 2022, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-155.
- [139] ASM International, Éd., *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2013.
- [140] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, et S. I. Olsen, Éd., *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [141] ISO, « ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [142] « EcoInvent ». Consulté le: 16 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- [143] Y. Lechón, C. de la Rúa, et R. Sáez, « Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solarthermal Power Plants in Spain », *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 130, n° 2, p. 021012, mai 2008, doi: 10.1115/1.2888754.
- [144] M. B. Whitaker, G. A. Heath, J. J. Burkhardt, et C. S. Turchi, « Life Cycle Assessment of a Power Tower Concentrating Solar Plant and the Impacts of Key Design Alternatives », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, n° 11, p. 5896-5903, juin 2013, doi: 10.1021/es400821x.
- [145] A. Kuenlin, G. Augsburger, L. Gerber, et F. Maréchal, « Life Cycle Assessment and Environomic Optimization of Concentrating Solar Thermal Power Plants », *26th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS2013)*, Guilin, China, juill. 2013.
- [146] S. Ong, C. Campbell, P. Denholm, R. Margolis, et G. Heath, « Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States », NREL/TP-6A20-56290, 1086349, juin 2013. doi: 10.2172/1086349.
- [147] F. Cavallaro et L. Ciralo, « A Life Cycle Assessment (LCA) of a Paraboloidal-Dish Solar Thermal Power Generation System », in *2006 First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area*, Corte-Ajaccio, France: IEEE, juill. 2006, p. 260-265. doi: 10.1109/ISEIMA.2006.344933.
- [148] Y. Bravo, C. Monné, M. Carvalho, F. Moreno, et M. Muñoz, « Hybridization of Solar Dish-Stirling Technology: Analysis and Design », *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 33, n° 4, p. 1459-1466, oct. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/ep.11929>.
- [149] W. Kloepffer, « Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95) », *Int J Life Cycle Assess*, vol. 13, n° 2, p. 89-95, mars 2008, doi: 10.1065/lca2008.02.376.
- [150] J. G. Backes, A. D'Amico, N. Pauliks, S. Guarino, M. Traverso, et V. Lo Brano, « Life Cycle Sustainability Assessment of a dish-Stirling Concentrating Solar Power Plant in the Mediterranean area », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101444, oct. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101444.

- [151] Ministère de la transition énergétique, « Prix de l'électricité en France et dans l'Union européenne en 2021 », 2021, [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Datalab_essentiel%20prix_elec_2021_051022_TD_bis_0.pdf
- [152] N. L. Panwar, S. Kothari, et S. C. Kaushik, « Techno-economic evaluation of masonry type animal feed solar cooker in rural areas of an Indian state Rajasthan », *Energy Policy*, vol. 52, p. 583-586, janv. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.10.020.
- [153] A. Herez, M. Ramadan, et M. Khaled, « Review on solar cooker systems: Economic and environmental study for different Lebanese scenarios », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, p. 421-432, janv. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.021.
- [154] K. W. Liyew, N. G. Habtu, Y. Louvet, D. D. Guta, et U. Jordan, « Technical design, costs, and greenhouse gas emissions of solar Injera baking stoves », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111392, oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111392.
- [155] L. Andrianaivo et V. J. Ramasiarinoro, « Life Cycle Assessment and Environmental Impact Evaluation of the Parabolic Solar Cooker SK14 in Madagascar », *JOCET*, p. 191-195, 2014, doi: 10.7763/JOCET.2014.V2.121.
- [156] J. M. F. Mendoza, « Sustainability assessment of home-made solar cookers for use in developed countries », *Science of the Total Environment*, p. 13, 2019.
- [157] A. Gallego-Schmid, J. M. F. Mendoza, et A. Azapagic, « Environmental assessment of microwaves and the effect of European energy efficiency and waste management legislation », *Science of The Total Environment*, vol. 618, p. 487-499, mars 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.064.
- [158] IEA, « Spain ». Consulté le: 18 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/countries/spain>
- [159] P. Dalla Valle, « Design d'un réacteur d'un simulateur de four solaire à haut flux pour des expériences de réduction d'oxyde de fer », 2019.
- [160] A. Gallo, A. Marzo, E. Fuentealba, et E. Alonso, « High flux solar simulators for concentrated solar thermal research: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, p. 1385-1402, sept. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.056.
- [161] « Crystallography Open Database ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.crystallography.net/cod/>
- [162] « ICSD ». [En ligne]. Disponible sur: <https://icsd.products.fiz-karlsruhe.de/en/about/about-icsd#general+information>
- [163] H. M. Rietveld, « A profile refinement method for nuclear and magnetic structures », *J Appl Crystallogr*, vol. 2, n° 2, p. 65-71, juin 1969, doi: 10.1107/S0021889869006558.
- [164] iPoint, « Umberto ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ifu.com/umberto/lca-software/>
- [165] M. A. J. Huijbregts *et al.*, « ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level », *Int J Life Cycle Assess*, vol. 22, n° 2, p. 138-147, févr. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [166] *Changements climatiques 2014: rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève (Suisse): GIEC, 2015.
- [167] D. Elduque, C. Javierre, C. Pina, E. Martínez, et E. Jiménez, « Life cycle assessment of a domestic induction hob: electronic boards », *Journal of Cleaner Production*, vol. 76, p. 74-84, août 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.009.

- [168] International Aluminium Institute, « Primary Aluminium Production », International Aluminium Institute. Consulté le: 10 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>
- [169] International Aluminium Institute, « Aluminium global cycle 2021 », International Aluminium Institute. Consulté le: 21 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/>
- [170] Government of Canada, « Faits sur l'aluminium », Faits sur l'aluminium. Consulté le: 27 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-laluminium/20568>
- [171] C. Favi, M. Germani, D. Landi, M. Mengarelli, et M. Rossi, « Comparative life cycle assessment of cooking appliances in Italian kitchens », *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, p. 430-449, juin 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.140.
- [172] H. Guillet De Chatellus, « Sources laser - Principes, propriétés et applications », *Optique Photonique*, sept. 2021, doi: 10.51257/a-v2-e4020.
- [173] Plastics Europe, « Economie circulaire des plastique ». Consulté le: 24 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://plasticseurope.org/fr/wp-content/uploads/sites/2/2022/06/FR-infographie-economie-circulaire-2020.png>
- [174] International Aluminium Institute, « Aluminium cycle ». Consulté le: 13 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/#regional>
- [175] Le Syndicat National de l'Exploitation Climatique, « Enquête annuelle du SNEC - Analyse et propositions de solutions pour l'efficacité énergétique des logements ».
- [176] Ademe, « Modélisation et évaluation environnementale des produits de consommation et biens d'équipement », déc. 2019.
- [177] IEA World Energy Statistics and Balances, « Ecoinvent 3.8 Dataset Documentation "market for electricity, low voltage - FR - electricity, low voltage" ». OECD.
- [178] IEA World Energy Statistics and Balances, « Ecoinvent 3.8 Dataset Documentation "market for electricity, low voltage - ES - electricity, low voltage" ». OECD.
- [179] IEA World Energy Statistics and Balances, « Ecoinvent 3.8 Dataset Documentation "market for electricity, low voltage - DE - electricity, low voltage" ». OECD.
- [180] IEA World Energy Statistics and Balances, « Ecoinvent 3.8 Dataset Documentation "market for electricity, low voltage - AU - electricity, low voltage" ». OECD.
- [181] Météo France, « Climat - Toulouse ». [En ligne]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/climat/normales/france/occitanie/TOULOUSE-BLAGNAC>
- [182] « Solar Cooker – EG Solar ». Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://eg-solar.de/en/produkt-kategorie/solarkocher/>
- [183] « Induction hob - SEVERIN (Official) », SEVERIN. Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://severin.com/en-en/kitchen/cooking/hotplates/kp-1071-induction-hob/>
- [184] « Electric plate - Proline HPO15W », Darty. Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.darty.com/nav/achat/encastrable/dominos_cuisson/rechaud/proline_hp_o15w.html
- [185] « Gas hob - Ribimex PRF315 », Darty. Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.darty.com/nav/achat/ref/MC348210265.html>
- [186] « Set of reflector sheets SK14, coated ». Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://sunandice.de/Set-of-reflector-sheets-SK14-coated>

Bibliographie

- [187] Ministère de la transition énergétique, « Prix du gaz naturel en France et dans l'Union européenne en 2021 », 2021, [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Datalab_Prix%20gaz%20naturel_V6_0510_SB.pdf
- [188] H. Lin, Y.-W. Chen, et C. Li, « The mechanism of reduction of iron oxide by hydrogen », *Thermochimica Acta*, vol. 400, n° 1-2, p. 61-67, avr. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00478-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00478-1).
- [189] D. Wagner, « Etude expérimentale et modélisation de la réduction du minerai de fer par l'hydrogène », Ph.D Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01753016/document>

Annexe

A. Appareils de cuisson conventionnels

a. Cradle-to-use

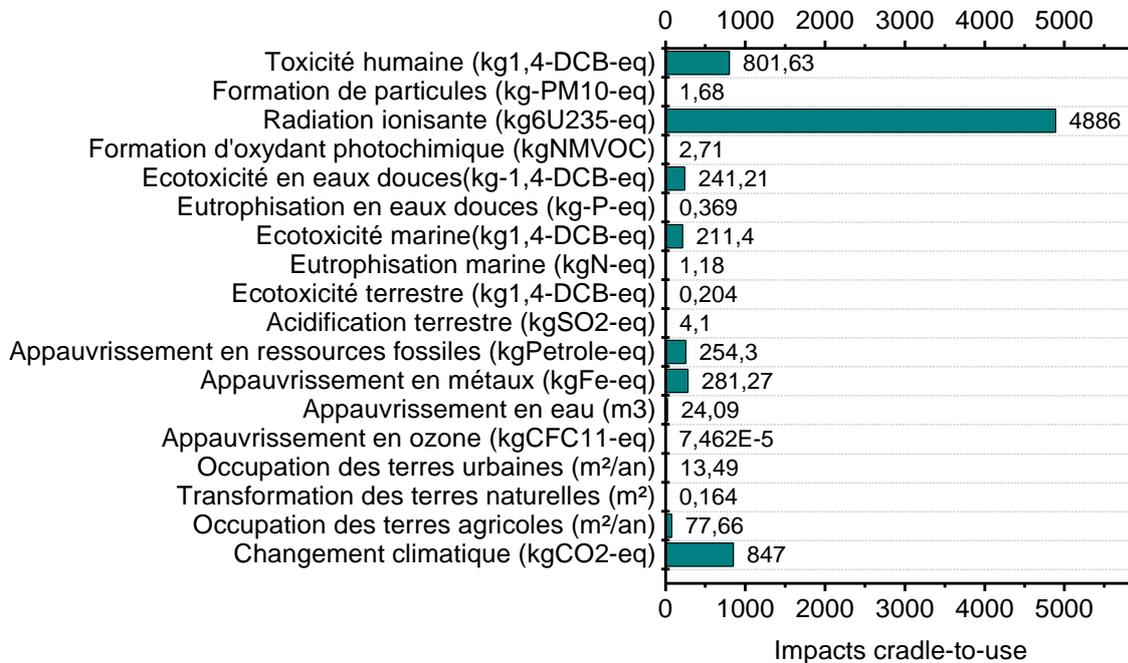


Figure A-1 : Impacts ReCiPe mid-point de la plaque à induction.

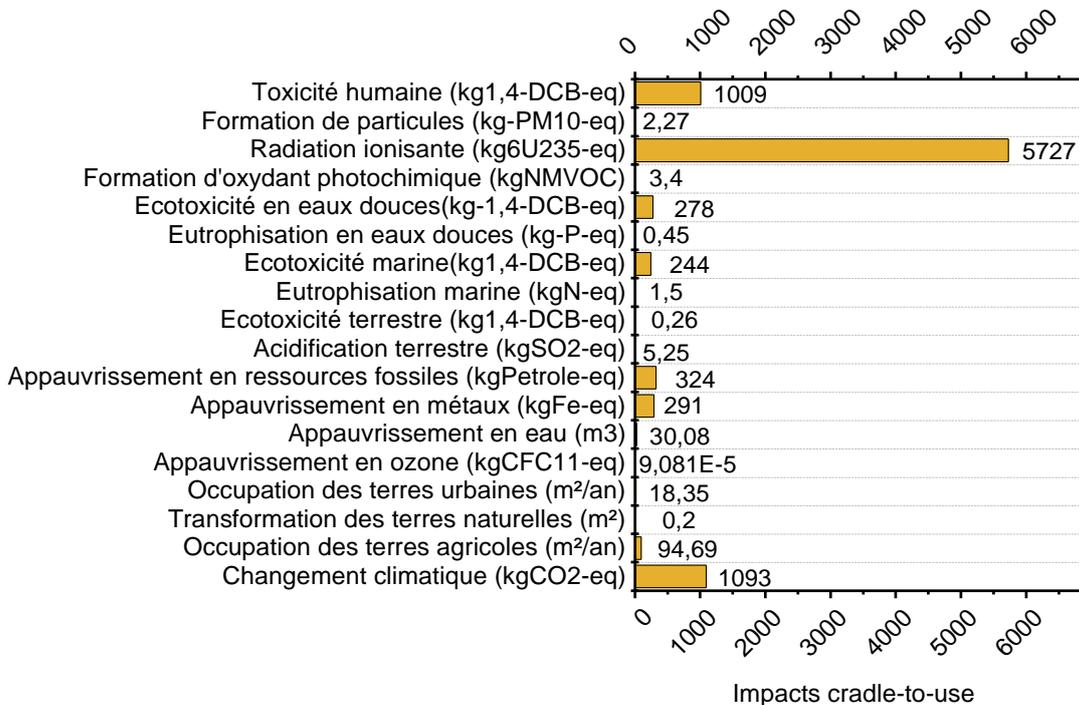


Figure A-2 : Impacts ReCiPe mid-point de la plaque électrique.

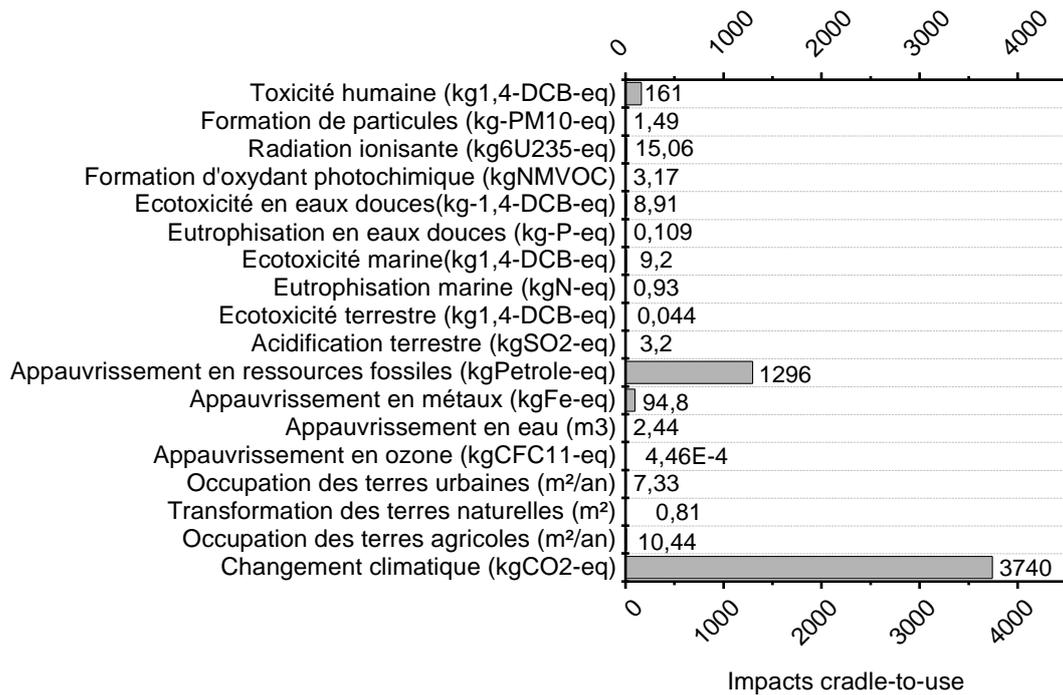


Figure A-3 : Impacts ReCiPe mid-point du brûleur à gaz

Tableau A-1 : Détail des résultats mid-point pour les appareils conventionnels sans traitement de fin de vie. Les impacts sont décomposés entre la phase de construction et la phase d'utilisation.

Indicateurs	Plaque à induction		Plaque électrique		Brûleur à gaz	
	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation
Changement climatique (kgCO _{2eq})	85	762	201	892	462	3278
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	3,66	74,29	7,65	87,04	9,38	1,06
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,014	0,15	0,029	0,17	0,03	0,78
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	2,01	11,48	4,90	13,45	5,45	1,88
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	4,32×10 ⁻⁶	7,03×10 ⁻⁵	8,51×10 ⁻⁶	8,23×10 ⁻⁵	5,66×10 ⁻⁶	4,40×10 ⁻⁴
Appauvrissement en eau (m ³)	0,53	24	2,47	27,61	2,13	0,31

Appareils de cuisson conventionnels

Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	147,76	133,51	135	156	77,93	16,87
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	25,30	228,95	55,59	268,24	110	1186
Acidification terrestre (kgSO ₂ _{eq})	0,55	3,55	1,09	4,16	1,96	1,24
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,024	0,18	0,051	0,21	0,030	0,014
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,14	1,04	0,29	1,21	0,55	0,38
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	35,11	176,29	37	207	6,86	2,34
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,10	0,27	0,14	0,31	0,10	0,01
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	40,21	201,11	42	236	7,39	1,52
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	0,49	2,22	0,80	2,60	1,52	1,65
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	6	4880	10	5717	10,08	4,98
Formation de particules (kgPM ₁₀ _{eq})	0,26	1,42	0,61	1,66	1,06	0,43
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	140	661	234	775	143	18

Tableau A-2 : Répartition des impacts mid-point en la phase de construction et la phase d'utilisation pour les appareils conventionnels sans traitement de fin de vie.

Indicateurs	Plaque à induction (%)		Plaque électrique (%)		Brûleur à gaz (%)	
	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation
Changement climatique	10,0	90,0	18,3	81,7	12,34	87,66
Occupation des terres agricoles	4,7	95,3	8,1	91,9	89,88	10,12
Transformation des terres naturelles	8,8	91,2	14,7	85,3	3,48	96,52
Occupation des terres urbaines	14,9	85,1	26,7	73,3	74,34	25,66
Appauvrissement en ozone	5,8	94,2	9,4	90,6	1,27	98,73
Appauvrissement en eau	2,2	97,8	8,2	91,8	87,30	12,70
Appauvrissement en métaux	52,5	47,5	46,3	53,7	82,20	17,80
Appauvrissement en ressources fossiles	10,0	90,0	17,2	82,8	8,52	91,48
Acidification terrestre	13,3	86,7	20,8	79,2	61,22	38,78
Ecotoxicité terrestre	12,1	87,9	20,0	80,0	68,09	31,91
Eutrophisation marine	11,9	88,1	19,2	80,8	58,93	41,07
Ecotoxicité marine	16,6	83,4	15,4	84,6	74,59	25,41
Eutrophisation en eaux douces	27,1	72,9	30,8	69,2	87,07	12,93
Ecotoxicité en eaux douces	16,7	83,3	15,0	85,0	82,97	17,03
Formation d'oxydants photochimiques	18,0	82,0	23,6	76,4	48,10	51,90
Radiation ionisante	0,1	99,9	0,2	99,8	66,93	33,07
Formation de particules	15,4	84,6	26,9	73,1	71,10	28,90
Toxicité humaine	17,5	82,5	23,2	76,8	88,85	11,15

Appareils de cuisson conventionnels

Tableau A-3 : Détail des résultats end-point pour les appareils conventionnels sans traitement de fin de vie. Les impacts sont décomposés entre la phase de construction et la phase d'utilisation.

Indicateurs	Plaque à induction		Plaque électrique		Brûleur à gaz	
	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation
Occupation des terres agricoles	0,14	2,74	0,29	3,21	0,35	0,04
Changement climatique	1,48	13,34	3,51	15,63	8,09	59,27
Ecotoxicité en eaux douces	$7,98 \times 10^{-3}$	$1,72 \times 10^{-2}$	0,016	0,020	$6,83 \times 10^{-3}$	$1,60 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$9,98 \times 10^{-3}$	$2,68 \times 10^{-2}$	0,014	0,031	$9,58 \times 10^{-3}$	$1,42 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité marine	$1,60 \times 10^{-3}$	$4,25 \times 10^{-3}$	$3,26 \times 10^{-3}$	$4,98 \times 10^{-3}$	$1,40 \times 10^{-3}$	$6,78 \times 10^{-4}$
Transformation des terres naturelles	0,055	0,39	0,11	0,45	0,11	1,22
Acidification terrestre	$6,99 \times 10^{-3}$	$4,55 \times 10^{-2}$	$1,40 \times 10^{-2}$	0,053	0,025	0,016
Ecotoxicité terrestre	$7,74 \times 10^{-3}$	$5,45 \times 10^{-2}$	$1,65 \times 10^{-2}$	0,064	$7,78 \times 10^{-3}$	$4,63 \times 10^{-3}$
Occupation des terres urbaines	0,09	0,53	0,22	0,62	0,25	0,09
Total qualité de l'écosystème	1,81	17,15	4,20	20,09	8,85	60,65
Changement climatique	2,35	21,11	5,56	24,73	12,80	91,02
Toxicité humaine	1,94	8,44	3,23	9,89	1,96	0,25
Radiation ionisante	$1,81 \times 10^{-3}$	1,59	$3,15 \times 10^{-3}$	1,86	$3,28 \times 10^{-3}$	$1,62 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$2,12 \times 10^{-4}$	$3,73 \times 10^{-3}$	$4,54 \times 10^{-4}$	$4,37 \times 10^{-3}$	$2,82 \times 10^{-4}$	0,023
Formation de particules	1,35	7,48	3,19	8,76	5,50	2,21
Formation d'oxydants photochimiques	0,034	0,38	0,082	0,44	0,14	0,010
Total santé humaine	5,67	39,00	12,06	45,69	20,40	93,52
Appauvrissement en ressources fossiles	3,03	27,45	6,67	32,17	13,24	142,16

Appauvrissement en métaux	7,41	10,85	11,49	12,71	5,69	3,99
Total appauvrissement en ressources	10,44	38,30	18,16	44,88	18,93	146,15
Total	17,92	94,45	34,42	110,65	48,18	300,32
Total end point	112,37		145,07		348,54	

Tableau A-4 : Répartition des impacts end-point en la phase de construction et la phase d'utilisation pour les appareils conventionnels sans traitement de fin de vie.

Indicateurs	Plaque à induction (%)		Plaque électrique (%)		Brûleur à gaz (%)	
	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation	Construction	Utilisation
Occupation des terres agricoles	4,92	95,08	8,24	91,76	88,94	11,06
Changement climatique	10,01	89,99	18,35	81,65	12,01	87,99
Ecotoxicité en eaux douces	31,68	68,32	43,70	56,30	81,01	18,99
Eutrophisation en eaux douces	27,14	72,86	30,82	69,18	87,07	12,93
Ecotoxicité marine	27,27	72,73	39,55	60,45	67,37	32,63
Transformation des terres naturelles	12,42	87,58	19,88	80,12	8,32	91,68
Acidification terrestre	13,33	86,67	20,78	79,22	61,22	38,78
Ecotoxicité terrestre	12,43	87,57	20,51	79,49	62,72	37,28
Occupation des terres urbaines	14,89	85,11	26,63	73,37	74,35	25,65
Total qualité de l'écosystème	9,54	90,46	17,30	82,70	12,73	87,27
Changement climatique	10,01	89,99	18,35	81,65	12,33	87,67
Toxicité humaine	18,69	81,31	24,61	75,39	88,84	11,16
Radiation ionisante	0,11	99,89	0,17	99,83	66,93	33,07
Appauvrissement en ozone	5,38	94,62	9,40	90,60	1,19	98,81

Appareils de cuisson conventionnels

Formation de particules	15,25	84,75	26,69	73,31	71,28	28,72
Formation d'oxydants photochimiques	8,32	91,68	15,61	84,39	93,40	6,60
Total santé humaine	12,69	87,31	20,89	79,11	17,91	82,09
Appauvrissement en ressources fossiles	9,95	90,05	17,17	82,83	8,52	91,48
Appauvrissement en métaux	40,57	59,43	47,48	52,52	58,52	41,08
Total appauvrissement en ressources	21,42	78,58	28,81	71,19	11,46	88,51
Total	15,95	84,05	23,73	76,27	13,83	86,17
Total end point	100		100		100	

b. Cradle-to-grave

Tableau A-5 : Impacts mid-point cradle-to-grave des appareils de cuisson conventionnels.

Indicateurs	Plaque à induction	Plaque électrique	Brûleur à gaz
Changement climatique (kgCO _{2eq})	846,6	1085	3736
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	78,07	94,6	10,38
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,16	0,20	0,80
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	13,56	18,3	7,29
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	7,47×10 ⁻⁵	9,05×10 ⁻⁵	4,46×10 ⁻⁵
Appauvrissement en eau (m ³)	24,09	30,1	2,43
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	281,27	282,4	91,01
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	253,10	321,7	1294
Acidification terrestre (kgSO _{2eq})	4,07	5,2	3,18
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,48	0,53	0,05

Eutrophisation marine (kgN _{eq})	1,18	1,5	0,93
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	319,85	243,8	9,76
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,36	0,45	0,11
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	368	277	9,58
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	2,69	3,4	3,15
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	4885	5726	14,93
Formation de particules (kgPM _{10eq})	1,72	2,3	1,47
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	802	1006	159

Tableau A-6 : Dommages end-point cradle-to-grave des appareils de cuisson conventionnels.

Indicateurs	Plaque à induction	Plaque électrique	Brûleur à gaz
Occupation des terres agricoles	2,88	3,49	0,39
Changement climatique	14,83	19,01	67,31
Ecotoxicité en eaux douces	$2,53 \times 10^{-2}$	$3,54 \times 10^{-2}$	$8,28 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$3,66 \times 10^{-2}$	$4,49 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$
Ecotoxicité marine	$5,86 \times 10^{-3}$	$8,16 \times 10^{-3}$	$2,04 \times 10^{-3}$
Transformation des terres naturelles	0,44	0,57	1,33
Acidification terrestre	$5,22 \times 10^{-2}$	$6,70 \times 10^{-2}$	$4,08 \times 10^{-2}$
Ecotoxicité terrestre	0,15	0,17	0,01
Occupation des terres urbaines	0,62	0,84	0,33
Total qualité de l'écosystème	19,06	24,23	69,44
Changement climatique	23,47	30,07	103,74
Toxicité humaine	10,37	13,08	2,19
Radiation ionisante	1,59	1,86	0,00
Appauvrissement en ozone	$3,95 \times 10^{-3}$	$4,80 \times 10^{-3}$	$2,36 \times 10^{-2}$
Formation de particules	9,01	12,03	7,62

Formation d'oxydants photochimiques	0,41	0,52	0,15
Total santé humaine	44,85	57,57	113,73
Appauvrissement en ressources fossiles	30,35	38,57	155,16
Appauvrissement en métaux	18,25	21,58	8,55
Total appauvrissement en ressources	48,60	60,15	163,71
Total	112,52	141,96	346,88

B. Les paraboles solaires

a. La parabole de référence

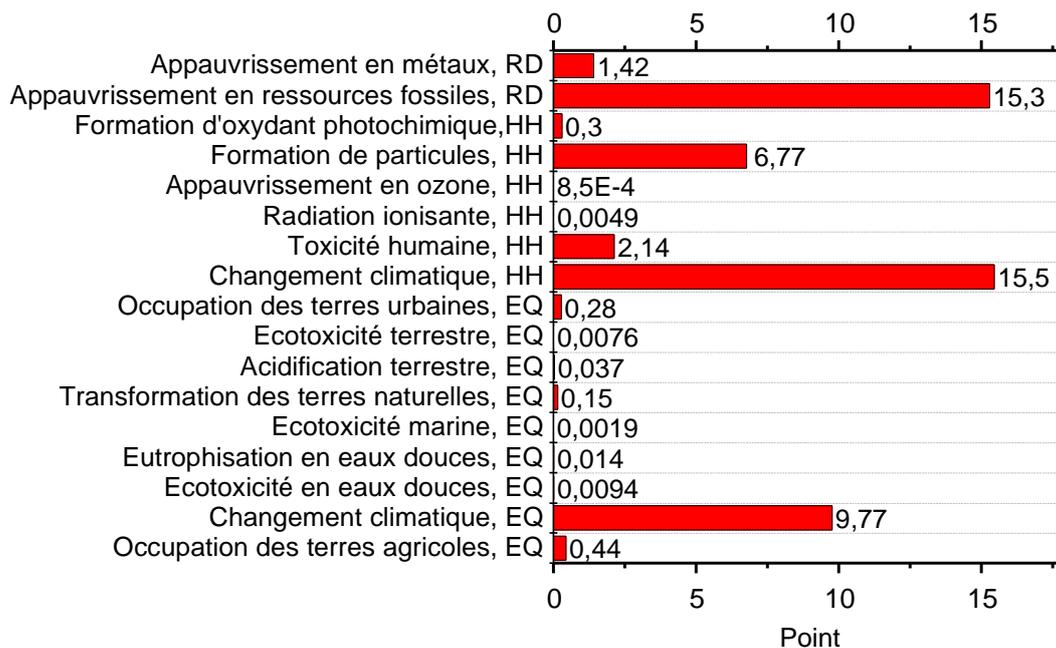


Figure B-1 : Dommages end-point de la parabole de référence pour les zones de dommages sur la qualité de l'écosystème (EQ), la santé humaine (HH) et l'appauvrissement en ressources (RD).

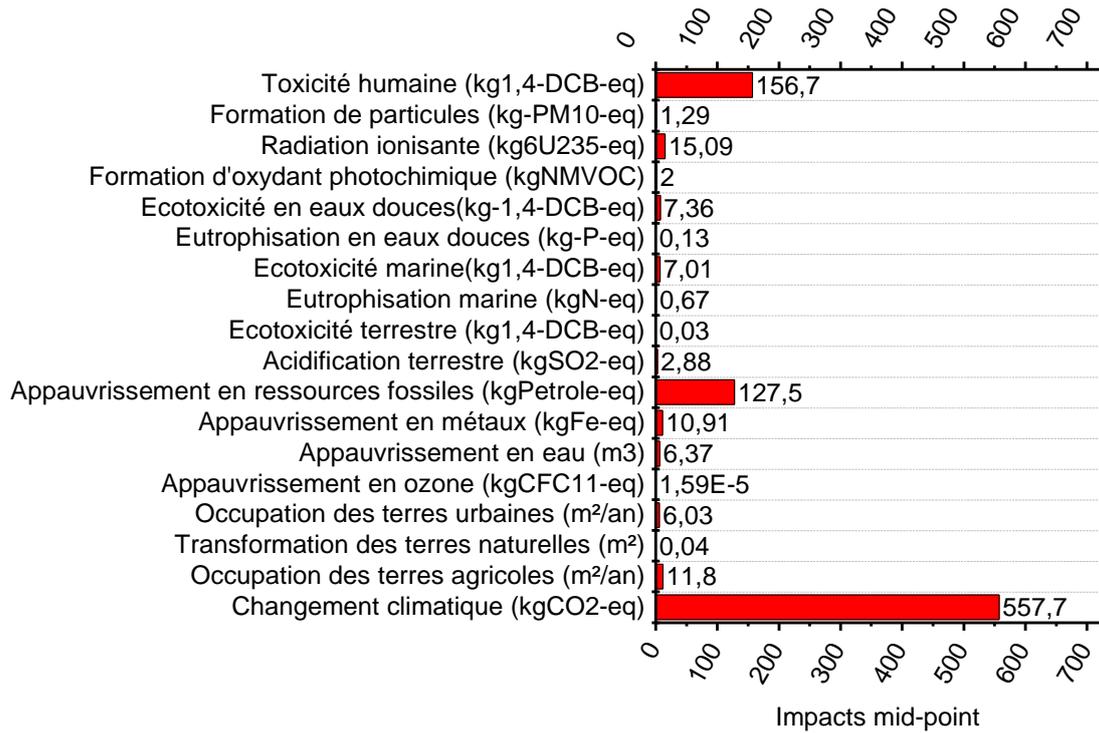


Figure B-2 : Impacts mid-point de la parabole solaire de référence.

b. Résultats mid-point sans fin de vie

Tableau B-1 : Résultats mid-point des paraboles en aluminium sans traitement de fin de vie.

Indicateurs	Aluminium chinois (référence)	Aluminium canadien	Aluminium chinois et recyclé à 35%	Aluminium canadien et recyclé à 35%	Aluminium recyclé
Changement climatique (kgCO ₂ eq)	557,72	203,36	348,44	149,82	76
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	11,84	6,92	9,45	6,27	5,15
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,04	0,19	0,029	0,13	0,013
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	6,03	2,24	4,08	1,57	1,01
Appauvrissement en ozone (kgCFC11eq)	1,59×10 ⁻⁵	1,54×10 ⁻⁵	1,31×10 ⁻⁵	1,28×10 ⁻⁵	9,80×10 ⁻⁶

Les paraboles solaires

Appauvrissement en eau (m ³)	6,37	5,2	5,95	5,2	5,19
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	10,91	9,68	10,77	9,95	10,87
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	127,47	49,69	89,25	37,75	22,67
Acidification terrestre (kgSO ₂ _{eq})	2,88	1,49	2	1,07	0,41
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,03	0,017	0,022	0,014	0,012
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,67	0,24	0,47	0,18	0,11
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	7,01	5,63	5,15	4,24	1,82
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,13	0,07	0,1	0,059	0,039
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	7,36	5,96	5,39	4,47	1,85
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	2,00	0,84	1,39	0,61	0,31
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	15,09	18,11	14,4	17,77	13,85
Formation de particules (kgPM ₁₀ _{eq})	1,29	0,53	0,89	0,38	0,17
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	156,71	96,75	118,45	79,36	50,77

Tableau B-2 : Résultats mid-point des paraboles en bois et aluminium sans traitement de fin de vie.

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Changement climatique (kgCO ₂ _{eq})	355,64	137,34	250,99	107,16	57,17

Occupation des terres agricoles (m ² /an)	163,35	160,29	161,89	159,91	159,08
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,028	0,12	0,022	0,083	0,012
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	5,56	3,24	4,52	2,99	2,57
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	1,09×10 ⁻⁵	1,06×10 ⁻⁵	9,76×10 ⁻⁶	9,54×10 ⁻⁶	7,59×10 ⁻⁶
Appauvrissement en eau (m ³)	5,81	5,08	5,56	5,08	5,08
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	9,13	8,37	9,16	8,66	6,16
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	82,19	34,25	59,59	28,01	17,63
Acidification terrestre (kgSO ₂ _{eq})	1,84	0,98	1,3	0,73	0,3
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,022	0,014	0,019	0,014	0,012
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,43	0,17	0,31	0,13	0,08
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	4,77	3,91	3,64	3,08	1,39
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,091	0,051	0,07	0,044	0,031
Ecotoxicité en eaux douces (kg-1,4-DCB _{eq})	5,01	4,14	3,8	3,24	1,42
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	1,29	0,58	0,93	0,45	0,24

Radiation ionisante (kg6U235eq)	13,22	14,54	13,03	14,58	12,53
Formation de particules (kgPM ₁₀ eq)	0,82	0,36	0,58	0,27	0,12
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	103,6	66,43	80,64	56,45	37,37

c. Mid-point avec fin de vie

Tableau B-3 : Résultats mid-point des paraboles en aluminium avec traitement de fin de vie

Indicateurs	Aluminium chinois (référence)	Aluminium canadien	Aluminium chinois et recyclé à 35%	Aluminium canadien et recyclé à 35%	Aluminium recyclé
Changement climatique (kgCO ₂ eq)	264,47	114,17	182,97	87,1	71,77
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	7,83	5,86	6,73	5,54	5,2
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,02	0,085	0,016	0,055	0,011
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	3,20	1,59	2,17	1,13	1,055
Appauvrissement en ozone (kgCFC11eq)	9,18×10 ⁻⁶	8,97×10 ⁻⁶	7,43×10 ⁻⁶	7,30×10 ⁻⁶	7,09×10 ⁻⁶
Appauvrissement en eau (m ³)	5,55	5,08	5,35	5,08	5,11
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	7,59	7,06	7,43	7,08	7,31
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPetrole _{eq})	62,03	29,04	43,63	22,59	19,87

Acidification terrestre (kgSO ₂ eq)	1,36	0,76	0,95	0,56	0,38
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,02	0,013	0,014	0,012	0,011
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,33	0,14	0,23	0,11	0,1
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	205,65	205,08	204,78	204,42	203,57
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,07	0,044	0,054	0,039	0,031
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	238,89	238,31	237,97	237,61	236,67
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	0,97	0,47	0,68	0,36	0,29
Radiation ionisante (kg6U235eq)	12,88	16,5	12,35	16,13	12,49
Formation de particules (kgPM ₁₀ eq)	0,61	0,28	0,42	0,21	0,16
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	80,49	56,1	62,36	47,46	37,8

Tableau B-4 : Résultats mid-point des paraboles en bois et aluminium avec traitement de fin de vie.

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Changement climatique (kgCO ₂ eq)	178,44	86,96	130,83	73,24	58,23
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	160,97	159,75	160,3	159,6	159,19

Les paraboles solaires

Transformation des terres naturelles (m ²)	0,018	0,056	0,016	0,039	0,012
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	4,08	3,1	3,6	2,98	2,86
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	7,33×10 ⁻⁶	7,17×10 ⁻⁶	6,80×10 ⁻⁶	6,71×10 ⁻⁶	5,94×10 ⁻⁶
Appauvrissement en eau (m ³)	5,31	5,02	5,19	5,02	5,01
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	7,01	6,68	7,02	6,81	3,98
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPetrole _{eq})	43,23	23,14	32,95	20,3	17,16
Acidification terrestre (kgSO2 _{eq})	0,92	0,55	0,67	0,44	0,3
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,017	0,013	0,015	0,013	0,013
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,23	0,114	0,17	0,099	0,086
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	128,3	127,95	127,8	127,57	126,85
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,052	0,036	0,043	0,033	0,028
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	148,98	148,63	148,44	148,22	147,45
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	0,68	0,37	0,51	0,32	0,26
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	12,48	14,17	12,39	14,19	12,1
Formation de particules (kgPM10 _{eq})	0,41	0,15	0,3	0,17	0,12

Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	57,91	42,85	47,47	38,31	30,8
--	-------	-------	-------	-------	------

d. End-point sans fin de vie

Tableau B-5 : Résultats end-point des paraboles en aluminium sans fin de vie.

Indicateurs	Aluminium chinois (référence)	Aluminium canadien	Aluminium chinois et recyclé à 35%	Aluminium canadien et recyclé à 35%	Aluminium recyclé
Occupation des terres agricoles	0,44	0,29	0,35	0,26	0,18
Changement climatique	9,77	3,56	6,83	2,72	1,43
Ecotoxicité en eaux douces	$9,37 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-3}$	$6,62 \times 10^{-3}$	$4,85 \times 10^{-3}$	$1,56 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$1,35 \times 10^{-2}$	$7,00 \times 10^{-3}$	$1,01 \times 10^{-2}$	$5,95 \times 10^{-3}$	$3,98 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité marine	$1,91 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-3}$	9,84E-04	2,92E-04
Transformation des terres naturelles	0,15	0,79	0,12	0,53	0,05
Acidification terrestre	$3,70 \times 10^{-2}$	$1,90 \times 10^{-2}$	$2,58 \times 10^{-2}$	$1,39 \times 10^{-2}$	$5,51 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité terrestre	$7,63 \times 10^{-3}$	$5,26 \times 10^{-3}$	$6,56 \times 10^{-3}$	$4,98 \times 10^{-3}$	$4,59 \times 10^{-3}$
Occupation des terres urbaines	0,28	0,10	0,20	0,08	0,06
Total qualité de l'écosystème	10,71	4,78	7,54	3,63	1,74
Changement climatique	15,46	5,64	10,80	4,29	2,25
Toxicité humaine	2,14	1,32	1,64	1,10	0,72
Radiation ionisante	$4,91 \times 10^{-3}$	$5,89 \times 10^{-3}$	$4,81 \times 10^{-3}$	$5,91 \times 10^{-3}$	$4,64 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$8,53 \times 10^{-4}$	$8,44 \times 10^{-4}$	$6,75 \times 10^{-4}$	$6,69 \times 10^{-4}$	$3,49 \times 10^{-4}$
Formation de particules	6,77	2,84	4,70	2,08	0,90

Les paraboles solaires

Formation d'oxydants photochimiques	0,30	0,22	0,20	0,15	0,02
Total santé humaine	24,68	10,02	17,35	7,63	3,90
Appauvrissement en ressources fossiles	15,29	5,96	10,93	4,75	2,94
Appauvrissement en métaux	1,42	1,11	1,10	0,89	0,51
Total appauvrissement en ressources	16,71	7,07	12,03	5,65	3,45
Total	52,10	21,87	36,91	16,90	9,09

Tableau B-6 : Résultats end-point des paraboles en bois et en aluminium sans fin de vie

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Occupation des terres agricoles	5,89	5,80	5,84	5,78	5,73
Changement climatique	6,23	2,41	4,40	1,81	1,01
Ecotoxicité en eaux douces	$6,29 \times 10^{-3}$	$4,62 \times 10^{-3}$	$4,58 \times 10^{-3}$	$3,46 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$9,13 \times 10^{-3}$	$5,11 \times 10^{-3}$	$7,05 \times 10^{-3}$	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,16 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité marine	$1,29 \times 10^{-3}$	$9,47 \times 10^{-4}$	$9,30 \times 10^{-4}$	$7,10 \times 10^{-4}$	$2,18 \times 10^{-4}$
Transformation des terres naturelles	0,11	0,50	0,08	0,34	0,04
Acidification terrestre	$2,35 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2}$	$1,66 \times 10^{-2}$	$9,12 \times 10^{-3}$	$3,88 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité terrestre	$5,92 \times 10^{-3}$	$4,46 \times 10^{-3}$	$5,25 \times 10^{-3}$	$4,04 \times 10^{-3}$	$3,93 \times 10^{-3}$
Occupation des terres urbaines	0,25	0,15	0,21	0,13	0,12
Total qualité de l'écosystème	12,53	8,88	10,56	8,08	6,91

Changement climatique	9,86	3,81	6,96	2,86	1,59
Toxicité humaine	1,42	0,90	1,10	0,72	0,51
Radiation ionisante	$4,30 \times 10^{-3}$	$4,73 \times 10^{-3}$	$4,24 \times 10^{-3}$	$4,52 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$5,87 \times 10^{-4}$	$5,80 \times 10^{-4}$	$4,76 \times 10^{-4}$	$4,51 \times 10^{-4}$	$2,68 \times 10^{-4}$
Formation de particules	4,31	1,89	3,02	1,40	0,61
Formation d'oxydants photochimiques	0,19	0,14	0,13	0,10	0,02
Total santé humaine	15,79	6,75	11,22	5,08	2,74
Appauvrissement en ressources fossiles	9,86	4,11	7,15	3,20	2,11
Appauvrissement en métaux	1,12	0,93	0,92	0,79	0,30
Total appauvrissement en ressources	10,97	5,03	8,06	3,99	2,42
Total	39,29	20,66	29,85	17,15	12,06

e. End-point avec fin de vie

Tableau B-7 : Résultats end-point des paraboles en aluminium avec fin de vie

Indicateur	Aluminium chinois (référence)	Aluminium canadien	Aluminium chinois et recyclé à 35%	Aluminium canadien et recyclé à 35%	Aluminium recyclé
Occupation des terres agricoles	0,29	0,24	0,24	0,23	0,18
Changement climatique	4,63	2,00	3,30	1,62	1,35
Ecotoxicité en eaux douces	$4,77 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,52 \times 10^{-3}$	$2,84 \times 10^{-3}$	$1,66 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$6,96 \times 10^{-3}$	$4,41 \times 10^{-3}$	$5,43 \times 10^{-3}$	$3,93 \times 10^{-3}$	$3,20 \times 10^{-3}$

Les paraboles solaires

Ecotoxicité marine	$9,75 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-4}$	$7,15 \times 10^{-4}$	$5,78 \times 10^{-4}$	$3,29 \times 10^{-4}$
Transformation des terres naturelles	0,09	0,34	0,07	0,23	0,05
Acidification terrestre	$1,75 \times 10^{-2}$	$9,74 \times 10^{-2}$	$1,24 \times 10^{-2}$	$7,41 \times 10^{-3}$	$5,05 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité terrestre	$5,22 \times 10^{-3}$	$4,21 \times 10^{-3}$	$4,73 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-3}$	$4,16 \times 10^{-3}$
Occupation des terres urbaines	0,15	0,07	0,11	0,06	0,06
Total qualité de l'écosystème	5,19	2,68	3,75	2,16	1,66
Changement climatique	7,33	3,17	5,21	2,55	2,13
Toxicité humaine	1,08	0,74	0,85	0,65	0,52
Radiation ionisante	$4,19 \times 10^{-3}$	$5,37 \times 10^{-3}$	$4,15 \times 10^{-3}$	$5,38 \times 10^{-3}$	$4,19 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$4,94 \times 10^{-4}$	$4,90 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-4}$	$4,11 \times 10^{-4}$	$3,04 \times 10^{-4}$
Formation de particules	3,19	1,50	2,25	1,16	0,87
Formation d'oxydants photochimiques	0,13	0,10	0,09	0,07	0,02
Total santé humaine	11,74	5,51	8,41	4,43	3,54
Appauvrissement en ressources fossiles	7,44	3,48	5,46	2,93	2,61
Appauvrissement en métaux	0,82	0,69	0,68	0,59	0,46
Total appauvrissement en ressources	8,26	4,17	6,14	3,53	3,07
Total	25,19	12,37	18,29	10,11	8,27

Tableau B-8 : Résultats end-point des paraboles en bois et en aluminium avec fin de vie

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium	Bois, aluminium	Bois et aluminium recyclé
-------------	---------------------------	----------------------------	-----------------	-----------------	---------------------------

			chinois et recyclé à 35%	canadien et recyclé à 35%	
Occupation des terres agricoles	5,80	5,77	5,78	5,77	5,74
Changement climatique	3,13	1,52	2,29	1,28	1,02
Écotoxicité en eaux douces	$3,48 \times 10^{-3}$	$2,80 \times 10^{-3}$	$2,70 \times 10^{-3}$	$2,28 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$5,23 \times 10^{-3}$	$3,64 \times 10^{-3}$	$4,28 \times 10^{-3}$	$3,34 \times 10^{-3}$	$2,80 \times 10^{-3}$
Écotoxicité marine	$7,15 \times 10^{-4}$	$5,77 \times 10^{-4}$	$5,53 \times 10^{-4}$	$4,69 \times 10^{-4}$	$2,53 \times 10^{-4}$
Transformation des terres naturelles	0,07	0,23	0,06	0,16	0,04
Acidification terrestre	$1,17 \times 10^{-2}$	$7,04 \times 10^{-3}$	$8,59 \times 10^{-3}$	$5,59 \times 10^{-3}$	$3,83 \times 10^{-3}$
Écotoxicité terrestre	$4,94 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-3}$	$4,63 \times 10^{-3}$	$4,24 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-3}$
Occupation des terres urbaines	0,19	0,14	0,16	0,14	0,13
Total qualité de l'écosystème	9,21	7,69	8,32	7,36	6,94
Changement climatique	4,95	2,41	3,63	2,03	1,61
Toxicité humaine	0,78	0,57	0,64	0,51	0,41
Radiation ionisante	$4,06 \times 10^{-3}$	$4,61 \times 10^{-3}$	$4,03 \times 10^{-3}$	$4,62 \times 10^{-3}$	$3,94 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$3,95 \times 10^{-4}$	$3,91 \times 10^{-4}$	$3,44 \times 10^{-4}$	$3,42 \times 10^{-4}$	$2,64 \times 10^{-4}$
Formation de particules	2,15	1,12	1,56	0,91	0,65
Formation d'oxydants photochimiques	0,09	0,07	0,06	0,05	0,02
Total santé humaine	7,97	4,18	5,90	3,51	2,69
Appauvrissement en ressources fossiles	5,18	2,77	3,95	2,43	2,06
Appauvrissement en métaux	0,71	0,63	0,62	0,56	0,24

Total appauvrissement en ressources	5,89	3,40	4,57	3,00	2,29
Total	23,08	15,27	18,78	13,86	11,93

C. Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes

a. Durée de vie de la structure de la parabole de référence

Tableau C-1 : Résultats mid-point pour la variation des durées de vie de la parabole de référence. Les valeurs étudiées sont 10, 20 et 40 ans.

Indicateurs	Construction			Cradle-to-grave		
	40 ans	20 ans	10 ans	40 ans	20 ans	10 ans
Changement climatique (kgCO _{2eq})	557,72	829,53	1384,46	264,47	388,11	646,71
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	11,84	17,72	29,54	7,83	11,69	19,46
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,040	0,058	0,098	0,022	0,032	0,054
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	6,03	8,93	15,03	3,20	4,67	7,93
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	1,59×10 ⁻⁵	2,25×10 ⁻⁵	3,78×10 ⁻⁵	9,18×10 ⁻⁶	1,24×10 ⁻⁵	2,09×10 ⁻⁵
Appauvrissement en eau (m ³)	6,37	7,14	8,69	5,55	5,90	6,61
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	10,91	16,89	29,32	7,59	11,69	20,37

Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	127,47	188,47	314,44	62,03	89,97	149,80
Acidification terrestre (kgSO _{2eq})	2,88	4,25	7,14	1,36	1,96	3,33
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,030	0,043	0,072	0,02	0,03	0,04
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,67	0,99	1,67	0,33	0,47	0,81
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	7,01	10,23	16,75	205,65	309,10	516,07
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,13	0,19	0,31	0,07	0,10	0,15
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	7,36	10,73	17,53	238,89	359,08	599,53
Formation d'oxydant photochimique (kgNMVOC _{eq})	2,00	2,95	4,99	0,97	1,40	2,40
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	15,09	18,16	25,06	12,88	14,83	19,50
Formation de particules (kgPM _{10eq})	1,29	1,92	3,22	0,61	0,89	1,51
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	156,71	229,45	376,73	80,49	114,68	184,89

b. Trajet des barres d'aluminium et du bois

Tableau C-2 : Résultats mid-point des paraboles en bois et aluminium sans traitement de fin vie lorsque le bois est transporté du lieu d'assemblage de la parabole au lieu d'utilisation.

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Changement climatique (kgCO _{2eq})	373,67	155,36	269,01	125,18	75,20
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	163,48	160,43	162,02	160,04	159,22
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,035	0,13	0,029	0,090	0,019
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	6,55	4,22	5,51	3,97	3,56
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	1,42×10 ⁻⁵	1,39×10 ⁻⁵	1,31×10 ⁻⁵	1,29×10 ⁻⁵	1,09×10 ⁻⁵
Appauvrissement en eau (m ³)	5,83	5,10	5,57	5,10	5,09
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	9,83	9,07	9,86	9,35	6,86
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	89,01	41,07	66,41	34,83	24,45
Acidification terrestre (kgSO _{2eq})	1,89	1,03	1,35	0,78	0,36
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,031	0,023	0,028	0,022	0,021
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,45	0,19	0,33	0,15	0,10

Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	4,94	4,08	3,81	3,25	1,56
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,092	0,052	0,071	0,045	0,033
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	5,14	4,27	3,94	3,37	1,56
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	1,37	0,65	1,00	0,52	0,32
Radiation ionisante (kg6U235eq)	14,64	15,96	14,45	15,99	13,95
Formation de particules (kgPM _{10eq})	0,85	0,39	0,61	0,30	0,15
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	108,43	71,27	85,47	61,29	42,20

Tableau C-3 : Résultats mid-point des paraboles en bois et aluminium avec traitement de fin vie lorsque le bois est transporté du lieu d'assemblage de la parabole au lieu d'utilisation.

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Changement climatique (kgCO _{2eq})	196,46	104,99	148,85	91,27	76,26
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	161,10	159,88	160,44	159,70	159,32
Transformation des terres naturelles (m ²)	0,025	0,06	0,023	0,046	0,019
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	5,06	4,08	4,59	3,97	3,84

Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes

Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	1,07×10 ⁻⁵	1,05×10 ⁻⁵	1,01×10 ⁻⁵	1,00×10 ⁻⁵	9,28×10 ⁻⁶
Appauvrissement en eau (m ³)	5,33	5,04	5,21	5,04	5,03
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	7,70	7,38	7,72	7,51	4,68
Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	50,05	29,96	39,77	27,12	23,98
Acidification terrestre (kgSO ₂ _{eq})	0,97	0,61	0,73	0,49	0,35
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0,026	0,022	0,024	0,022	0,021
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0,25	0,14	0,19	0,12	0,11
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	128,48	128,12	127,96	127,74	127,02
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0,053	0,037	0,044	0,030	0,029
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	149,12	148,76	148,57	148,35	147,58
Formation d'oxydants photochimiques (kgNMVOC _{eq})	0,76	0,45	0,59	0,39	0,33
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	13,90	15,59	13,81	15,60	13,52
Formation de particules (kgPM ₁₀ _{eq})	0,44	0,24	0,33	0,20	0,15
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	62,74	47,69	52,30	43,15	35,63

Tableau C-4 : Résultats end-point des paraboles en bois et aluminium sans traitement de fin vie lorsque le bois est transporté du lieu d'assemblage de la parabole au lieu d'utilisation.

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Occupation des terres agricoles	5,90	5,80	5,84	5,79	5,73
Changement climatique	6,55	2,72	4,72	2,20	1,33
Ecotoxicité en eaux douces	6,39×10 ⁻³	4,72×10 ⁻³	4,67×10 ⁻³	3,59×10 ⁻³	1,25×10 ⁻³
Eutrophisation en eaux douces	9,25×10 ⁻³	5,23×10 ⁻³	7,17×10 ⁻³	4,58×10 ⁻³	3,28×10 ⁻³
Ecotoxicité marine	1,32×10 ⁻³	9,86×10 ⁻⁴	9,69×10 ⁻⁴	7,49×10 ⁻⁴	2,57×10 ⁻⁴
Transformation des terres naturelles	0,13	0,53	0,11	0,37	0,067
Acidification terrestre	0,024	0,013	0,017	0,010	4,60×10 ⁻³
Ecotoxicité terrestre	8,82×10 ⁻³	7,36×10 ⁻³	8,15×10 ⁻³	7,18×10 ⁻³	6,83×10 ⁻³
Occupation des terres urbaines	0,30	0,19	0,25	0,18	0,16
Total qualité de l'écosystème	12,93	9,28	10,96	8,56	7,31
Changement climatique	10,36	4,31	7,46	3,47	2,09
Toxicité humaine	1,48	0,97	1,17	0,84	0,58
Radiation ionisante	4,76×10 ⁻³	5,19×10 ⁻³	4,70×10 ⁻³	5,20×10 ⁻³	4,54×10 ⁻³
Appauvrissement en ozone	7,63×10 ⁻⁴	7,55×10 ⁻⁴	6,52×10 ⁻⁴	6,47×10 ⁻⁴	4,44×10 ⁻⁴
Formation de particules	4,47	2,05	3,18	1,58	0,77
Formation d'oxydants photochimiques	0,19	0,14	0,13	0,10	0,020
Total santé humaine	16,51	7,47	11,95	5,99	3,46

Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes

Appauvrissement en ressources fossiles	10,67	4,93	7,96	4,18	2,93
Appauvrissement en métaux	1,28	1,09	1,08	0,95	0,47
Total appauvrissement en ressources	11,95	6,01	9,04	5,13	3,40
Total	41,39	22,77	31,95	19,68	14,17

Tableau C-5 : Résultats end-point des paraboles en bois et aluminium avec traitement de fin vie lorsque le bois est transporté du lieu d'assemblage de la parabole au lieu d'utilisation.

Indicateurs	Bois et aluminium chinois	Bois et aluminium canadien	Bois, aluminium chinois et recyclé à 35%	Bois, aluminium canadien et recyclé à 35%	Bois et aluminium recyclé
Occupation des terres agricoles	5,81	5,78	5,78	5,77	5,74
Changement climatique	3,44	1,84	2,61	1,60	1,34
Ecotoxicité en eaux douces	$3,57 \times 10^{-3}$	$2,90 \times 10^{-3}$	$2,80 \times 10^{-3}$	$2,38 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$
Eutrophisation en eaux douces	$5,35 \times 10^{-3}$	$3,76 \times 10^{-3}$	$4,40 \times 10^{-3}$	$3,46 \times 10^{-3}$	$2,92 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité marine	$7,54 \times 10^{-4}$	$6,16 \times 10^{-4}$	$5,92 \times 10^{-4}$	$5,08 \times 10^{-4}$	$2,93 \times 10^{-4}$
Transformation des terres naturelles	0,10	0,26	0,09	0,18	0,069
Acidification terrestre	0,012	0,008	0,009	0,006	$4,55 \times 10^{-3}$
Ecotoxicité terrestre	$7,83 \times 10^{-3}$	$7,21 \times 10^{-3}$	$7,53 \times 10^{-3}$	$7,14 \times 10^{-3}$	$6,98 \times 10^{-3}$
Occupation des terres urbaines	0,23	0,19	0,21	0,18	0,18
Total qualité de l'écosystème	9,61	8,08	8,71	7,76	7,34
Changement climatique	5,45	2,91	4,13	2,53	2,11

Toxicité humaine	0,84	0,64	0,70	0,58	0,48
Radiation ionisante	$4,52 \times 10^{-3}$	$5,07 \times 10^{-3}$	$4,49 \times 10^{-3}$	$5,08 \times 10^{-3}$	$4,40 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$5,70 \times 10^{-4}$	$5,66 \times 10^{-4}$	$5,19 \times 10^{-4}$	$5,17 \times 10^{-4}$	$4,39 \times 10^{-4}$
Formation de particules	2,31	1,28	1,72	1,07	0,80
Formation d'oxydants photochimiques	0,09	0,07	0,06	0,05	0,021
Total santé humaine	8,70	4,90	6,62	4,23	3,42
Appauvrissement en ressources fossiles	6,00	3,59	4,77	3,25	2,88
Appauvrissement en métaux	0,87	0,79	0,78	0,73	0,40
Total appauvrissement en ressources	6,87	4,38	5,55	3,98	3,28
Total	25,18	17,37	20,88	15,97	14,04

Tableau C-6 : Comparaison des impacts mid-point avec et sans fin de vie de la parabole de référence avec le trajet classique et le trajet plus court.

Indicateurs	Sans fin de vie		Avec fin de vie	
	Reference	Court	Reference	Court
Changement climatique (kgCO _{2eq})	557.72	557.06	264.47	263.81
Occupation des terres agricoles (m ² /an)	11.84	11.83	7.83	7.83
Transformation des terres naturelles (m ²)	0.040	0.040	0.022	0.022
Occupation des terres urbaines (m ² /an)	6.03	6.01	3.20	3.19
Appauvrissement en ozone (kgCFC11 _{eq})	1.59×10^{-5}	1.58×10^{-5}	9.18×10^{-6}	9.07×10^{-6}
Appauvrissement en eau (m ³)	6.37	6.37	5.55	5.55
Appauvrissement en métaux (kgFe _{eq})	10.91	10.88	7.59	7.57

Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes

Appauvrissement en ressources fossiles (kgPétrole _{eq})	127.47	127.24	62.03	61.80
Acidification terrestre (kgSO _{2eq})	2.88	2.87	1.36	1.35
Ecotoxicité terrestre (kg1,4-DCB _{eq})	0.030	0.030	0.019	0.019
Eutrophisation marine (kgN _{eq})	0.67	0.67	0.33	0.33
Ecotoxicité marine (kg1,4-DCB _{eq})	7.01	7.01	205.65	205.65
Eutrophisation en eaux douces (kgP _{eq})	0.13	0.13	0.069	0.069
Ecotoxicité en eaux douces (kg1,4-DCB _{eq})	7.36	7.35	238.89	238.88
Formation d'oxydant photochimique (kgNMVOC _{eq})	2.00	1.99	0.97	0.96
Radiation ionisante (kg6U235 _{eq})	15.09	15.05	12.88	12.83
Formation de particules (kgPM _{10eq})	1.29	1.29	0.61	0.61
Toxicité humaine (kg1,4-DCB _{eq})	156.71	156.61	80.49	80.39

Tableau C-7 : Comparaison des impacts end-point avec et sans fin de vie de la parabole de référence avec le trajet classique et le trajet plus court.

Indicateurs	Sans fin de vie		Avec fin de vie	
	Reference	Court	Reference	Reference
Occupation des terres agricoles	0,44	0,44	0,29	0,29
Changement climatique	9,77	9,76	4,63	4,62
Ecotoxicité en eaux douces	9,37×10 ⁻³	9,37×10 ⁻³	4,77×10 ⁻³	4,77×10 ⁻³
Eutrophisation en eaux douces	0,014	0,013	6,96×10 ⁻³	6,95×10 ⁻³
Ecotoxicité marine	1,91×10 ⁻³	1,91×10 ⁻³	9,75×10 ⁻⁴	9,74×10 ⁻⁴
Transformation des terres naturelles	0,15	0,15	0,085	0,084
Acidification terrestre	0,037	0,037	0,017	0,017
Ecotoxicité terrestre	7,63×10 ⁻³	7,58×10 ⁻³	5,22×10 ⁻³	5,17×10 ⁻³
Occupation des terres urbaines	0,28	0,28	0,15	0,15

Total qualité de l'écosystème	10,71	10,70	5,19	5,17
Changement climatique	15,46	15,44	7,33	7,31
Toxicité humaine	2,14	2,14	1,08	1,08
Radiation ionisante	$4,91 \times 10^{-3}$	$4,90 \times 10^{-3}$	$4,19 \times 10^{-3}$	$4,18 \times 10^{-3}$
Appauvrissement en ozone	$8,53 \times 10^{-4}$	$8,48 \times 10^{-4}$	$4,94 \times 10^{-4}$	$4,88 \times 10^{-4}$
Formation de particules	6,77	6,75	3,19	3,17
Formation d'oxydants photochimiques	0,30	0,30	0,13	0,13
Total santé humaine	24,68	24,64	11,74	11,70
Appauvrissement en ressources fossiles	15,29	15,26	7,44	7,41
Appauvrissement en métaux	1,42	1,41	0,82	0,82
Total appauvrissement en ressources	16,71	16,67	8,26	8,23
Total	52,10	52,01	25,19	25,11

c. Incertitudes

Tableau C-8 : Analyses d'incertitudes pour le procédé ayant la plus grosse contribution à l'impact sur le changement climatique pour chaque appareil étudié.

Appareil	Contribution à l'impact <i>cradle-to-grave</i> (%)	Process unitaire	Variance avec la matrice pedigree	Valeur moyenne	Intervalle de confiance 95,5% limite basse	Intervalle de confiance 95,5% limite haute	haut/bas 95.5%	Intervalle d'incertitude par contributeur (%)	Intervalle d'incertitude par appareil (%)
Induction	90	Market for electricity, low voltage [FR]	0,0053	1	0,99	1,01	1,02	2,12	1,91
	2,5	Market group for electricity, medium voltage [CN]	0,002	1	1,00	1,00	1,01	0,80	
	1,1	Capacitor, filme type, for through hole	0,052	1	0,90	1,11	1,23	20,84	

Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes

		mounting [GLO]							
	1	Inductor production, ring core choke type [GLO]	0,052	1	0,90	1,11	1,23	20,84	
Plaque électrique	91,6	Market for electricity, low voltage [FR]	0,0053	1	0,99	1,01	1,02	2,12	1,94
	5,1	Casting steel, lost wax RoW	0,019	1	0,96	1,04	1,08	7,60	
	7,73	Market group for electricity, medium voltage [CN]	0,002	1	1,00	1,00	1,01	0,80	
Brûleur à gaz*	11,1	Market for natural gas, higher pressure [FR]	0,0581	1	0,89	1,12	1,26	23,29	2,59
	11	Market group for electricity, medium voltage [CN]	0,002	1	1,00	1,00	1,01	0,80	
Parabole de référence	89,3	Aluminium production, primary, ingot [CN]	0,0013	1	1,00	1,00	1,01	0,52	0,46
Parabole en aluminium chinois et 35% recyclé	83,8	Aluminium production, primary, ingot [CN]	0,0013	1	1,00	1,00	1,01	0,52	0,44
Parabole en aluminium canadien	78,2	Aluminium production, primary, ingot [CA]	0,0012	1	1,00	1,00	1,00	0,48	0,38
Parabole en aluminium canadien et 35% recyclé	68,7	Aluminium production, primary, ingot [CA]	0,0012	1	1,00	1,00	1,00	0,48	0,33

Résultats de l'analyse de sensibilité et incertitudes

Parabole en aluminium recyclé	24,5	Anodising, aluminium sheet [RER]	0,0507	1	0,90	1,11	1,22	20,31	4,98
	23,9	Market group for electricity, medium voltage [CN]	0,002	1	1,00	1,00	1,01	0,80	
	23,3	Aluminium, secondary, from old scrap, at plant [RER]	0,0162	1	0,97	1,03	1,07	6,48	
Parabole en bois et aluminium chinois	87,1	Aluminium production, primary, ingot [CN]	0,0013	1	1,00	1,00	1,01	0,52	0,45
Parabole en bois, aluminium chinois et 35% recyclé	79,8	Aluminium production, primary, ingot [CN]	0,0013	1	1,00	1,00	1,01	0,52	0,41
Parabole en bois et aluminium canadien	71,9	Aluminium production, primary, ingot [CA]	0,0012	1	1,00	1,00	1,00	0,48	0,35
Parabole en bois, aluminium canadien et 35% recyclé	59,7	Aluminium production, primary, ingot [CA]	0,0012	1	1,00	1,00	1,00	0,48	0,29
Parabole en bois et aluminium recyclé	32,5	Anodising, aluminium sheet [RER]	0,0507	1	0,90	1,11	1,22	20,31	6,60
	19,2	Aluminium, secondary, from old scrap, at plant [RER]	0,0162	1	0,97	1,03	1,07	6,48	
	15,4	Market group for electricity, medium voltage [CN]	0,002	1	1,00	1,00	1,01	0,80	

* pour le brûleur, la plus grosse partie de l'impact sur le changement climatique vient de la combustion du gaz naturel (77%)

D. Un modèle simple pour déterminer les conditions des bénéfices des cuiseurs solaires

Nous avons considéré un scénario dans lequel un foyer occidental déjà équipé d'un appareil conventionnel (plaque à induction, plaque électrique ou brûleur à gaz) achète ou construit un cuiseur solaire neuf. Afin de compenser l'impact environnemental de la construction du cuiseur solaire le foyer devra utiliser le cuiseur qui ne produit pas d'impact durant son utilisation : au-delà d'un certain nombre de repas cuisiné au solaire sur une année, les économies d'énergies permettront de réduire l'impact global de la cuisine du foyer. Ici, l'attention sera portée sur l'impact sur le réchauffement climatique *mid-point*, mais le même modèle peut être utilisé pour d'autres indicateurs *mid-point* ou *end-point*.

Pour les appareils conventionnels, nous considérons l'impact sur le changement climatique *cradle-to-use*, noté $CC_{standard}$ qui est la somme de la phase de construction $C_{standard}$ et de la phase d'utilisation $U_{standard}$:

$$CC_{standard} = C_{standard} + U_{standard} \quad \text{Eq D-1}$$

Les mêmes grandeurs sont utilisées pour le cuiseur solaire : $CC_{solaire}$, $C_{solaire}$ et $U_{solaire}$. Ici, $C_{solaire}$ représente l'impact *mid-point cradle-to-grave*. Dans le cas de la cuisine solaire $U_{solaire} = 0$ donc :

$$CC_{solaire} = C_{solaire} \quad \text{Eq D-2}$$

Nous avons noté x le pourcentage de repas cuisinés au solaire. Lorsque les deux appareils (solaire et conventionnel) sont utilisés, l'impact total sur le réchauffement climatique CC_{total} est donné par :

$$CC_{total} = C_{solaire} + C_{standard} + (1 - x) U_{standard} \quad \text{Eq D-3}$$

L'achat d'un cuiseur solaire est avantageux si :

$$CC_{total} < CC_{standard} \quad \text{Eq D-4}$$

En remplaçant $CC_{standard}$ par Eq D-1 et CC_{total} par Eq D-3 nous avons :

$$x > \frac{C_{solaire}}{U_{standard}} \quad \text{Eq D-5}$$

E. Considérations économiques

Ici seront présentées les considérations économiques des scénarios où la durée de vie de la parabole est 10 ans et 20 ans.

Une parabole complète (structure et réflecteurs) vaut 400 euros [182]. Lorsque la durée de vie de la structure est de 10 ans, et vu que la durée de vie des réflecteurs est de 10 ans, sur les 40 ans cela revient à quatre paraboles complètes soit 1600 €. Dans le cas de la durée de vie de 20 ans, le total revient à deux paraboles complètes et 2 jeux de réflecteurs à 139 € [186]. Donc, dans ce cas, le prix total est de 1078 €.

Tableau E-1 : Considérations économiques pour comparer les appareils conventionnels et les cuiseurs solaires avec les variations des durées de vie du cuiseur solaire de référence (10, 20 et 40 ans) pour une consommation de 165 kWh/an.

	Investissement à l'achat total (€)	Coût d'utilisation (€/kWh)	Coût annuel (€/an)
Plaque à induction	300	0,193	50,6
Plaque électrique	120	0,193	53,5
Brûleur à gaz	120	0,077	27,7
Cuiseur solaire de référence (40 ans)	817		20,4
Cuiseur solaire de référence (20 ans)	1078		27
Cuiseur solaire de référence (10 ans)	1600		40
Cuiseur solaire en bois et aluminium chinois	667		16,7

F. Influence du temps de réduction

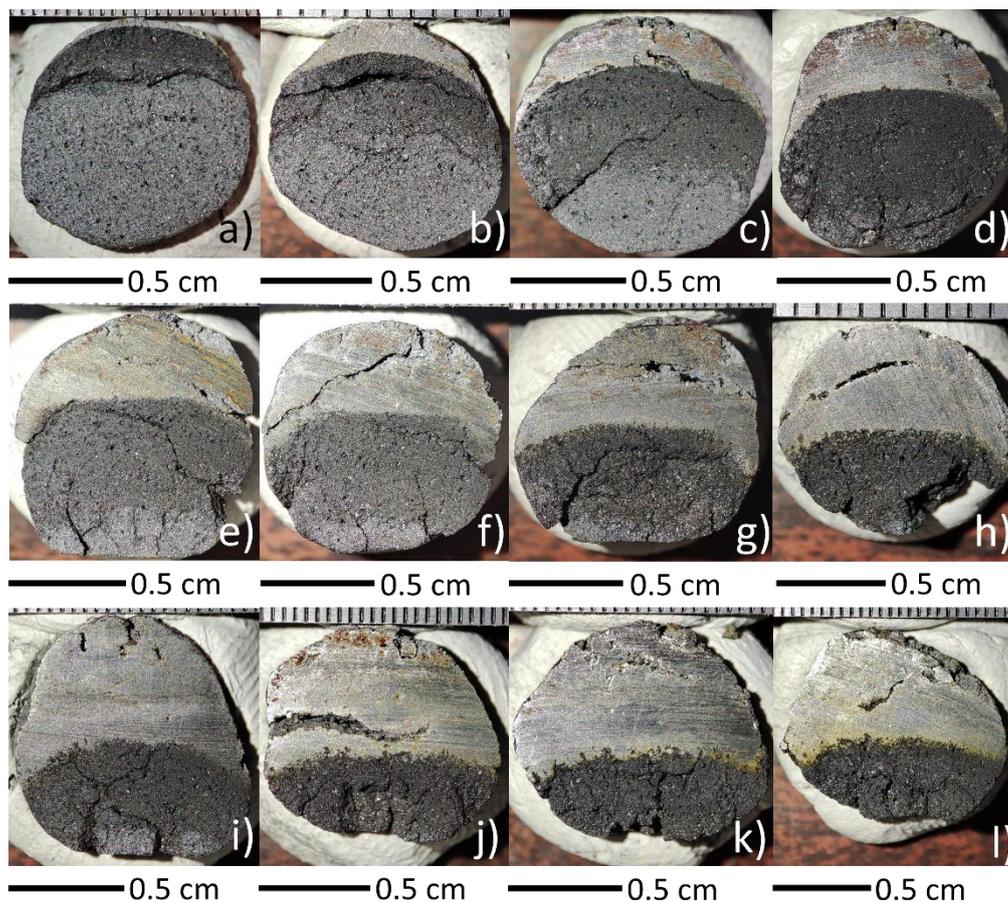


Figure F-1 : Première série de réduction de pellet de minerai de fer sous flux lumineux concentré de 318 W_l et 2 bars d'hydrogène et pour différents temps de réduction : a) 0,5 min, b) 1 min, c) 2 min, d) 3 min, e) 4 min, f) 5 min, g) 6 min, h) 7 min, i) 8 min, j) 10 min, k) 13 min et l) 16 min.

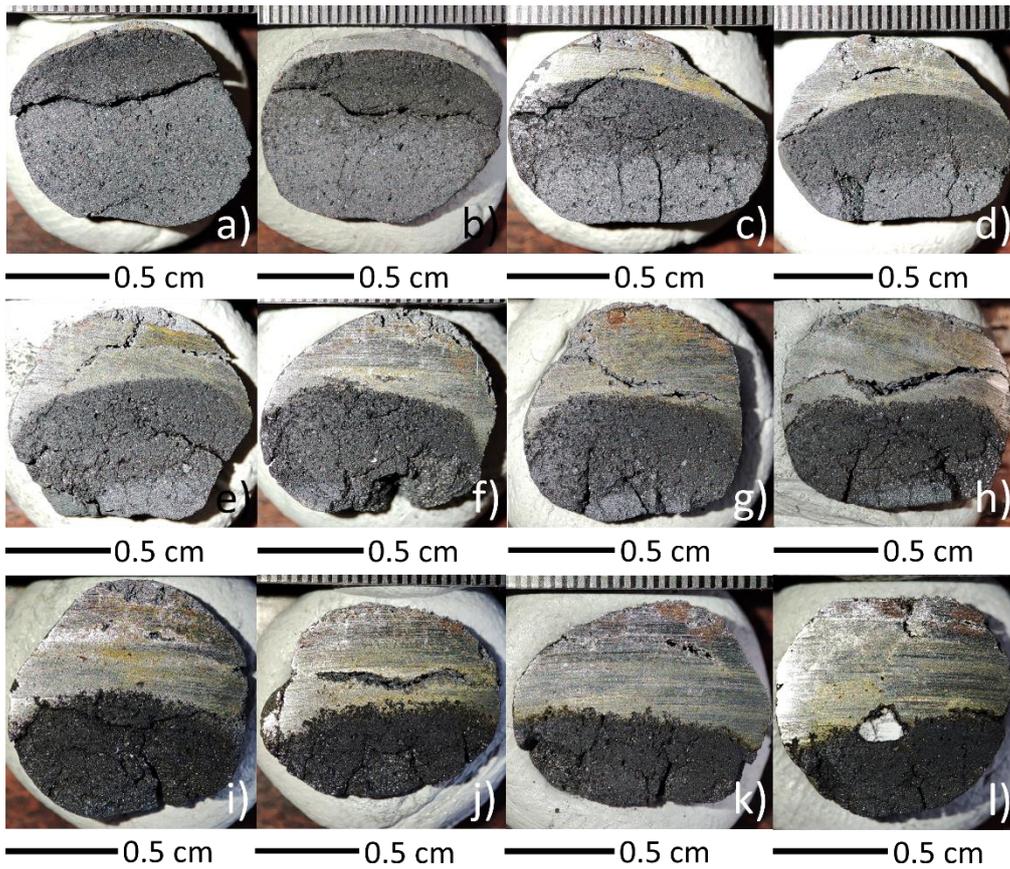


Figure F-2 : Seconde série de réduction de pellet de minerai de fer sous flux lumineux concentré de 318 W₁ et 2 bars d'hydrogène et pour différents temps de réduction : a) 0,5 min, b) 1 min, c) 2 min, d) 3 min, e) 4 min, f) 5 min, g) 6 min, h) 7 min, i) 8 min, j) 10 min, k) 13 min et l) 16 min.

G. Influence de la puissance de la lampe

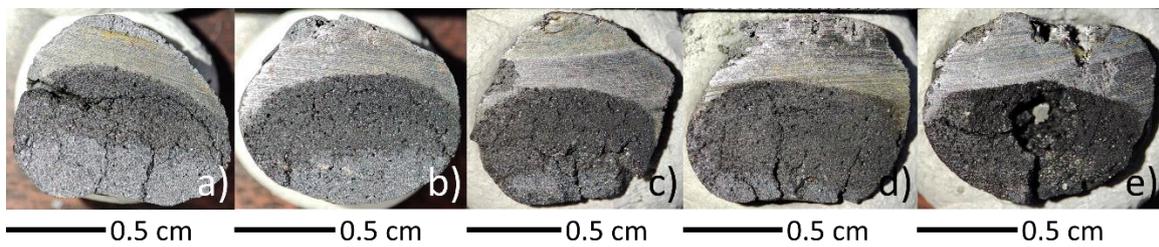


Figure G-1 : Première série de réduction de pellet de minerai de fer sous 2 bars d'hydrogène pendant 4 min et sous différentes puissances de flux lumineux : a) 260, b) 298, c) 318, d) 334 et e) 372.

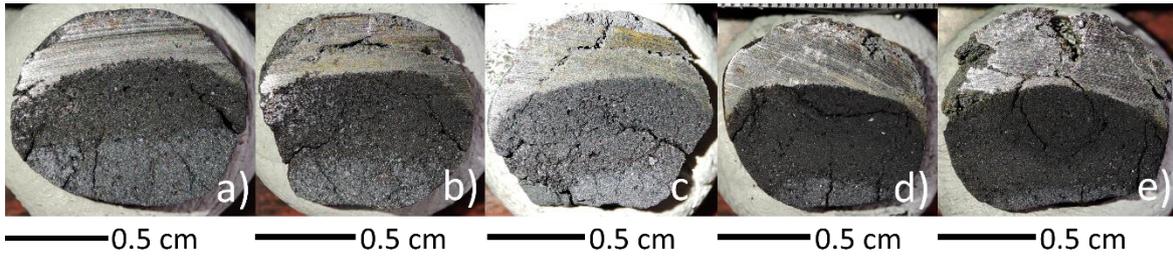


Figure G-2 : Deuxième série de réduction de pellet de minerai de fer sous 2 bars d'hydrogène pendant 4 min et sous différentes puissances de flux lumineux : a) 260, b) 298, c) 318, d) 334 et e) 372.

H. Diffraction des réductions

a. Pellets

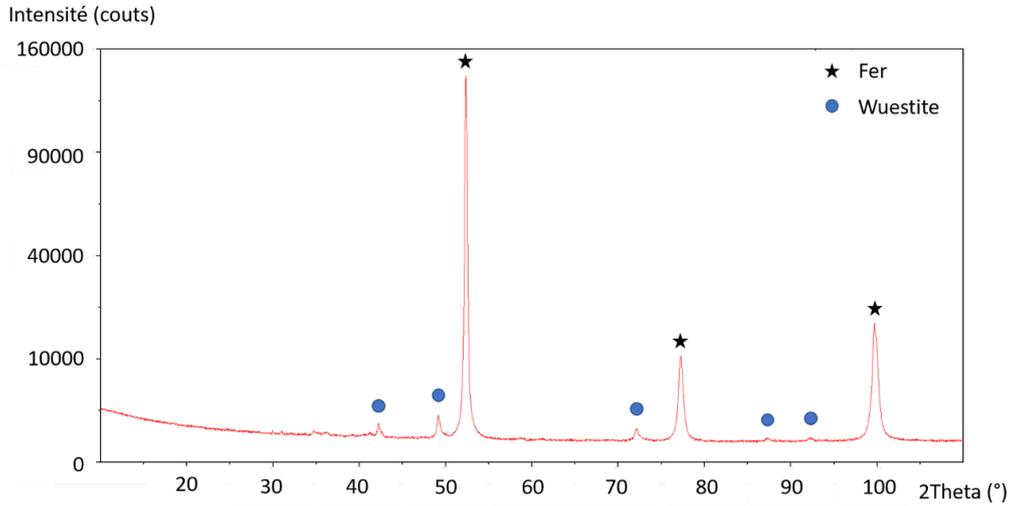


Figure H-1 : Diffraction mesurée de l'échantillon P3 après une réduction de 16 min avec retournement, sous 2 bars d'hydrogène et 372 W_f.

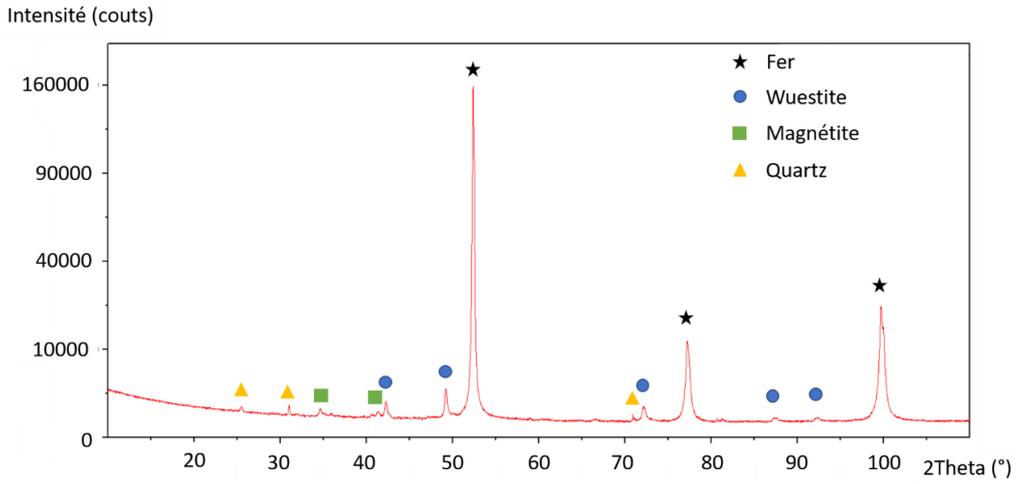


Figure H-2 : Diffraction mesurée de l'échantillon P5 après une réduction de 12 min avec 3 retournements, sous 2,4 bars d'hydrogène et 372 W₁.

b. Gravieres

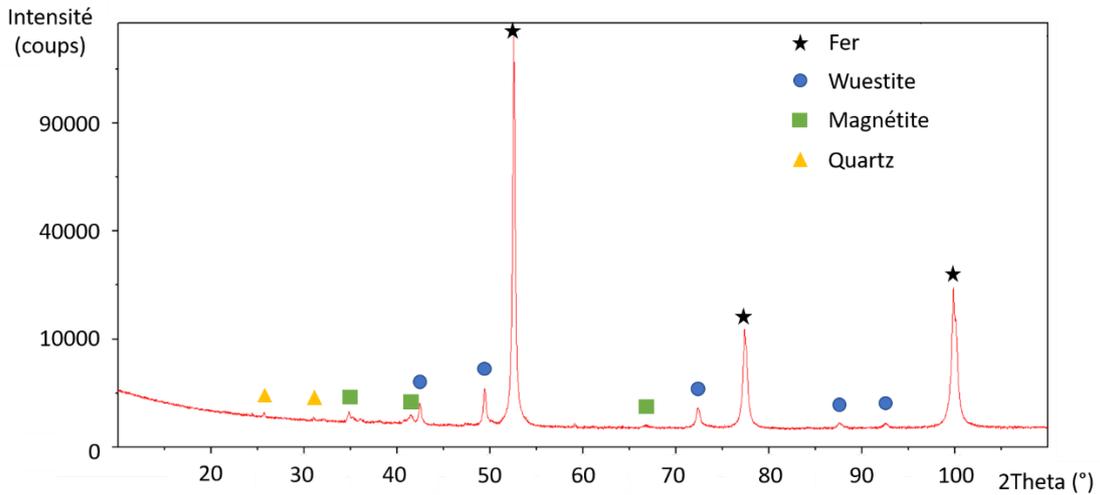


Figure H-3 : Diffraction mesurée de l'échantillon G2 réduit sous hydrogène (0 bar relatif) pendant 3 min sous 372 W₁ sans retournement.

Diffraction des rayons X

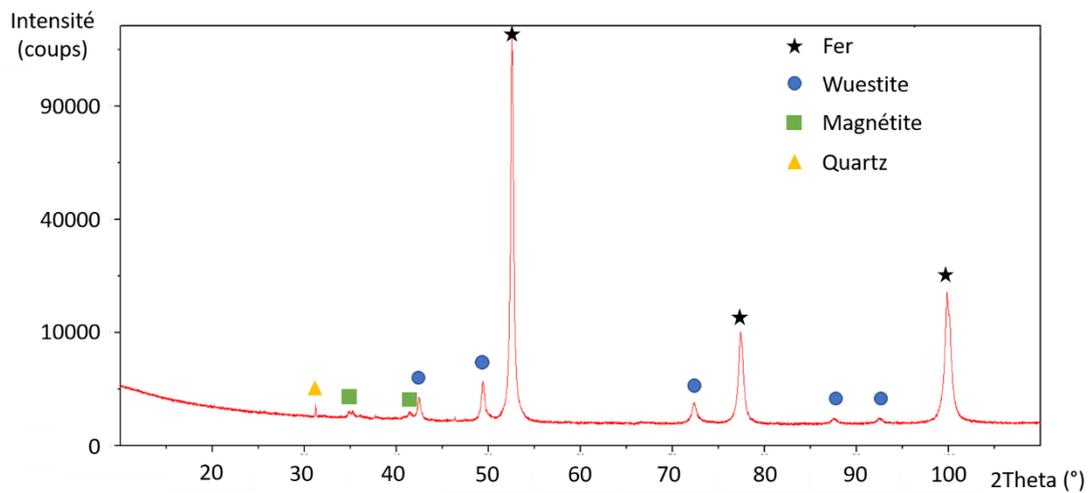


Figure H-4 : Diffraction des rayons X mesurée de l'échantillon G3 réduit sous hydrogène (0 bar relatif) pendant 3 min sous 372 W_1 sans retournement.

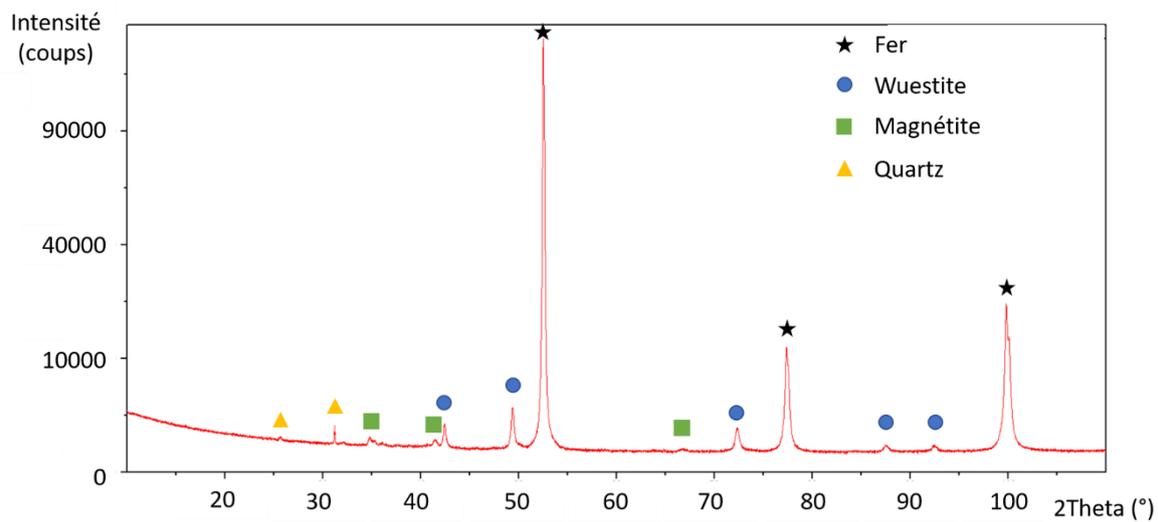


Figure H-5 : Diffraction des rayons X mesurée de l'échantillon G6 réduit sous hydrogène (0 bar relatif) pendant 8 min sous 372 W_1 avec retournement.

c. Disques

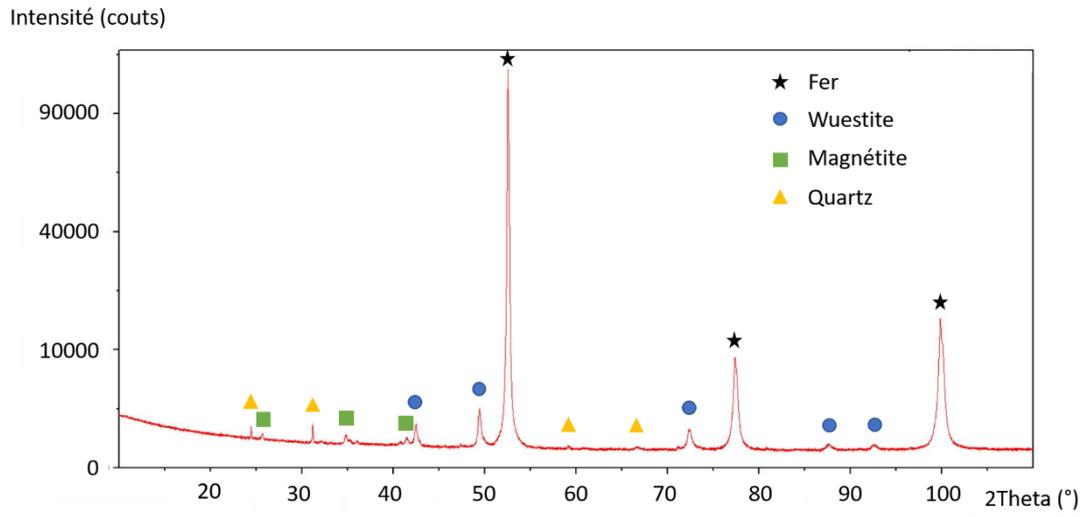


Figure H-6 : Diffraction des rayons X mesurée de l'échantillon D3 après une réduction de 2 min sous 2 bars d'hydrogène.