

Logiques énergétiques complémentaires : apports critiques à une approche par Analyse Cycle de Vie des systèmes techniques de cuisson boulangers.

Robin Lenormand¹, Guillaume Guimbretière², Sacha Hodencq¹, Frédéric Wurtz¹

¹Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

²Laboratoire TREE - UMR 6031, CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France

RESUME - Le besoin de soutenabilité de nos systèmes énergétiques nous impose de penser de nouveaux cadres de travail et d'améliorer les méthodes d'évaluation des vecteurs énergétiques. En prenant le cas des fours à pain en boulangerie, cet article vise d'une part à comparer les dommages liés au type de four par une analyse de cycle de vie ; et d'autre part, il vient porter un regard critique sur cette méthode, en particulier en questionnant sa faculté à prendre en compte les usages associés au choix de l'outil.

Mots-clés— Soutenabilité énergétique, Fours à pain, Analyse de cycle de vie (ACV), Méthode multicritère

1. INTRODUCTION

Ces dernières années marquent un tournant dans le dépassement des frontières planétaires, dont l'effondrement de la biodiversité et du vivant [1], mais aussi dans l'augmentation significative des inégalités sociales [2]. Des études montrent alors des articulations entre le mix énergétique et les limites géophysiques [3]. Récemment, en France, la crise énergétique de l'hiver 2022-2023 illustre les besoins d'une Transition énergétique intégrant *flexibilité* et *sobriété* énergétiques. De plus, la stratégie de transition énergétique vers le « *tout électrique* » est questionnée, si l'on considère la matérialité des systèmes techniques et les ressources minérales limitées à l'échelle planétaire [4]. Des logiques énergétiques complémentaires doivent donc être étudiées.

Pour être pertinentes, ces logiques complémentaires doivent être travaillées dans un cadre global, support d'une vision systémique. Ainsi, de nouveaux cadres de recherche - comme « *Design for Sustainability Transitions (DfST)* » [5] ou la « *Science de la durabilité* » [6], par exemple, permettent de penser les transitions simultanément énergétiques, écologiques, matérielles, minérales, et accompagnées d'une conscience de justice énergétique et sociale. Le paradoxe de ces approches systémiques est que tout en ancrant la problématique énergétique dans la complexité de la réalité, elles rendent difficiles les prises de décisions pour l'action. Il en résulte un besoin de jeux d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs [7] permettant d'estimer la durabilité d'un système technique dans un cadre analytique systémique.

L'étude présentée ici est la première brique d'un travail de thèse qui cherche à définir et construire une méthode de comparaison multi-critères afin d'évaluer la pertinence en termes de durabilité de systèmes techniques mobilisant différents vecteurs

énergétiques (bois-énergie, électricité, solaire direct, etc.) selon les usages.

Le cas du système technique de cuisson boulanger :

La filière de la boulangerie est un exemple symbolique de la vulnérabilité énergétique face à l'inflation du coût de l'énergie - en particulier de l'électricité - durant la période 2022-2023. De nombreux témoignages abondent dans le sens de la précarité de ce secteur [8], et la production de chaleur représente 65% de la dépense énergétique totale d'une boulangerie [9]. Dans ce contexte, le système technique de cuisson boulanger est un intéressant cas d'étude de comparaison de logiques d'exploitation de sources d'énergie complémentaires en passant ou non par le vecteur énergétique électrique.

En effet, comme l'illustre la figure 1, en s'inspirant du cadre DfST et des travaux menés par Adrien Prévost [10], bien que

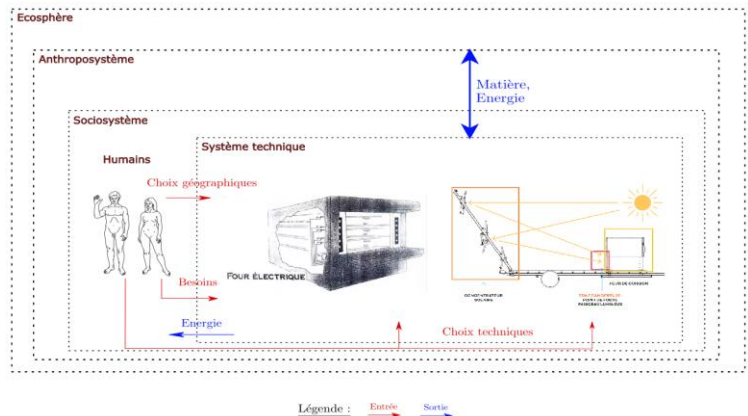


Figure 1 : Intégration du système technique de cuisson boulanger dans le sociosystème, l'anthroposystème et la biosphère.

non-visible pour le consommateur, le four à pain est pourtant bien en interaction avec le sociosystème, l'anthroposystème et la biosphère.

Afin de comparer la durabilité des systèmes de cuisson boulangers, dans cet article, nous présentons et discutons les résultats d'une analyse quantitative fine de la durabilité d'un four électrique, un four à bois et un four solaire : l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

2. LES FOURS A PAINS BOULANGERS

Historiquement, les fours à pains sont des fours à bois à inertie. De nos jours, en France, la technique de cuisson validée

par le Certificat d'Aptitude Professionnel est électrique. Cependant, la cuisson au bois continue de perdurer et depuis peu, la cuisson solaire à concentration directe est également utilisée [11], [12].

Choix des fours :

Les fours retenus pour l'ACV comparative sont (i) le four solaire boulanger à concentration directe Lytefire 5 [13] (représenté figure 2) - en version L11, ce modèle de four est celui utilisé par Neoloco, le premier boulanger solaire d'Europe [11] - (ii) le four à bois 100 à chambre de cuisson séparée et à faible inertie, de l'Atelier Paysan [14] (représenté figure 3), et (iii) le four électrique *MODULOSOL* MM4 126-86 de l'entreprise MAP [15] (représenté figure 4).

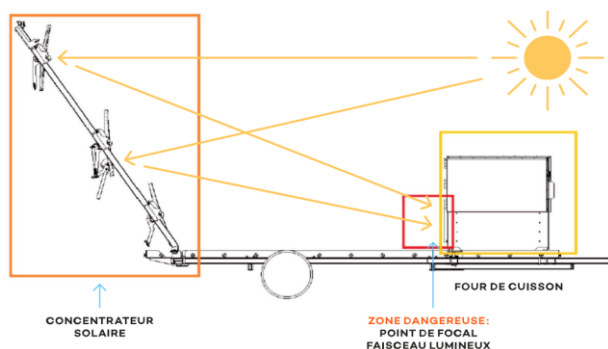


Figure 2 : Illustration du four solaire Lytefire 5 (brochure)

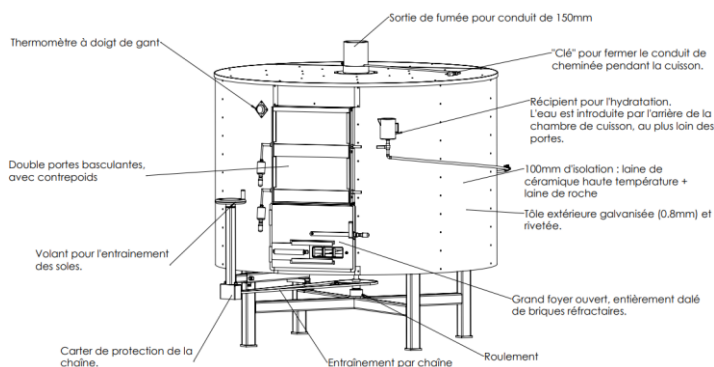


Figure 3 : Plan illustré du Four à bois 100 de l'Atelier Paysan (brochure)

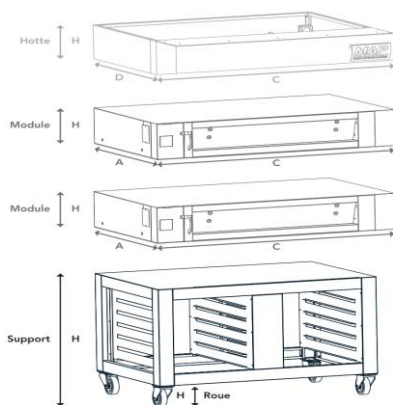


Figure 4 : Plan illustré du four électrique MODULOSOL (brochure)

Le Tableau 1 résume les caractéristiques des fours étudiés.

Nom/Référence	Four MAP MM4 126-86	Four 100, Atelier Paysan	Four Lytefire 5, Lytefire
Vecteur énergétique	Electricité	Bois-énergie	Solaire
Masse (kg)	225	510	550
Surface totale des soles (m ²)	1,92	1,57	1,04
Capacité pain (kg)	35	20	20
Nombre de fournées par jour pour 60 kg de pain	1,7	3	3
Puissance (kW)	7	-	3,5

Tableau 1 : Comparaison des 3 fours

Fonctionnements des fours et discussion sur la commensurabilité de la notion de « four » :

En regardant le fonctionnement de chaque « four » étudié avec une attention particulière pour la place et la nature du système technique de production d'énergie lié au four, on remarque des différences importantes : décomposons le système technique de chaque four en partant de la chambre de cuisson. C'est la partie nécessairement commune à chaque four (l'enceinte isolée thermiquement dans laquelle sont cuits les pains). Cette chambre de cuisson est chauffée par un système technique transformant une énergie primaire en chaleur :

- Dans le cas du four solaire à concentration directe Lytefire 5, les rayons du soleil sont captés par une surface miroir qui réfléchit la lumière vers une chambre de conversion lumière / chaleur par absorption / émission. La chambre de conversion est ouverte sur la chambre de cuisson chauffée par convection. Le système ne possède aucun composant électrique. On peut séparer physiquement convertisseur et chambre de cuisson.
- Le four à bois 100 est composé d'un foyer séparé de la chambre de cuisson, l'ensemble étant dans une enceinte isolée thermiquement. Le foyer est positionné à la base de l'enceinte et les gaz chauds issus de la combustion du bois sont évacués en longeant l'extérieur de la paroi de la chambre de cuisson. La chaleur est transmise par conduction. Le système ne possède aucun composant électrique. Le convertisseur d'énergie est hybridé avec la chambre de cuisson. L'ensemble étant connecté à un réseau externe d'approvisionnement en bois.
- Les chambres de cuisson des modules du four électrique sont équipées de résistances électriques chauffantes. L'ensemble est connecté à un réseau de production/distribution d'électricité.

Ces différences notables vont avoir des incidences sur la formulation des hypothèses de base de l'Analyse Cycle de Vie.

3. ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES FOURS BOULANGERS

3.1. Méthodologie

Objectif et champ d'étude :

L'objectif est de **comparer les impacts socio-environnementaux du vecteur énergétique utilisé par le four boulanger pour la cuisson du pain**. Dans notre problématique, « les impacts » sont tout autant des modifications environnementales (pollutions, extractivisme, etc.) que des modifications organisationnelles à plusieurs niveaux de la

pratique et de la place du métier de boulanger. Ainsi, dès le commencement de cette étude, nous sommes conscients des difficultés à représenter la réalité des situations hybrides où les systèmes énergétiques boulangers combinent pratiques et organisations classiques avec des approches moins conventionnelles, et des outils connectés aux macro-infrastructures et réseaux énergétiques avec des outils déconnectés. C'est pourquoi, nous avons pris le parti d'effectuer en premier lieu une ACV comparative des pôles extrêmes que sont une boulangerie fournil/boutique classique équipé d'un four électrique connecté au macro-réseau électrique, et un boulanger sans boutique cuisant au bois ou au solaire.

Dépendance de la définition de l'Unité Fonctionnelle aux pratiques liées au type de four :

Pour apporter des éléments de réponse à l'objectif défini ci-dessus, nous définissons 2 Unités Fonctionnelles (UF) : une nommée « classique » et une nommée « sobriété ».

L'UF « classique » est relative à la pratique classique d'un artisan boulanger travaillant 5 jours par semaine avec un fournil et une boutique : *Cuire 60 kg de pain par jour, 5 jours par semaine pendant 40 ans*. Cette UF ne permet pas de prendre en compte la modification des pratiques boulangères induites à la fois par le modèle de four et la vision de société associée. Si la norme ISO 14044:2006 [16] permet de poser un cadre universel, elle est toutefois contraignante. C'est pourquoi nous choisissons de nous extraire de la norme et définissons la deuxième UF « sobriété » intégrant ces deux contraintes socio-techniques : *Gagner correctement sa vie comme boulanger dans une démarche de sobriété en consommation de ressources et d'optimisation de la valeur nutritive des pains*.

Flux de référence, durée de vie et réparabilité :

Nous n'avons pas de données concernant la durée de vie et l'impact de la réparabilité des fours Lytefire 5 et bois 100 qui sont des modèles trop récents. Néanmoins, la démarche de sobriété appliquée à la durée de vie des fours boulangers permet de poser l'hypothèse d'une durée de vie de 100 ans pour les fours solaire et bois de l'Atelier Paysan qui sont pensés pour être réparables par les utilisateurs. Les fours à bois traditionnels ont une durée de vie de plusieurs siècles. Les fours électriques intégrant des éléments électroniques plus fragiles et non pensés pour une réparabilité par les usagers ont une durée de vie fixées à quelques dizaines d'années.

Ainsi, le flux de référence est de 1 pour les fours Lytefire et bois 100 pour les deux UF. Le flux de référence est de 2 pour le four électrique dans le cas de l'UF « classique » et 1 dans le cas de l'UF « sobriété » où des efforts sont entrepris pour renforcer la réparabilité du four électrique (mise à disposition des plans, réemploi, pièces d'occasion, etc.). De haute technicité, les panneaux photovoltaïques ne peuvent pas être réparables par les usagers et le flux de référence est de 2 pour les deux UF.

Construction des ACV comparatives ciblées :

Il n'est pas possible de strictement comparer les 3 modèles de « fours » dans leurs phases de *production*, *usage* et *fin de vie*. En effet, les modèles sont bien trop différents en ce qui concerne l'hybridation plus ou moins poussée avec le convertisseur d'énergie primaire. Il est néanmoins possible de cibler des moments du cycle de vie où l'analyse comparative reste pertinente.

Concernant la phase de production, l'impact de celle-ci est déconnecté de la pratique artisanale et donc peut être calculé

indépendamment de l'UF étudiée. Nous calculons donc une première ACV comparative de l'impact de la production du four à bois 100 (chambre de cuisson et convertisseur énergétique combinés), de la chambre de cuisson du four Lytefire, de sa partie miroir collectrice de lumière solaire, du four électrique MODULOSOL, et d'un convertisseur photovoltaïque dimensionné pour faire fonctionner le four électrique en direct. Nous excluons l'impact de l'assemblage (outils et main d'œuvre) et du démantèlement (voir tableau 2).

La phase d'usage a surtout du sens pour les systèmes techniques connectés aux macro-infrastructures énergétiques. Ce n'est pas le cas de la cuisson solaire. Nous considérons deux configurations solaires : le four Lytefire et le four électrique MODULOSOL connecté à un convertisseur photovoltaïque en réseau local et sans système de stockage. Ces deux configurations solaires ont un impact nul à l'usage : en effet, elles fonctionnent sur la base d'un processus physique de conversion d'une énergie de flux naturel sans aucune consommation ni émission de matière durant la phase d'usage. Les systèmes énergétiques mobilisant le vecteur énergétique solaire sont donc comparables en regardant uniquement la phase de production pondérée par les flux de référence qui sont fixés à 1 pour le Lytefire et 2 pour les panneaux photovoltaïques et le four électrique dans le cas de l'UF « classique ».

La cuisson au bois permet un fonctionnement connecté au réseau de collecte/distribution du bois-énergie ou bien un fonctionnement de collecte local en autonomie. Le premier fonctionnement a un impact dû à l'approvisionnement en bois, alors que le second est considéré comme nul. Les deux fonctionnements ont un impact identique dû à la combustion du bois.

Enfin, la cuisson électrique alimentée par un réseau de macro-infrastructures va avoir un impact à l'usage dépendant de la nature du mix énergétique. L'étude de ces différences correspond à la troisième ACV comparative calculée.

HYPOTHESES ET APPROXIMATIONS			
PHASES	FOUR ELECTRIQUE	FOUR BOIS	FOUR SOLAIRE
Fabrication	On néglige l'installation du four et le raccordement au réseau ou au PV. L'ensemble des composants est fabriqué en Chine.	On néglige les travaux relatifs à l'installation du four, comme la cheminée. Les briques réfractaires sont fabriquées en France ; le reste des éléments en Chine.	L'ensemble des éléments est fabriqué en Chine.
Transport	Nous comptons pour les composants des 3 fours le transport suivant : 1 200 km en camion en Chine, jusqu'au port ; 18 520 km en bateau entre la Chine et Marseille ; 300 km en camion entre Marseille et Grenoble.		
Assemblage final	Nous choisissons de négliger la phase d'assemblage final des fours pour deux raisons : (i) la consommation énergétique liée est l'assemblage de chaque four n'a pas été relevée ; (ii) si la consommation se situe entre 10 et 50 MJ, les dommages causés représentent moins d'0,1% de la production totale.		
Usage	On considère 4 scénarios de consommation du four : (i) le mix électrique français, (ii) l'autoproduction par le photovoltaïque, (iii) le mix électrique espagnol, (iv) le mix électrique polonais.	- Bois nécessaire pour 20 kg de pain : 5 kg. - Pouvoir calorifique du bois (feuillu) : 3,7 kWh/kg Nous considérons 2 scénarios d'approvisionnement du bois : (i) collecte/distribution du bois-énergie, (ii) un fonctionnement local et autonome. On considère l'impact du second nul.	On suppose nulle la consommation énergétique du four solaire en phase d'utilisation. On néglige également l'emprise au sol.
Fin de vie	Dans cette version simplifiée, nous faisons l'hypothèse d'un scénario fin de vie 100% déchet, avec un trajet en camion léger de 20 km.		

Tableau 2 : Hypothèses et approximations sur les différentes phases du cycle de vie des fours.

Le tableau 2 résume les hypothèses et approximations faites pour le calcul de l'ACV.

Logiciel ACV, base de données et méthode de caractérisation :

Les Analyses Cycle de Vie réalisées pour cette étude sont de type **attributionnel**, c'est à dire en isolant le produit du reste de la technosphère.

La base de données utilisée est *Ecoinvent*. Celle-ci est l'une des plus complètes. Le logiciel propriétaire sélectionné pour la simulation est *SimaPro* [17].

Le calcul des impacts environnementaux des différentes phases du cycle de vie des fours sont calculés suivant la méthode multicritère « *IMPACT 2002+ V2.14* » : A partir de l'inventaire des flux entrants, le logiciel *Simapro* applique à chaque flux un coefficient (facteur de caractérisation) précisant la contribution de ce flux au phénomène environnemental considéré. En sorties, 15 indicateurs sont calculés : *carcinogens*, *non-carcinogens*, *respiratory inorganics*, *ionizing radiation*, *ozone layer depletion*, *respiratory organics*, *aquatic ecotoxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, *terrestrial acid/nutri*, *land occupation*, *aquatic acidification*, *aquatic eutrophication*, *global warming*, *non-renewable energy*, et *mineral extraction*. Ces indicateurs servent à la construction de 4 types de « dommages » : *human health*, *ecosystem quality*, *climate change*, et *ressources*.

Le logiciel *SimaPro* avec la base de données utilisée ne permet pas de calculer l'impact de la combustion de bois 100. Les émissions sont estimées en prenant 3,7 kWh/kg de pouvoir calorifique et 30 gCO₂e/kWh [18].

Inventaire du Cycle de Vie (ICV) :

Le tableau 3 résume l'inventaire des composants du four solaire Lytefire5, du four à bois 100, du four électrique MM4 126-86 – 2 modules et des panneaux photovoltaïques. Les inventaires sont réalisés sur la base des brochures techniques des fours.

Modèle	Eléments	Masse (kg)
Chambre cuisson Lytefire	Acier inoxydable	142,35
	Verre	2,166
	Isolant (laine de roche)	13,8
Convertisseur lumière/chaaleur Lytefire	Tubes aluminium	35,454
	Cornières acier	40,067
	Fer	30,586
	Acier	250
	Miroirs en verre	36
Four bois 100	Structure acier	271
	Isolant (laine de roche)	20
	Briques réfractaires	219
Four électrique	Support + 2 modules inox	180
	Isolant (laine de roche)	40,6
	Résistances blindées inox	3
	Electronique de commande	1,442
Panneaux PV (7kWc /44 m ²)	Multi-SI wafer	484

Tableau 3 : Inventaire des éléments composants les fours

3.2. Résultats des Analyse de Cycle de Vie

Ci-dessous sont présentés (i) l'ACV comparative de la phase de « production » des fours ; (ii) l'ACV comparative d'usage pour deux scénarios d'approvisionnement en bois pour le four bois 100 ; (iii) quatre scénarios de mix énergétiques pour l'usage du four électrique. Cette étude préliminaire a pour ambition d'identifier le potentiel et les limites de l'ACV pour aider à une transition de la filière boulangère vers la durabilité : dans ce contexte, nous nous en tenons à une analyse des 4 types de dommages construits sur la base des 15 indicateurs. Une analyse plus fine fera l'objet de futurs travaux.

La phase de production des « fours » :

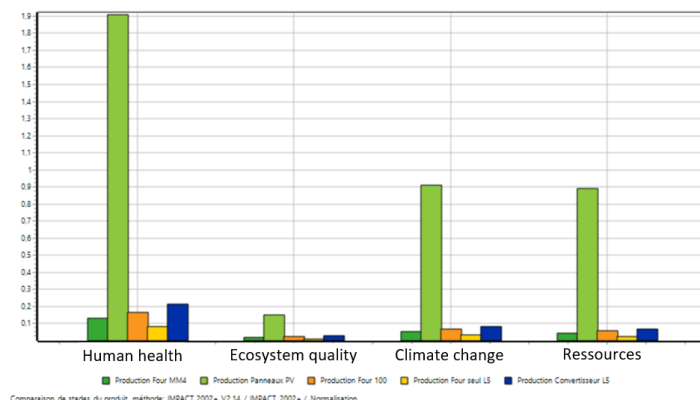


Figure 5 : Impacts de la phase de production (légende dans le texte)

La figure 5 montre les 4 dommages normalisés pour la phase de production des éléments du système technique déconnecté des macro-infrastructures de production/distribution d'énergie : four électrique (vert foncé), panneaux photovoltaïques (vert clair), four à bois (orange), chambre cuisson du Lytefire (jaune) et convertisseur lumière/chaaleur (bleu) – voir partie Méthodologie 3.1. En première lecture de cette figure, deux observations sont immédiates : (i) les impacts relatifs entre éléments sont les mêmes pour les 4 dommages, (ii) l'impact de la production des panneaux photovoltaïques est très important par rapport à l'impact des autres éléments. En rentrant plus dans le détail, on observe (i) que la production des convertisseurs énergétiques est plus impactante que la production des chambres de cuisson ; (ii) que la production du four à bois 100 (qui comprend convertisseur et chambre de cuisson combinés) est moins impactante que la production des convertisseurs des configurations solaires, (iii) que la production de la chambre de cuisson du Lytefire est moins impactante que la production du four électrique.

Deux scénarios pour la cuisson au bois :

La consommation en bois du four 100 est de 5kg de bois sec pour la cuisson de 20kg de pain avec un four démarrage à froid (témoignage privé). La densité du bois est de 700 kg/m³ et la distance à la source de 100 km.

Les émissions d'une fournée sont alors de 0.645 kgCO₂e (voir partie méthodologie). La collecte et le transport correspondent respectivement à 0.721 et 0.253 kgCO₂e. Les dommages totaux normalisés de l'approvisionnement en bois sont de $\approx 2.3E^{-4}$ pour Human health et Ecosystem quality, et de $\approx 9.7E^{-5}$ pour Climate change et Ressources. Globalement, l'impact est majoritairement dû à la collecte plutôt qu'à la distribution sur 100 km (11 fois plus pour Human health – 27 fois plus pour Ecosystem quality – 3 fois plus pour Climate change et Ressources).

Dans le cadre de l'UF « classique » le four bois 100 doit faire 3 fournées/jour, 5 jours/semaine et ses émissions totales dues à la combustion sur 40 ans sont $0.645 \times 3 \times 5 \times 52 \times 40 = 20,1 \text{ tCO}_2\text{e}$. La production du four bois 100 émet 676 kgCO₂e.

Quatre scénarios pour la production d'électricité :

Dans cette partie, nous discutons 4 scénarios énergétiques pour la phase d'utilisation du four électrique :

- (1) Mix électrique « nucléaire » ;
- (2) Autoproduction électrique par le photovoltaïque ;
- (3) Mix électrique « renouvelable » ;
- (4) Mix électrique « fossile ».

Le mix électrique « nucléaire » (1) correspond au mix français (98% bas carbone, dont 36% de renouvelable [19]). Le mix autoproduction photovoltaïque (2) correspond à un pur suivi de production, sans contraintes de puissance minimale, et sans batterie. Le mix électrique « renouvelables » (3) correspond au mix espagnol (68% renouvelable [19], dont 20% de part photovoltaïque [20]). Le mix électrique « fossile » (4) correspond au mix polonais (37% bas carbone [19]).

La figure 6 montre les 4 dommages pour le cycle de vie complet du four électrique en fonction des 4 mix énergétiques proposés : « nucléaire » (1) en vert foncé, autoproduction PV (2) en vert clair, « renouvelables » (3) en orange et « fossile » (4) en jaune.

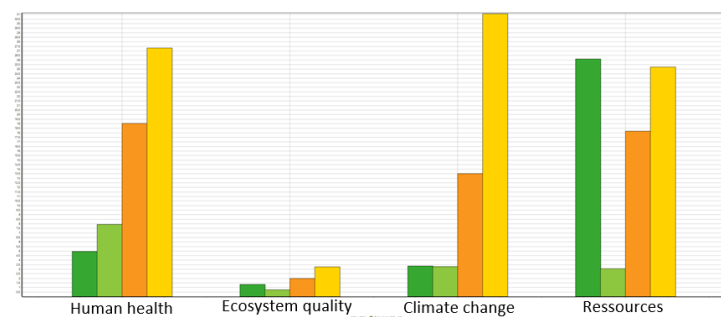


Figure 6 : Dommages des cycles de vie du four électrique (légende dans le texte)

En première lecture, on remarque immédiatement le très fort impact du mix « fossile » (mix4), le faible impact du PV autonome (mix2) par rapport aux autres mix énergétiques, et le faible impact du « nucléaire » (mix1) pour 3 dommages accompagné d'un plus fort impact sur les ressources. En entrant plus dans le détail, il est notable que le PV autonome est nettement moins impactant que le mix « renouvelable » (mix 3) : une interprétation possible de cette observation est que la différence s'explique par l'impact important que représente l'entretien de la macro-infrastructure énergétique du mix 3. Cette dernière dépasse alors largement les économies d'échelle. En synthèse, nos ACV comparatives ciblées montrent que les systèmes techniques de cuisson basés sur le vecteur énergétique électrique sont plus impactantes que le solaire à concentration ou le bois. Cette remarque est valable dans le cas de l'UF « sobriété ». L'effet est encore plus prononcé dans le cadre de l'UF « classique ».

Pour finir, nous pouvons comparer les émissions en tCO₂e du four à bois déconnecté au réseau d'approvisionnement, du four électrique alimenté en PV et du four Lytefire, dans le cadre de l'UF « classique ». Les trois configurations sont les moins émettrices pour chaque vecteur énergétique : la production des

panneaux PV et du four électrique émet respectivement 9000 kgCO₂e et 510 kgCO₂e avec un flux de référence à 2. Les émissions totales dues à la **cuisson électrique PV** dans le cadre de l'UF « classique » sont donc de $(9000 + 510) \times 2 = 19,0 \text{ tCO}_2\text{e}$ - les émissions totales dues à la **cuisson au bois** sont de **20,8 tCO₂e** - la production du Lytefire complet émet 1150 kgCO₂e et sans émission à l'usage, les émissions totales dues à la **cuisson solaire à concentration directe** sont de **1,15 tCO₂e**.

4. ANALYSE CRITIQUE DE L'ACV DES FOURS BOULANGERS

Dans cette partie, nous mettons l'accent sur 3 critiques majeures : le choix des fours, la gestion de la réparabilité et la méthode ACV elle-même.

Concernant la critique du choix des modèles de fours retenus pour l'ACV comparative, le four électrique MODULOSOL est conçu pour répondre à une demande de fournées tout au long de la journée avec notamment une production de baguettes. Le four solaire et le four à bois sont pensés pour un usage plus traditionnel d'une seule étape de cuisson par jour, voire par semaine en privilégiant les pains au levain. Ainsi, il est difficile de différencier l'influence du vecteur énergétique de l'organisation du travail liée à la cuisson et aux produits boulangers. En effet, en l'absence de soleil, les configurations solaires directes ne produisent pas. La gestion de cette contrainte par les boulangers solaires peut-être de panifier quand l'énergie est disponible, ou bien d'avoir en complément un deuxième four utilisant un vecteur énergétique « à la demande » [11]. Cette remarque montre la nécessité de considérer également les situations hybrides qui combinent plusieurs vecteurs énergétiques. Enfin, le modèle de four électrique est choisi sur un critère de capacité de production. Sur un critère de puissance, c'est le module (3-4kW) qui faudrait retenir.

Le critère de réparabilité est une contrainte forte orientant le développement des fours solaire Lytefire et bois 100. Sans procédure dédiée, les conséquences de la réparabilité sont difficiles à estimer, notamment pour le four électrique. Nous avons proposé de prendre en compte la réparabilité via la durée de vie, mais cela ne représente qu'une correction partielle et des améliorations sont à réfléchir. Notamment, nous avons considéré que les matières premières venaient de zones lointaines comme la Chine. Dans le cadre d'une démarche de sobriété, des scénarios d'approvisionnement plus local devraient être étudiés.

En ce qui concerne une critique de l'ACV en tant que méthode d'analyse, si l'on reprend le schéma développé par le cadre Design for Sustainability, l'ACV répond aux niveaux « matériaux/composants » et « produit ». Cependant, l'analyse attributionnelle ne pose pas la question des interactions entre le produit, le service, et le système socio-technico-écologique. Elle ne permet pas de prendre en compte des aspects liés aux spécificités du métier ou bien ayant une dimension politique comme la justice énergétique, l'adaptabilité organisationnelle, la relocalisation, la résilience collective, ou le type de gouvernance. Nous avons tenté d'introduire ces dimensions dans notre étude en définissant deux Unités Fonctionnelles (« Classique » et « Sobriété ») ; la piste est intéressante et mérite d'être approfondie.

Pour finir, de façon assez classique, notre étude pourrait également être améliorée par un inventaire plus précis des éléments composants les fours.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de ce travail nous souhaitons porter une double analyse critique : d'une part étudier le niveau d'impact de production et d'usage d'un four boulanger lié au vecteur énergétique ; et d'autre part, proposer un regard critique [21] sur la méthode d'Analyse de Cycle de Vie retenue pour notre étude.

L'ACV montre ainsi qu'utiliser l'électricité pour cuire le pain est l'option énergétique la plus impactante concernant la production des artefacts techniques. Cela est vrai, même en passant par l'utilisation de panneaux photovoltaïques en réseau local. Cependant, le PV local est le moins impactant des mix énergétiques producteurs d'électricité, et sur la durée, la cuisson au bois s'avère fortement émettrice à l'usage (en tCO₂e). En phase d'utilisation, le solaire à concentration directe est le vecteur énergétique le moins émetteur (en tCO₂e). La mise en œuvre de l'ACV montre aussi la difficulté de dissocier le vecteur énergétique des pratiques et organisations induites par le modèle de four boulanger. La force de l'ACV reste bien entendue dans sa méthode multicritère reconnue, normalisée, et robuste permettant de situer matériellement notre étude. De futurs travaux pourront alors explorer le potentiel d'ACV alternative à l'attribuionnelle, comme l'ACV conséquentielle ou l'ACV sociale, par exemple. L'ACV pourrait également être travaillée en la combinant avec la matrice de convivialité qui reprend les différentes phases du cycle de vie d'un produit en y intégrant les indicateurs de convivialité définis par Ivan Illich [22] : relation, accessibilité aux ressources, adaptabilité, bio-interaction, adéquation.

Pour renforcer la prise en compte des liens entre vecteur énergétique, outil de cuisson, pratiques boulangères et organisation de la filière, des enquêtes de terrain chez des boulangers aux profils classiques, alternatifs ou bien hybrides seront menées dans les années qui viennent. Le défi à venir est la mise en place d'une méthodologie d'analyse combinée de ces données de terrains quantitatives et qualitatives avec des méthodes d'analyses multicritères comme l'ACV.

6. REFERENCES

- [1] IPBES, « Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services », Zenodo, mai 2019. doi: 10.5281/zenodo.6417333.
- [2] Insee et Statistique publique, « Revenus et patrimoine des ménages », Edition 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/7941437?sommaire=7941491>
- [3] I. M. Algunaibet, C. Pozo, Á. Galán-Martín, M. A. J. Huijbregts, N. Mac Dowell, et G. Guillén-Gosálbez, « Powering sustainable development within planetary boundaries », *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, n° 6, p. 1890-1900, 2019, doi: 10.1039/C8EE03423K.
- [4] O. Vidal, « Ressources minérales, progrès technologique et croissance », *Temporalités*, n° 28, déc. 2018, doi: 10.4000/temporalites.5677.
- [5] F. Ceschin et İ. Gaziulusoy, *Design for Sustainability : A Multi-level Framework from Products to Socio-technical Systems*. Taylor & Francis, 2020. Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/121652>
- [6] O. Dangles et C. Fréour, *Science de la durabilité*, IRD, 2022.
- [7] D. Ekchajzer, L. Bornes, J. Combaz, C. Letondal, et R. Vingerhoeds, « Decision-making under environmental complexity: the need for moving from avoided impacts of ICT solutions to systems thinking approaches », in *ICT4S 2024 : International Conference on ICT for Sustainability*, Stockholm, Sweden, juin 2024. Consulté le: 21 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04637677>
- [8] « Crise énergétique : des centaines de boulangers manifestent à Paris pour demander davantage d'aides au gouvernement », 23 janvier 2023. Consulté le: 26 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/01/23/hausse-des-prix-de-l-energie-des-centaines-de-boulangers-manifestent-pour-demander-davantage-d-aides-au-gouvernement_6159011_3234.html
- [9] « Consommation d'énergie et économies en boulangerie - ENGIE Pro ». Consulté le: 18 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://pro.engie.fr/economies-d-energie/comment-faire-des-economies-d-energie/reduire-sa-consommation-par-equipements/les-essentiels-de-l-efficacite-energetique-en-boulangerie>
- [10] A. Prévost, « Pilotage d'une chaîne de conversion active et analyse du cycle de vie pour le petit éolien ».
- [11] A. Crétot, *La Boulangerie solaire. Un exemple pour un futur radieux.*, Terre vivante. in Champs d'action. 2023.
- [12] G. Guimbretière, B. Pillot, C. Révillion, C. Mathiak, et R. Authier, « Territorial solar baking potential: A socio-technical analysis for planning the sustainable energy transition of the bakery world ».
- [13] « Meet the Lytefire Users - Lytefire ». Consulté le: 18 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://lytefire.com/users>
- [14] « Catalogue outils - Atelier Paysan ». Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://latelierpaysan.org/catalogue_outils.php?prefiltre=Four%20%C3%A0%20pain%20100
- [15] « Les fours de boulangerie modulaires », Map. Consulté le: 18 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fourmap.fr/>
- [16] « ISO 14044:2006 », ISO. Consulté le: 18 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>
- [17] « SimaPro, logiciel leader pour l'ACV - Evea », SimaPro. Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://network.simapro.com/evea/>
- [18] « Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel », La librairie ADEME. Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/energies/5214-analyse-du-cycle-de-vie-du-bois-energie-collectif-et-industriel.html>
- [19] « Live 24/7 CO₂ emissions of electricity consumption ». Consulté le: 18 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <http://electricitymap.tmrw.co>
- [20] « Statistical Factsheet 2024 ».
- [21] P. Vincent-Sweet, « Analyse du cycle de vie et protection de l'environnement : pertinence et limites de l'outil Le point de vue d'une association », 2012.
- [22] I. Illich, *La Convivialité*, Seuil. 1973.