HABITAT LOW-TECH

Un projet LOW-TECH LAB

PRÉSENTATION

Pierre-Alain Lévêque & Clément Chabot

* Ce document est en open source sous licence Creative Commons CC-BY[1].
Vous êtes libre de partager : copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats ; vous pouvez adapter : remixer, transformer et créer à partir du matériel pour toute utilisation, y compris commerciale.
Vous devez créditer l'Œuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'œuvre.
Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que Le Low-tech Lab vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Œuvre.

1. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

SOMMAIRE

PRÉSENTATION 1

Glossaire 4

Low-tech Lab 5
Habitat low-tech 11
Contexte d'expérimentation 17

RÉSULTATS 25

Répartition des low-tech dans l'habitat 26
Hypothèses applicables à tous les systèmes 27

Capteur à air chaud 31
Chauffe-eau solaire 36
Poêle de masse 41
Panneau photovoltaïque 46
Marmite norvégienne 50
Garde-manger 55
Eau pluviale 60
Toilettes sèches 65
Douche à recyclage 70
Phytoépuration 75
Bokashi 80

INTERPRÉTATIONS ET PERSPECTIVES 83

Interprétation générale 84
Conclusion du projet 88
Ouverture 95
Media 99
Remerciements 102

Liste des abréviations et acronymes

ACV : analyse de cycle de vie

DEP ou EPD : déclarations environnementales de produits`

EH : équivalent habitant

GES : gaz à effet de serre

HLT : Habitat low-tech (nom du projet)

PAC : pompe à chaleur

HABITAT LOW-TECH

GLOSSAIRE

Liste des unités

g : gramme

kg : kilogramme

t : tonne

mm : millimètre

m : mètre

km : kilomètre

m^2 : mètre carré

m^3 : mètre cube

L : litre

kgCO2eq : kilogramme d'équivalent CO2

W : Watt

W.h : Watt x heure

kW.h : kilowatt x heure

s : seconde

min : minute

h : heure

j : jour

HABITAT LOW-TECH

GLOSSAIRE

Le ***Low-tech Lab*** croit au pouvoir de l'innovation utile, accessible et durable pour répondre aux enjeux d'aujourd'hui et de demain : les low-technologies offrent à tous et partout, les moyens de répondre aux besoins de chacun dans le respect des Humains et de la Planète !

Pour cela, le ***Low-tech Lab*** mène des expériences concrètes qui éprouvent des solutions technologiques dans divers contextes et domaines.
Ces retours d'expériences et témoignages sensibilisent en montrant que des alternatives et un mieux-vivre existent.

Le ***Low-tech Lab*** s'est donné pour mission de partager ces solutions et l'esprit low-tech afin de permettre à chacun de répondre à ses besoins de base de manière autonome et durable.

LOW-TECH LAB

Comment
donner l'envie et les moyens au plus grand
nombre d'un mode de vie
sobre, en harmonie avec l'environnement ?

Comment
consommer, produire et créer
de manière simple et responsable ?

Comment
faire des choix technologiques adaptés
et appropriés qui contribuent
à un monde où chacun peut être acteur ?

Comment
faciliter et contribuer concrètement
au changement, à la transition sociétale
et à un progrès orienté à l'échelle des individus
et des communautés ?

PRINCIPES D'ACTION

Le partage open-source
Parce que l'intelligence commune doit revenir au commun, parce que chacun doit pouvoir accéder à ces solutions et parce qu'il est nécessaire et urgent d'encourager l'innovation incrémentale, le fruit des actions est partagé de manière libre sous des licences *Creative Commons*.

La subsidiarité et adaptation au contexte local
Pour être adaptées et appropriées, les actions doivent être portées au plus proche des problématiques concrètes, et des besoins des communautés et acteurs du territoire.

La cohérence
Parce que nos valeurs humanistes de simplicité, de partage, d'équité et d'écologie doivent être intégrées, incarnées et réelles, la cohérence est essentielle entre le Pourquoi et le Comment, entre le Discours et l'Action.

La collaboration
Pour encourager l'échange de compétences et d'expériences, pour catalyser les engagements d'acteurs et citoyens d'horizons divers, pour impulser une synergie autour des low-tech, le Low-tech Lab travaille de manière apartisane et laïque, ouverte et collaborative.

Une alternative positive
Parce qu'il est préférable de changer par envie avec le sourire plutôt que par peur, le Low-tech Lab a choisi de mettre en avant les solutions constructives plutôt que les problèmes !

LES LOW-TECH

Les « low-tech » sont des technologies, services et savoir-faire qui répondent aux critères suivants :
Utile : Une low-tech répond à des besoins essentiels dans les domaines de l'énergie, l'alimentation, l'eau, la gestion des déchets, les matériaux de construction, l'habitat, les transports, l'hygiène ou la santé.
Durable : Robuste, réparable, recyclable, elle est pensée pour que son impact écologique et social soit optimal depuis la production, la distribution, l'usage et jusqu'à la fin de vie.
Accessible : À l'inverse des high-tech, son coût et sa complexité technique ne sont pas prohibitifs pour une large tranche de la population.

La découverte de nombreuses initiatives low-tech à travers le monde, notamment dans le cadre de notre expédition Nomade des Mers, a vivement renforcé nos convictions en faveur d'un mode de vie plus sobre et low-tech.
De retour en France, nous avons été confrontés à un décalage entre les solutions découvertes dans les contextes tropicaux et les besoins associés à nos modes de vie occidentaux. En effet, nous ne cuisinons pas au feu de bois et nous accédons à l'eau, à l'électricité, au gaz de manière "illimitée".
Les systèmes que nous avions documentés étaient peu adaptés à nos besoins. Cette dissonance à fait naître l'envie d'étudier les low-tech propres au contexte français.

Les principes low-tech peuvent s'appliquer à tous les secteurs. Dans ce projet, nous nous sommes concentrés sur l'habitat pour plusieurs raisons.
Dans un premier temps, le résidentiel-tertiaire a un lourd bilan environnemental : il est l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre (17%) [1] et en deuxième position derrière les transports. De plus, en France, il est le secteur le plus gourmand en énergie, consommant 43% de l'énergie finale[2].
Le logement est également au cœur des problématiques sociales. À titre d'exemple, plus de 5 millions de ménages souffrent de précarité énergétique[3].
Enfin, à l'heure d'un rabattage médiatique très sombre sur le changement climatique, de plus en plus d'individus sont en quête de solutions pour entrer en transition.
L'habitat est une excellente porte d'entrée car chacun y possède un champ d'actions important.

1. Commissariat général au développement durable, *Chiffres clés du climat*, p37 (2019).
[en ligne] https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-46-chiffres-cles-du-climat-edition-2019-novembre2018.pdf (consulté en 12/2019).
2. ADEME, *Le résidentiel tertiaire* (2011).
[en ligne] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/cahier-2_le-residentiel-tertiaire.pdf (consulté en 12/2019).
3. ADEME, *La précarité énergétique* (2018).
[en ligne] https://www.ademe.fr/expertises/batiment/quoi-parle-t/precarite-energetique (consulté en 12/2019).

Les low-tech peuvent répondre
de manière holistique
aux problématiques sociales
et environnementales
de l'habitat occidental.

Créons un habitat low-tech.

Phase 1

Découvrir et documenter les low-tech utilisées
→ *Projet Low-tech Tour France*

Phase 2

Valider ou invalider l'intérêt de ces systèmes
sur les plans écologique, économique et ergonomique
par l'expérimentation à l'échelle individuelle
→ *Expérimentation Habitat Low-tech*

Phase 3

Participer à diffuser largement les systèmes
et la philosophie low-tech par des activités de sensibilisation,
de mise en réseau et d'accompagnement des acteurs
associatifs ou professionnels de l'habitat
→ *À venir*

© Benoît Stichelbault

HABITAT LOW-TECH

OBJECTIF

Mesure de l'impact écologique, économique et ergonomique des low-tech dans l'habitat

À travers cette expérience, nous souhaitons démontrer et partager, en tant qu'habitants et par le calcul, l'intérêt des systèmes que nous avons repérés et installés.

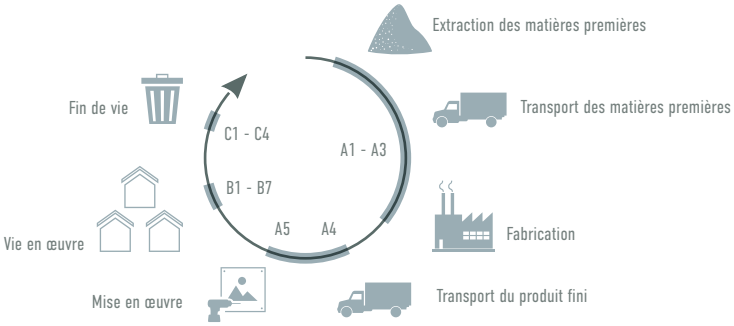
PROTOCOLE ET OUTILS D'OBSERVATION

La multitude de paramètres influant sur un habitat (saisonnalité, ensoleillement, hygrométrie, précipitation, température, nombre de personnes, modes de vie...) nous a vite éloignés de la caractérisation technique pure des systèmes (performance, rendement). Cette étude est réalisable en laboratoire avec des ambiances contrôlées.
Nous souhaitions davantage étudier la qualité de vie dans un habitat low-tech et les impacts écologiques et économiques à partir d'un ensemble d'hypothèses.

Pour chaque critère d'étude (écologique, économique et ergonomique) nous avons utilisé un outil dédié.

Pour l'**impact environnemental** (critère écologique), nous nous sommes essentiellement appuyés sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) avec l'émission de gaz à effet de serre. Cette étude du potentiel de réchauffement climatique est importante mais ne représente qu'une partie de l'impact de l'activité humaine sur la biosphère (voir ci-contre).
En outre, il est nécessaire de rester critique face à cet outil, particulièrement pour les études énergétiques en France.
Notre mix énergétique étant majoritairement nucléaire (78%[4])
il est très peu émetteur de gaz à effet de serre, il reste cependant source de nombreuses problématiques notamment de sécurité et d'éthique, qui ne sont pas modélisables à travers l'ACV.
Les phases du cycle de vie présentes dans l'étude suivante sont détaillées de cette manière :

A1-A3 : Étape de production
A4-A5 : Étape de construction
B1-B7 : Étape d'utilisation
C1-C4 : Étape de fin de vie
D : Bénéfices au-delà des frontières du système



→ *Schéma de principe du cycle de vie et de ses différentes étapes*[5]

Pour les systèmes permettant de réduire la consommation d'eau, nous avons comptabilisé l'économie en eau.

Selon les travaux du ***Stockholm Resilience Centre***[6], le concept de limites planétaires désigne les limites que l'humanité ne doit pas dépasser pour ne pas compromettre les conditions favorables dans lesquelles elle a pu se développer et pouvoir durablement vivre dans un écosystème sûr, c'est-à-dire évitant les modifications brutales et difficilement prévisibles de l'environnement planétaire[7].

Selon leurs travaux, le changement climatique est un gros facteur de risque, cependant il se place derrière l'érosion de la biodiversité et la perturbation des cycles biochimiques de l'azote et du phosphore.

4. EDF, *Mix énergétique* (2018).
[en ligne] https://www.edf.fr/mix-energetique (consulté en 12/2019).
5. SIPEV, *Fiche de déclaration environnementale et sanitaire* (2014).
[en ligne] https://docplayer.fr/20790708-En-conformite-avec-la-norme-nf-en-15804-a1-et-son-complement-national%20-xp-p01-064-cn-novembre-2014.html (consulté en 12/2019).
6. Stockholm resilience centre, *Planetary boundaries research* (2015).
[en ligne] https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html (consulté en 12/2019).
7. Wikipedia, Limites planétaires (2019).
[en ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/Limites_plan%C3%A9taires(consulté en 12/2019).

Nous nous sommes également penchés sur l'**intérêt économique** des systèmes. Selon nous une démarche écologique doit être économiquement intéressante pour ne pas rester marginale, réservée au luxe d'une élite.

Le coût matériel nécessaire à la réalisation et l'installation des low-tech a été comptabilisé. En étudiant les économies réalisées grâce à la réduction des consommations, nous avons pu déterminer un temps de retour sur investissement, c'est à dire, calculer la durée nécessaire au remboursement du système et à partir de laquelle une économie quotidienne est réalisée. Dans ces calculs, nous n'avons pas simulé le coût de la main d'œuvre. Nous avons cependant indiqué le temps que nous avons investi pour la réalisation de chacun des systèmes. Ces durées peuvent être facilement réduites avec des modifications mineures sur les systèmes et une main d'œuvre expérimentée.

Pour les impacts environnementaux et économiques, dans les cas où l'étude était possible et pertinente, nous avons comparé :

→ Notre consommation frugale associée à un système low-tech

→ Notre consommation frugale associée à un système conventionnel

→ La consommation moyenne d'un français associée à un système low-tech

→ La consommation moyenne d'un français associée à un système conventionnel

Ce raisonnement permet de dissocier l'impact d'un mode de vie frugal de l'impact des systèmes installés.

Pour l'**usage**, nous avons tenu un carnet de bord pour consigner notre niveau de confort, nos consommations et générations de déchets. Chaque semaine nous avons également réalisé un bilan ergonomique sur chaque système installé : l'utilité, la fonctionnalité, l'efficacité et la compatibilité[8] avec nos modes de vie ont été évaluées sur toute la durée de l'expérimentation.

8. Utilité : À quel point la low-tech était nécessaire pour répondre à un besoin ?
Fonctionnalité : À quel point il était possible de l'utiliser/elle remplissait sa fonction ?
Efficacité : À quel point la low-tech a été performante ?
Compatibilité : À quel point l'usage de la low-tech est compatible avec le quotidien et le mode de vie ?

→ *Habitat low-tech Concarneau été 2019* © Clément Chabot

© Foucauld Delaplace

CONTEXTE D'EXPÉRIMENTATION

LES *COBAYES*

Nous (Pierre-Alain, 29 ans et Clément, 30 ans) sommes tous les deux issus d'une formation d'ingénieur (ICAM).
Depuis plusieurs années baignés dans l'univers low-tech, nous sommes de fait "biaisés" dans l'étude des usages. Nous ne sommes donc pas un échantillon représentatif de la population. Certains comportements écologiques élémentaires ont depuis longtemps intégré nos quotidiens et ne sont pas considérés comme des efforts mais des sources de satisfactions (réduction des emballages et de la consigne de chauffage, compostage, douches courtes, toilettes sèches, déplacements à vélo...).
Cependant, le fait de tester sur et par nous-mêmes est un des principaux moyens d'action au Low-tech Lab, nous voulions être les premiers "cobayes" de cette maison déconnectée.

À la conception du projet, nous avions envisagé de vivre en colocation dans l'habitat low-tech. Par souhait d'autonomie individuelle nous avons rapidement mis en place une alternance, une "garde partagée" de la maison, chacun habitant la maison une semaine sur deux.

CHOIX DE L'HABITAT

Nous avons la culture de projets rapides et relativement économiques. Nous souhaitions pouvoir mettre en œuvre l'ensemble des low-tech dans un habitat en quelques mois et pour un coût total inférieur à 50 000 €. De plus, nous désirions que ce projet d'habitat devienne un support pédagogique et soit donc visitable pour que chacun puisse découvrir ces low-tech en vrai et dans l'usage.

Ces paramètres nous ont portés vers le choix d'une "tiny-house", petite maison écologique et nomade, sur un châssis de remorque, réalisé au sein de l'Atelier Bois d'ici[9], à partir de bois local. Évidemment peu représentatif de l'habitat français, cette petite maison nous a permis de réaliser rapidement le "laboratoire low-tech" nécessaire à l'expérimentation.
Le choix de ce mode d'habitat nous a ouvert l'opportunité d'être hors réseau (électricité, eau et assainissement), nous permettant d'étudier au mieux le potentiel des low-tech.
Nous nous sommes installés, le temps de l'expérience, dans un pré généreusement prêté par Gildas, ancien maraîcher bio de Concarneau.

L'objectif du projet n'est pas de promouvoir l'habitat en micro-maison dans les champs mais d'étudier l'intérêt des low-tech dans l'habitat en général pour, à terme, pouvoir les transposer à des bâtis existants ou les intégrer dans la conception de logements individuels ou collectifs neufs.

CONTEXTE TEMPOREL

La construction de l'habitat low-tech a commencé en janvier 2019, l'expérimentation a débuté en mars et s'est terminée en décembre 2019. Cette période permet d'observer l'utilisation des low-tech sur les différentes saisons.

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

Le Low-tech Lab étant hébergé à la base Explore[10] à Concarneau, c'est ici que nos vies se sont développées ces dernières années. Nous ne souhaitions pas réaliser cette expérimentation "hors-sol". Le projet se déroule donc à Concarneau, dans le Finistère Sud, en climat océanique, caractérisé par des étés plutôt beaux et doux et des hivers souvent pluvieux, ventés et doux (mais avec régulièrement de belles journées calmes et lumineuses). Les écarts de températures sont faibles et les jours de gel sont rares[11].

CONTEXTE LÉGAL

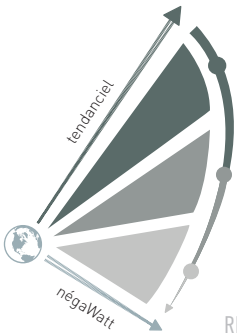
Ce projet est réalisé à titre expérimental pour proposer des alternatives durables et économiques aux systèmes conventionnels.
En étant différent des usages de son temps il est logiquement en décalage avec les réglementations en vigueur :

- Il n'est aujourd'hui pas légal d'installer un habitat léger sur un terrain agricole
- Il n'est a priori pas légal d'utiliser l'eau de pluie pour des usages corporels et de consommation
- Il n'est pas légal d'assainir ses eaux grises via un système non-certifié pour de l'assainissement individuel.

9. Jean-Daniel Blanchet, Tiny house Bretagne (2019).
[en ligne] https://tiny-house-bretagne.fr/#(consulté en 12/2019).
10. Explore, *Incubateur d'explorations à impact positif* depuis 2013.
[en ligne] https://www.we-explore.org/ (consulté en 12/2019).
11. Wikipedia, Géographie de la Bretagne (2019).
[en ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ographie_de_la_Bretagne (consulté en 12/2019).

DÉMARCHES ÉTUDIÉES

Au vu des différents paramètres partagés précédemment, nous avons sélectionné un ensemble de low-tech et de démarches adaptées au contexte de l'expérimentation.
Les démarches **négaWatt** et **Zéro déchet** ont été fondamentales dans la conception du projet. Elles sont présentées ci-dessous.



SOBRIÉTÉ

EFFICACITÉ

RENOUVELABLES

CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Prioriser les besoins énergétiques essentiels dans les usages individuels et collectifs de l'énergie.

Éteindre les vitrines des magasins et les bureaux inoccupés la nuit. Limiter l'étalement urbain, réduire les emballages, etc.

Réduire la quantité d'énergie nécessaire à la satisfaction d'un même besoin.

Isoler les bâtiments, améliorer les rendements des appareils électriques, des véhicules, etc.

PRODUCTION

Privilégier les énergies renouvelables qui grâce à un **développement ambitieux mais réaliste**

peuvent remplacer progressivement les énergies fossiles et nucléaires.

→ *Schéma de la démarche négaWatt*

DÉMARCHE NÉGAWATT

Partant du principe que l'énergie la moins polluante est celle qu'on ne consomme/produit pas, négaWatt propose de repenser notre vision de l'énergie en s'appuyant sur une démarche en trois étapes :

→ la sobriété

→ l'efficacité

→ les énergies renouvelables

L'idée n'est pas de « revenir à la bougie » mais de réduire à la source la quantité d'énergie nécessaire pour un même service, c'est-à-dire mieux utiliser l'énergie à qualité de vie constante.
Plusieurs exemples peuvent illustrer la notion de sobriété :

En milieu urbain, a-t-on besoin d'un véhicule de 1200 kg pour transporter une personne de 80 kg sur 5 km, le tout à une moyenne de 25 km/h ?
Ce même véhicule étant également capable de transporter 5 personnes sur 800 km à 150 km/h, ne faudrait-il pas utiliser de nouveaux modes de transport en ville ?

Est-ce normal d'être en T-shirt toute l'année ?
Aujourd'hui on relève fréquemment des températures supérieures à 21°C dans les logements ou les bureaux, et ce en plein hiver.
Est-ce bien raisonnable ?

Ces exemples nous montrent que tout autour de nous, dans notre quotidien, existe un gisement d'économie d'énergie, appelé négawatt.
Ce gisement de négaWatt est bien plus important que les autres gisements d'énergie ; il faut donc l'utiliser en priorité !
« Produire des négaWatts » c'est donc rompre avec nos (mauvaises) habitudes en préférant la sobriété énergétique au gaspillage.
C'est rechercher la meilleure utilisation possible de l'énergie, plutôt que de continuer à en consommer toujours plus.
La sobriété énergétique n'est pas un retour en arrière, c'est simplement une utilisation plus intelligente de l'énergie[12].

12. Negawatt, *Réussir la transition énergétique* (2017). [en ligne] https://negawatt.org/ (consulté en 12/2019).

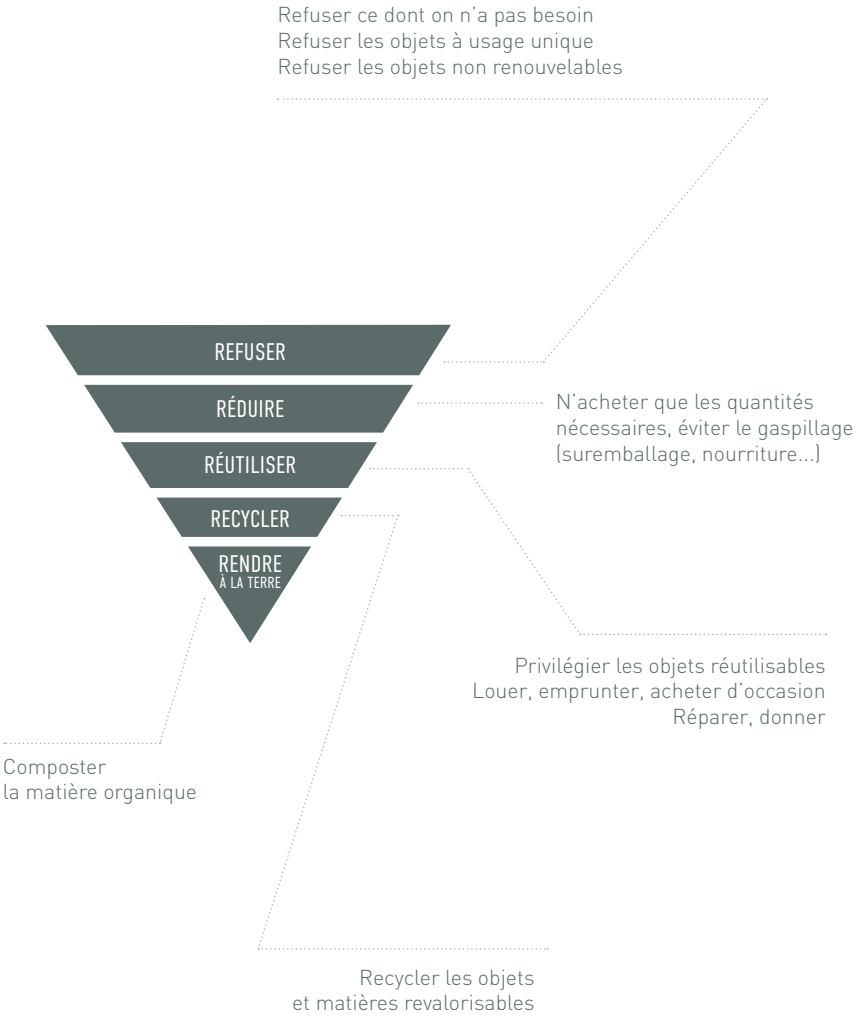
« Le meilleur déchet, c'est celui qu'on ne produit pas »

DÉMARCHE ZÉRO DÉCHET

99 % des ressources prélevées dans la nature sont reléguées au rang de déchets en moins de quarante-deux jours[13]. En cela, réduire très fortement notre génération de déchet permet de limiter notre lourde empreinte environnementale.
Très proche idéologiquement de négaWatt, la démarche zéro déchet s'applique à la réduction du déchet et du gaspillage en s'appuyant sur cinq principes :

- Refuser tous les produits à usage unique.
La première règle est de refuser tout ce dont vous n'avez pas besoin.
- Réduire la consommation de biens.
- Réutiliser tout ce qui peut avoir une deuxième vie.
- Recycler tout ce qui peut l'être.
- Composter les différents déchets organiques. [14 & 15]

13. Jérémie Pichon et Bénédicte Moret (préf. Nicolas Hulot), *Famille presque zéro déchet*, Vergèze, Thierry Souccar Éditions, 2016.
14 Zero Waste Paris, *Zero wast* (inc).
[en ligne] https://zerowasteparis.fr/wp-content/uploads/5R-03.jpg (consulté en 12/2019).
15. Radio Canada, *Les 5 règles pour bien commencer* (2018).
[en ligne] https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1123887/zero-dechet-5-regles-refuser-reduire-reutiliser-recycler-composter (consulté en 12/2019).



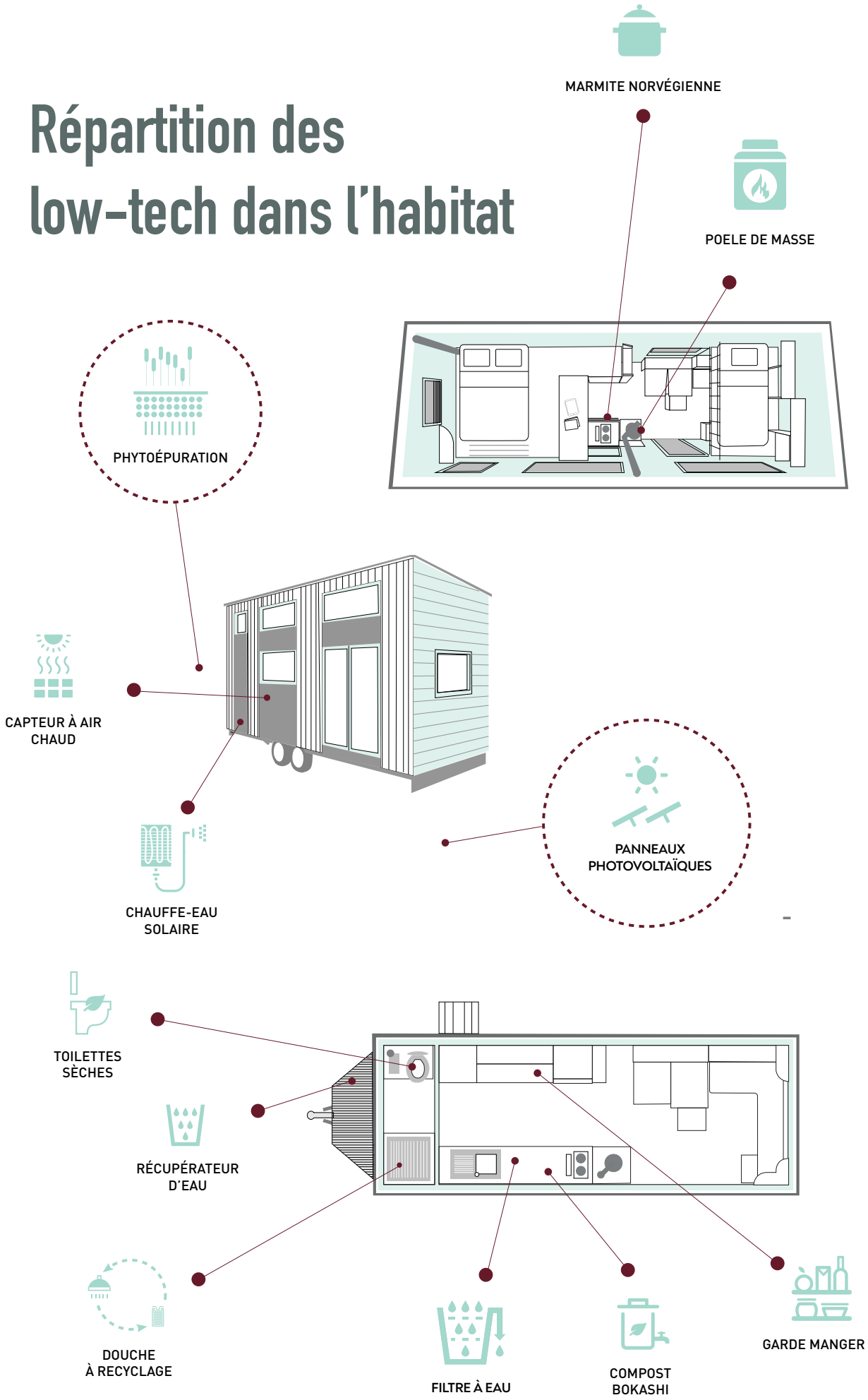
→ *Schéma du principe des 5R de la démarche Zéro déchet*

HABITAT LOW-TECH

RAPPORT D'EXPÉRIMENTATION

RÉSULTATS

Répartition des low-tech dans l'habitat



Hypothèses applicables à tous les systèmes

Pour l'étude du coût, du retour sur investissement et l'analyse de cycle de vie de chacune des low-tech nous avons pris un nombre important d'hypothèses de calcul.

À chaque fois elles sont exprimées pour permettre à chacun de refaire les calculs et potentiellement d'ajouter ou modifier des hypothèses pour être au plus proche de la réalité.

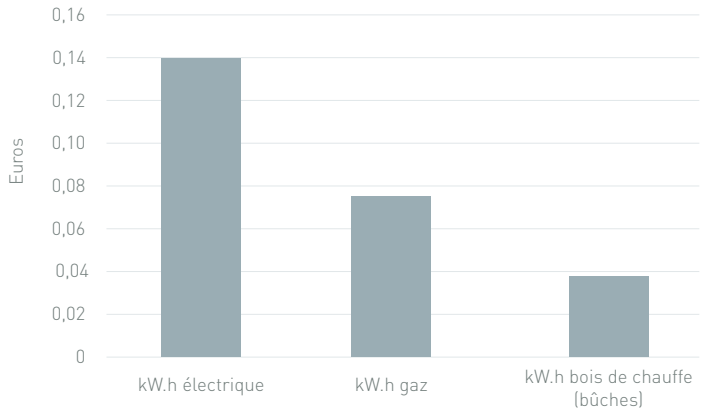
Certaines hypothèses reviennent très souvent, pour simplifier le document nous les avons extraites des fiches low-tech pour les présenter ci-contre.

ÉNERGIE FINALE

Pour l'ensemble des calculs, nous avons raisonné à l'échelle du foyer donc en énergie finale correspondant au montant visible sur les factures.

Pour une étude à l'échelle territoriale il serait intéressant de travailler à partir de l'énergie primaire.

COÛTS



→ Prix du kW.h en France en 2019

En France, en 2019, le coût du kiloWatt.heure (kW.h) revient à :

- 0,14€/kW.h électrique
- 0,075€/kW.h gaz[1]
- 0,038€/kW.h bois de chauffe[2] (bûches).

→ Le prix moyen de l'eau en France est de 3,98€/m³.[3]

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Pour le potentiel de réchauffement climatique et les économies en eau, l'étude est réalisée sur 10 ans d'utilisation.

ANALYSE DE CYCLE DE VIE ET POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Pour réaliser les analyses de cycle de vie nous avons utilisé les *Déclarations Environnementales de Produits (DEP)* ou les *Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES)* conformes aux normes ISO 14040[4] et EN 15978[5].
Base de données (BDD) : INIES[6], Okobaudat[7].

Les petites quantités et les produits pour lesquels aucune fiche EPD/FDES n'ont pu être trouvées ont été exclus des calculs.
Le transport réel effectué est exclu. Les distances et moyens de transport sont déjà estimés dans les fiches EPD/FDES.

Seuls les impacts des étapes de la production, de la construction et de la fin de vie sont extraits des fiches. La phase d'utilisation est estimée séparément, à partir des ressources consommées (eau, bois, gaz ...), sur une durée de vie de 10 ans pour chacune des low-tech ou du système « conventionnel » utilisé à titre de comparaison. Ces calculs utilisent les facteurs d'émissions de l'ADEME présentés plus loin dans ce chapitre.

Pour chaque système, les trois éléments les plus impactants, en potentiel global de réchauffement, sont indiqués. Le calcul est réalisé sur la base de matériaux neufs. Cela permet d'identifier les gros postes d'impact et d'y chercher des alternatives ou de se les approvisionner via des circuits de revalorisation.

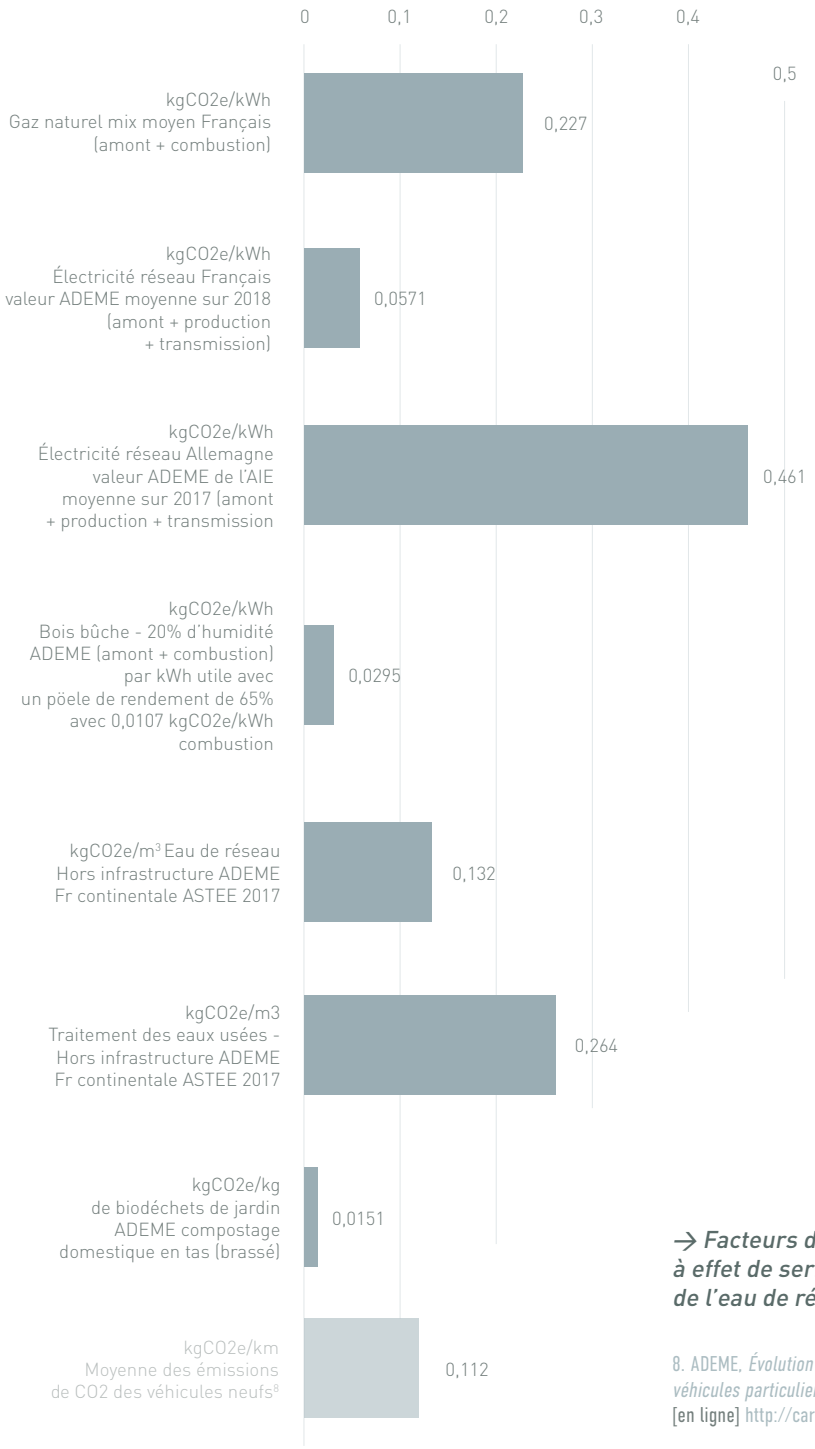
1. ELWAT, *Quel est le prix d'un kilowattheure (kWh) de gaz ?* (2019).
[en ligne] https://www.kelwatt.fr/enquete/prix-kilowattheure-gaz(consulté en 12/2019).
2. Quelle énergie, *Prix des énergie* (2016).
[en ligne] https://www.quelleenergie.fr/prix-energie(consulté en 12/2019).
3. Eau France, *Le prix de l'eau* (2019).
[en ligne] https://www.eaufrance.fr/le-prix-de-leau (consulté en 12/2019).
4. ISO, *Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre* (2006).
[en ligne] https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr(consulté en 12/2019).
5. NSAI Standards, *Sustainability of construction works. Assessmentof environmental performance of buildings* (2011).
[en ligne] https://infostore.saiglobal.com/preview/is/en/2011/i.s.en15978-2011-lc-2011-11.pdf?sku=1500481 (consulté en 12/2019).
6. INIES, *Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment* (2019).
[en ligne] https://www.inies.fr/accueil/(consulté en 12/2019).
7. ÖKOBAUDAT, *Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment* (2019).
[en ligne] https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html(consulté en 12/2019).

HYPOTHÈSES CONSERVATIVES

Dans certain cas nous n'avons pas trouvé de Déclarations Environnementales de Produits représentatives du système installé. Nous avons donc pris celle de produits similaires mais plus imposants.

Parfois ces systèmes sont très supérieurs à notre cas d'usage, par exemple la pompe étudiée est 5 fois plus puissante que la nôtre. Dans ces cas nous avons indiqué que l'hypothèse est conservative (hypothèse conservative), donc en défaveur de notre évaluation.

FACTEURS D'ÉMISSIONS



→ Facteurs d'émissions de gaz à effet de serre des principales énergies, de l'eau de réseau et de l'assainissement

8. ADEME, *Évolution du taux moyen d'émissions de CO2 en France, véhicules particuliers neufs vendus en France* (2018). [en ligne] http://carlabelling.ademe.fr/chiffrescles/r/evolutionTauxCo2

BUDGET CO2EQ[8]

En moyenne, un français émet près de 12 tonnes de CO2 par an ; l'objectif, pour rester en dessous de 2°C de réchauffement d'ici 2100, serait d'émettre moins de 2,5 tonnes/citoyen/an. C'est un « budget » qui s'applique de manière égale pour tous les citoyens sur terre[9].

CONSOMMATIONS

→ ***Moyennes françaises dans l'habitat :***
En France, en moyenne 2,2 personnes composent un ménage[11]

• 4770 kW.h/an/ménage consommé en France en 2018[12]

• 143 litres d'eau par jour, dont 40% sous la douche, 20% aux toilettes
800 kW.h/an pour chauffer l'eau chaude sanitaire[13]

• 135 kW.h/an d'énergie utile* pour cuisiner
(*l'énergie utile signifie l'énergie réellement transmise au récipient, après pertes de rendement des appareils de cuisson, sur la base d'une consommation annuelle d'une plaque à induction pour 1 à 2 personnes de 150 kW.h/an ayant un rendement de 90% en hypothèse conservative[14])

8. Gouvernement, *Les nouveaux indicateurs,Carbone* (2016).
[en ligne] https://www.gouvernement.fr/indicateur-emprunte-carbone(consulté en 12/2019).
& *Carbon brief* (2019). [en ligne] https://www.carbonbrief.org/ (consulté en 12/2019).
9. Gouvernement, *Les nouveaux indicateurs,Carbone* (2016).
[en ligne] https://www.gouvernement.fr/indicateur-emprunte-carbone(consulté en 12/2019).
10. Prix elec, *Consommation Électrique 2018 en France : Statistiques et Analyses* (2018).
[en ligne] https://prix-elec.com/energie/comprendre/statistiques-consommation-france (consulté en 12/2019).
11. INSEE, *Taille des ménages en 2016* (2016).
[en ligne] https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381486(consulté en 12/2019).
12. ADEME, *Eau et énergie : Quelle consommation ?* (2019).
[en ligne] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/infographie-economiser-eau-energie-2019.pdf (consulté en 12/2019).
13. Thomas Véron, *Ballon d'eau chaude : consommation, réglages pour économiser* (2019).
[en ligne] https://selectra.info/energie/guides/conso/regler-ballon-eau-chaude (consulté en 12/2019).
14. Selectra, *Appareils électriques : quelle consommation en kWh et en euros ?* (2019).
[en ligne] https://selectra.info/energie/guides/conso/appareils-electriques (consulté en 12/2019).

USAGES DANS LA MAISON LOW-TECH

Les calculs sont réalisés sur la base de notre expérimentation, pour deux personnes (Clément et Pierre-Alain) dans la maison low-tech qui a une surface de 14 m², environ 46 m³.

• Nous avons un besoin en énergie pour chauffer la maison de 1400 kW.h annuels, sur la base d'un habitat classique avec une demande de 100 kW.h/m² annuels[15]

• Nous consommons en moyenne 250 W.h d'énergie électrique par jour (mesure par wattmètre)
• Nous avons un besoin de 1600 kW.h pour chauffer l'eau chaude sanitaire sur un an[16]

• Nous consommons en moyenne 25 litres d'eau par jour chacun, soit 50 litres par jour à deux (mesure sur la cuve de stockage)

• Nous consommons en moyenne 15 litres d'eau par douche (mesure par débitmètre, amphiro[17])

• Nous consommons, pour boire et cuisiner, 5 litres d'eau par jour chacun (comptage vase de potabilisation)

• L'assainissement traite en moyenne 40 litres d'eau par jour (mesure sur bac gradués en sortie d'assainissement)

DIAGRAMMES ARAIGNÉES

Sur ces diagrammes en synthèse de chaque low-tech, l'axe "usage" est noté en absolu tandis que les axes économique et environnemental sont relatifs à un système existant.

15. Selectra, *Consommation moyenne d'électricité d'une maison* (2019).
[en ligne] https://selectra.info/energie/guides/conso/consommation-moyenne-electricite/maison (consulté en 12/2019).
16. Thomas Véron, *Ballon d'eau chaude : consommation, réglages pour économiser* (2019).
[en ligne] https://selectra.info/energie/guides/conso/regler-ballon-eau-chaude (consulté en 12/2019).
17. Amphiro, *Economisez l'énergie sous la douche* (2019).
[en ligne] https://www.amphiro.com/fr/(consulté en 12/2019).

Capteur à air chaud

Le chauffage de l'habitat représente 67% de la consommation énergétique d'un ménage[1]. L'usage d'énergie renouvelable pour ce poste de consommation peut donc s'avérer très intéressant.

L'usage du rayonnement solaire pour chauffer directement l'air entrant dans la maison est une opération relativement simple.
Le rendement est 4 à 5 fois supérieur au photovoltaïque.

Exploré depuis les années 1950 par Félix Trombe, le principe du mur Trombe permet de chauffer l'air de l'habitat en utilisant le rayonnement solaire direct via le principe du "corps noir" placé derrière un vitrage.

Ainsi, selon les contextes, il est possible de réduire fortement la part d'énergie fossile et nucléaire utilisée pour le chauffage.

LE CAPTEUR À AIR CHAUD DE GUY ISABEL

Le capteur à air chaud de Guy Isabel[2] est une sorte de mur Trombe adaptable à du bâti existant lorsqu'une place verticale sur la façade sud recevant le soleil d'hiver est disponible.

Il s'agit d'un cadre en bois dont le fond est percé d'un trou bas, communiquant avec l'habitat pour l'arrivée d'air «frais» et d'un trou haut pour la sortie de l'air chaud dans l'habitat.
L'air est invité à circuler en zigzag grâce à des chicanes en bois.
Des ardoises recouvrent ce cheminement en bois, enfin une vitre ferme l'ensemble.

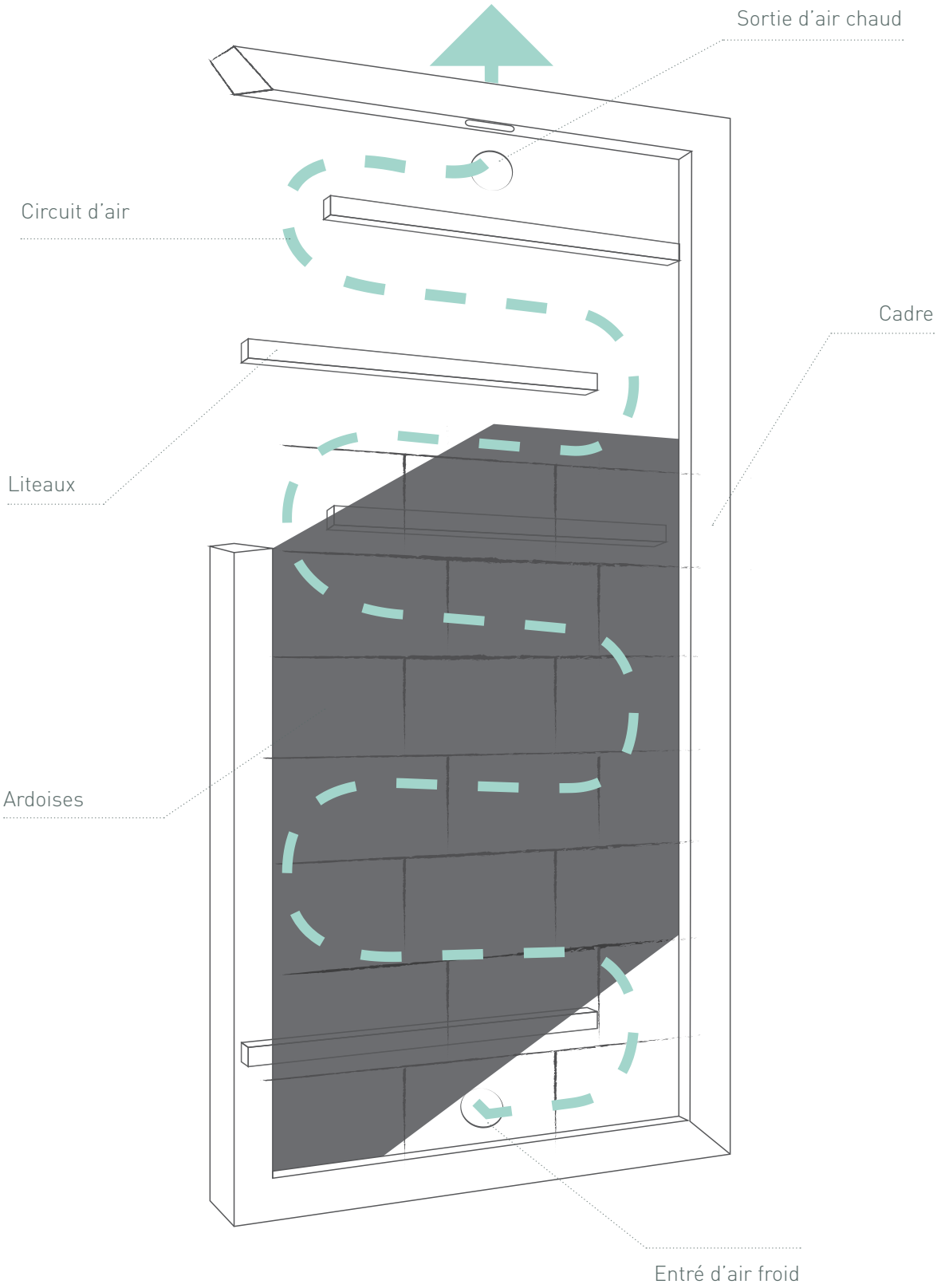
Ainsi, les ardoises recevant le rayonnement solaire vont fortement chauffer, la vitre permet un effet de serre et limite la perte de chaleur vers l'extérieur.

D'après les résultats de Guy Isabel, il faut environ 2 m² de capteurs (environ 300 W/m² sur la période utile) pour réchauffer en moyenne de 6 à 7°C une pièce de 15 m² en hiver (mesures prises à Cholet) [3].

DIMENSIONNEMENT ET HYPOTHÈSE POUR L'HABITAT LOW-TECH

La surface de l'habitat low-tech faisant 14m², le capteur installé fait 2 m².
Il est positionné plein sud et dégagé de tout ombrage.
L'air chaud arrive au niveau du plan de travail de la cuisine, au milieu de l'habitat. Un vérin thermostatique relié à un clapet de ventilation ne permet l'entrée d'air du capteur vers l'habitat qu'à partir de 25°C.
Une trappe d'été permet l'évacuation de l'air chaud à l'extérieur.

1. [en ligne] https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/dossiers-comprendre/dossier/lenergie-france/consomme-plus-denergie-france
2. [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Chauffage_solaire_version_ardoise
3. [en ligne] https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/les-capteurs-solaires-a-air-9782212140170/


Sortie d'air chaud
Circuit d'air
Cadre
Liteaux
Ardoises
Entré d'air froid

8h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Canalisation	20	0
Corps noir	19	19
Effet de serre	101	1
Isolant	12	12
Quincaillerie	21	21
Sélection thermique	10	10
Structure	81	81
Autres	74	70
Total	**338**	**214**

Euros

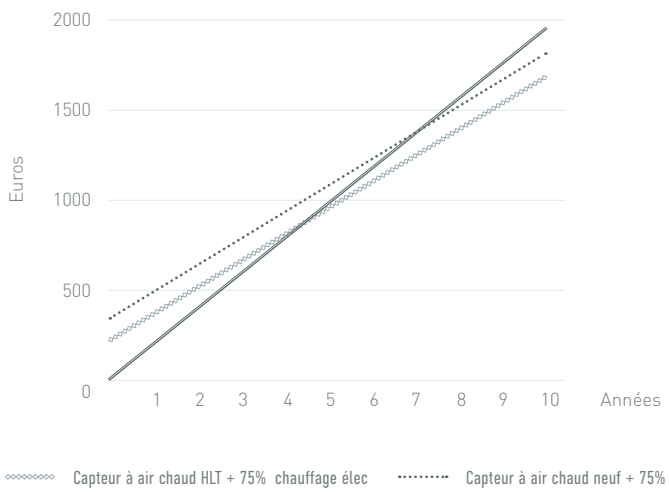
HYPOTHÈSES DE CALCUL

- Le capteur à air chaud mesure 2 m²
- L'utilisation du capteur à air chaud permet de réduire la consommation d'énergie de chauffage de 25%[4]
- Le capteur à air chaud permet de chauffer en présence de soleil, un radiateur électrique prend le relais lors des jours sombres et la nuit
- Pas de maintenance majeure pendant 10 ans
- Le capteur à air chaud ne remplaçant pas un autre moyen de chauffage mais son utilisation en période de soleil, les investissements en appareil de chauffage ne sont pas pris en compte, seule l'économie d'énergie est comptabilisée.

4. "Un capteur de 2m² pour une pièce de 15m² = +5 à 6°C ; baisser le chauffage d'1°C = environ 7 % d'économies";
Sources : Guy Isabel, *Les capteurs solaires à air*, France, Eyrolles, 2014.
Quelle énergie, Tout savoir sur les capteurs solaires à air, 2019.
[en ligne] https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/aerovoltaique/capteurs-solaires-air (consulté en 12/2019).

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des moyens de chauffage sur 10 ans***
Cf Annexe II - ROI



BILAN ÉCONOMIQUE

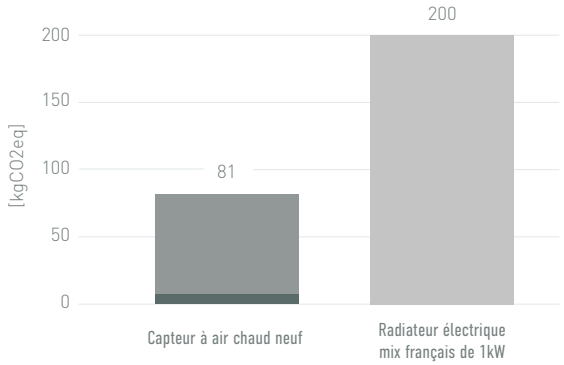
Selon nos hypothèses, l'usage d'un capteur à air chaud complété par un chauffage électrique devient rentable en 5 ans en comparaison à l'utilisation d'un chauffage électrique seul. S'il n'était construit qu'avec du matériel neuf, la rentabilité, en 9 années, bien que plus tardive reste intéressante.

Il est donc évidemment intéressant d'exploiter le maximum de surface disponible exposée au soleil d'hiver pour augmenter la part du solaire thermique dans le chauffage.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV



→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de chauffage prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

- Utilisation 10 ans @ 25% de 1400 kwh/an
- Fin de vie C1 - C4
- Production A1 - A5

LES 3 ÉLÉMENTS LES PLUS IMPACTANTS EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV

Vitre → 30% Manchon inox → 17% Ardoises → 16%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

D'un point de vue émissions de gaz à effet de serre (GES), le capteur solaire à air chaud tel qu'installé sur l'habitat low-tech est très pertinent en comparaison au chauffage électrique, malgré un mix nucléaire peu émetteur de GES en France.
Les chaudières à gaz ou au fioul sont encore plus polluantes dans l'usage[5], le capteur à air chaud est d'autant plus intéressant pour les habitats chauffés par ces dernières.

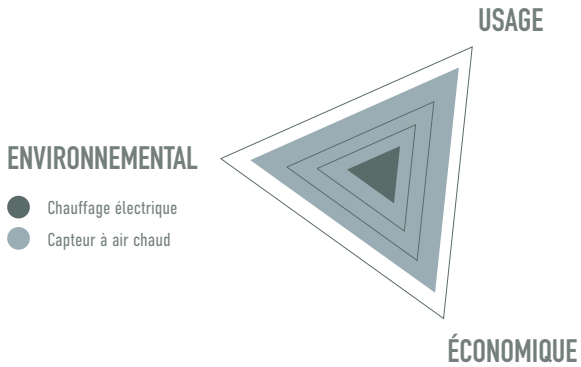
Concernant les matériaux qui composent le système, les 3 éléments vitre, manchon inox et ardoises sortent clairement du lot. Il est donc intéressant de réfléchir à des alternatives moins impactantes, principalement pour l'inox qui peut simplement être remplacé. Vitre et ardoises peuvent être récupérées en ressourceries.

5. Carbone4, *Les chaudières gaz sont-elles compatibles avec la lutte contre le changement climatique ?* (2019). [en ligne] http://www.carbone4.com/analyse-chaudieres-gaz-climat/ (consulté en 12/2019).

CONFORT ET USAGE

\+ À l'usage, le capteur à air chaud se montre l'une des low-tech les plus passives, c'est-à-dire qu'il ne demande aucune attention particulière, fonctionne très bien et de manière autonome.
Les seules interventions rapides sont à faire au début de l'automne et fin de printemps, pour ouvrir ou fermer la sortie d'air chaud vers l'extérieur, permettant de chauffer ou non l'habitat.
En hiver, pour peu qu'il y ait eu suffisamment de soleil dans la journée, c'est un vrai plus de pouvoir rentrer le soir dans l'habitat ayant été chauffé et gardé hors humidité grâce au capteur à air chaud.

− Cependant, de par son orientation plein sud, il ne commence à chauffer qu'en fin de matinée, moment où le soleil donne vraiment sur le capteur.
Donc le week-end, par exemple, lorsqu'il y a du soleil, un feu peut être nécessaire le matin en attendant que le capteur prenne le relais.



Bilan

De par sa simplicité, son efficacité et sa maturité (cela fait des décennies qu'il est éprouvé par Guy Isabel) le capteur à air chaud est l'une des low-tech les plus abouties que nous connaissions. L'installation d'un capteur à air chaud à l'est serait intéressante à tester pour répondre à un besoin en chauffage le matin, lors des week-ends par exemple.
Notre contexte géographique, dans une plaine dégagée de tout arbre, a permis un fonctionnement idéal. Il est évident que la pertinence du système est complètement liée au contexte d'installation.
Il serait, a priori, très efficace dans des contextes montagneux dans le Sud de la France, où les hivers sont froids mais plus ensoleillés qu'en Bretagne.

De manière plus globale, on voit que le système est très pertinent à tous points de vue. À titre d'exemple, aujourd'hui en France, 5 millions de foyers sont en contexte de précarité énergétique (12 millions d'individus) dont plus d'un million sont propriétaires de maisons individuelles[6], contexte le plus favorable à l'installation des capteurs à air chaud.
Un potentiel important de bénéficiaires existe donc sur le territoire, permettant de valider l'importance d'une diffusion large de ce système et plus largement de l'usage du solaire en énergie thermique.

6. ADEME, *La précarité énergétique* (2018).
[en ligne] https://www.ademe.fr/expertises/batiment/quoi-parle-t/precarite-energetique (consulté en 12/2019).

PISTES D'AMÉLIORATION

Conception • Que ce soit pour sa masse ou ses composants issus de la pétrochimie (mastic, pare-pluie, etc), un travail d'optimisation du dimensionnement serait intéressant pour le rendre plus compact et encore plus pertinent sur les aspects économiques et écologiques.

Exposition • Il serait intéressant de tester un capteur complémentaire à l'est lorsque la façade reçoit le soleil d'hiver afin de démarrer la chauffe plus tôt en journée.

Matériaux • L'ardoise servant de corps noir est l'un de matériaux les plus impactant, pouvoir le remplacer par un autre matériau sain et plus léger serait une bonne amélioration, surtout pour les régions où l'ardoise n'est pas traditionnellement utilisée en toiture.

Déphasage jour/nuit • Lorsque le système chauffe en journée, le soleil entrant par les vitres participe également à la chauffe, pouvant même occasionner des surchauffes dans l'habitat. Cependant dès la baisse du soleil, le capteur à air chaud ne fournit plus de chaleur.
Il serait intéressant de penser un accumulateur thermique complémentaire au capteur solaire pour emmagasiner de la chaleur en journée qui pourrait être restituée le soir voire la nuit et mieux lisser la courbe de température de l'habitat.

Chauffe-eau solaire

Transformer l'énergie solaire en chaleur est simple et efficient. Avec un rendement trois à quatre fois supérieur aux panneaux photovoltaïques, les panneaux solaires thermiques permettent de produire de la chaleur, premier poste de consommation d'énergie de l'habitat en France (79% de la consommation d'énergie[1]).

L'eau chaude sanitaire est un besoin de base sous notre climat ; elle est utilisée principalement dans la douche, la vaisselle et le lavage du linge. Chez les français, cela représente 13% de la consommation d'énergie à la maison.

Un chauffe-eau solaire permet de produire 60 à 90% de l'eau chaude sanitaire annuelle en fonction des régions et années. Associé à une source de chaleur alternative (biomasse, électricité, gaz, fioul) qui prend le relais lors des périodes de faible ensoleillement, il réduit fortement la facture énergétique.

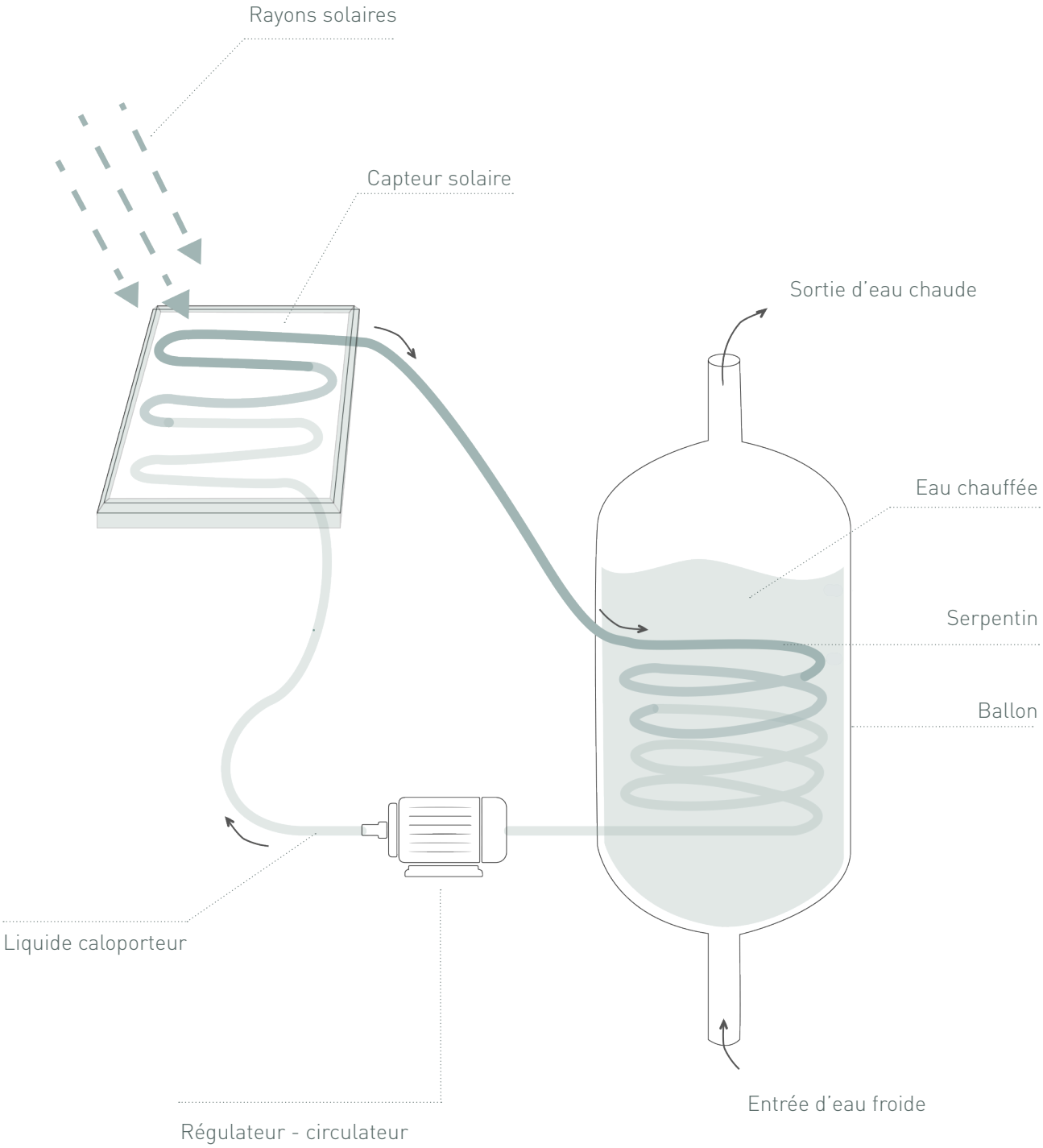
LE PANNEAU SOLAIRE THERMIQUE D'ÉRIC LAFOND[2]

Placé entre une vitre et de l'isolant, un échangeur thermique de réfrigérateur est traversé par un fluide caloporteur. Le rayonnement solaire est transformé en chaleur qui sera transmise à l'eau chaude sanitaire dans un ballon échangeur. Le fluide tourne en circuit fermé grâce à un circulateur. L'eau chaude sanitaire ne passe pas dans le panneau.
Attention, les grilles d'échangeur thermique, lors de leur récupération sur un réfrigérateur, peuvent dégager des gaz frigorifiques, certains ont un potentiel de réchauffement climatique 2000 fois supérieur au CO2 !
Il faut se rapprocher d'organismes de dépollution et recyclage des produits électroménagers pour en récupérer proprement.
D'après les études d'Eric Lafond, ce système produit en moyenne 500W/m² à l'année en France.

DIMENSIONNEMENT ET HYPOTHÈSE POUR L'HABITAT LOW-TECH

Dans notre cas, le panneau fait 1m² (55x175 cm²). Depuis l'origine du projet il est prévu d'adapter la surface de panneaux aux usages et contextes bioclimatiques.
Le système global est constitué d'un ballon d'eau chaude de 90 litres, d'un circulateur, d'un régulateur et d'un système de surpression.
Le ballon de 90 litres permet d'avoir de l'inertie sur deux jours à deux personnes. Un jour sans soleil mais pas sans eau chaude !

1. ADEME, *Eau et énergie : Quelle consommation ?* (2019). [en ligne] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/infographie-economiser-eau-energie-2019.pdf (consulté en 12/2019).
2. Low-tech Lab, *Chauffe eau solaire* (2018) [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Chauffe_eau_solaire(consulté en 12/2019).


Rayons solaires
Capteur solaire
Sortie d'eau chaude
Eau chauffée
Serpentin
Ballon
Liquide caloporteur
Régulateur - circulateur
Entrée d'eau froide

8h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

PANNEAU SOLAIRE THERMIQUE 1M² (€)

	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Colle	5	5
Peinture	2	2
Vitre	100	0
Échangeur	0	0
Isolant	10	10
Plomberie	2	2
Quincaillerie	10	10
Structure bois	50	50
Total	**179**	**79**

INSTALLATION TOTALE (€)

	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Panneau solaire thermique	179	79
Circulateur - Régulateur	400	150
Ballon d'eau chaude	395	395
Plomberie	131	131
Total	**1 105**	**755**

HYPOTHÈSES DE CALCUL

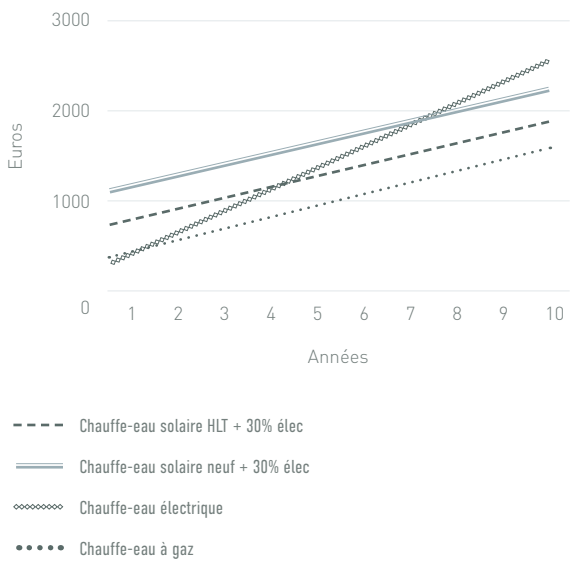
- Production de 70% de l'eau chaude sanitaire avec le chauffe-eau solaire, complément en électrique ou gaz (hypothèse conservative)
- L'équivalent de 5% de la production énergétique est nécessaire en apport électrique pour le fonctionnement du régulateur et du circulateur
- Le coût et l'impact du fluide caloporteur ne sont pas pris en compte, dans notre cas nous utilisons de l'eau
- Comparaison à un chauffe-eau électrique de 100 litres (300 €)[3]
- Comparaison à un chauffe-eau gaz instantané 11l/min, 17 kW (350€)[4]
- Les chauffe-eau électriques et gaz ont un rendement de 70 %[5]
- Pas de maintenance pendant 10 ans

3. Leroy Merlin, *Chauffe eau électrique* (2019).
[en ligne] https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/chauffe-eau-electrique-vertical-mural-equation-titane-electronique-100-l-e180184 (consulté en 12/2019).
4. Leroy Merlin, *Chauffe eau gaz* (2019).
[en ligne] https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/chauffe-eau-gaz-instantane-elm-leblanc-ondea-lc-11-11-l-min-e56331 (consulté en 12/2019).
5. ADEME, *L'eau chaude sanitaire* (2016).
[en ligne] https://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire (consulté en 12/2019).

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des moyens de production d'eau chaude sanitaire sur 10 ans***

Cf Annexe II - ROI

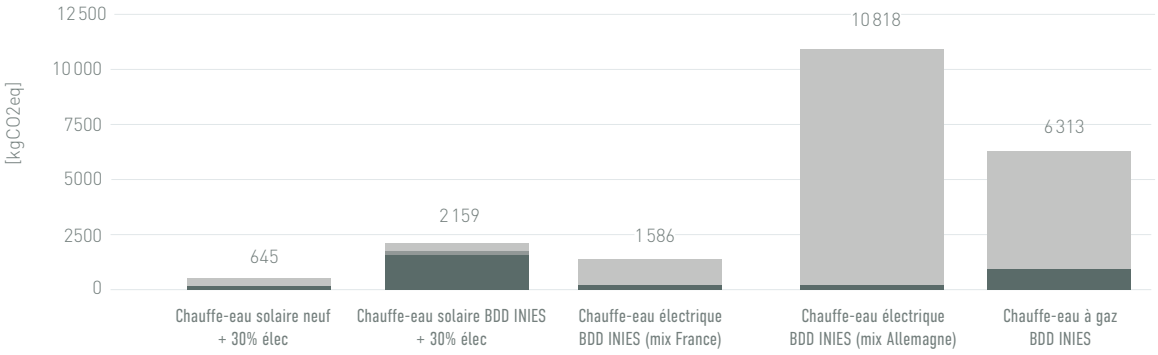


BILAN ÉCONOMIQUE

Tel que nous l'avons installée dans la maison low-tech, il faut compter 4 ans pour rentabiliser l'installation par rapport à un chauffe-eau électrique, si nous avions tout réalisé avec des matériaux neufs, il aurait fallu 7 ans.
Économiquement parlant, le gaz est plus intéressant que le solaire thermique.
Pour une installation solaire thermique clé en main du marché, il faut compter entre 5000 et 7000 euros.
Le retour sur investissement n'est pas évident au vu de la durée de vie des systèmes.
Des aides permettant de réduire les coûts d'achat et d'installation peuvent rendre le système compétitif.
Le rendement de 70% pour le solaire thermique est bas, il est "challengeable". Nous avons rencontré des personnes (à Brest !) qui produisent en moyenne 90% de leur eau chaude sanitaire en solaire en réduisant la consigne de température du ballon d'eau chaude et augmentant l'inertie du système.
Plus une installation solaire est importante, plus son coût par utilisateur est faible et donc le retour sur investissement rapide, d'où l'intérêt de mutualiser ces systèmes.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT



→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de chauffage prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

Cf Annexe I - ACV

Utilisation 1600 KWH/2 personnes/an pendant 10 ans — Fin de vie C1 - C4 — Production A1 - A5

LES 3 ÉLÉMENTS LES PLUS IMPACTANTS EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Ballon d'eau chaude → 46%
Circulateur/Régulateur →15%
Vitrage → 12%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

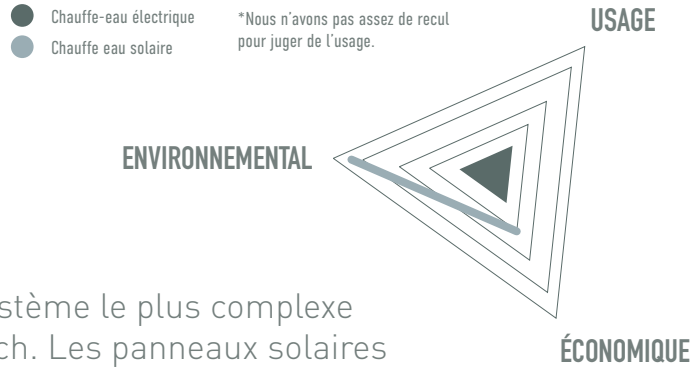
Ces calculs initiaux montrent que sur une durée de 10 ans le chauffe-eau solaire low-tech aurait un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 60% à 90% par rapport à un chauffe-eau électrique et à gaz respectivement. Cependant, le mix énergétique français, très nucléarisé, permet aux chauffe-eau électriques français de générer très peu de gaz à effet de serre et d'être très concurrentiels sur ce domaine.

On se rend compte avec le mix énergétique allemand, charbonné, que l'impact environnemental du solaire est bien inférieur à l'électrique outre-Rhin. Il en est de même pour les chaudières ou chauffe-eau à gaz.

Les gisements de vitrages en fin de vie sont nombreux, revaloriser des vitres permet de réduire le coût et l'impact environnemental du système. Moins évident, il est possible de faire de même avec les ballons d'eau chaude puis leur ajouter un échangeur thermique.

CONFORT ET USAGE

Dans ce projet de courte durée, l'eau chaude n'a pas été notre priorité vis-à-vis des autres besoins (électricité, sanitaires, conservation, chauffage) nous avons donc passé une majeure partie de l'expérimentation sans chauffe-eau solaire fonctionnel. L'usage, sur cette période d'expérimentation, n'est pas révélateur des vraies conditions d'utilisation dans un habitat classique terminé.



Bilan

Le chauffe-eau solaire est de loin le système le plus complexe que nous avons dans la maison low-tech. Les panneaux solaires thermiques sont simples à réaliser mais le reste du circuit ne l'est pas, la plomberie nécessite savoirs et compétences que nous n'avions pas. Avec du recul, nous aurions pu avoir une installation de plomberie bien plus simple.
De plus, cette low-tech a été victime des biais de l'expérimentation ; nous pouvions prendre nos douches sur notre lieu de travail ou collocations où nous vivions à mi-temps.
Néanmoins, ces panneaux solaires thermiques, semblent très pertinents d'un point de vue économique et écologique. Avec un rendement légèrement inférieur aux produits sur le marché et un coût jusqu'à vingt fois inférieur pour la même unité de surface, ce système est plein d'opportunités.

En France, en fonction des régions et de l'exposition, il faut en moyenne 4m² de panneaux pour 2 à 3 personnes et 6m² pour 6. En général, nous disposons de grandes surfaces artificielles ensoleillées telles que les toitures ou façades exposées au sud. Quel dommage de rendre le solaire thermique économiquement peu intéressant en proposant des systèmes à haut rendement onéreux alors que le soleil est gratuit et l'espace largement disponible.
Pour terminer, suite aux épisodes caniculaires des dernières années, il est perturbant d'utiliser une source d'énergie fossile ou nucléaire pour chauffer de l'eau alors que la population cherche l'ombre et la fraîcheur pendant tout l'été.

PISTES D'AMÉLIORATION

Régulateur DIY et open source • Le régulateur, qui commande le circulateur en fonction de la température du ballon d'eau chaude et du panneau, est onéreux et difficilement réparable. Il serait intéressant de le remplacer par une version « faite-maison » à partir de microcontrôleurs libres, par exemple Arduino.

Thermosiphon • Le régulateur-circulateur représente une part importante du coût économique et environnemental du système. Il serait intéressant d'étudier la piste d'un chauffe-eau en thermosiphon. Avec le ballon au-dessus des panneaux, le liquide caloporteur circule par convection. De cette manière l'investissement initial serait réduit et le système passif.

Hors-Gel • Certains systèmes, quand le circulateur ne tourne pas, se purgent automatiquement, c'est-à-dire que le fluide se retire du panneau solaire et est donc à l'abri du gel, très dangereux pour l'installation.

Vase ouvert • Un vase ouvert fait office de vase d'expansion, il permet au système de ne pas monter en pression ce qui pourrait le dégrader. Un vase ouvert se positionne au point le plus haut de l'installation. Il permet, en plus d'un vase d'expansion classique, de purger le fluide caloporteur des potentielles bulles d'air.

Poêle de masse

Un poêle de masse permet de pallier le manque d'inertie thermique d'un habitat léger ou en bois. En effet, sans éléments lourds tels qu'une chape ou des murs en béton, pierre ou terre, aucun matériau ne conserve la chaleur dans la maison. L'air étant renouvelé en permanence, il est important d'accumuler la chaleur dans une masse.

Dans les poêles de masse, la masse constituée de matériaux lourds (pierre, brique ou béton) stocke l'énergie d'une flambée quotidienne unique et intense (entre 1 et 3 h) et restitue longuement la chaleur une fois le feu éteint (jusqu'à 24h). Sa masse lui confère une inertie thermique propice à lisser les écarts de températures à l'intérieur d'un bâtiment. Toute la quantité de bois nécessaire pour chauffer l'habitat est brûlée en une seule fois, ce qui induit des températures élevées dans le foyer et permet d'obtenir une combustion quasi-complète et peu polluante. L'accumulateur est conçu pour absorber une majorité d'énergie issue de la combustion et des fumées.

Avec un rendement pour la plupart supérieur à 80%, ces poêles font partie des appareils de chauffage au bois les plus performants.

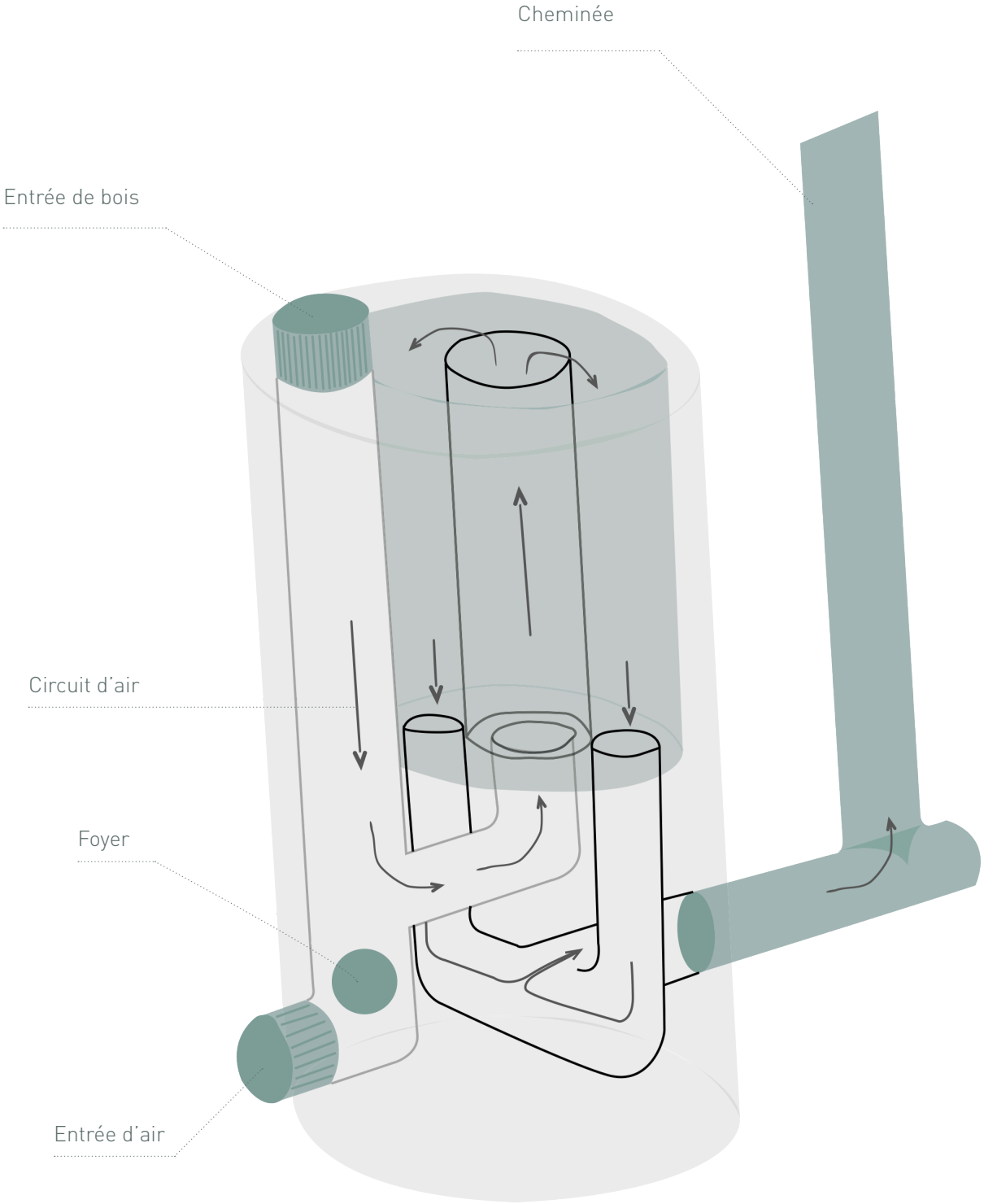
LE POÊLE DE MASSE SEMI-DÉMONTABLE DE VITAL BIES[1]

Le principe de ce poêle est de combiner « masse » et « mobilité » : une partie de l'inertie est réalisée par du sable, qui est facilement retirable. Le poêle, vidé, est plus simple à déplacer. À l'usage, le poêle rocket fonctionne en chargement vertical, ce qui permet une auto alimentation en bois par gravité. La combustion, par aspiration des flammes, est latérale inférieure, ce qui permet une arrivée d'air par le dessus du combustible. C'est une conception originale qui assure de très bonnes performances mais demande un temps de prise en main.
Ce poêle existe en 60, 120 ou 200 litres qui font respectivement 80, 160 ou 250 kg. Attention, l'assurance incendie ne couvre plus un habitat avec un poêle auto-construit.

DIMENSIONNEMENT ET HYPOTHÈSE POUR L'HABITAT LOW-TECH

Pour la maison low-tech et ses 14 m², nous avons installé le poêle de 60 litres. Le foyer a une puissance d'environ 2 kiloWatts, les flambées durent une à deux heures.

1. Low-tech Lab, *Poêle de masse semi démontable* (2017). [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Poelito_-_Po%C3%AAle_de_masse_semi-d%C3%A9montable (consulté en 12/2019).


Cheminée
Entrée de bois
Circuit d'air
Foyer
Entrée d'air

16h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Bidon	50	0
Coffrage	10	4
Fumisterie	100	100
Ciment chargé	55	55
Sable	5	0
Peinture	13	13
Tresse	13	13
Verre Vitrocéramique	25	25
Total	**271**	**210**

Euros

HYPOTHÈSES DE CALCUL

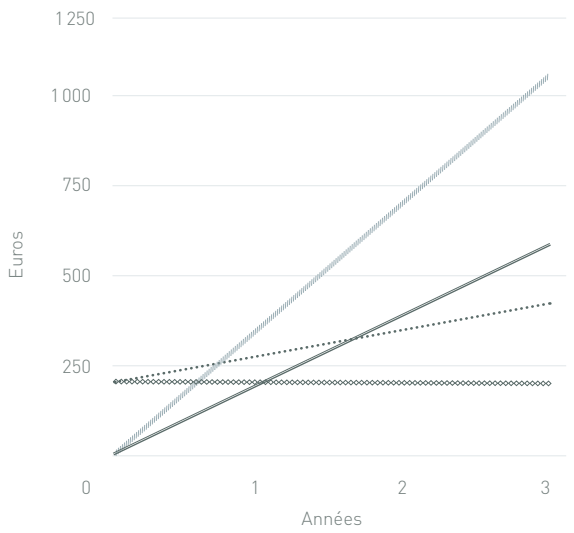
- La présence du capteur à air chaud n'est pas prise en compte, le besoin en chaleur de la maison est toujours de 1400 kW.h
- Le bois collecté en milieu naturel ou constitué de chutes (gratuit)
- La période de chauffage est de 232 jours (1er octobre au 20 mai), hypothèse conservative
- Le rendement d'un poêle rocket est de 75%
- Le rendement d'une cheminée à foyer ouvert est de 15%
- Le rendement est purement énergétique, il ne prend pas en compte les émanations de gaz à effet de serre supplémentaires liées à une mauvaise combustion, hypothèse conservative
- Le rendement d'un chauffage électrique est de 100%
- La pompe à chaleur (PAC) a un coefficient de performance de 3,9 et une puissance de 5,2 kW
- L'installation de la fumisterie n'est pas prise en compte
- Le coût des radiateurs, chaudières et cheminée n'est pas pris en compte (hypothèse conservative)
- Une pompe à chaleur a un coût de 5000€ (hypothèse conservative)

2. abcclim, Degré-jour unifiés (DJU) (2014)
[en ligne] https://www.abcclim.net/degres-jour-dju.html (consulté en 12/2019).
3. Assos des 2 mains, Le poelito (2017).
[en ligne] https://sites.google.com/site/assodes2mains/poele/le-poelito (consulté en 12/2019).
4. Alain, Comment augmenter le rendement de mon foyer ouvert ? (2017).
[en ligne] https://www.chauffageaubois.eu/comment-augmenter-le-rendement-de-mon-foyer-ouvert/ (consulté en 12/2019).

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des moyens de chauffage sur 3 ans***

Cf Annexe II - ROI



Poêle de masse HLT, bois gratuit
Poêle de masse HLT, bois acheté
Radiateur électrique
Cheminée à foyer ouvert

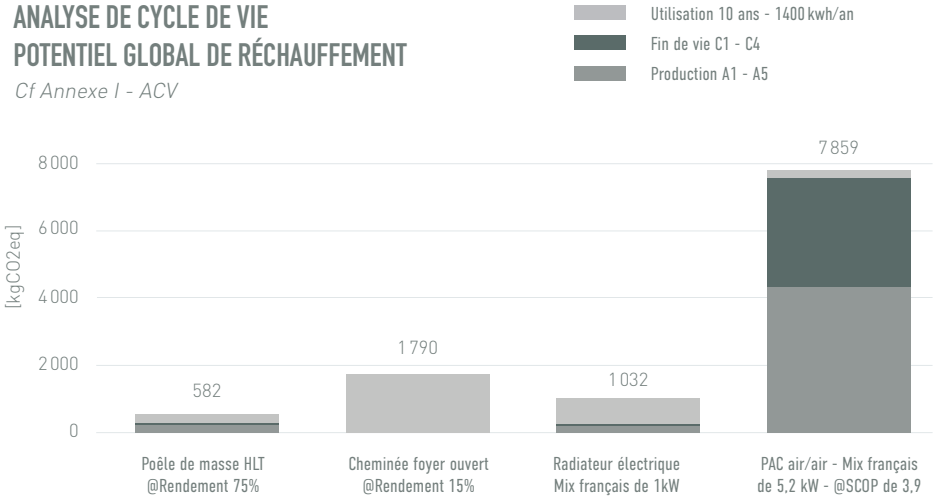
BILAN ÉCONOMIQUE

- Telle que nous l'avons installée à la maison, il faut un an pour rentabiliser l'installation du poêle par rapport à un chauffage électrique.
- Si nous achetions le bois, l'installation serait rentabilisée le deuxième hiver.
- La pompe à chaleur n'apparaît pas sur le graphique, l'investissement initial (5 000€) la met en dehors du spectre d'étude. Pour notre petit besoin en chaleur il faudrait 25 ans pour la rentabiliser par rapport à un radiateur électrique, 15 ans par rapport à une cheminée à foyer ouvert.
La PAC ne "rattrape" jamais le poêle de masse.
- Pour une surface de 100 m² à chauffer, la PAC devient intéressante vis à vis des radiateurs électriques la 5ème année, la 12ème face à un poêle de masse à haut rendement.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV



→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de chauffage prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

LES 3 ÉLÉMENTS LES PLUS IMPACTANTS EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Fumisterie inox → 60 %
Bidon 60 litres → 16 % Ciment fondu → 6 %

BILAN ENVIRONNEMENTAL

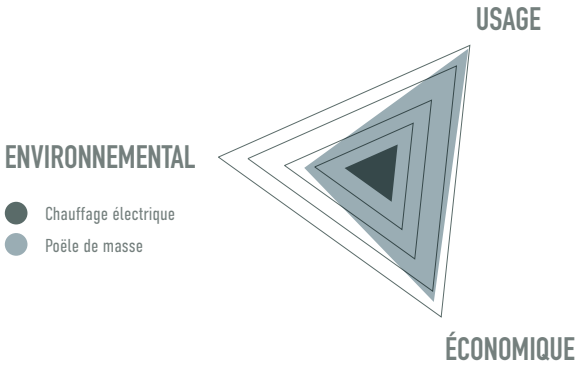
Ces calculs initiaux montrent que sur une durée de 10 ans le poêle de masse low-tech aurait un potentiel d'émissions de gaz à effet de serre évitées de l'ordre de 43% par rapport à un chauffage électrique, 67% pour une cheminée à foyer ouvert et 92% pour une PAC. A l'instar du capteur à air chaud, nous n'avons pas intégré les chaudières à gaz ou au fioul qui ont un impact environnemental encore plus lourd que les autres solutions comparatives[5].
La performance du poêle est relative au faible impact du bois issu d'une forêt gérée durablement qui a un potentiel de réchauffement climatique moitié moindre que le mix énergétique français, ramené au kW.h. Il semble donc intéressant de se chauffer au bois dans la mesure où le poêle à haut rendement génère peu de fumées et de particules fines. Les pompes à chaleur, bien que consommant peu et donc considérées comme systèmes écologiques, ont un très fort impact à la production et en fin de vie. Dans notre cas "simulé", l'utilisation de la PAC représente moins de 10 % de l'impact ` de son cycle de vie complet !

5. Carbone4, *Les chaudières gaz sont-elles compatibles avec la lutte contre le changement climatique ?* (2019).
[en ligne] http://www.carbone4.com/analyse-chaudieres-gaz-climat/ (consulté en 12/2019).

CONFORT ET USAGE

Le poêle est très peu gourmand, environ 2 kilos de bois par heure de feu. Le bois de chauffe doit être de petites dimensions. Nous réalisons des flambées d'une à deux heures en soirée, la température est confortable, il ne fait ni trop chaud ni trop froid. Une fois éteint, le poêle continue à rayonner pendant quatre à six heures. Au matin, le poêle est tiède. Cette petite inertie est liée à la faible masse du dispositif. Les poêles de masse traditionnels peuvent peser de plusieurs centaines de kilogrammes jusqu'à quelques tonnes, augmentant ainsi l'inertie du système.
Voir et entendre le feu crépiter est très agréable et lors des flambées il est possible de faire chauffer de l'eau, griller du pain, réchauffer un plat...

Sans surprise le poêle n'est pas utile sur la période estivale. Au retour de la fraîcheur nous le reprenons rapidement en main, même s'il demande de suivre un protocole rigoureux et peu intuitif pour l'allumage. Si la méthodologie n'est pas respectée il y a un risque d'enfumage de la maison.
L'évacuation des cendres peut générer de la poussière. Il faut s'occuper régulièrement du feu pour conserver une bonne combustion. Nous ne laissons pas le feu sans surveillance prolongée même si nous n'avons jamais eu de problème de remontée de flammes dans le conduit de chargement du bois.



Bilan

Ce poêle de masse fait partie des éléments majeurs de la maison low-tech, il est utile, efficace, simple et s'intègre magnifiquement à la maison.
Il est particulièrement intéressant dans un petit habitat car son inertie permet d'éviter de « chauffer la porte ouverte ». En effet, le pic de chaleur d'un poêle classique dans un petit volume impose d'ouvrir portes et fenêtres pour ne pas transformer la pièce à vivre en hutte de sudation.

D'un point de vue économique et environnemental il semble plus pertinent qu'un chauffage électrique et une pompe à chaleur, même pour des volumes à chauffer bien plus importants que la maison low-tech.

Une attention particulière est à porter sur les ressources en bois si son usage vient à augmenter fortement.

PISTES D'AMÉLIORATION

Poêle de 120 litres • Il serait intéressant de remplacer ce poêle de 60 litres par son grand frère de 120 litres pour étudier l'usage et le confort thermique.
En effet, avec plus de masse le poêle rayonnera plus tard dans la nuit. Il y a par contre un risque de surchauffe lors de la flambée. Le conduit de chargement de bois plus large du poêle de 120 litres permet également d'utiliser du bois de plus grande dimension.

Poêle bouilleur • Le poêle pourrait permettre de chauffer l'eau du ballon d'eau chaude en l'absence de soleil.

Acier inoxydable • Dans l'analyse de cycle de vie, la fumisterie inox est de loin le plus gros poste d'impact, il serait intéressant de la remplacer par des matériaux moins émetteurs de gaz à effet de serre.

Panneaux Photovoltaïques

Les panneaux solaires photovoltaïques sont des modules de transformation de l'énergie solaire en électricité sous forme de courant continu.

Ce sont des systèmes non low-tech ayant des rendements avoisinant les 20%.

Dans le cas d'un usage de l'électricité en site isolé, le montage s'accompagne de module électronique et de batterie de stockage permettant une distribution continue de courant dans l'habitat.

L'INSTALLATION SOLAIRE DANS L'HABITAT LOW-TECH

Les panneaux photovoltaïques permettent via un régulateur de charge, le stockage de l'électricité produite dans des batteries. Par la suite, un circuit 12V en courant continu permet l'usage de l'électricité avec le moins de pertes de rendement possible. Si besoin, un onduleur permet la production de courant en 220V alternatif. L'onduleur a un rendement d'environ 90%.

Dans l'habitat low-tech, l'usage d'un circuit 12V en courant continu est pertinent car nous n'avons aucun appareil "de puissance" comme une bouilloire, des plaques électriques, un aspirateur... L'usage de ce type d'appareil aurait rendu moins logique l'usage de 12V, cela aurait nécessité des grosses sections de câble pour véhiculer l'énergie.

Les panneaux photovoltaïques sont placés au sol, exposés plein sud. Ce choix de positionnement, plutôt que de les placer sur le toit, permet une maintenance aisée (nettoyage, changement d'angle selon les saisons, etc)

DIMENSIONNEMENT ET HYPOTHÈSE POUR L'HABITAT LOW-TECH

Nous n'avons pas connaissance de low-tech produisant de l'électricité de manière pertinente sur les aspects simplicité, accessibilité et environnemental.
Bien que des éoliennes à autoconstruire existent, nous n'avons pas fait ce choix pour différentes contraintes (géographie, impact environnemental, infrastructure nécessaire).
Au sein de l'habitat, nous avons donc travaillé à réduire au maximum l'usage de l'électricité sans que cela nuise au confort. Nous nous sommes appuyés sur la démarche proposée par le collectif négaWatt[1]. Ainsi nous n'avons besoin d'alimenter que la lumière, les ordinateurs et téléphones, la musique et un petit réfrigérateur lors des pics de chaleur pour une consommation moyenne de 250 W.h/jour.
À titre comparatif, en moyenne en France, la consommation électrique est de 3000 W.h/jour/personne juste pour l'électroménager, sans compter le chauffage et les autres postes de dépense[2].
Tout ce qui nécessite de la chaleur a été redirigé vers des sources d'énergie plus pertinentes et limite au maximum l'usage de moteurs électriques. Ici, nous avons conservé une pompe pour l'eau et un petit réfrigérateur ponctuellement.
Nous avons donc installé 2 panneaux solaires photovoltaïques de 290 Watt-crêtes (Wc), 4 batteries de 90 Ah, un contrôleur de charge permettant un circuit 12V en courant continu ainsi qu'un onduleur pour alimenter un circuit plus rarement utilisé de 220V en courant alternatif.
Notre profil énergétique (cf Annexe III - Profil énergétique) nous a permis de réaliser le dimensionnement.

1. Negawatt, *Réussir la transition énergétique* (2017). [en ligne] https://negawatt.org/ (consulté en 12/2019).
2. Alice, *Consommation électrique moyenne par jour* (2018). [en ligne] https://www.agence-france-electricite.fr/consommation-electrique/moyenne-par-jour/(consulté en 12/2019).

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

10h

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Batterie	1500	0
Câbles	27	27
Contrôleur de charge	204	204
Onduleur	184	184
Production électrique	320	258
Total	**2235**	**673**

Euros

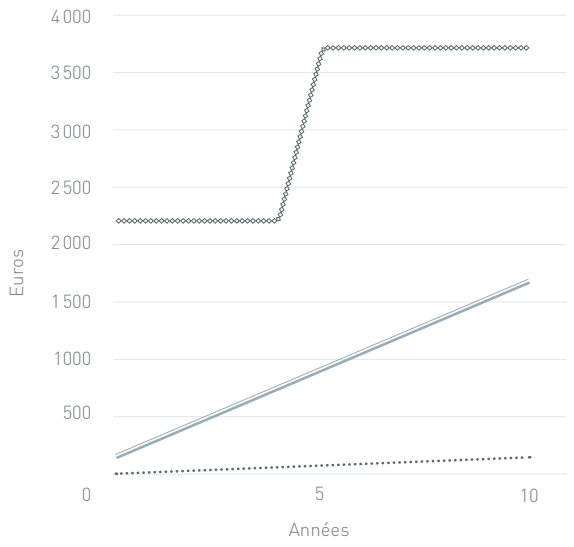
HYPOTHÈSES DE CALCUL

- Nous comparons notre installation complète à un raccordement au réseau pour un mix français principalement au nucléaire et un mix allemand principalement au charbon
- Pour le calcul de potentiel global de réchauffement des panneaux photovoltaïques, nous utilisons les données par défaut de l'ADEME, pouvant être jusqu'à deux fois plus impactants que d'autres panneaux disponibles dans la base de donnée
- Pour le calcul du potentiel global de réchauffement, nous ne prenons pas en compte le changement de batterie sur 10 ans d'utilisation
- Avec le scénario négaWatt, notre demande en électricité a été réduite de 70 fois par rapport à une consommation moyenne, soit 100 kW.h/an au lieu de 7 000 kW.h /an (petit frigo, lumières LED, chargeurs de téléphone, ordinateur...)
- Nos panneaux photovoltaïques, cumulant 600 Wc (4m²), sont surdimensionnés par rapport aux besoins, ils peuvent produire environ 600 kW.h par an, seulement 100 kW.h sont consommés.

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des moyens de consommation d'électricité sur 10 ans***

Cf Annexe II - ROI



Installation autonome neuve, changement batteries à 5 ans

Consommation frugale avec mix français

Consommation normale avec mix français, électroménager seul

BILAN ÉCONOMIQUE

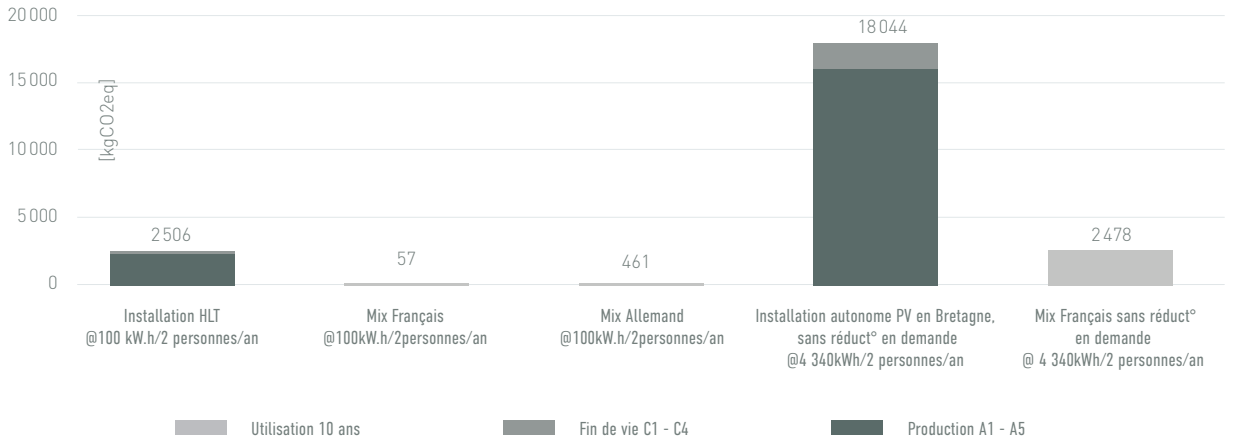
Dans notre cas, l'installation a coûté 673 € et elle aurait coûté 2235 € en neuf.
Si nous étions raccordés au réseau, nous payerions 13 € d'électricité par an.
Face au faible coût du kW.h en France, la rentabilité économique d'un système de production/consommation électrique autonome est très compliquée.
L'autonomie électrique telle que nous l'avons réalisée n'est pas intéressante d'un point de vue économique lorsque l'accès au réseau est possible, surtout que le parc batterie est à changer tous les 5 ans environ.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV

→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de consommation d'électricité prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation



LES 3 ÉLÉMENTS LES PLUS IMPACTANTS EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

2 panneaux photovoltaïques 290 Wc → 56%
4 batteries 90 Ah → 25 % Onduleur → 13%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

Grâce à la démarche négaWatt[3] et à la rationalisation de nos consommations d'énergie, il semble possible d'avoir un bilan d'émission GES équivalant à celui des panneaux photovoltaïques d'un français moyen raccordé au réseau.
Par contre, si nous consommions de l'électricité comme la moyenne française, nous aurions un impact environnemental presque 6 fois plus important qu'en étant raccordés au réseau.

Il est donc très important de noter que pour viser un impact intéressant (pour les GES) avec le photovoltaïque en consommation autonome, c'est avant tout un changement de mode de consommation qui doit être fait par l'usager.

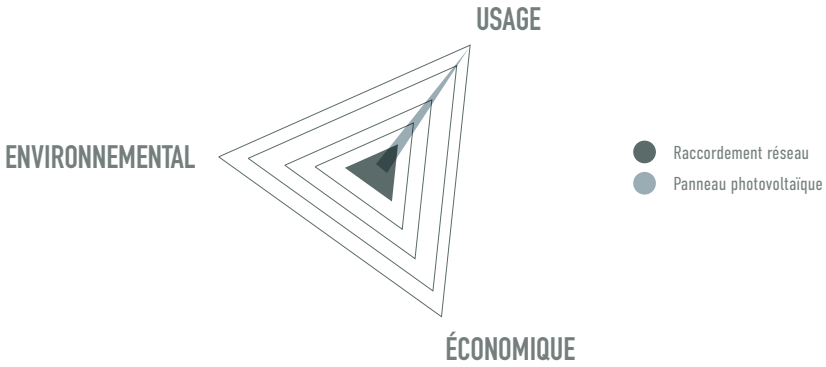
3. Negawatt, *Réussir la transition énergétique* (2017). [en ligne] https://negawatt.org/ (consulté en 12/2019).

CONFORT ET USAGE

\+ Que ce soit en été avec l'usage du petit réfrigérateur ou en hiver avec des durées d'ensoleillement moindre, nous n'avons jamais ressenti de contrainte particulière avec notre système électrique. À titre d'exemple, nous avons particulièrement apprécié l'écoute de nombreuses heures de musique sans que cela ne pose de problème.

D'un point de vue ressenti, il est satisfaisant de rendre concret ce qui se passe derrière les prises électriques, nous avons un "stock" d'énergie à gérer, à l'instar des ressources dans un jeu vidéo. Cela crée un sentiment de reprise de contrôle sur cette ressource qu'est l'énergie électrique.

− En terme d'entretien, un nettoyage hebdomadaire des panneaux durant des périodes sans pluie est nécessaire pour avoir le meilleur rendement possible, l'opération dure 5 minutes.



Bilan

Non low-tech, avec une rentabilité économique critiquable et un impact environnemental fort, la question de la production d'électricité avec des panneaux photovoltaïques est complexe, alors qu'il n'est pas envisageable de se passer totalement d'électricité.
À cela s'ajoute un débat sur le nucléaire qui permet, d'un côté, un bon impact environnemental sur l'indicateur « potentiel global de réchauffement », mais entraîne de nombreuses problématiques de gestion de déchets et, plus largement, éthiques.

Le vrai travail est de réduire ses consommations et de rationaliser les sources d'énergie par rapport à l'énergie finale demandée : thermique ? électrique ? mécanique ?
Un important travail de sensibilisation est à réaliser auprès du grand public en rendant « palpable », dans un premier temps, la notion d'énergie électrique, de Watt et de kW.h.

PISTES D'AMÉLIORATION

Pédagogie • Les concepts d'énergie et de kW.h sont très abstraits, surtout que l'énergie arrive en illimité dans les prises électriques des logements et que les fils ne permettent pas vraiment d'imaginer la quantité d'énergie qui y passe, à l'inverse d'un tuyau d'eau par exemple.
Un outil de visualisation de l'énergie serait intéressant pour rendre ludique la réduction de sa consommation (sans tomber dans le gadget).

Marmite norvégienne

La marmite norvégienne est un procédé permettant de réduire l'usage de plaques de cuisson ou du four pour des aliments cuisant dans un liquide, que ce soit pour des cuissons plutôt courtes (pâtes / riz/ pommes de terre) ou des plats qui nécessitent de mijoter longtemps (mogettes vendéennes[1]).

Il s'agit de porter le plat à ébullition puis de le placer dans une enceinte bien isolée pour que la cuisson se termine grâce à l'énergie apportée au plat durant la phase de chauffe. Une fois cuit, le plat reste au chaud jusqu'à la consommation (on retrouve ce principe dans la restauration collective). Cette enceinte, la marmite norvégienne, peut être réalisée de multiples manières : du simple enroulement dans des couvertures à un tiroir réalisé pour cette fonction.

Il est possible d'économiser jusqu'à 50% de l'énergie de cuisson, qui s'élève en France à 135 kW.h/an utile, en moyenne pour un foyer de 1 à 2 personnes[2].

Le terme « marmite norvégienne » est trompeur car il ne s'agit pas forcément d'une marmite et il n'est pas sûr que le principe soit d'origine norvégienne.

LA MARMITE NORVÉGIENNE DANS L'HABITAT LOW-TECH

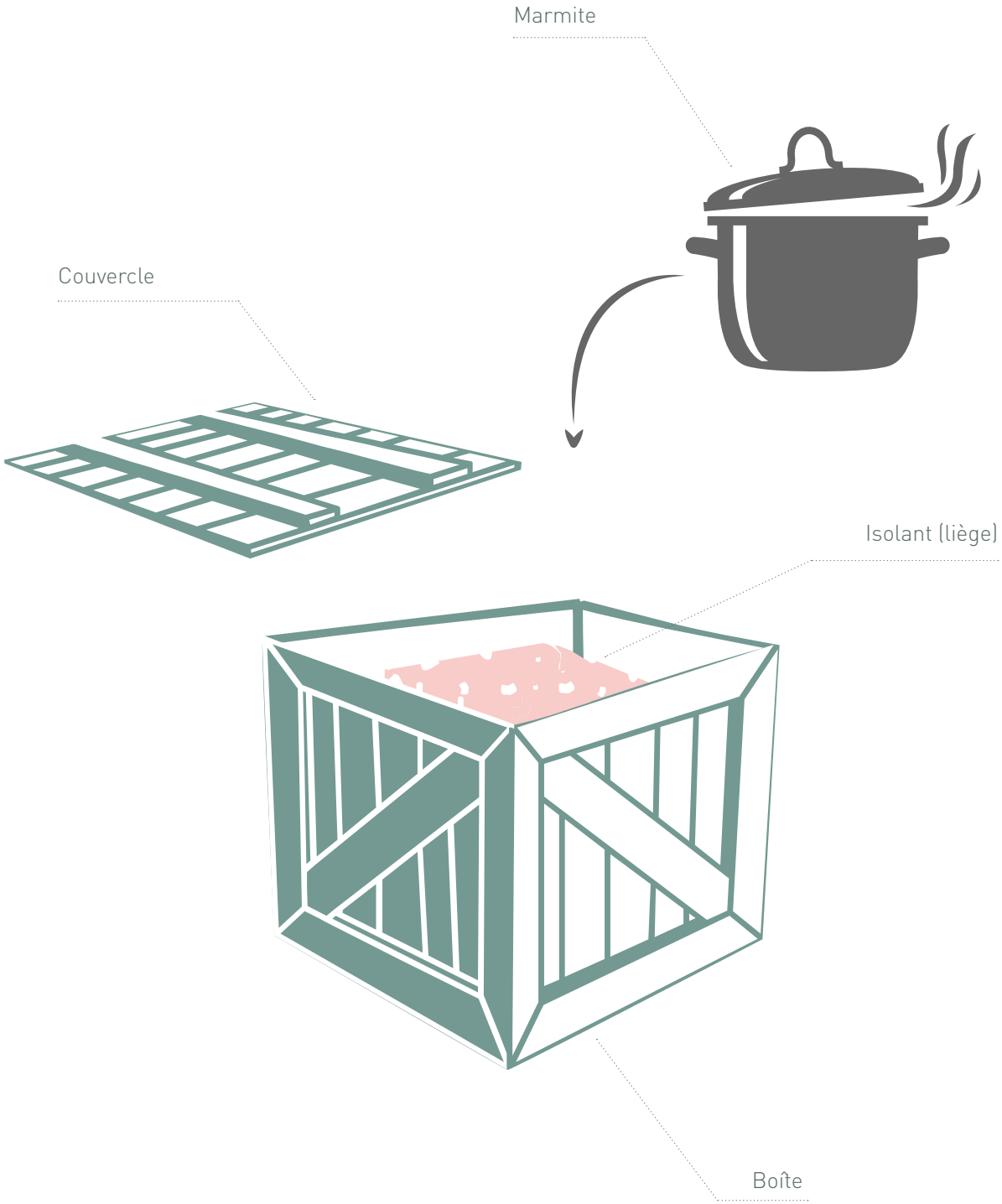
Un tiroir de l'habitat est dédié à cet usage. Une double paroi a été réalisée dans le tiroir permettant d'accueillir un isolant : des copeaux de liège expansé.
Lors de la cuisson de plat mijoté ou de riz, le récipient de cuisson est retiré dès le début de l'ébullition et placé dans le tiroir « norvégien » afin, d'une part, de terminer la cuisson de manière douce et, d'autre part, de garder le plat au chaud jusqu'à sa consommation.

DIMENSIONNEMENT DANS L'HABITAT LOW-TECH

L'épaisseur d'isolation est de 5 cm dans un coffrage en contreplaqué.
Des copeaux de liège expansé font office d'isolant.
L'enceinte intérieure permet l'installation de récipients d'une contenance d'environ 5 L.

Dans le cas d'un plat dont la cuisson est dite « sans brunissement », dans un liquide, la marmite norvégienne permet l'économie de 50% d'énergie par rapport à une cuisson complète sur le feu à gaz.

1. La mogette vendéenne est un plat traditionnel vendéen à base de haricots blancs et necessitant une cuisson particulièrement longue.
2. Selectra, *Appareils électriques : quelle consommation en kWh et en euros ?* (2019).
[en ligne] https://selectra.info/energie/guides/conso/appareils-electriques (consulté en 12/2019).


Marmite
Couvercle
Isolant (liège)
Boîte

2h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Isolant	5	5
Structure	36	0
Total	**41**	**5**

Euros

HYPOTHÈSES DE CALCUL

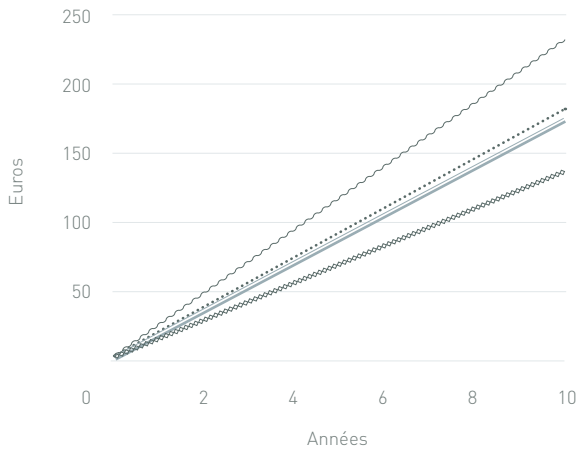
- Consommation moyenne énergétique pour la cuisson en France pour une à deux personnes : 135 kW.h/an d'énergie utile, après perte de rendement du système de cuisson
- Rendement d'une plaque à induction: 90% soit 150 kW.h/an de consommation
- Rendement d'une plaque électrique classique : 70% soit 192 kW.h/an de consommation
- Rendement d'une plaque au gaz : 60% soit 225 kW.h/an de consommation 3 & 4
- La marmite permet d'économiser 25% d'énergie par repas cuisiné : nous avons un très faible usage du four.
- Nous faisons une partie de nos repas avec une poêle, qui ne peut être utilisée avec la marmite norvégienne. Seul ce qui est en casserole peut se mettre dans le système.

3. Selectra, *Appareils électriques : quelle consommation en kWh et en euros ?* (2019). [en ligne] https://selectra.info/energie/guides/conso/appareils-electriques (consulté en 12/2019).
4. Eneco, *Induction ou gaz ? Telle est la question* (2017). [en ligne] https://blog.eneco.be/fr/economiser/induction-ou-gaz-telle-est-la-question/ (consulté en 12/2019).

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des moyens de cuisson sur 10 ans***

Cf Annexe II - ROI



Marmite norvégienne HLT + 75 % gaz
Gaz
Marmite norvégienne HLT + 75% induction
Induction

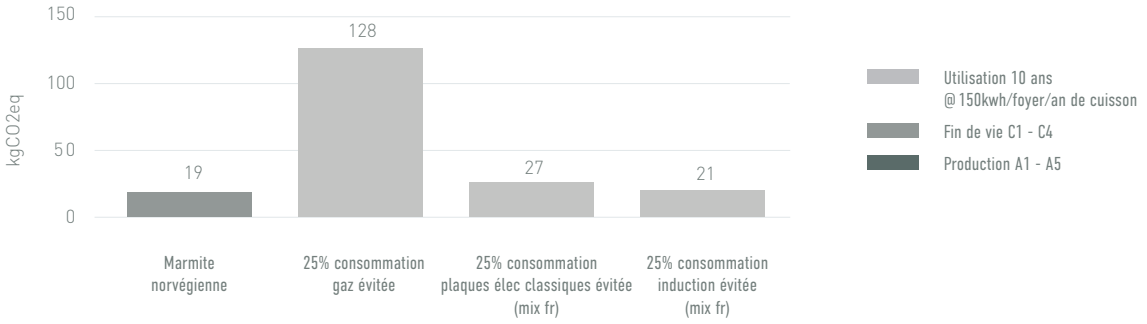
La marmite telle que nous l'avons réalisée, avec de la récupération, se montre rentabilisée rapidement d'un point de vue économique : 1 an pour une cuisson gaz, 0,8 année lorsque le mode de cuisson se fait sur plaque électrique classique, et 1,3 ans avec l'induction.
Cependant, si nous l'avions faite en neuf avec les mêmes matériaux, la rentabilité est moins évidente avec 7,9 années (gaz), 6,1 années (plaque électrique classique) et 9,8 années (induction).
Ces ordres de grandeur montrent qu'il vaut mieux réfléchir à des matériaux tout autant isolants et moins chers, ce qui est tout à fait possible à trouver.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV

→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de cuisson prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation



L'ÉLÉMENT LE PLUS IMPACTANT
EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Liège expansé → 90%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

La marmite norvégienne est essentiellement composée de bois et de liège expansé. Sans surprise, c'est le liège expansé qui réalise plus de 90% de l'impact négatif du système sur le potentiel de réchauffement global. En effet, le procédé pour expanser le liège est très consommateur d'énergie. Nous l'avons utilisé car nous avions des stocks disponibles ; cependant il serait simple de trouver un matériau moins impactant pour une efficacité similaire voire meilleure.

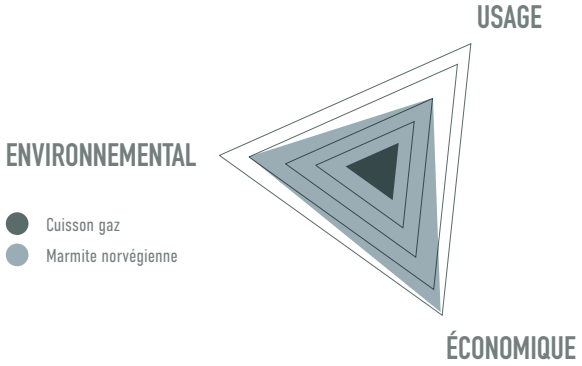
Nous pourrions par exemple creuser la piste du mycélium de champignon déshydraté.

En comparant le gain généré par la marmite que nous avons fabriquée et par rapport à son empreinte carbone, nous nous rendons compte qu'elle n'est pas des plus pertinentes dans le contexte de mix énergétique français. Cependant, le système de marmite reste tout de même intéressant à la condition de bien réfléchir aux matériaux utilisés.

CONFORT ET USAGE

\+ Le système a été, dès le début, intégré à notre cuisine, dans un tiroir aménagé, à proximité des plaques de cuisson. Les manœuvres sont donc relativement courtes et aisées. Le système est esthétiquement inclus à l'habitat. Nous nous sommes rendus compte que nous avions des habitudes de cuisson qui nous faisaient peu faire de plats mijotés, nous utilisons beaucoup la poêle, qui ne peut aller dans la marmite norvégienne. C'est donc principalement les féculents (pâte, riz, pommes de terre) que nous mettons dans le système. Cependant, la présence de cette low-tech nous a permis de nous réapproprier certains plats mijotés.
Pour des cuissons courtes, type riz, en plus d'une économie d'énergie, l'usage de la marmite permet une meilleure qualité de cuisson que si nous devions gérer le feu, pour une durée quasi identique. Nous ne faisons plus brûler les fonds de casseroles ! Elle permet de plus, de garder le plat au chaud. C'est donc un gain de confort pour une seule manipulation : placer le récipient dans le tiroir-marmite.

\− Pour des cuissons plus longues, l'usage de la marmite norvégienne demande une petite organisation car la cuisson va être plus lente que sur le feu. Il faut donc prévoir la cuisson plus en amont. Nous faisons ces remarques via notre prisme cependant nous ne sommes pas des cuisiniers avertis ! Il faudrait pousser l'usage plus loin pour vraiment étudier la conservation des qualités gustatives des plats entre une cuisson traditionnelle et une marmite norvégienne.



Bilan

Dans notre cas, c'est la combinaison « cuisson gaz/marmite norvégienne » qui est intéressante car elle représente le coût énergétique le plus faible et permet une bonne réduction d'émission de GES.
Avec des possibilités de formes et de matières très variées, le principe de marmite norvégienne peut très facilement s'adapter à tous les contextes : rural, urbain, locataire.

Cependant, que ce soit sur l'aspect économique ou écologique, un vrai travail est à faire pour, à la fois, réduire le coût du système neuf et son empreinte carbone afin qu'il gagne en pertinence pour tous les modes de cuisson, et qu'il soit intéressant à diffuser.

C'est également le type de low-tech qui permet un côté ludique et sensibilisateur, une porte d'entrée pour une prise de conscience écologique et des actions plus importantes par la suite.

PISTES D'AMÉLIORATION

Matériau isolant • Ayant des stocks disponibles, nous avons utilisé du liège expansé. C'est ce matériau qui réalise la principale empreinte écologique de notre système sans que cela soit justifié par ses performances isolantes. Nous souhaiterions étudier la piste de l'isolation en brique de mycélium déshydraté.

Matériau souple • De nombreuses cuisines, notamment en milieu urbain, sont relativement petites pour se permettre de sacrifier un tiroir à cet usage, comme nous l'avons fait. Il serait bon de creuser la piste de modèles de marmites souples et très isolantes.

Garde-manger

Le garde-manger, autrefois très répandu, notamment dans les campagnes, est en général un meuble grillagé suspendu, bien souvent à l'extérieur d'une maison.
On va pouvoir y conserver certains types d'aliments, à l'abri des attaques (rongeurs, etc).
Il a connu un déclin dès l'arrivée des réfrigérateurs.

**Aujourd'hui, une bonne partie du gaspillage alimentaire domestique se réalise dans le réfrigérateur.
En cause, une mauvaise connaissance des ambiances de conservation par aliment, des problématiques de design du produit (les aliments les plus vieux se retrouvent au fond) et des problématiques d'organisation de la part des consommateurs.**

LE GARDE-MANGER DANS L'HABITAT LOW-TECH[1]

Conserver n'est pas synonyme de *faire du froid*. À chaque aliment, son ambiance de conservation.
Intégré à la conception de la cuisine, le garde-manger de l'habitat low-tech se compose de 4 types d'ambiances de conservation :
• Sec, aéré, à la lumière, matérialisé par des tiroirs-claies
• Sec, aéré, à l'ombre, réalisé par un tiroir doublé de toile de jute
• Humide, frais, à l'ombre mis en œuvre pas un caisson en bois, suspendu à l'extérieur de la façade nord de l'habitat et dont l'accès se fait depuis une fenêtre dans la cuisine
• Humide, froid effectué avec un réfrigérateur d'occasion de 40 L, connecté à l'électricité seulement pendant les périodes critiques estivales

Cet ensemble d'ambiances de conservation permet l'optimisation de la conservation pour un bon nombre d'aliments frais tout en ayant un impact économique et écologique le plus faible possible.

DIMENSIONNEMENT DANS L'HABITAT LOW-TECH

Le garde-manger de l'habitat low-tech est pensé pour 2 personnes.
• Ambiance sec, à la lumière :
3 tiroirs-claies de 600mm*600mm*150mm
• Ambiance sec, à l'ombre :
1 tiroir-claie ombré de 600mm*600mm*250mm
• Ambiance humide, frais :
2 tiroirs-claies dans un caisson extérieur de 250mm*500mm*150mm ainsi qu'un range-bouteilles
• Ambiance froid : un réfrigérateur d'occasion, 40L, connecté suivant les épisodes de chaleur
Le tout est principalement réalisé en bois de peuplier, bois adapté au contact alimentaire.

Ces tiroirs sont inclus dans la cuisine plus largement pensée pour accueillir également bocaux pour du sec en vrac et plan de travail.

1. Low-tech Lab, *Garde-Manger* (2019). [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Garde-Manger (consulté en 12/2019).

Sec et lumineux
Tiroirs-claies
(abricots, aubergines, avocats,
bananes, agrumes, tomates,
œufs ...)
Sec et sombre
Tiroir-claie sombre
(pommes de terres,
oignons, ail, courges,
prunes, pêches ...)
Humide et frais
Range-bouteilles
Tiroirs-claies extérieurs
(carottes, champignons,
concombres, courgettes,
poireaux, salade ...)
Ambiance froid
Réfrigérateur en période estivale
(viandes, poissons, produits laitiers,
produits cuisinés, boissons fraîches ...)

10h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Adhésif	3	3
Collage	2	2
Conserver	45	45
Refroidir	100	60
Total	**150**	**110**

Euros

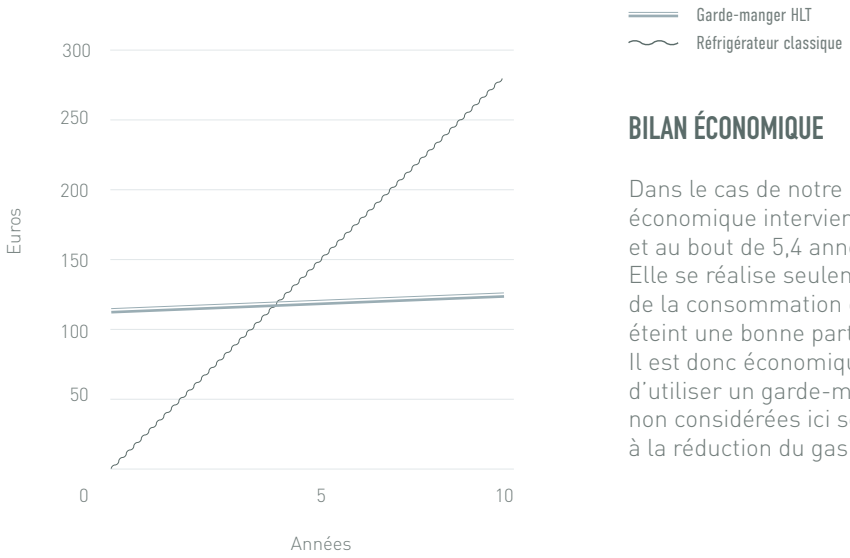
HYPOTHÈSES DE CALCUL

- Consommation annuelle moyenne d'un réfrigérateur en France : 200 kW.h/an[2]
- Consommation annuelle moyenne du réfrigérateur 40 L A+ de l'habitat low-tech : 8 kW.h/an (branché 1 mois durant l'été 2019)[3 & 4]
- Le calcul du ROI n'est basé que sur l'économie d'électricité réalisée par la diminution de la consommation électrique d'un réfrigérateur.
- La réduction du gaspillage alimentaire n'a pas été quantifiée

2. ADEME, *Réduire sa facture d'électricité* (2019).
[en ligne] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-reduire-facture-electricite.pdf (consulté en 12/2019).
3. ENGIE, *Tout savoir sur la consommation de votre réfrigérateur* (2018).
[en ligne] https://particuliers.engie.fr/economies-energie/conseils/bien-choisir-ses-equipements/tout-savoir-sur-la-consommation-de-votre-refrigerateur.html (consulté en 12/2019).
4. Énergie consommée par un réfrigérateur 40L à l'année : 100kW.h donc 8kW.h pour 1 mois

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des moyens de conservation alimentaire sur 10 ans*** *Cf Annexe II - ROI*



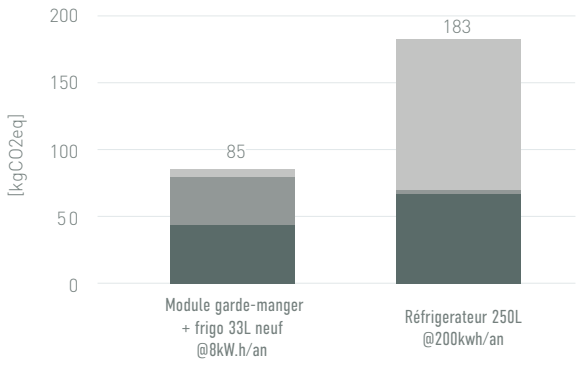
BILAN ÉCONOMIQUE

Dans le cas de notre installation, la rentabilité économique intervient au bout de 4,1 années et au bout de 5,4 années pour du matériel neuf. Elle se réalise seulement sur la réduction forte de la consommation électrique du réfrigérateur, éteint une bonne partie de l'année.
Il est donc économiquement tout à fait pertinent d'utiliser un garde-manger, d'autres économies non considérées ici seront réalisées grâce à la réduction du gaspillage alimentaire.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV



→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de conservation alimentaire prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

- Utilisation 10 ans
- Fin de vie C1 - C4
- Production A1 - A5

L'ÉLÉMENT LE PLUS IMPACTANT
EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Réfrigérateur → 85%

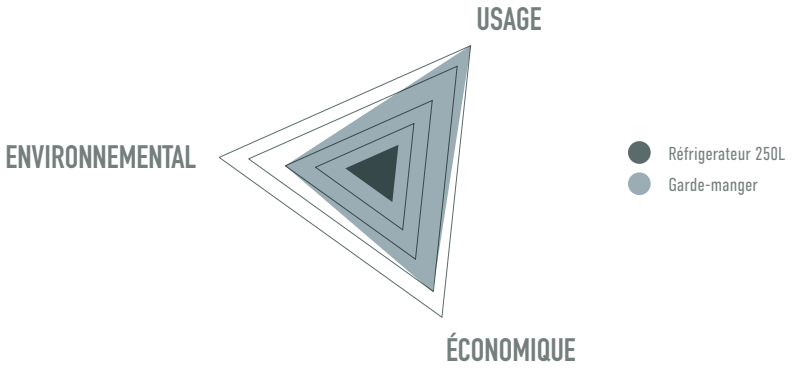
BILAN ENVIRONNEMENTAL

Sans surprise, c'est notre réfrigérateur 40 L qui est le plus impactant sur un plan environnemental (85% de l'empreinte carbone). Il est donc très intéressant de l'acquérir en occasion et non en neuf.

CONFORT ET USAGE

\+ À l'usage, le garde manger de l'habitat low-tech est globalement très satisfaisant : la meilleure visibilité sur les aliments qu'offre le système de tiroirs-claies permet de repérer très rapidement les aliments à consommer en premier (contrairement à un réfrigérateur classique). Ce point permet de participer à la réduction du gaspillage alimentaire.
En bénéfice collatéral, l'usage de tiroirs-claies pensé notamment pour les fruits et légumes nous invite en tant qu'usager à acheter plus d'aliments bruts et de fruits et légumes. Cela évite l'achat de produits transformés nécessitant un stockage au froid. Le ressenti n'a pas été une perte de confort mais une invitation à modifier certaines habitudes. Ce système nous encourage dans la démarche de circuits courts et de qualité pour les aliments.
De même, invités à acheter les légumes en vrac, nous avons noté une diminution de la production des déchets d'emballage.

− Concernant spécifiquement le gaspillage alimentaire, nous avons commencé l'expérience sans réfrigérateur de 40L. Nous sommes consommateurs de produits laitiers type fromage et beurre. Les premiers jours de canicule durant l'été 2019 ont engendré le gaspillage de ce type d'aliment. C'est pourquoi nous avons ajouté un petit réfrigérateur. Il a été branché 1 mois durant l'été, pour la conservation des produits laitiers et pour garder aux frais quelques boissons.



Bilan

Le garde manger étant un mobilier, il est possible de l'adapter à tous types d'habitat, que ce soit en contexte urbain, locataire, ou rural. Cependant, attention à l'effet rebond.
Il est plus indiqué d'inciter l'usager à réduire l'utilisation de son réfrigérateur existant en complément d'un garde-manger, plutôt que de le voir jeter son ancien et en acheter un neuf, certes mieux dimensionné, mais a fortiori plus impactant sur les plans économique et écologique.

Il est intéressant de noter la cascade d'effets positifs que peut engendrer ce système car il invite à repenser ses consommations et sa production de déchets.
Bien que sa rentabilité ne soit pas immédiate, c'est une bonne low-technologie pour entrer dans une démarche de changement sans modifier significativement son confort.
Il est donc intéressant à diffuser plus largement dans tous les contextes.

PISTES D'AMÉLIORATION

La principale piste d'amélioration du système se situe dans son design : comment faire en sorte qu'il puisse facilement être adapté à tous types de cuisine ? Dans notre cas, nous avons un peu trop de surface de claie, il est possible de rendre le système plus compact.

Eau pluviale

Collecter, stocker et purifier l'eau de pluie permet de bénéficier d'une ressource gratuite et potentiellement largement abondante en fonction des régions et saisons.

Un français consomme en moyenne 143 litres d'eau par jour dont 7% pour la boisson et la préparation des repas et 93% pour : l'hygiène corporelle (40%), les sanitaires (20%), la lessive (12%), la vaisselle (10%) et l'entretien de l'habitat[1].
L'utilisation d'eau potable pour la majeure partie de ces usages est une sur-qualité.

Dans le cadre du projet, collecter la pluie est le moyen le plus simple de disposer d'eau sans être raccordé à un réseau d'adduction.
L'utilisation d'eau pluviale comme eau domestique repose sur différents éléments :
La collecte → la préfiltration → le stockage → la filtration → la mise sous pression du réseau → la potabilisation

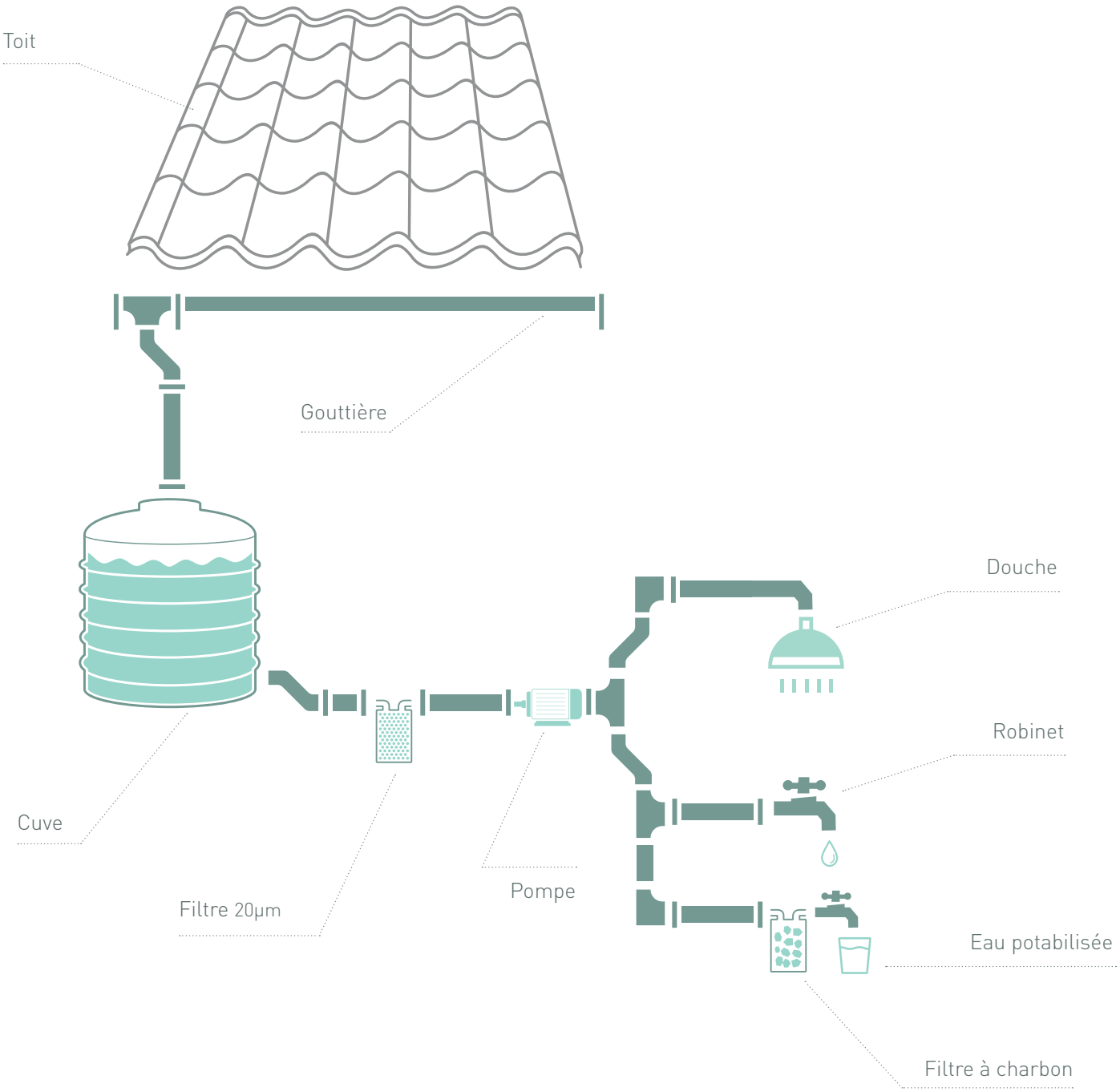
LA COLLECTE D'EAU PLUVIALE DANS L'HABITAT LOW-TECH[1]

L'eau de pluie est collectée via la toiture. La gouttière est équipée d'un système de préfiltration (1mm) qui permet de débarrasser l'eau des grosses impuretés (feuilles, plumes, insectes...).
L'eau rejoint ensuite la cuve de stockage. Idéalement, l'eau de pluie collectée doit être stockée dans une cuve de béton de grande capacité, enterrée. L'eau de pluie est légèrement acide et déminéralisée. Le béton permet de corriger cette acidité et de partiellement minéraliser l'eau.
Un grand volume de cuve permet de stocker lors des pics de fortes précipitations et de pallier les périodes de sécheresse.
Un système enterré permet de priver l'eau du rayonnement solaire et de limiter les variations de température, tous deux favorables au développement bactérien.
Ces trois éléments : béton, grande capacité et fouille, sont incompatibles avec le cahier des charges de l'habitat low-tech, soit une maison nomade qui ne laisse trace d'aucune activité humaine à son départ. La maison est équipée d'une cuve en plastique.
À la suite de la filtration l'eau est mise sous pression par une pompe pour être distribuée dans le réseau de la maison. Seules les eaux de consommation (boisson et de cuisson) sont « purifiées » par l'utilisation de filtres à charbon actif.

Attention, l'utilisation d'eau pluviale pour un usage domestique est réglementée et limitée : « Le ministère chargé de la santé entend rester vigilant dans l'application de cette réglementation, afin de conserver les acquis en termes d'hygiène publique obtenus par l'alimentation en eau potable de l'ensemble de la population française. »[2]

DIMENSIONNEMENT DANS L'HABITAT LOW-TECH

Pour dimensionner le système de l'habitat low-tech nous avons étudié nos consommations quotidiennes et les précipitations moyennes mensuelles. Ce calcul (cf Annexe IV - Profil hydrique) nous a permis de dimensionner la surface de captation et le volume de stockage minimum.
La surface de captation est actuellement de 14m² (projection au sol). Le double est prévu avec la présence d'une serre.
Une cuve de 200 litres et un ballon d'eau chaude de 90 litres sont intégrés à la maison. Une cuve de 1000 litres supplémentaires est présente à l'extérieur.
L'eau est filtrée à 50 puis 20µm. La pompe a un débit de 13 litres/minutes. L'eau de consommation est « potabilisée » par un filtre à charbon actif.



HYPOTHÈSES DE CALCUL

- Le prix de la toiture n'est pas pris en compte
- La pompe consomme 2 W.h/jour
- Le prix d'installation d'un système de collecte d'eau pluviale sur le marché est de 5000€ (cuve en béton de plusieurs milliers de litres). HC
- 100% de l'eau consommée est issue de l'eau de pluie, donc gratuite
- Les filtres à charbon actif ne sont pas comptabilisés dans l'analyse de cycle de vie. Ils doivent être changés tous les 10 ans[3]
- Le coût et l'impact de l'excavation pour le raccordement sont exclus

1. ADEME, *Eau et énergie : Quelle consommation ?* (2019)
[en ligne] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/infographie-economiser-eau-energie-2019.pdf (consulté en 12/2019)
2. Ministère de la solidarité et de la santé, *Usage domestique d'eau de pluie* (2015).
[en ligne] https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/article/usage-domestique-d-eau-de-pluie (consulté en 12/2019).
3. Berkey, *Filtre à eau Black Berkey* (2019).
[en ligne] https://www.berkeywaterfilterseurope.fr/filtres-a-eau-black-berkey (consulté en 12/2019).

5h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

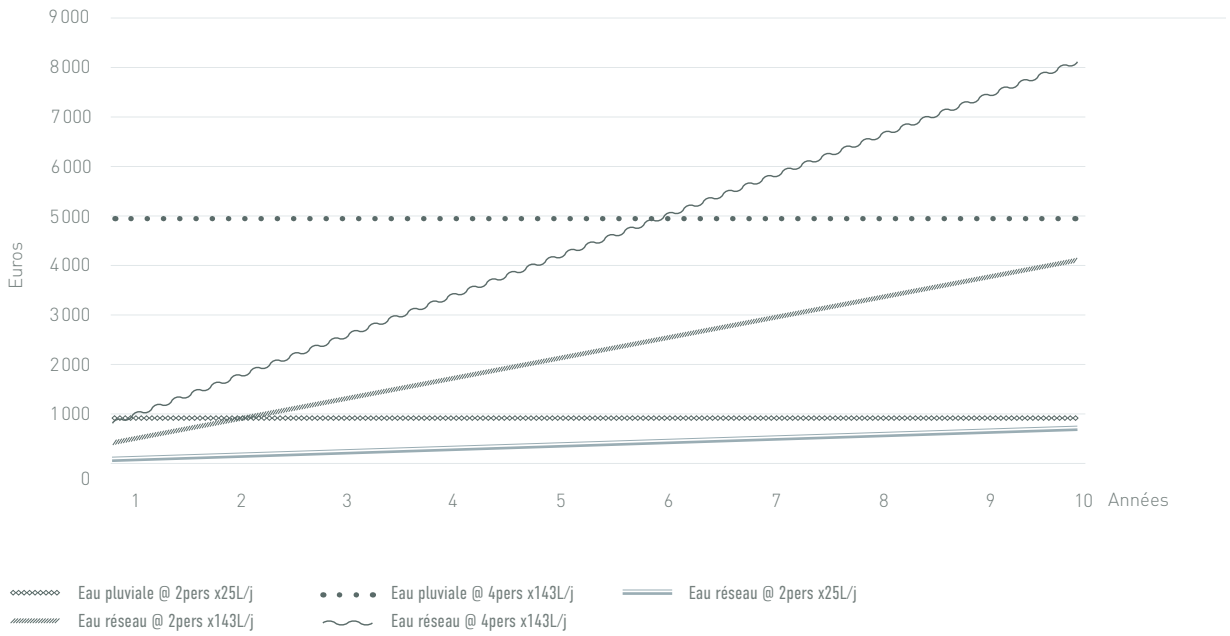
FONCTION	COÛT NEUF (Euros)
Gouttière	10
Cuves	345
Filtration	55
Pressurisation	220
Potabilisation	300
Total	**930**

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

Cf Annexe II - ROI

→ *Coût des moyens de consommation d'eau sur 10 ans*



BILAN ÉCONOMIQUE

• Dans le cas où nous vivons à deux dans la maison low-tech, en consommant chacun 25 L d'eau par jour, le retour sur investissement, en ne consommant pas d'eau du réseau, se ferait au bout de 13 ans, si nous étions déjà raccordés au réseau.

• Si nous consommions chacun 143 litres d'eau par jour (moyenne française) en étant deux personnes, sans consommer l'eau du réseau, le ROI aurait lieu après 2 ans et quelques mois.

• Si nous vivions à 4, en consommant selon la moyenne française et en faisant installer un système classique (cuve de plusieurs milliers de litres en béton), le ROI aurait lieu après 7 ans d'utilisation, sans consommer d'eau du réseau, si nous étions déjà raccordés au réseau.

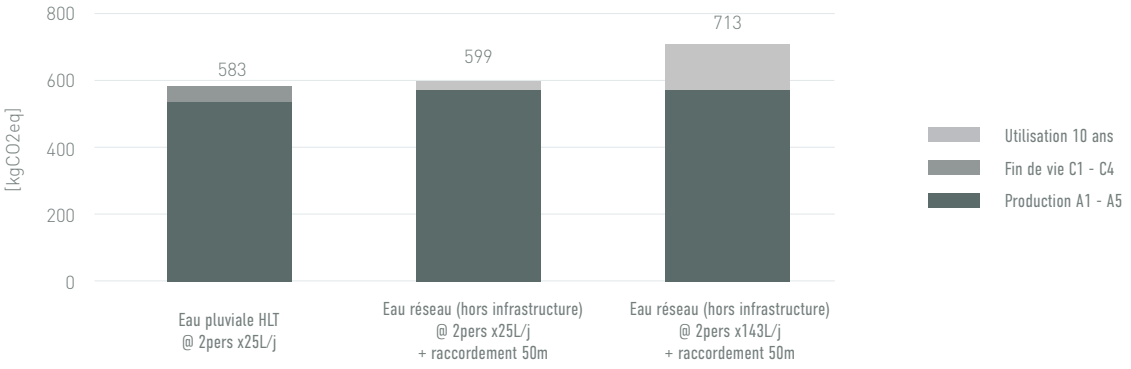
• Si le terrain n'est pas viabilisé, l'excavation, la pose du réseau et la viabilisation ont un prix minimum de 2000€. Dans cette situation, une installation autonome peut être intéressante dès l'investissement, particulièrement si le réseau d'adduction publique est éloigné.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV

→ Potentiel global de réchauffement climatique des moyens de consommation d'eau prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation



L'ÉLÉMENT LE PLUS IMPACTANT
EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Cuves → 58% Pompe → 39 % Berkey inox → 3%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

Au regard du potentiel de réchauffement climatique seul, la collecte d'eau pluviale ne permet pas forcément de réduire les émissions de GES, particulièrement si l'habitat est déjà raccordé au réseau d'eau potable.
En effet la consommation d'eau du réseau (l'utilisation) ne représente que 4% de l'impact total du cycle de vie en potentiel global de réchauffement.

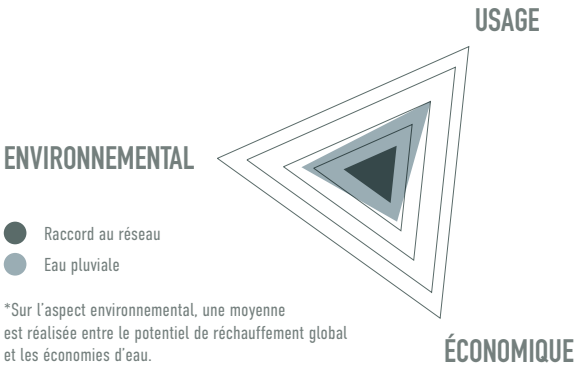
Par contre, du point de vue de l'économie d'eau, avec notre usage, sur 10 ans, il nous permet, à deux, d'économiser 182 000 litres d'eau.
Un foyer de 4 personnes avec une consommation moyenne économiserait plus de deux millions de litres d'eau traitée.

CONFORT ET USAGE

(−) Nous n'avons pas réalisé la serre devant doubler la surface de captation d'eau pluviale, la cuve de 1000 litres a été installée en fin d'été et la canicule a sévi, même en Bretagne.
Nous avons donc manqué d'eau aux mois de juillet et août. Pour continuer à vivre « normalement » nous avons dû ramener environ 300 litres d'eau manuellement. Le manque d'eau est très contraignant.
Avec notre très faible volume de stockage, un certains stress a pu naître quand la météo est restée au beau fixe. Vivre avec un stock limité d'eau donne une valeur importante à ce besoin de premier ordre. La « potabilisation » par les filtres à charbon actif, par gravité, prends un peu de temps, il faut l'anticiper.

(+) Remettre les choses à leur juste valeur fait du bien, cela permet de libérer l'esprit des nombreuses vanités du quotidien. Adapter sa consommation à la météo semble naturel.
Être indépendant du réseau d'adduction d'eau, qui est complexe et centralisé, est rassurant.
La satisfaction de profiter de l'eau de pluie est très élevée, une forte impression d'être relié à son environnement se fait ressentir. Collecter l'eau de pluie est une très bonne raison d'apprécier les précipitations. L'eau, sans le conventionnel goût de chlore, est bien meilleure.
Personne n'a signalé être malade après avoir consommé l'eau de la maison low-tech.

Attention, consommer l'eau de pluie, même après purification mécanique implique une forte responsabilisation des usagers et demande des contrôles réguliers.
Une activité bactérienne pathogène peut se développer rapidement.



Bilan

Si l'habitat est déjà raccordé au réseau d'eau potable, les retours sur investissement économique et en équivalent CO2 peuvent prendre du temps. Le stockage de l'eau demande un volume important, il est plus simple d'intégrer la collecte d'eau pluviale dès la conception du projet d'habitat individuel ou collectif. Si de l'espace est disponible en cave ou en terrain, il est possible d'intégrer ce principe dans une maison existante.

Si le dimensionnement et l'installation sont bien réalisés, dépendre entièrement de l'eau de pluie apporte une responsabilisation et un bien-être de haut niveau.

PISTES D'AMÉLIORATION

Surface de captation • Pour coller aux statistiques de précipitations et répondre à notre besoin en eau il nous faut augmenter la surface de captation.
Citerne en béton • Bien que non applicable dans le cadre d'un projet nomade, une citerne en béton enterrée est une vraie plus-value.
Visibilité du volume d'eau • Connaître facilement le volume d'eau disponible serait un plus.
Minéralisation de l'eau de pluie • C'est par une alimentation saine et équilibrée que nous absorbons la majorité des minéraux nécessaires au bon fonctionnement du corps humain. Toutefois une consommation prolongée d'eau de pluie, déminéralisée, pourrait générer des carences. Le stockage en cuve de béton permet d'apporter une partie de ces éléments nécessaires mais pas tous. Il serait intéressant d'étudier les potentiels manques associés à une consommation d'eau pluviale et comment y remédier. Nous n'avons pas connaissance de données scientifiques fiables sur le sujet.

Toilettes sèches

Un français consomme en moyenne 10 000 litres d'eau par an pour la chasse d'eau. Cela représente 20% de la consommation d'eau d'un foyer, soit prêt de 160€ par an pour un foyer de 2 personnes.

Les toilettes sèches se présentent comme une solution très intéressante, principalement en contexte rural car les zones de compostage et la récupération de matières carbonées type sciure de bois non traité ou autres peuvent facilement être approvisionnées. Les toilettes sèches permettent d'aborder la thématique du déchet comme une ressource.

En effet, l'urine et les excréments sont riches en azote et autres composants qui, mélangés avec le bon taux de matière carbonée, permettent l'obtention d'un compost riche. Celui-ci sera utilisable au bout d'un an et demi à deux ans pour la plantation d'arbres ou de plantes ornementales. Par principe de précaution envers les hormones et antibiotiques présents dans nos excréments, on évitera l'usage pour des plantes comestibles.

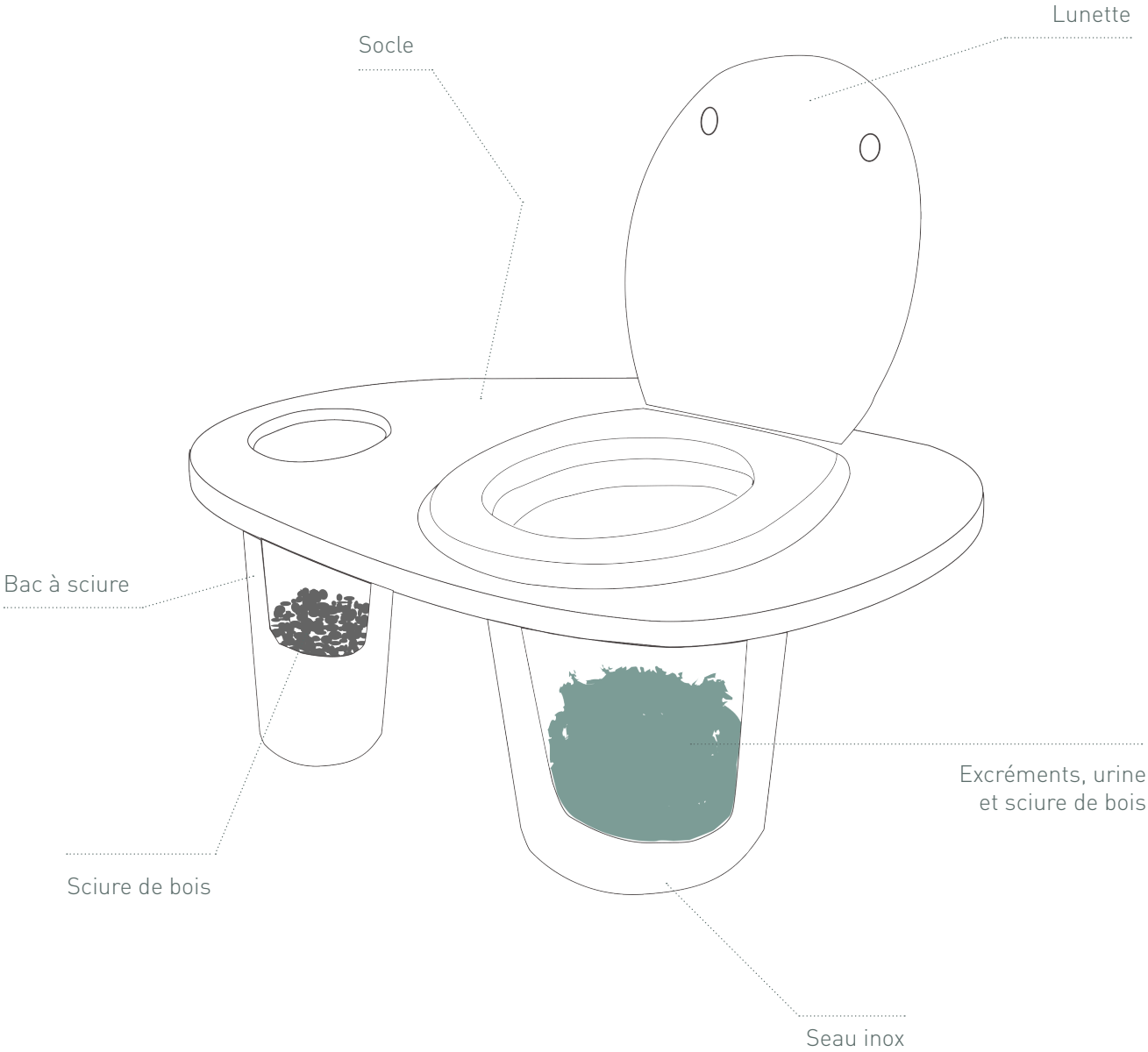
TOILETTES SÈCHES INSTALLÉES DANS L'HABITAT LOW-TECH

Les toilettes sèches de l'habitat low-tech font parties des toilettes dites « à litière biomaitrisée »[1]. Il s'agit d'un caisson en bois contenant un seau en inox sur lequel est installée une lunette de toilette classique. Sur le côté, se trouve un bac à sciure. La sciure est fournie par un charpentier local qui ne la valorise pas autrement. La ventilation éolienne de l'habitat low-tech est reliée au caisson pour que l'air de l'habitat soit aspiré via les toilettes assurant ainsi aucun désagrément d'odeur.

1. Low-tech Lab, Toilettes sèches familiale (2017). [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Toilettes_s%C3%A8ches_familiales (consulté en 12/2019).

DIMENSIONNEMENT DANS L'HABITAT LOW-TECH

Notre caisson de toilette est réalisé en bois, peuplier et thuya pour le plateau haut. La lunette de toilette a été récupérée dans un dépôt. Le seau en inox est neuf et d'un volume de 15L.


Lunette
Socle
Bac à sciure
Excréments, urine
et sciure de bois
Sciure de bois
Seau inox

3h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Lunette WC	50	0
Aération	20	20
Assise	31	31
Colle	2	2
Habillage	3	3
Litière	0	0
Quincaillerie	8	8
Seau	58	58
Stock sciure	1	1
Structure	7	7
Total	**179**	**129**

Euros

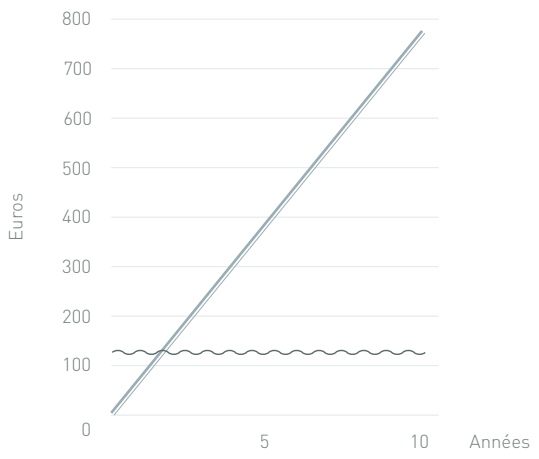
HYPOTHÈSES DE CALCUL

- La masse moyenne des selles d'un humain est de 150 g/jour
- Un volume de sciure remplaçant une chasse dans le cas de toilettes sèches pèse 0,15 kg
- 4 volumes de sciure par personne "équivalent chasse" par jour
- Le calcul de rentabilité des toilettes sèches s'effectue sur les économies d'eau
- Les matières carbonées (ici sciure de bois non traité) sont récupérées gratuitement
- La logistique liée à la récupération des matières carbonées n'est pas prise en compte
- Le compostage ou assainissement sont pris en compte on ne comptabilise pas la masse d'urine dans le compostage pour l'ACV

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des types de toilettes sur 10 ans***

Cf Annexe II - ROI

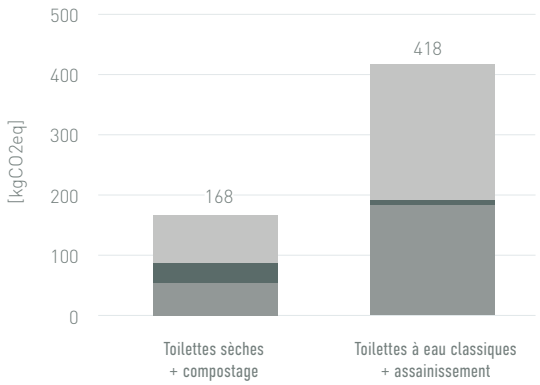


De la façon dont nous avons réalisé nos toilettes sèches, le retour sur investissement intervient au bout de 1,6 ans. Dans le cas de matériel entièrement neuf, il faudrait 2,3 ans. C'est donc une solution intéressante sur cet aspect. Cela permettrait d'économiser 80€/an pour 2 personnes soit près de 800€ en 10 ans.
À bien noter que la rentabilité est calculée en comptant que la matière sèche carbonée est récupérée gratuitement (c'est le déchet de nombreuses entreprises et artisans du bois).

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV



→ Potentiel global de réchauffement climatique des types de toilettes prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

- Utilisation + traitement 10 ans
- Fin de vie C1 - C4
- Production A1 - A5

L'ÉLÉMENT LE PLUS IMPACTANT EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Tube d'aération en acier galvanisé → 63%
Seau en inox → 21% Lunette de WC → 7,5%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

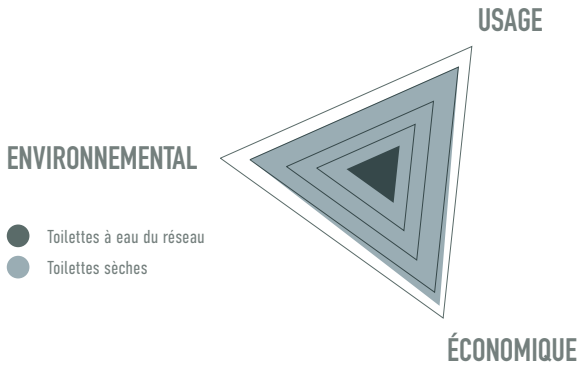
Bonne nouvelle concernant l'impact environnemental de nos toilettes sèches : plus de la moitié de l'impact est réalisé par une pièce non-essentielle du système : le tube d'aération en galva installé avant d'avoir connaissance de son potentiel de réchauffement climatique. Il est donc aisé de le remplacer par un matériau bien moins impactant pour diviser par 2 l'impact général.

Dans tous les cas, les toilettes sèches telles que nous les avons installées ont un impact bien meilleur que le seul usage de l'eau potable dans la chasse d'eau de toilettes classiques utilisée sur la même période.

CONFORT ET USAGE

\+ Durant la phase d'utilisation classique des toilettes sèches, nous avons identifié un gain de confort par rapport à des toilettes à eau : peu de bruit, pas d'odeur et un ressenti d'hygiène du module supérieur à des toilettes en céramique.
Nous avons également maintenant une gêne psychologique à utiliser des toilettes à eau potable de part le gâchis que cela représente.
Les toilettes sèches nécessitent une vidange du seau lorsqu'il est plein.
L'opération dure cinq minutes, le temps de traverser l'habitat, d'aller vider le seau au compost, de le rincer, de l'installer puis de se laver les mains correctement.
Dans notre cas, nous n'avons pas de problème de confort avec cette étape, nous avons même une certaine satisfaction de remettre un de nos déchets à la nature pour en faire une ressource.

− Cependant, lors de la présence d'invités à la maison, la sortie du seau en public peut se révéler gênant pour les non-initiés.
Le seul point ayant posé question est l'aménagement de la zone de compost pour pouvoir vider le seau sans risque de projection sur ses habits ainsi que d'avoir un endroit où accéder facilement à des brosses, gants, eau, etc.



Bilan

Rapidement rentable et écologiquement plus intéressant que les toilettes à eau en céramique, ce type de système mérite une belle diffusion.
Dès que quelques m² de parcelles sont disponibles pour installer un compost, l'usage des toilettes sèches devient pertinent.

Cependant, en contexte principalement urbain, un vrai défi s'impose pour à la fois garantir un apport en matières carbonées et une logistique de récupération de la matière organique lors d'un manque d'espace de compostage. C'est peut-être aux collectivités d'organiser ce type de circuit au même titre que les poubelles de tri, sachant de plus que le compost peut être valorisé.
Certaines villes comme Lorient proposent déjà un service de collecte des déchets organiques.
Sur l'aspect appropriation par les individus, un gros travail de sensibilisation reste à faire pour déconstruire les représentations négatives de ce type de toilettes, sur les tabous, l'hygiène, etc.

PISTES D'AMÉLIORATION

Aspect environnemental • L'acier galvanisé pour l'aération est le facteur de loin le plus impactant.
Il semble facile de le remplacer par un autre matériau (tubes en carton par exemple).

Aspect confort • La phase de vidange est vraiment celle qui peut poser problème pour l'acceptation de ce système. Une réflexion sur comment gérer les flux de matières organiques doit être menée.

Douche à recyclage

Qui n'a jamais rêvé de passer du temps sous la douche sans avoir la culpabilité d'un grand sacrifice écologique ? Ce sentiment est justifié, la douche est le plus gros poste de consommation d'eau de la maison. Avec, en moyenne, 60 litres d'eau par jour par français, la douche représente 40% de notre consommation. Mais le sombre bilan de la douche, ou du bain (200 litres), ne s'arrête malheureusement pas là ; l'énergie consommée dans la salle de bain pour chauffer l'eau représente plus de 10% de notre facture énergétique annuelle, plus de 300€/an par foyer.[1 & 2]

La douche à recyclage semble prometteuse : fonctionner en circuit fermé le temps d'une douche pour consommer beaucoup moins d'eau et d'énergie. Le système est déjà bien connu car largement utilisé dans les spas pour réduire la consommation des douches massantes.

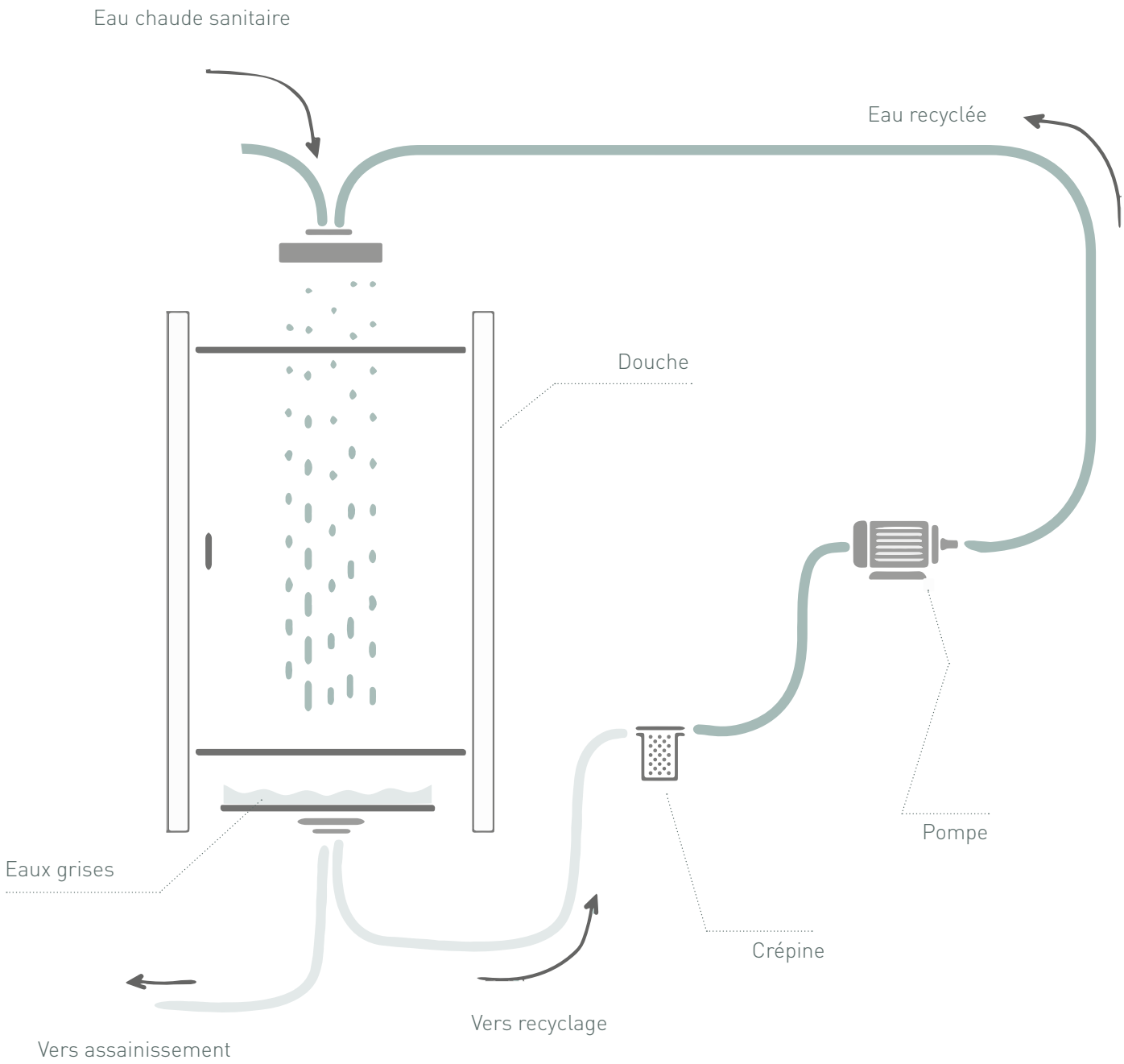
LA DOUCHE À RECYCLAGE DE L'HABITAT LOW-TECH

La douche à recyclage que nous avons documentée lors du Low-tech Tour France ne nous a pas convaincus. En effet, séparer le savon de l'eau savonneuse nécessite l'usage de filtres qui vont rapidement se colmater. Remplacer ces filtres fait vite grimper les coûts économique et environnemental de l'installation.
De plus, dans la maison autonome nous nous sommes interdits de chauffer à l'électricité (voir installation électrique et négaWatt). Un chauffe-eau à gaz, instantané et avec régulation, est très onéreux. Par souci de simplification nous avons donc retiré la filtration et la chauffe, et ne recyclons que les eaux "propres". L'usage est donc légèrement différent du principe initial, relativement proche du fonctionnement des lave-vaisselles basse consommation[3] : les eaux souillées (lavage, rinçage et rinçage du bac de douche) sont évacuées vers l'assainissement, comme pour une douche classique. Si l'utilisateur souhaite rester sous la douche il peut passer en recyclage en bouchant la bonde puis activer la pompe de recyclage. L'eau du circuit fermé passe seulement dans une crépine pour retirer les gros éléments comme les cheveux. N'étant pas réchauffée dans ce circuit, on ajoute un peu d'eau très chaude à l'eau recyclée pour maintenir une température d'eau confortable.

DIMENSIONNEMENT DANS L'HABITAT LOW-TECH

En plus des éléments standards d'une douche, ce système intègre une surverse pour boucher la bonde et éviter les débordements, ainsi qu'un plancher amovible, une crépine, une pompe 12 litres/minute et une vanne mélangeuse 3 voies.

1. ADEME, *L'eau chaude sanitaire* (2019).
[en ligne] https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/bien-gerer-habitat/leau-chaude-sanitaire (consulté en 12/2019).
2. ADEME, *Eau et énergie : Quelle consommation ?* (2019).
[en ligne] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/infographie-economiser-eau-energie-2019.pdf (consulté en 12/2019).
3. Spareka, *Comment fonctionne un lave vaisselle ? le circuit d'eau* (2016).
[en ligne] https://www.youtube.com/watch?v=mjcwArj9nPs (consulté en 12/2019).


Eau chaude sanitaire
Eau recyclée
Douche
Pompe
Eaux grises
Crépine
Vers recyclage
Vers assainissement

3h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF (Euros)
Plancher	20
Plomberie	60
Pompe	70
Total	**150**

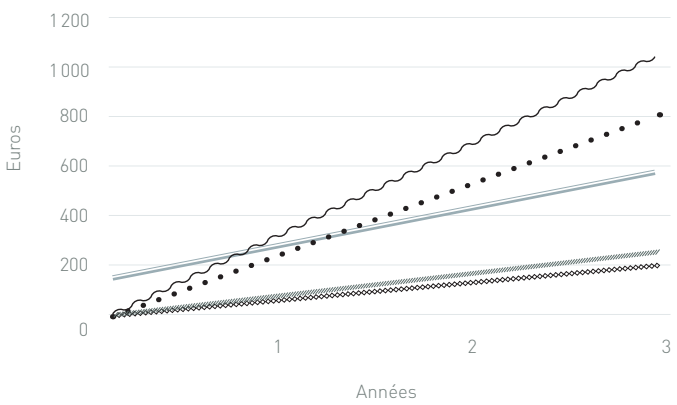
HYPOTHÈSES DE CALCUL

- Les éléments de la douche en elle-même tels que le pommeau, le mitigeur, le réceptacle, etc., sont exclus puisqu'ils sont communs à tous les systèmes comparés.
- Les chauffe-eau ne sont pas pris en compte
- L'eau de douche est à 37 °C[4]
- L'eau "froide" est à 15°C
- Il faut 1,16 Wh pour augmenter 1 litre de 1°C
- En moyenne, la douche quotidienne d'un français nécessite 60 litres d'eau et dure 10 minutes
- En recyclage, pour une douche de 60 litres, il faut 20 litres pour le lavage et le rinçage en 4 minutes, puis 5 litres d'eau en circuit fermé pour 6 minutes de pompage
- La pompe a une puissance de 75 Watts
- Les chauffe-eau ont un rendement de 70%[5]
- La pompe utilisée pour l'ACV est largement surdimensionnée (hypothèse conservative)
- L'eau de réseau et l'assainissement des eaux usées sont pris en compte

4. ADEME, *L'eau chaude sanitaire* (2019).
[en ligne] https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/bien-gerer-habitat/leau-chaude-sanitaire (consulté en 12/2019).
5. ADEME, *L'eau chaude sanitaire* (2016).
[en ligne] https://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire (consulté en 12/2019).

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ ***Coût des types de douches sur 3 ans***
Cf Annexe II - ROI



- Douche normale - chauffe-eau élec @ 2pers x15L/j
- Douche à recyclage + chauffe-eau élec @ 2pers x60Leq/j
- Douche normale - chauffe-eau gaz @ 2pers x60L/j
- Douche normale - chauffe-eau gaz @ 2pers x15L/j
- Douche normale - chauffe-eau élec @ 2pers x60L/j

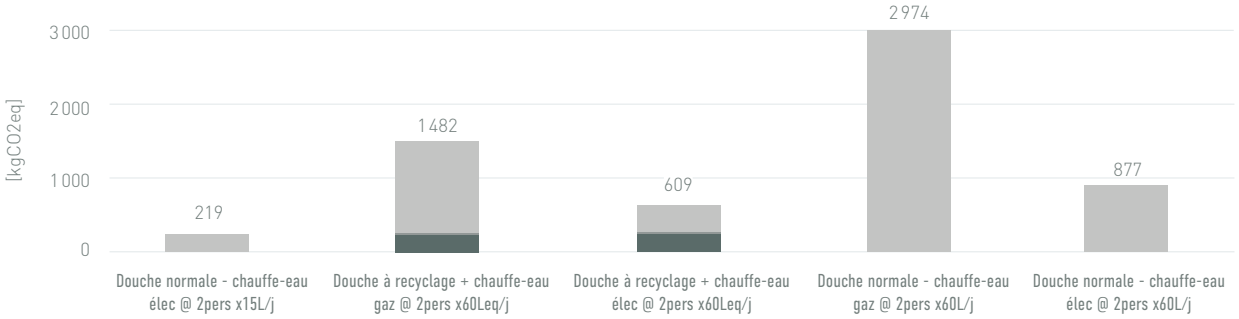
BILAN ÉCONOMIQUE

Un litre d'eau à 37°C coûte 0,8 centimes (50% eau, 50% énergie). Une douche normale de 60 litres coûte 0,48€ ; pour le même volume utile, le coût d'une douche à recyclage s'élève à 0,20€ soit 0,27€ économisés par douche.
Le retour sur les 150€ d'investissement a lieu après 555 douches, soit moins de un an après l'installation s'il y a deux utilisateurs quotidiens qui ne réduisent pas leur consommation.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV



→ Potentiel global de réchauffement climatique des types de douches prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

- Utilisation 10 ans pour 2 personnes
- Fin de vie C1 - C4
- Production A1 - A5

L'ÉLÉMENT LE PLUS IMPACTANT EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

Pompe → 93% Raccords laiton → 3% Mastic → 1%

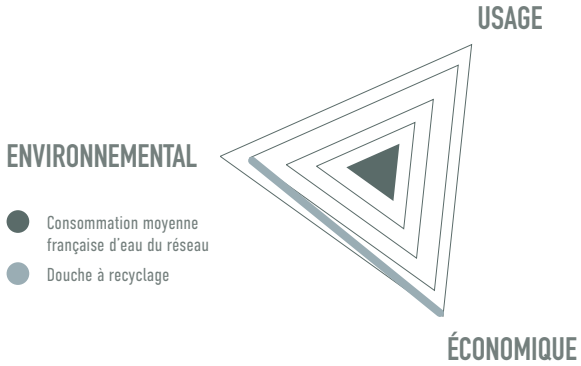
BILAN ENVIRONNEMENTAL

La douche à recyclage installée permet de faire des économies en eau et en énergie.
Même si l'investissement écologique est important, notamment lié à l'installation de la pompe, à moyen terme ce système est intéressant comparé à une douche classique. Plus les utilisateurs prennent des douches longues et nombreuses, plus le système est pertinent.

En regard de la consommation d'eau, sur la base d'une douche de 60 litres par jour, le système permet d'économiser près de 13000 litres d'eau par personne par an.

CONFORT ET USAGE

La douche à recyclage a subi l'installation tardive du chauffe-eau solaire et donc induit l'absence d'eau chaude dans la maison pendant une grande partie de l'expérimentation.
L'enseignement reste cependant intéressant, l'eau froide est un très bon moyen de consommer très peu d'eau et aucune énergie ! Mais le confort est sensiblement réduit...
Pour les périodes où l'eau était à une température agréable nous avons peu utilisé le système de recyclage.
En effet, ce système demande de se laver et de se rincer avant de pouvoir se relaxer plus longuement.
Dans notre cas, une fois propre, nous sortons généralement de la douche.
La douche à recyclage n'est pas intéressante pour nous, étant naturellement rapides et économes sous le jet d'eau.



Bilan

La douche à recyclage permet de faire de grosses économies en eau et en énergie pour les personnes ayant une forte consommation d'eau chaude dans la salle de bain.
Ces économies sont intéressantes d'un point de vue économique et écologique.

La douche à recyclage peut s'intégrer dans tous les types d'habitats. Il faut se méfier d'un potentiel effet rebond qui encouragerait les personnes économes à rester bien plus longtemps sous la douche qu'à l'habitude. Bien que réduisant la consommation d'eau et d'énergie nécessaire à la chauffe, le recyclage n'est pas neutre pour autant.

Se laver rapidement est le meilleur moyen de réduire son empreinte environnementale.

PISTES D'AMÉLIORATION

Chauffe-eau instantané électrique • Pour ne pas surdimensionner notre installation électrique solaire, plus gros impact environnemental de la maison, nous nous sommes interdits de chauffer à l'électricité. Dans une maison plus classique il serait intéressant d'étudier la pertinence d'un chauffe-eau instantané électrique. Il permettrait de réchauffer de quelques degrés l'eau qui s'est refroidie au contact de l'air, dans le bac et la plomberie. En fonctionnant ainsi, la consommation d'eau serait d'autant plus réduite.

Douche à recyclage "plug'n play" • Il serait intéressant de concevoir une douche à recyclage qui ne demande aucune modification dans la salle de bain, simplement un complément à ajouter à l'installation conventionnelle.

Phytoépuration

La phytoépuration est un système d'assainissement des eaux usées. Il a pour objectif de transformer les eaux usées en eau assimilable par le milieu naturel.
En sortie d'assainissement l'eau n'est pas potable.
Elle est très riche en minéraux assimilables par le sol et les plantes, comparable à un engrais. L'eau retourne dans le milieu naturel par infiltration ou champ d'épandage.
Ce fonctionnement est similaire à tous les types d'assainissements qu'ils soient individuels ou collectifs : station d'épuration, lagunage, fosse septique, fosse toutes eaux, micro-station...

La phytoépuration, comme tous les autres systèmes, est basée sur le principe de séparation des matières solides et liquides ainsi que la dégradation des particules par les bactéries.
La phytoépuration, ou filtres plantés, repose sur trois acteurs :

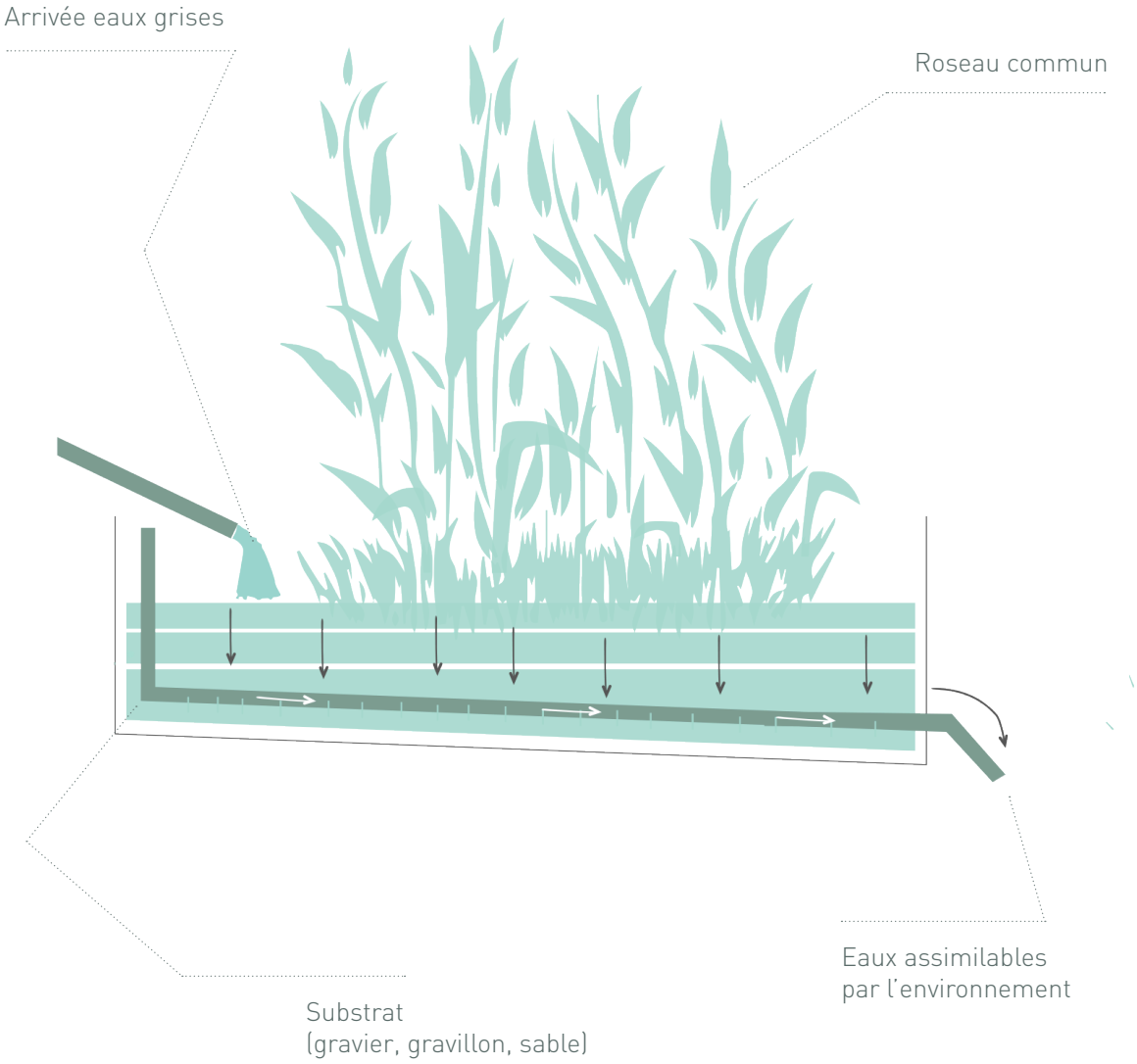
• les bactéries : elles dégradent les particules organiques pour les rendre assimilables par le milieu naturel,

• le substrat : constitué de graviers ou granulats, il constitue l'habitat des bactéries qui viennent se fixer à la surface de chaque élément. Il joue également un rôle important pour l'enracinement des plantes. Avec une granulométrie allant du plus fin au plus grossier, le substrat est également un filtre permettant de laisser passer l'eau tout en bloquant les plus gros éléments.

• les plantes, avec le développement de leurs racines et le mouvement de leurs parties aériennes, décolmatent le filtre qui, contrairement à toutes les autres solutions, s'auto-entretient. De plus elles stimulent l'activité bactérienne autour de leurs racines : la rhizosphère.
Elles jouent un rôle mineur dans la décontamination de l'eau en absorbant une petite proportion des minéraux.

Dans un système de phytoépuration domestique classique il faut au moins 2m² de filtres plantés par équivalent habitant.

Si un raccordement à l'assainissement collectif de type « tout à l'égout » est possible, il est obligatoire.



LA MICRO-PHYTOÉPURATION NOMADE[1]

En général les phytoépurations sont des aménagements paysagers, ce sont des installations fixes qui demandent de terrasser voire maçonner la zone de construction. Dans le cas du projet Habitat Low-tech, nous souhaitions pouvoir quitter le lieu d'expérimentation sans laisser aucune trace humaine. Il nous fallait une phytoépuration aux dimensions réduites, et légère. Avec l'aide d'Aquatiris[2], nous avons travaillé à répondre à ce cahier des charges. En consommant peu d'eau et en la souillant au minimum, avec l'utilisation de toilettes sèches notamment, nous pouvions réduire la surface du filtre. Pour l'alléger, le substrat, normalement conçu à base de graviers et gravillons, a été remplacé par des bouchons de liège et du liège expansé. Le sable a été conservé. Les plantes utilisées sont le roseau commun (phragmite australis) et la menthe aquatique.

DIMENSIONNEMENT DANS L'HABITAT LOW-TECH

Dans notre cas, la phytoépuration fait 0,5m² (1mx0,5m) pour deux habitants. Il est prévu, dès l'origine du projet, d'augmenter le nombre de filtres si la qualité des effluents n'est pas conforme à la réglementation.
Le système installé est passif, le filtre étant plus bas que l'exutoire de la maison, il ne nécessite pas de pompe de relevage.

1. Low-tech Lab, *Phytoépuration eaux usées* (2018). [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Phyto%C3%A9puration_eaux_us%C3%A9es (consulté en 12/2019).
2. Aquatiris, *Phytoépuration* (2019). [en ligne] https://www.aquatiris.fr/ (consulté en 12/2019).

6h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

FONCTION	COÛT NEUF THÉORIQUE	COÛT HLT
Étanchéité	40	0
Exutoire	25	25
Habillage	70	0
Plantes	35	0
Substrat	350	25
Structure	80	80
Total	**600**	**130**

Euros

HYPOTHÈSES DE CALCUL

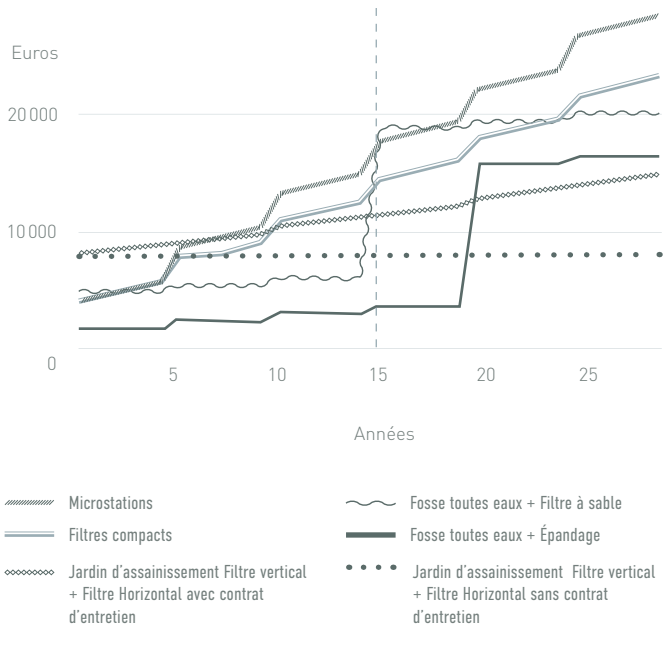
- Génération de 40 litres d'eaux grises par jour pour deux habitants dans la maison low-tech
- Bouchons de liège assimilés à du liège expansé (hypothèse conservative)
- Coût phytoépuration pour 5 équivalant-habitants : 7000 € / entretien : 0 €
- Coût microstation d'assainissement pour 5 équivalant-habitants : 5000 €[3] / entretien : 350 € par an[4]
- Coût fosse toutes eaux pour 5 équivalant-habitants : 3500 €[5] / entretien : 230 € sur 4 ans[6]

3. Devis-Bat, *Combien coûte une micro-station d'épuration* (2017).
[en ligne] http://devibat.com/guide-prix/assainissement/prix-micro-station-epuration-individuelle.php (consulté en 12/2019).
4. Tricel, *Coût annuel micro-station Tricel Novo*(2019).
[en ligne] https://www.tricel.fr/cout-annuel-micro-station-epuration (consulté en 12/2019).
5. Fosse septique info, *Prix fosse septique* (inc).
[en ligne] https://www.fosseseptique.info/prix-fosse-septique/ (consulté en 12/2019).
6. Travaux.com, P*rix de la vidange d'une fosse septique* (inc).
[en ligne] https://www.travaux.com/guide-des-prix/plomberie/prix-de-vidange-dune-fosse-septique (consulté en 12/2019).

RETOUR SUR INVESTISSEMENT

→ *Coût des systèmes d'assainissement sur 15 et 30 ans*[8]

Cf Annexe II - ROI



BILAN ÉCONOMIQUE

- L'installation de la maison low-tech est de taille très réduite due à notre faible consommation d'eau (1/6 de la consommation moyenne d'un français).
Le système n'est pas agréé. L'investissement est donc faible et le coût d'entretien nul.

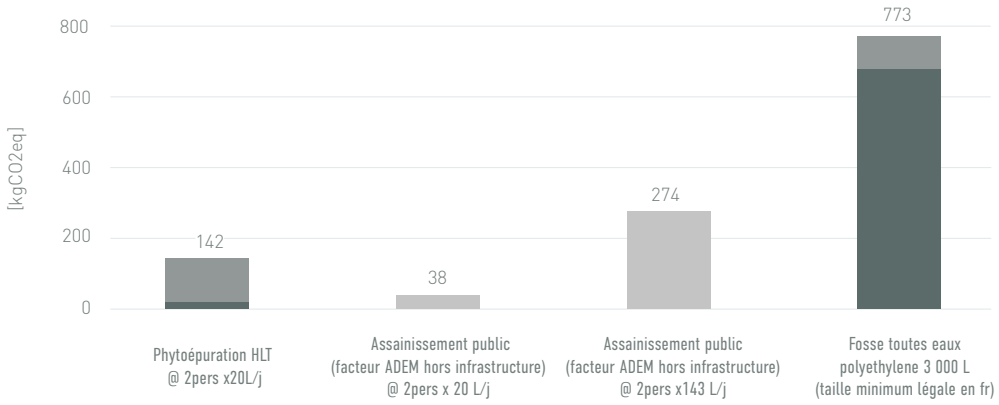
Pour des installations professionnelles standard (phyto/fosse/micro station) :
- La phytoépuration devient économiquement plus intéressante que la microstation après 5 ans d'utilisation
- Comparée à une fosse toutes eaux, il faut attendre 20 ans, soit le remplacement de la cuve[9].

7. Aquatiris, *Coût des systèmes d'assainissement sur 15 et 30 ans* (2012).
[en ligne] https://www.aquatiris.fr/fr/comparatif.aspx (consulté en 12/2019).
8. Source : SATAA des départements du Rhône, du Jura et de la Saône-et-Loire, en appui sur le groupe de travail des acteurs de l'ANC de GRAIE.
Données concernant les filières officiellement agréés, pour dimensionnement 5EH.Prix annoncés par les fabricants dans les guides d'utilisation, et concernant les dispositifs seuls (hors réseau de collecte et hors exutoire).
Filtres compacts et microstations : moyenne des dispositifs agréés au 31/12/12.
9.Aquatiris, *Questions fréquentes* (Inc).
[en ligne] https://www.aquatiris.fr/fr/La-phytoepuration-en-questions.aspx (consulté en 12/2019).

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

ANALYSE DE CYCLE DE VIE
POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

Cf Annexe I - ACV



→ Potentiel global de réchauffement climatique des systèmes d'assainissement prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

Utilisation 10 ans à 2 personnes
Fin de vie C1 - C4
Production A1 - A5

L'ÉLÉMENT LE PLUS IMPACTANT EN POTENTIEL GLOBAL DE RÉCHAUFFEMENT

cf Annexe I - ACV

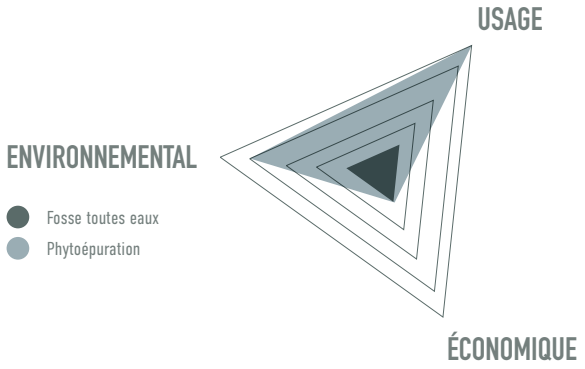
Bouchons de liège → 35% Liège expansé → 26%
Membrane EPDM → 20%

BILAN ENVIRONNEMENTAL

Détails en annexe XVIII
Au regard de l'analyse de cycle de vie en potentiel de réchauffement climatique, la micro-phytoépuration que nous avons installée semble pertinente par rapport à une fosse toutes eaux conventionnelle. Néanmoins, notre système est très sous-dimensionné par rapport aux systèmes comparés. Aquatiris partagera l'analyse de cycle de vie de ses solutions en 2020. Il sera intéressant de l'étudier. Pour une consommation d'eau identique (40 litres par jour), l'assainissement public a un moindre impact (à noter que le facteur ADEME ne prend pas en compte le coût des infrastructures publiques). Pour une consommation de 150 litres/jour pour 2 personnes, les filtres plantés ont un impact inférieur à l'assainissement public sur 10 ans.
D'un point de vue moins calculatoire, la gestion des eaux usées sur place doublée d'un système vivant visible encourage très fortement à la réduction des polluants dans l'eau (produits d'entretien et d'hygiène, produits chimiques).
L'impact environnemental de la gestion des eaux usées est donc fortement réduit par une modification comportementale liée à l'utilisation d'un filtre planté.

CONFORT ET USAGE

La phytoépuration est un système passif, il ne demande aucune activité de notre part si ce n'est contempler la croissance des plantes et la vie qui s'y développe.
Comme dit précédemment, l'usage d'une phytoépuration encourage à la modification des usages.
Il est toujours bon de se rappeler que l'évier n'est pas une poubelle à liquide.



Bilan

Comparée aux autres systèmes d'assainissements individuels, la phytoépuration sera rentabilisée à moyen ou long terme (cinq à vingt ans).
Les filtres plantés sont en général des ouvrages paysagers qui s'intègrent à merveille sur les lieux de vie. Ils démystifient la gestion des eaux usées normalement consignée à des « boîtes noires » favorisant ainsi une responsabilisation de la consommation de l'eau.

PISTES D'AMÉLIORATION

Allègement de l'assainissement • Dans le cadre d'un habitat nomade, la micro-phytoépuration de la maison low-tech reste lourde, notamment à cause de l'usage du sable (75 kg) pour la filtration et la vie bactérienne. Il peut être intéressant d'étudier le système « lombri-bois » qui utilise copeaux et sciure de bois non résineux, plus légers.

Ralentissement du flux • Aujourd'hui, l'activité bactérienne en sortie de phytoépuration est légèrement supérieure à la réglementation, notamment due à un écoulement trop rapide des eaux usées dans le filtre. Il faudrait colmater le filtre, potentiellement avec du compost ou de la sciure, pour augmenter le temps de traitement.

Remplacement du liège • L'utilisation du liège dans notre phytoépuration représente 70% de l'impact environnemental en potentiel de réchauffement climatique.
Il serait intéressant d'utiliser d'autres matériaux légers, locaux et moins impactants.

Bokashi

Chaque année, un français produit 320 kg de déchets dont 120 kg sont des déchets organiques potentiellement valorisables. Ils peuvent notamment servir d'engrais pour les cultures. En campagne, il est simple de composter ses déchets organiques. En ville, c'est plus problématique. Pourtant plus des ¾ des français vivent en milieu urbain, le potentiel de valorisation est donc très important. La production de compost via les déchets organiques ouvre les portes de la culture de plantes et légumes chez soi.

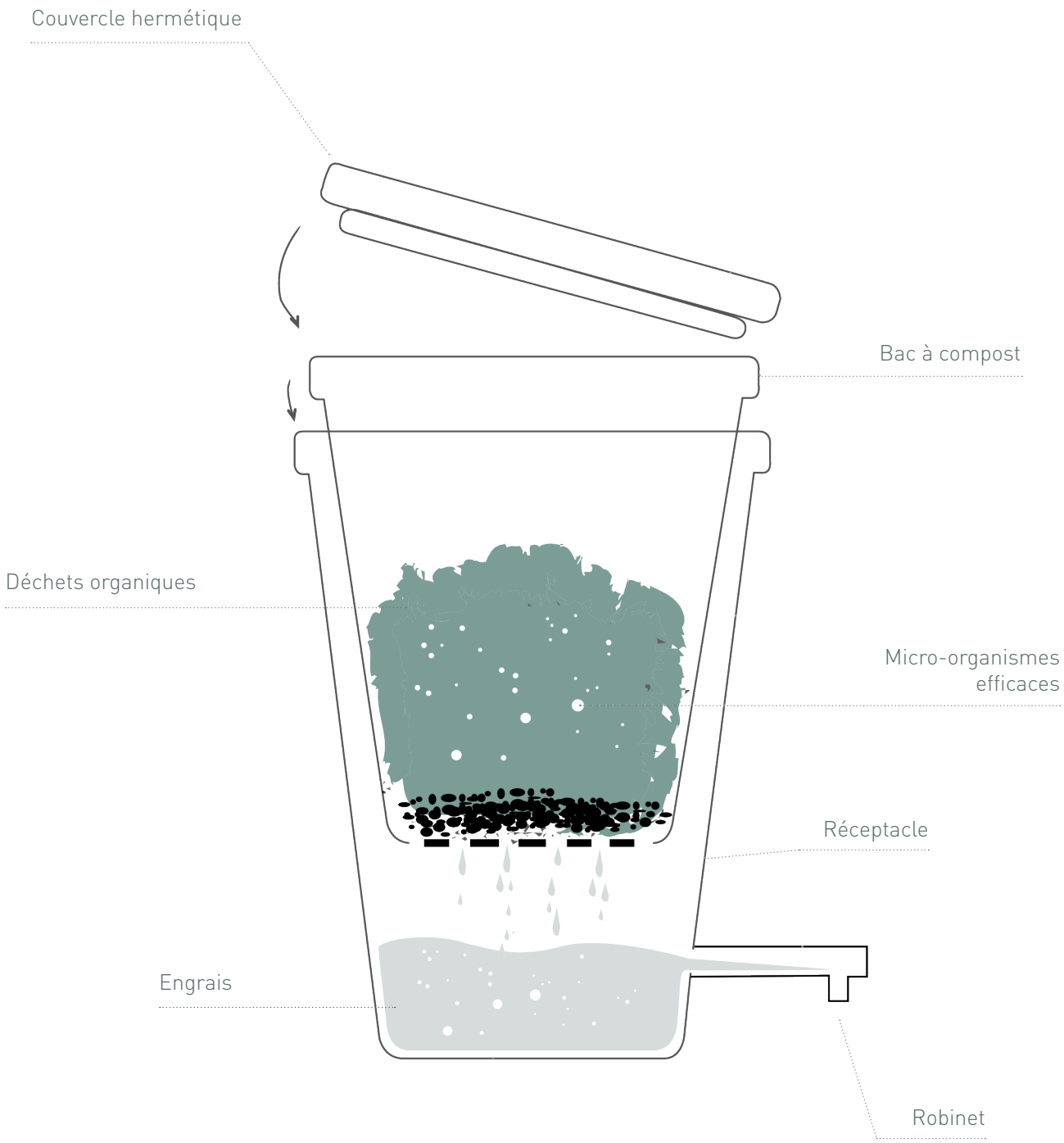
En milieu urbain, les objectifs sont variés :
- **se réapproprier les méthodes de culture**
- **tendre vers la souveraineté alimentaire**
- **dépolluer l'air environnant**
- **manger des produits de qualité et de proximité**

Le bokashi (« matière organique fermentée » en japonais) est une méthode de compostage très efficiente, pouvant être adaptée au contexte urbain. Le bokashi met en œuvre ce qu'on appelle les micro-organismes efficaces (dits EM). Leur utilisation pour le compost permet d'imiter le fonctionnement d'un humus très sain et d'optimiser la bonne dégradation de la matière organique.

Le résultat du compostage est :
- un jus très nutritif pour les plantes (à diluer à 1% avec de l'eau)
- un compost solide riche en minéraux et micro-organismes

Par l'utilisation d'un contenant étanche et hermétique, le bokashi est particulièrement adapté au contexte urbain, hors sol : il est fermé, ne sent pas, le compostage est rapide, permettant l'usage d'un bac de petite taille, et le jus est directement utilisable pour de la culture hors sol (en pot de terre ou sur substrat). Léon-Hugo Bonte et Bertrand Grevet nous ont accompagnés dans la découverte et l'utilisation du compostage bokashi pendant le Low-tech Tour France[1].

1. Low-tech Lab, *Bokashi de cuisine* (2017). [en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Compost_Bokashi_de_cuisine (consulté en 12/2019).


Couvercle hermétique
Bac à compost
Déchets organiques
Micro-organismes efficaces
Réceptacle
Engrais
Robinet

1h

COÛT ET ORIGINE DES MATÉRIAUX

Dans notre cas nous avons récupéré un seau alimentaire en restauration collective, il est possible d'acheter des composteurs bokashi dans le commerce. Pour les micro-organismes efficaces nous avons acheté du son de blé ensemencé à 22€ les 2 kg.

HYPOTHÈSES DE CALCUL

- 2kg de son de blé permettent d'ensemencer le compostage pendant un an
- Les matières organiques après compostage bokashi seront soit compostées soit considérées comme un déchet classique collecté en l'absence de composteur

RETOUR SUR INVESTISSEMENT ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Le jus de bokashi permet de remplacer l'usage d'engrais (naturel ou de synthèse) du commerce. L'économie est celle des produits non consommés.

CONFORT ET USAGE

Nous n'avons pas eu la main verte dans cette expérimentation, la gestion du vivant n'a pas été notre fort. Rapidement le compostage bokashi s'est mis à sentir mauvais ce qui n'est pas synonyme de réussite de la fermentation. Après quelques essais nous avons abandonné cette méthode, d'autant qu'elle ne nous était pas utile ; en effet nous n'avions pas de culture hors-sol.
Nos déchets organiques rejoignent directement le composteur extérieur.

Bilan

Bien qu'intéressant sur le papier, nous n'avons pas su bien gérer la méthode de compostage bokashi. De plus, ne faisant pas de culture hors-sol, nous n'avons pas de besoin particulier en engrais liquide. Le contexte de l'expérimentation, en milieu rural-champêtre, ne nous a pas encouragés à persévérer dans cette direction.
Il semble néanmoins pertinent pour les personnes ayant une forte production de plantes en hors-sol, que ce soit pour la culture en pot ou en hydroponie.

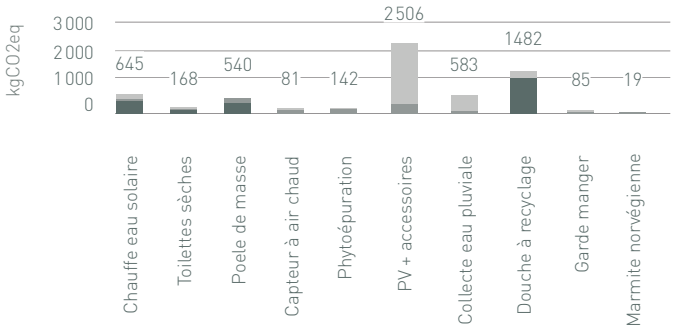
HABITAT LOW-TECH

Un projet Low-tech Lab

INTERPRÉTATIONS & PERSPECTIVES

INTERPRÉTATION GÉNÉRALE

Sur tous les systèmes installés dans la maison il est notoire que l'installation solaire voltaïque représente la moitié de l'impact environnemental total, malgré sa petite dimension (voir graphique ci-dessous). Cette information est cruciale quand le sujet de la transition énergétique est sur le devant de la scène. Bien que les énergies renouvelables (soleil, vent, courants) soient vertueuses, les moyens de les capter, de les transformer en électricité voire de les stocker ont un coût environnemental très élevé. Il n'existe pas de solution low-tech pour produire de l'électricité.
La transition énergétique passe donc avant tout par une très forte réduction de notre besoin en énergie et particulièrement en électricité avant de changer de source.



→ Potentiel global de réchauffement climatique des systèmes intégrés à l'habitat low-tech prenant en compte leur production, leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

Production A1 - A5 Fin de vie C1 - C4 Estimation phase utilisation

Pour les autres systèmes, les résultats nous semblent très encourageants. Les notes, globalement positives, valident le travail des dernières années et une veille de qualité.
Pour cette expérimentation, nous n'avons pas intégré l'ensemble des systèmes que nous avons documentés ces dernières années, la sélection a été judicieuse.

Cependant cette étude nous a tout de même réservé quelques surprises, particulièrement pour la marmite norvégienne. Réduire la consommation d'énergie de cuisson si simplement nous semblait évident, c'était un système simple à intégrer à toutes les cuisines. Finalement le résultat n'est pas si évident. Le choix des matériaux est important pour éviter la "fausse bonne idée" écologique.

Pour le reste, certaines low-tech se démarquent en étant pertinentes sur tous les points de vue, c'est notamment le cas du garde-manger et du capteur à air chaud.
La phytoépuration et le poêle de masse sont les grands champions de l'environnement.
Pour les petits porte-monnaie en quête d'investissements mineurs et de grandes économies, nous recommandons les toilettes sèches et la marmite norvégienne en matériaux de récupération.
Le chauffe-eau solaire, le capteur à air chaud et la phyto-épuration sont invisibles dans l'usage au quotidien, ils ne demandent aucune activité ou entretien particuliers.

Pour finir, la phytoépuration, le garde manger et la marmite norvégienne ont été remarquables par leur influence bénéfique sur nos comportements et modes de vie.

30 000€

COÛT TOTAL DE L'HABITAT DONT 3 500€ DE LOW-TECH

6 251 kgCO2eq → Potentiel global de réchauffement climatique des low-tech installées prenant en compte leur production leur fin de vie et 10 ans d'utilisation

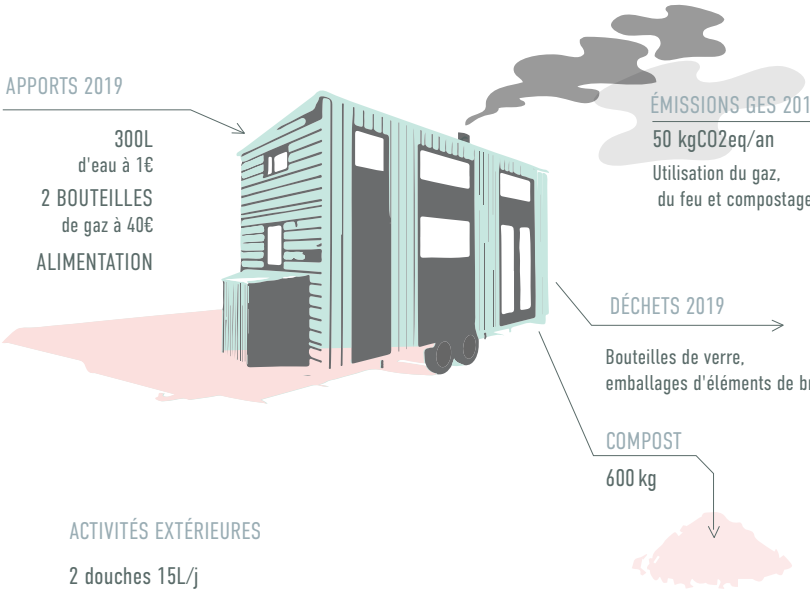
2 500 kgCO2eq → part de l'installation solaire photovoltaïque

APPORTS 2019

300L d'eau à 1€

2 BOUTEILLES de gaz à 40€

ALIMENTATION



ÉMISSIONS GES 2019

50 kgCO2eq/an

Utilisation du gaz, du feu et compostage

DÉCHETS 2019

Bouteilles de verre, emballages d'éléments de bricolage

COMPOST

600 kg

ACTIVITÉS EXTÉRIEURES

2 douches 15L/j

26 machines à laver/an

95€ → 24 kgCO2eq

→ Coût et potentiel global de réchauffement climatique de l'habitat low-tech

© Foucauld Delaplace

CONCLUSION DU PROJET

Ce rapport est l'aboutissement de 3 ans de travail autour des low-tech dans l'habitat occidental. Les résultats de cette suite d'expériences sont imparfaits, ils sont le fruit de l'étude d'un cas particulier, le nôtre. Nous avons souhaité être les plus neutres dans notre approche calculatoire.
Malgré cette attention, nous ne sommes pas à l'abri d'erreurs ou de fautes dans le raisonnement. Si tel est le cas, nous vous remercions pour votre bienveillance et surtout pour votre aide dans la prochaine mise à jour du document.

Néanmoins, cette étude est une première approche du sujet, elle permet d'aborder les grandes tendances quant à la pertinence d'une démarche low-tech pour penser un futur durable.
Les outils créés pourront d'ailleurs être utilisés et adaptés à d'autres contextes, pour d'autres personnes.

Le premier point important à noter est que, bien souvent, c'est la conjugaison d'une démarche de sobriété et d'une low-tech qui permet de tirer le meilleur potentiel de ces systèmes. Autrement dit, il ne faut attendre de la technique que ce qu'elle peut nous apporter : un moyen pour répondre au mode de vie que l'on s'est choisi en tant qu'individu.
Le premier pas pour chacun est donc de réévaluer ses besoins.

Dans ce cadre, nos résultats montrent que, majoritairement, les low-tech sont pertinentes sur l'aspect environnemental et économique. Il est possible de réduire fortement son empreinte carbone tout en faisant de belles économies financières.

Pour l'usage, nous ne pouvons pas généraliser car ce point est très subjectif et propre à chacun. La seul chose que nous pouvons faire est de partager nos ressentis : nous avons changé certaines de nos mauvaises habitudes mais nous n'avons pas du tout perdu en confort en vivant dans cette maison.

Au contraire, nous avons tiré une profonde satisfaction en réduisant drastiquement notre empreinte carbone et nos dépenses en vivant tout aussi bien, voire mieux, qu'au sein d'un habitat conventionnel.

Dans nos sociétés nous associons le mot "confort" à une aisance matérielle, une sécurité. La vie dans cet habitat nous a permis de toucher une autre notion du confort : celle d'avoir l'esprit libéré du matériel en visant l'essentiel, celle de réduire notre dépendance à un système complexe, obscur et parfois destructeur, celle de se sentir en sécurité car inclus dans un écosystème, nous permettant une autonomie en eau et en énergie grâce aux ressources naturelles locales.

À l'origine nous n'étions pas particulièrement favorables à cette quête d'autonomie en énergie et en eau. Un amalgame perdure entre autonomie et écologie : un habitat autonome a un impact environnemental bien supérieur à son équivalent relié aux réseaux. S'il n'y a pas de réduction considérable des consommations, un site autonome est une vraie plaie écologique (cf. impact des panneaux solaires photovoltaïques). De plus l'autonomie s'oppose à la mutualisation, qui, en optimisant l'accès aux ressources et à leur rentabilité, est très pertinente des points de vue écologique et économique. Ce faisant, la portée pédagogique du projet nous a menés vers le choix d'un micro-habitat nomade, nous avons donc opté pour une maison autonome des réseaux, acceptable grâce à une réduction forte de nos besoins. Cette autonomie partielle a été un accélérateur, un catalyseur, de la reconnexion à notre environnement. Mais même sans chercher l'autonomie, profiter des ressources disponibles localement permet de se relier à son univers proche et se révèle vertueux.

L'objectif de notre expérimentation était de valider la pertinence des low-tech pour le contexte de l'habitat occidental. Objectif atteint ! Nous allons pouvoir passer à la suite : participer à diffuser plus largement ces systèmes qui nous ont convaincus.

Cette expérimentation nous a également beaucoup apportés à titre individuel, elle nous a invités à habiter autrement. Nous souhaitons vous partager nos ressentis personnels, témoignages de nos transformations.

BILAN INDIVIDUEL PIERRE-ALAIN

Au terme de ce projet, je me dis que j'ai passé les 4 dernières années à observer le monde des low-tech depuis ma fenêtre. Ce n'est seulement que cette année que j'ai pu ouvrir la porte et entrevoir ce qu'il s'y passait. Je ne me rendais pas compte du potentiel caché derrière ces systèmes et cette démarche :

L'homme, l'objet, qui possède qui ?

Je fonctionne avec les tripes, c'est bien mon deuxième cerveau ! Première info du ventre à la tête : un drôle de sentiment d'allègement mental s'installe au passage du pré de la maison low-tech. La sobriété matérielle, ne s'encombrer que du nécessaire, est la première étape d'une démarche low-tech. Avec Clément, nous nous sommes posés la question « De quoi avons-nous besoin ? ». Nous avons conçu cette maison pour y vivre bien, sans superflu.
J'en ai profité pour faire du rangement et le bilan des objets que je possède. L'oreille tendue sur mes mots, l'expérience prend du relief : « J'ai oublié ce truc là-bas, faut vraiment que je le vende… », « Arf, c'est en panne, faut que je le répare », « Mais qu'est-ce qu'il fait ici ce tas de fringues ? Faut que je m'en débarrasse ». Des heures consommées et de la charge mentale. Au fur et à mesure, j'épure.
Je suis convaincu que cette "quête du peu" est un des paramètres les plus importants dans cette sensation d'allègement. Elle peut permettre à chacun de tendre vers un mieux être. J'ai d'ailleurs hâte d'entendre comme slogan « Il n'a pas de Rolex à 50 ans, il a réussi sa vie ! »
L'autonomie : choisir de qui être dépendant.

Deuxième message du ventre au cerveau : D'où vient ce sentiment de sécurité et de satisfaction le soir, à l'extinction des feux ?
Je cherche du côté de l'autonomie que nous procurent les low-tech. Nous n'avons pas la nourriture mais l'énergie et l'eau sont à portée de main.
Le mot est trompeur : l'autonomie invite à créer ses dépendances : Nous avons choisi la pluie pour l'eau, le soleil et le bois pour l'énergie, les lombrics pour nos déchets organiques et les producteurs locaux pour la panse.
Mon sentiment de satisfaction et de sécurité vient de ces choix.

Dans notre univers dessiné par les barbelés du pré, peu importe la météo, je suis content. Je fais partie d'une entreprise de compostage où les vers sont mes collègues. J'ai pu discuter de la mauvaise saison avec le producteur des carottes que je mange. Je sais combien pèse mon kW.h électrique aussi bien que mon litre d'eau. Je commence à comprendre la matrice et j'en fais partie : on peut compter les uns sur les autres en cas de pépins !
Cette dépendance de proximité entraîne le respect des acteurs et des ressources dont nous sommes dépendants.
Tous réunis, nous tendons vers un écosystème palpable, viable et sécurisant.

Surprise, cette fois ci pour ma tête et mon portefeuille :
1 an de charges pour l'Habitat low-tech, 150€.
Je laisse courir la réflexion sur ce que pourrait entraîner un idéal de vie libérée des charges, notamment financières, que laissent en partie, promettre les low-tech.
J'imagine où chacun pourrait se libérer du temps pour creuser ses passions, investir son énergie à agir pour ses valeurs :
Les low-tech peuvent participer à la libération du potentiel de chacun.
Mais les low-tech nécessitent le lien à l'autre pour que ça fonctionne. Des liens naissent les mélanges d'idées, d'actions, d'énergies :

Pour peu qu'elle soit orientée vers le bon sens, la démarche low-tech peut participer à la libération du potentiel collectif.
La route est longue, mais je me sens en mouvement, j'en suis heureux.

BILAN INDIVIDUEL CLÉMENT

Les résultats de ce travail expérimental me réjouissent. Oui, les low-tech ont un sens, elles répondent à cette promesse qu'une vie à moindre coût et dans un plus grand respect du monde est possible.

Mais mon engouement, ma plus profonde satisfaction, est d'autant plus personnel, j'ai trouvé un apaisement en renouant avec mon environnement direct.

Gamin, je m'émerveillais du vivant, du sauvage, de l'ampleur du bond des grenouilles, à l'éclair d'une libellule en vol, à travers la puissante poigne des crabes. J'étais parfois intrusif, malin, à soulever dalles et rochers en quête d'architectures fourmilières ou d'abris à coléoptères.
Sûrement avec l'âge, je m'interdis, je muselai, cet émerveillement. Le monde est sérieux, dur et froid. Il faut se consacrer aux choses graves et non à l'admiration des bestioles ou du végétal.
Mon erreur est là, renoncer à l'enchantement du naturel car réservé à l'enfant ou au naturaliste. Plus vraiment enfant et pas spécialiste du vivant, je rompais avec la nature, ma nature, comme beaucoup d'entre nous. Quelle sottise !
Vincent Munier[1] cite G.K. Chesterton : "Le monde ne mourra jamais par manque de merveilles mais uniquement par manque d'émerveillement."
Cette expérience m'a permis de retrouver le vivant, ma part de sauvage. L'émerveillement a fait son grand retour, dans sa simplicité et sa grandeur.

1. Vincent Munier, Eternel émerveillé, Passe-moi les jumelles, RTS 2019

Cette petite maison m'a encouragé à lever le pied et observer, m'observer. Retrouver un rythme naturel, saisonnier, avec l'impermanence des éléments renvoie à un équilibre supérieur, dont, je pense, j'avais besoin. Nous tirons tous un grand plaisir de vivre avec moins, plus simplement, en témoignent les voyageurs à pieds, à vélo ou à la voile, vivant de peu pour vivre plus, reliés aux éléments.

Alors pourquoi consigner ce bien-être à quelques rares escapades alors qu'il pourrait élever nos quotidiens ?

Mais il est vrai que ce mode de vie doit résulter d'un choix et non être subi. Ce ne doit pas être un renoncement mais une ouverture. Alors, il ne demande qu'à nous, à chacun, de faire ce pas, ce choix de dépendre un peu plus de l'environnement, pour, j'espère, partager le même constat et l'envie d'encourager nos prochains à évoluer.
Certes, cela demande un peu d'humilité d'accepter le refus du ciel à pleuvoir ou de s'adapter à la grisaille qui perdure, mais c'est aussi pour le plaisir d'accélérer aux beaux jours puis de ralentir en hiver. Plus globalement, la Nature est généreuse et lui remettre une part de mes besoins est formidable.
Je me sens moins responsable de l'entièreté de mes satisfactions individuelles, je joue la réponse à mes besoins élémentaires avec l'environnement, j'externalise en partie mes sources de bien-être. Ce grand jeu du quotidien balaie bien des soucis et des intérêts mal placés. Il offre un recentrage et un calme inhabituel et bienvenu.

Finalement, aussi naif et enfantin que cela puisse paraître, je pense que telle est notre place. J'en veux pour preuve l'équilibre que nous avons trouvé à dépendre de cette Nature, à l'image de nombreux autres en transitions ou déjà transformés.
Alors je m'émerveille du sauvage qui se révèle à chaque nouvelle goutte de pluie, pour chaque rayon solaire, qui m'offrent le confort d'une vie simple.
Et si chacun, en profitant de l'eau qui lui est offerte comme du soleil qui le baigne, pouvait se reconnecter à sa nature, reprendre conscience de la chaîne globale dont il fait toujours partie, alors peut-être que le monde tournerait un peu plus rond.

© Foucauld Delaplace

OUVERTURE

Ce rapport, en plus de la série de vidéos "En quête d'un Habitat Durable"[2], clôture notre expérimentation d'habitat low-tech et nous ouvre la porte vers de nouveaux projets.

PARTAGE DE LA PHILOSOPHIE ET PÉDAGOGIE

Le partage de l'état d'esprit low-tech, l'éducation au changement, la compréhension de l'impact de chacun et des possibilités d'action est le premier pas d'une mise en mouvement. Avant de changer, il est important de comprendre pourquoi nous devons renouveler nos modes de vie. Ensuite, il faut s'approprier son environnement, découvrir ce qui y est "toxique" et ce qui l'est moins. Et enfin choisir, remplacer nos objets et habitudes désuets par des démarches et systèmes vertueux et pourquoi pas low-tech !

C'est pourquoi nous laissons les clefs de la maison à Romane qui prend le relais pour emmener l'Habitat low-tech en tournée dans toute la France à la rencontre des acteurs associatifs, professionnels et des scolaires sensibles à cette démarche ; pour permettre au plus grand nombre, par l'envie, de mettre le pied à l'étrier vers un monde soutenable.

2. Low-tech Lab, *En quête d'un habitat durable* (2018).
[en ligne] https://www.youtube.com/playlist?list=PL16ZDrU18TC1DrpGL0n6iHjX6Ubgwv-hc (consulté en 12/2019).

FORMATION ET PRODUCTION DE SYSTÈMES LOW-TECH

Aujourd'hui, les systèmes étudiés dans ce rapport sont le fruit du travail de documentation du Low-tech Tour France.
Des tutoriels, vidéos et notices de fabrication, sont disponibles gratuitement sur la plateforme wiki du Low-tech Lab[3] grâce à la générosité de leurs inventeurs.
Chacun peut donc, à sa guise, dupliquer ou adapter ces low-tech à son habitat.

Nous savons cependant que la mise en œuvre de ces systèmes nécessite des outils, des compétences et du temps, que tout un chacun n'a pas forcément à disposition.

Dans l'objectif de permettre à un maximum de personnes de bénéficier de ces systèmes, nous souhaitons consacrer une partie de nos activités à accompagner des professionnels et associations à les prendre en main.
Nous sommes également persuadés que le maillage local de gisements de matériaux (ressourceries, acteurs du recyclage), d'espace de micro-production et de zones de vente serait un bon moyen de diffuser ces techniques tout en favorisant une économie locale. Le changement d'échelle implique également une démarche qualité. Nous allons nous pencher sur l'étude d'un projet pilote en ce sens.

3. Collectif, Low-tech Lab (inc).
[en ligne] https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Explore (consulté en 12/2019).

ÉTUDE D'AUTRES CONTEXTES D'USAGE

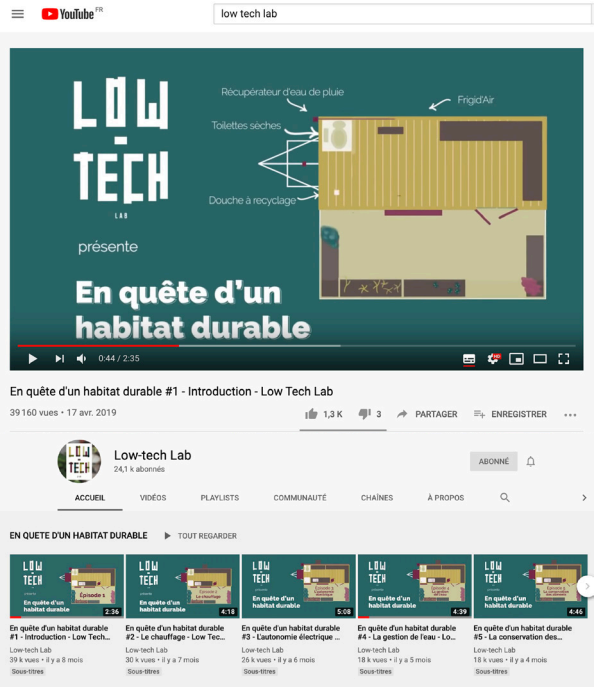
Évidemment, notre cœur de métier reste inchangé au Low-tech Lab. Notre attirance pour l'expérimentation, l'aventure au quotidien, persiste joyeusement.

Comme d'autres qui souhaiteront se joindre à la démarche, nous allons tester de nouveaux systèmes dans des contextes différents, plus représentatifs des modes de vie contemporains. Quel est mon pouvoir d'agir dans un appartement ? Quels systèmes intégrer dans l'habitat collectif ? Comment rénover ma maison ? sont autant de questions dont, comme vous, nous avons hâte d'explorer les réponses.

© Foucauld Delaplace

MÉDIA

ILS ONT RELAYÉ L'AVENTURE



France 2 : Télématin • France 3 Bretagne • France 3 National : On a la solution • France Inter : Carnet de campagne et La terre au Carré • France Culture • Hit West • Libération • L'ADN • La Maison Écologique Le Mouvement Colibris • Ouest France • Phosphore Sans transition • RFI • Tébéo • Le Télégramme We demain • 18h39, et bien d'autres !

La réalisation
d'un tel projet ne se fait pas
à 4 bras et 2 têtes !

Pour leur confiance et leur soutien financier, nous remercions l'ADEME, le Ministère de la transition écologique et solidaire, l'institut Fontaine, la fondation THETYS, le Crédit Mutuel ARKEA, la fondation MACIF Bretagne/Normandie.

L'habitat low-tech pèse 3,5 tonnes, il en a fallu du matériel pour le réaliser ! Nous remercions Jean-Daniel Blanchet / Atelier Bois d'Ici pour la mise à disposition de l'atelier et l'accompagnement dans nos premiers pas de charpentier. SpeedNautic, Fenetrea, Leroy Merlin Quimper et Schneider Electric pour les dons de matériel.

Les low-tech que nous avons installées dans cette maison nous ont été transmises lors du Low-tech Tour France par des passionnés ouverts au partage libre de leurs travaux.
Nous tenons à remercier Léon-Hugo Bonte pour le bokashi, Gilles Planchon et Enkidou Burtschell pour la spiruline, Aurélie Guibert pour l'éolienne, Vital Bies et David Mercereau pour le poêle de masse, Guy Isabel et Jean-Daniel Blanchet pour le capteur à air chaud, Eric Lafont et le collectif du Grand Moulin pour le chauffe-eau solaire, Kévin Quentric et Aquatiris pour la phytoépuration, Arieh et David pour leurs conseils sur l'énergie, Claire Yobé pour la lactofermentation, Pierre et Thomas de Picojoule pour le biogaz.
De nombreuses mains ont participé à la mise sur roues de l'habitat low-tech et la réalisation de nos livrables.
Nous remercions Jean-Baptiste Poivre, Jérôme, Mathilde et les nombreux bénévoles ayant participé à la construction et aux portes ouvertes.
Merci à François Legrand et Clément Isaia pour leur aide sur la mise au point de nos outils de mesure ; Axel Lattuada et Hélène de Vestèle/EDENI pour leur participation à nos vidéos.
Mention particulière à Lorélia le Gouvello pour son aide très précieuse à l'analyse de cycle de vie des low-tech. Merci à Camille/Pipalouk pour la mise en forme de ce rapport. Merci à Gildas pour la mise à disposition gracieuse du meilleur pré de Concarneau.
Nos remerciements sont également adressés à Alexis, Manon, Michka, Lorelia, Kévin, Isabelle, Michèle et Dominique pour la relecture de ce rapport.

Nous remercions Romane et Mewen, avec qui nous avons formé le "noyau dur" de ce projet et qui ont su apporter leur grain de sel et leur bonne humeur !
Nous remercions les copains du Low-tech Lab avec une spéciale dédicace à Martine pour réussir à faire tenir toutes nos idées dans le bon cadre administratif et légal !

Enfin, nous remercions chaleureusement Sophie, Bilou, Emmanuel et l'équipe du Fonds Explore, qui nous soutiennent au quotidien à Concarneau depuis le début du Low-tech Lab. Ils nous permettent de réaliser nos projets dans les meilleures conditions.

REMERCIEMENTS

Janvier 2020