

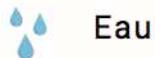
PROJET CHARBONNIER

Rapport Four Pyrolyse

Projet ingénieur étudiant



Porteur de projet



Eau



Matériaux



Energie



CONTACT

cultureailleurs@yahoo.fr

GRENOBLE

Septembre - Janvier 2021/2022

Sommaire

Introduction commune aux rapports du projet Charbonniers du Trièves	4
Demande des porteurs de projet	4
Introduction	4
La pyrolyse	5
2.1. Généralités	5
2.2. Les phases de la pyrolyse lente du bois	6
2.3. Les produits gazeux de la pyrolyse lente	8
Le four	9
3.1. Rappels sur la combustion	9
3.2. Etat de l'art des fours à pyrolyse	10
3.3. Objectif et démarche de la conception	13
3.3.1. Objectif	13
3.3.2. Cahier des charges	13
3.3.3. Démarche de la conception	13
3.4. Présentation de la version finale	17
3.4.1. Présentation du fonctionnement	17
3.4.2. Analyse des risques	21
3.4.3. Fabrication et utilisation	23
3.5. Impacts écologiques et sociétaux	25
3.5.1. Analyse de cycle de vie des fours	25
3.5.2. Bilan carbone	27
3.5.3. Expérience utilisateur (voir Annexes)	31
3.5.4. Le four : un Commun?	32
3.6. Limites et pistes d'amélioration	33
Conclusion	34

Annexes	35
Analyse de risque: arbres de défaillance	35

Introduction commune aux rapports du projet

Charbonniers du Trièves

Ce rapport est issu du travail de six étudiants du semestre [PISTE](#) (Pour une Ingénierie Sobre Techno et Éco-responsable) 2021-2022 de [Grenoble INP](#), en collaboration avec l'association [Culture Ailleurs](#).

Le projet « Charbonniers du Trièves » est porté par l'association Culture Ailleurs, qui réalise des performances artistiques dans divers domaines. A la suite d'un appel à projet sur la forêt, les membres de l'association s'intéressent à une discipline ayant une forte histoire sur le territoire : le travail de charbonnier, initialement voué à alimenter les fours de métallurgie, puis les moteurs fonctionnant au gaz de charbon. Aujourd'hui, le métier exercé par les charbonniers de l'association consiste à réaliser la pyrolyse de bois récolté en forêt (issu des coupes d'entretien réalisées par l'Office National des Forêts) afin de produire du charbon végétal. L'association acquiert alors un four à pyrolyse, pour produire et vendre ce charbon végétal, tout en réalisant des performances artistiques sur cette thématique. Une caractéristique notable du charbon végétal est la présence de nombreux pores : il agit alors comme un filtre, dépolluant l'eau et l'air, mais peut aussi être utilisé pour régénérer la vie des sols grâce à ses capacités de rétention d'eau, de nutriments, de bactéries.

Notre travail d'étudiant-ingénieur se concentre sur : 1° L'utilisation du charbon actif pour filtrer l'eau ; 2° L'étude et la conception d'un modèle de four à pyrolyse de plus petite taille que le modèle *Exeter Retort* utilisé par les porteurs de projet; 3° La documentation du four *Exeter Retort*.

Demande des porteurs de projet

Une fournée du four *Exeter Retort* produit assez de charbon pour plusieurs utilisateurs : dans une démarche d'autonomisation de la production de charbon végétal (utilisation pour filtrer son eau ou amender ses sols), les porteurs se questionnent sur la pertinence pratique et environnementale d'un four de plus petite taille, utilisé par chaque particulier pour sa consommation personnelle (un maraîcher, ou un pépiniériste par exemple).

La première demande des porteurs de projet est donc d'évaluer la pertinence de l'utilisation d'un four à pyrolyse de plus petite taille que celui qu'ils utilisent actuellement..

La deuxième demande est d'évaluer le processus de pyrolyse (rendement, pollutions) ayant lieu dans le four miniaturisé, et d'analyser dans quelle mesure ce processus peut-être amélioré en jouant sur ses paramètres.

Introduction

Ce rapport regroupe l'ensemble des travaux menés autour du four à pyrolyse et de son possible rétrécissement par rapport à celui utilisé actuellement par l'association. Il débute par un rappel des connaissances actuelles sur la pyrolyse, qui nous ont servi à appréhender les enjeux et phénomènes liés à ce processus chimique. Suite à ce travail d'état

de l'art est présentée notre démarche de conception et les résultats auxquels nous sommes arrivés à la fin de ce semestre. En parallèle d'un contenu technique sur le fonctionnement du four en lui-même, ont été menées des études auprès des potentiels futurs utilisateurs et aussi concernant les impacts sur l'environnement et la sécurité des usagers; dans l'objectif de répondre aux questions posées par l'association sur la pertinence écologique et utilitaire d'un four à pyrolyse plus petit et abordable.

La pyrolyse

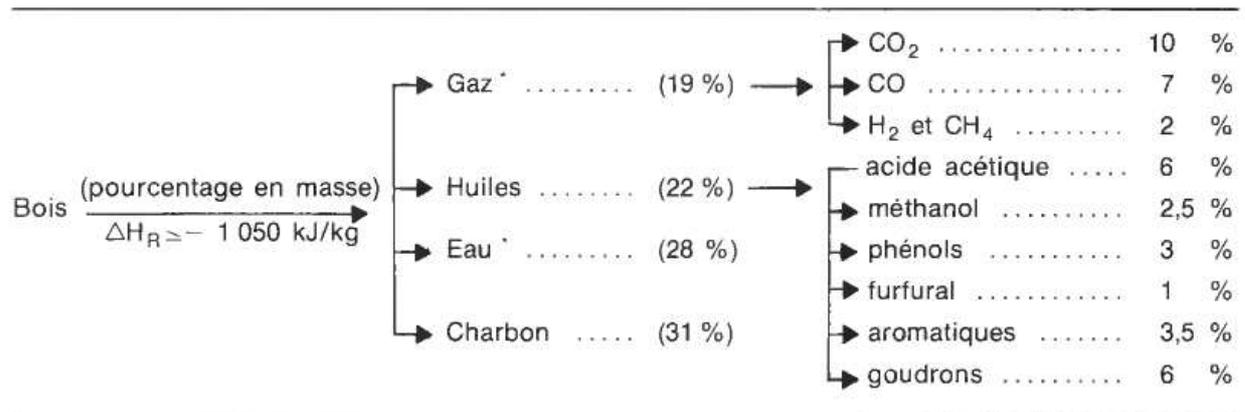
2.1. Généralités

“La pyrolyse [...] est la décomposition chimique d'un composé organique (particulièrement de la biomasse lignocellulosique) par une augmentation importante de sa température [...]. L'opération est réalisée en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène pour éviter l'oxydation et la combustion”¹.

Cette réaction, qui voit se succéder plusieurs étapes en fonction de la température, conduit à une production de gaz combustibles, de liquide (huile ou mélange d'hydrocarbures tels que des goudrons, de l'acide acétique) et de matière solide (charbon). Le charbon produit contient la fraction minérale de la biomasse, ainsi que le « carbone fixe », c'est-à-dire le carbone qui ne s'est pas transformé en gaz ou liquide. Cette proportion entre gaz, liquide et solide dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques de la biomasse pyrolysée (essence de l'arbre, humidité), la température et la pression lors de la réaction, etc.

Il existe deux grands types de pyrolyse, qui dépendent de la vitesse de chauffage des particules de bois (transfert thermique lent ou rapide). Les proportions des produits de la réaction diffèrent. Ainsi, plus la montée et température est rapide, plus la quantité de gaz dégagée par la pyrolyse est élevée (gazéification, processus utilisé dans l'industrie pour produire du méthane).

¹ Pyrolyse [modifiée le 21 janvier 2020 ; consultée le 12 Octobre 2021], dans Wikipédia.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>



Produits d'une pyrolyse lente²

	Pyrolyse lente	Pyrolyse rapide
Plage de température [°C]	300 à 700	400 à 800
Vitesse de chauffage [°C/s]	0.1 à 1	10 à 200
Proportion des produits	Charbon: 35% Huiles: 30% Gaz: 35%	Charbon: 20% Huiles: 50% Gaz: 30%

Caractéristiques de la pyrolyse lente et de la pyrolyse rapide

L'objectif étant de fabriquer un maximum de charbon, nous traiterons par la suite le cas de la pyrolyse lente.

2.2. Les phases de la pyrolyse lente du bois

Le bois est un ensemble de tissus cellulaires composés de trois matériaux moléculaires: la cellulose (représente 30% de la masse d'un feuillus en moyenne), l'hémicellulose (45%) et la lignine (20%). De plus, la composition élémentaire du bois sec est d'environ 49% de carbone, 45% d'oxygène, 5.5% d'hydrogène et 0.2% d'azote ³.

² X. Déglise (1982), Les conversions thermochimiques du bois, p 255
http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21577/RFF_1982_4_249.pdf?sequence=1

³ Patrick Rousset (2004), Thèse "Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température de la microparticule au bois massif" p 72
<https://pastel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/106360/filename/thesefinale.pdf>

Lors de la pyrolyse, la température augmente et ces éléments sont décomposés suivant la cinétique simplifiée suivante ⁴.

- Jusqu'à 150°C: déshydratation (endothermique), l'eau contenu dans le bois est évaporée
- T < 230°C: la décomposition des hémicelluloses prédomine
- 230°C < T < 290°C: la décomposition de la cellulose prédomine
- T > 290°C: la décomposition de la lignine prédomine

Chaque composé a une énergie d'activation (kJ/mol) qui représente l'énergie qu'il faut apporter pour que la réaction de décomposition ait lieu, et une énergie de réaction (kJ/kg) qui exprime l'énergie dégagée (si négative) ou absorbée (si positive) lors de la réaction.

Les réactions chimiques qui ont lieu lors d'une pyrolyse sont complexes. Le type de bois et les conditions de pyrolyse influencent grandement ces réactions, ce qui explique les plages larges de valeurs expérimentales visibles dans la littérature. Nous pouvons résumer les caractéristiques de ces trois grandes étapes:

	Décomposition de l'hémicellulose	Décomposition de la cellulose	Décomposition de la lignine
Energie d'activation [kJ/kg] ⁵	125 à 260	90 à 297	18 à 124
Energie de réaction [kJ/mol]	-510 à 120	-455 à 79	-363 à 42
Plage de température de la réaction [°C]	< 230	230 à 290	> 290
Fraction massique moyenne dans un feuillus	30%	45%	20%

Caractéristiques des différentes phases de décomposition de la biomasse

En ce qui concerne la déshydratation, l'énergie dégagée lors de cette étape (appelé le pouvoir calorifique réel *PCR*) dépend du taux d'humidité du bois (*H*)⁶ :

⁴ Suisse énergie partenaire, La combustion du bois, slide n°27, <https://slideplayer.fr/slide/3207392/>

⁵ Patrick Rousset (2004), Thèse "Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température de la microparticule au bois massif" p 73
<https://pastel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/106360/filename/thesefinale.pdf>

⁶ X. Déglise (1982), Les conversions thermo-chimiques du bois, p 253
http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21577/RFF_1982_4_249.pdf?sequence=1

$$PCR \text{ (kJ/kg de bois sec)} = (PCS - 4000)(1 - 0.012 H)$$

où *PCS* pouvoir calorifique supérieur [kJ/kg]

2.3. Les produits gazeux de la pyrolyse lente

Comme indiqué plus haut, environ un tiers de la masse de bois à pyrolyser se transforme en gaz. Leur nature est très diverse mais les gaz majoritaires sont bien identifiés. Leur émission dépend à nouveau de la phase de décomposition de la biomasse ⁷:

	T < 200°C	200°C < T < 280°C	280°C < T < 500°C
Produits gazeux majoritaires	H ₂ O	H ₂ O, CO ₂ , HCOOH, CH ₃ COOH, HCOCHO	HCOOH, CH ₃ COOH, CH ₂ O, CO, CH ₄ , CH ₃ OH, H ₂ , goudrons
Produits gazeux minoritaires (traces)	CO ₂ , HCOOH, CH ₃ COOH, HCOCHO	CO	aromatiques

Durant la phase de déshydratation du bois (c'est-à-dire avant 200°C), il n'y a pas de rejet significatif de gaz combustible. En revanche, la grande majorité des produits combustibles sont émis entre 200 et 500°C. Des molécules plus longues (nombre d'atomes de carbone ou d'oxygène supérieur à quatre) sont également formées, ce sont des gaz dit condensables (ou goudrons). La matière est ainsi décomposée jusqu'à laisser une structure graphitique. On procède ensuite à un refroidissement lent en maintenant l'absence d'oxygène pour éviter toute inflammation.

Malheureusement, il n'existe pas réellement de levier pour limiter l'émission de ces gaz émis par la pyrolyse car contrairement à une combustion, ces fumées qui représentent un carburant ne peuvent pas être brûlées du fait de l'absence d'oxygène. On peut néanmoins valoriser ces fumées en les transférant à la chambre de combustion afin d'être brûlées et ainsi servir à alimenter le foyer de chaleur qui alimente la pyrolyse. Ce recyclage en boucle fermée doit être favorisé au maximum. Dans le cas où ces gaz de pyrolyse ne peuvent pas servir à alimenter le foyer, notamment lorsque la chambre de pyrolyse aura atteint une température suffisante, il faut veiller à les brûler à l'aide d'une torchère avant de les laisser s'échapper dans l'atmosphère. La quantité non négligeable de méthane produit pourrait justifier une chaîne de traitement et d'épuration des fumées. Nous veillerons, dans tous les cas, à toujours laisser un moyen pour les gaz de s'échapper de la chambre de pyrolyse.

⁷ Claude Bernard (2005), Thèse "Caractérisation et optimisation de la combustion de bois fragmenté en chaufferies automatiques", p 2,17

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747449/document>

Il est à noter qu'il est plus judicieux de pyrolyser de la biomasse assez sèche pour réduire la durée de la déshydratation et la quantité d'énergie nécessaire pour activer la réaction d'évaporation de l'eau. Le bois sec chauffe plus rapidement, il faut donc être plus vigilant sur le suivi de la combustion, en particulier au début. Pour cela, des moyens de réguler l'entrée d'air dans le foyer et des thermocouples peuvent être utilisés.

Les quantités émises des principaux gaz combustibles ainsi que leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant:

	CO ₂	CH ₄	CO	NO _x
Pourcentage de gaz émis par rapport à la masse totale de bois mise dans la chambre de pyrolyse ⁸	8.6%	2%	11.2%	/
Température d'auto inflammation [°C]	/	535	605	570
Limite d'inflammabilité	Ininflammable	4.5 à 17%	12.5 à 74.2%	4 à 76%
Toxicité	5 000 ppm	10 000 ppm	50 ppm	25 ppm

La température d'auto inflammation correspond à la température à partir de laquelle un gaz peut s'enflammer sans chaleur, avec un rapport de concentration gaz / oxygène favorable. Ce rapport s'appelle la limite d'inflammabilité. Ces conditions peuvent mener à une explosion, en particulier si le mélange gazeux vient à être en contact avec une surface chaude. Enfin, dépassé un certain rapport gaz / oxygène (indiqué en partie par million *ppm*), le gaz devient toxique pour l'être humain et peut mener à une asphyxie.

Le four

3.1. Rappels sur la combustion

Une combustion est la réaction chimique entre les atomes de carbone et d'hydrogène des gaz combustibles, préalablement dégagés de la biomasse par la chaleur, et l'oxygène de l'air, pour former du dioxyde de carbone. Pour avoir une réaction complète il faut un bon équilibre entre le combustible, l'air et la chaleur : c'est le triangle du feu.

Ainsi pour limiter les émissions d'imbrulés, on veille à assurer un mélange carburant (biomasse) / comburant (air) homogène, avec une proportion la plus proche possible des

⁸ M-S. Safdari, E. Amini, D.R. Weise, T.H. Fletcher (2019), Thèse "Heating rate and temperature effects on pyrolysis products from live wildland fuels", p 299
<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747449/document>

proportions stoechiométriques. Il ne faut donc ni trop d'air (réaction semi-oxydante) pour ne pas baisser excessivement la température du foyer et donc le rendement, ni un défaut d'air (réaction semi-réductrice) pour éviter l'émissions de gaz imbrûlés nocifs pour l'environnement et la santé (tel que le monoxyde de carbone).

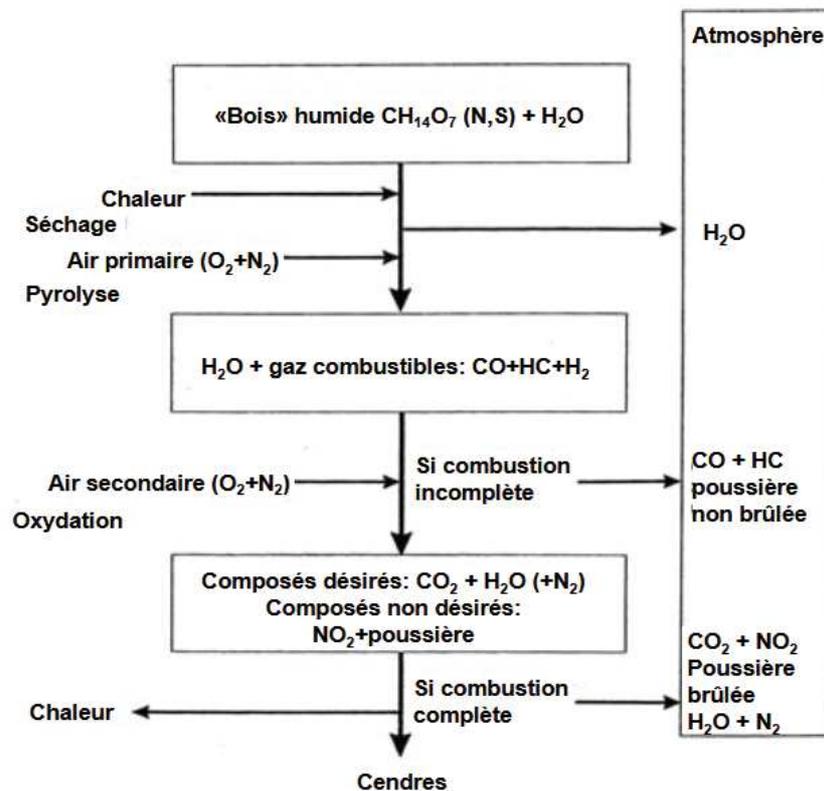


Schéma des phases de la combustion du bois⁹

3.2. Etat de l'art des fours à pyrolyse

On distingue deux types de four à pyrolyse, suivant si la combustion et la pyrolyse sont menées dans la même chambre ou non. La majorité des fours à pyrolyse séparent les deux réactions, on parle dans ce cas de combustion indirecte. En effet, la quantité et la qualité du charbon produit y sont supérieures étant donné que les entrées d'air peuvent être évitées en confinant totalement la biomasse à pyrolyser. L'autre avantage d'avoir deux chambres distinctes est de pouvoir mieux contrôler l'homogénéité du chauffage de la biomasse à pyrolyser et donc la régularité du charbon produit. C'est une des raisons qui explique pourquoi les systèmes qui fonctionnent à combustion directe ont d'abord un usage de cuisson (tel que le *Top-Lit UpDraft*).

a) Four utilisé par l'association Culture Ailleurs

⁹ Suisse énergie partenaire, La combustion du bois, slide n°33

<https://slideplayer.fr/slide/3207392/>

Le four utilisé par l'association Culture Ailleurs (modèle [Exeter Retort](#)) est un four à double chambre, donc à combustion indirecte. Les charbonniers indiquent qu'ils peuvent produire jusqu'à 100 kg de charbon végétal par fournée. Ce four est composé de deux cylindres horizontaux, le petit étant la chambre autoclave de pyrolyse, positionnée dans le deuxième cylindre : la chambre de combustion (voir photos ci-après). La chambre de pyrolyse fait un volume de 1,6 m³.



Photo du four Exeter Retort, dont les portes de la chambre de pyrolyse (à l'intérieur) et de combustion sont ouvertes. Le feu permettant la montée en température est réalisé en dessous de la chambre de pyrolyse



Photo du four Exeter Retort, toutes portes fermées. La trappe du bas permet de contrôler l'arrivée d'air, et d'alimenter en bois le foyer de combustion au démarrage.

NB : les constructeurs du four *Exeter Retort* ne diffusant pas les plans de leur four, nous réalisons des plans 3D en Conception Assistée par Ordinateur, grâce aux mesures réalisées lors de notre rencontre avec les membres de *Culture Ailleurs*. Malheureusement, la fermeture des serveurs informatiques de l'ENSE³ ce vendredi à 18h ne nous a pas permis de finaliser et de réaliser les mises en plan de ce four. Nous les fournirons pour le rapport final, sous un format libre, afin de faciliter leur diffusion et d'enrichir les connaissances liées à l'utilisation des fours à pyrolyse.

b) Fours de petite taille

De nombreux design existent parmi les fours à pyrolyse à deux chambres. En particulier, on peut distinguer entre les fours horizontaux et les fours verticaux. Bien que la verticalité semble à priori être bénéfique pour les écoulements de gaz et les échanges thermiques, les fours horizontaux ont l'avantage d'être plus facilement utilisables (chargement et déchargement de biomasse). Ainsi, il semblerait que pour des processus non industriels, la forme verticale est seulement utilisée pour les fours de petite taille. Dès que l'on dépasse un certain diamètre (d'un mètre environ), les contraintes de manutention deviennent trop importantes pour choisir ce design.

3.3. Objectif et démarche de la conception

3.3.1. Objectif

Le sujet dégagé suite aux premiers échanges avec nos porteurs de projet était de **discuter la pertinence d'une réduction d'échelle du four, pour une production davantage locale et possiblement individuelle du four**. Pertinence à la fois écologique (impacts négatif et positif) et d'usage (utile, adapté).

Cela sous-entend une bonne compréhension des phénomènes liés à la pyrolyse. c'est pourquoi nous avons commencé par mener des recherches bibliographiques. Afin de maîtriser davantage le sujet avant de pouvoir en parler, notamment à de potentiels futurs utilisateurs.

3.3.2. Cahier des charges

L'objectif est de concevoir un four à pyrolyse accessible, durable et résilient. Ce triptyque peut être décliné en trois axes:

1. Pollution minimale (effet de serre et sanitaire)
2. Simplicité et sécurité d'utilisation (autonomie, contrôle maximum du processus, durée de fonctionnement raisonnable)
3. Optimisation énergétique (utilisation multiple de l'énergie dégagée)

En plus de chercher un bilan environnemental positif, nous devons garder à l'esprit qu'un tel objet doit servir la résilience locale. C'est-à-dire qu'il puisse être facilement réquisitionné par des individus pour répondre à leurs besoins élémentaires tels que la fertilisation des sols, le traitement de l'eau ou la production de chaleur.

3.3.3. Démarche de la conception

Généralités

Au début, nous avons à l'esprit que le cœur de notre projet consisterait à réaliser un four pour caractériser son fonctionnement, ses performances et ainsi appréhender la complexité des phénomènes par l'expérimentation.

Lorsque nous avons compris que le temps nous manquerait pour valider un design pertinent, complet et surtout sécurisé, nous avons jugé préférable de ne pas précipiter le mouvement et de nous focaliser sur la poursuite des recherches théoriques. D'autant plus que nous avons dans le même temps été sensibilisés à la gestion des risques, discipline particulièrement importante pour ce projet. Finalement, en intégrant ce nouveau point de vue sur l'objet que nous concevons, nous avons pu mûrir la réflexion (nouvelle version du design), mieux comprendre les phénomènes qui sont en jeu lorsque le four est en marche et donc avoir une meilleure connaissance de l'objet dans son ensemble.

Cette réflexion, que nous avons tenté de rendre la plus intégrée et complète possible, est la manière la plus juste pour nous de répondre à la question posée par l'association. En rendre compte par une documentation riche et ouverte nous a semblé représenter une plus-value importante.

Concrètement

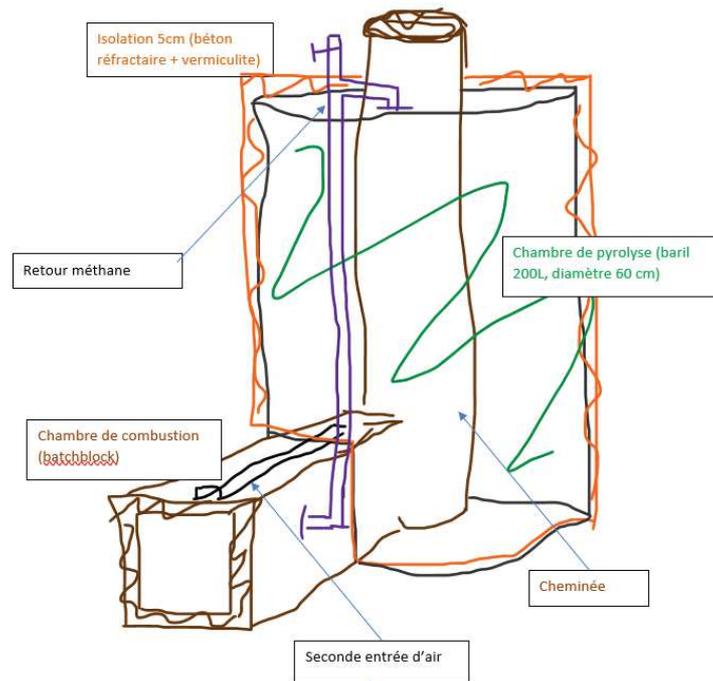
Nous sommes très vite partis sur un modèle de four à combustion indirecte, qui possède donc deux chambres. Le premier constat est qu'une bonne pyrolyse lente ne doit pas dépasser les 500°C environ. En parallèle, pour avoir une combustion complète, il faut atteindre des températures assez élevées (autour de 1000°C).

Pour pouvoir jouer sur ces deux plages de températures différentes, l'idée principale est d'utiliser une masse d'inertie entre la chambre de combustion et de pyrolyse (inspiration des poêles de masse) pour avoir un stockage de la chaleur dégagée par la combustion, qui puisse rayonner ensuite doucement vers la chambre de pyrolyse. Bien dimensionnée, cette idée présente plusieurs avantages: elle permet de maintenir une température plus constante et homogène autour de la chambre de pyrolyse, et donc d'assurer un charbon de structure plus régulière. Elle permet aussi de limiter la consommation de biomasse de combustion et donc la pollution du four. En effet, à partir d'un certain temps, les gaz de pyrolyse peuvent être recyclés pour alimenter le foyer de combustion et prennent ainsi le relais avec l'énergie dégagée par les réactions exothermiques qui ont lieu dans la chambre de pyrolyse.

Les dispositifs accessibles et simples qui permettent d'avoir une combustion de bonne qualité, rejetant un minimum de gaz nocifs, sont peu nombreux. Le Rocket Stove est un modèle qui a fait ses preuves pour la cuisson d'aliments principalement. Sur la même idée, un four de masse à été pensé, le Batch Rocket¹⁰. La bibliographie réalisée nous laisse penser que c'est à l'heure actuelle le concept le plus pertinent pour notre situation. Les différentes dimensions sont basées sur les expérimentations sur plusieurs années de son créateur et ses performances semblent avoir été confirmées à plusieurs reprises depuis.

La première version du four regroupait donc un Batch Rocket, dont la cheminée est épaissie pour en faire une masse d'inertie, et un baril placé autour faisant office de chambre à pyrolyse, séparé de l'extérieur par une épaisseur d'isolant.

¹⁰ Batch Box Rocket by Peter Van den Berg [consultée le 20 octobre 2021]
<https://batchrocket.eu/en/workings#mixing>

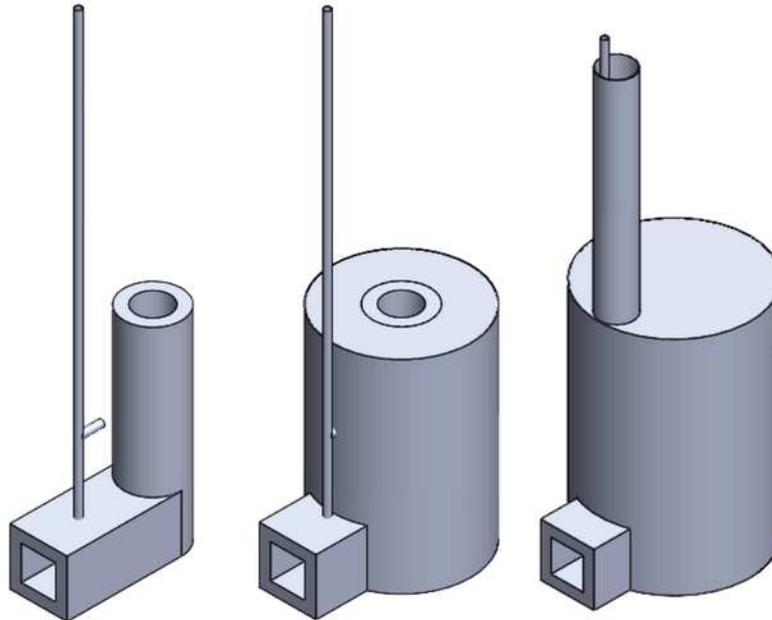


Croquis de la 1ère version du four à pyrolyse low-tech

Au détour d'une conversation avec notre professeur de thermique, la question des risques liés à l'utilisation d'un tel objet est apparue : le second constat était la dangerosité du processus. En effet, la combustion est menée à de hautes températures et surtout la décomposition de biomasse par pyrolyse rejette des gaz nocifs pour la santé (intoxication), pour l'environnement (pollution atmosphérique), avec un potentiel explosif non négligeable.

Avec une analyse des risques, nous avons pu identifier les potentielles fragilités de notre système, les parties critiques, les conditions pouvant mener à des dysfonctionnements, etc. Finalement, nous avons revu le design de notre four pour y ajouter des dispositifs permettant de rendre son fonctionnement plus sécurisé :

- Enceinte de confinement (à la place de l'isolant extérieur) pour "récupérer" et rediriger l'ensemble des gaz issu de fuites potentielles de la chambre de pyrolyse vers la cheminée, qui monte assez haut pour les éloigner des surfaces chaudes et des utilisateurs, et pour les diluer dans l'air ambiant.
- Soupape de sécurité en parallèle de la vanne. L'avantage d'une soupape est qu'une fois bien dimensionnée, elle fonctionne indépendamment de l'utilisateur.
- Capteurs de concentration en gaz reliés à alarme en sortie de cheminée pour signaler le non fonctionnement de la torchère du haut
- Capteur de température au niveau de la chambre de pyrolyse pour avoir une information sur l'état d'avancement du processus et pouvoir contrôler la combustion.



Modélisation 3D de la 2ème version du four à pyrolyse low-tech

L'utilisation de ce four est donc relativement simple :

- Remplir le cylindre de la chambre de combustion (présent sur la deuxième vue de l'image ci-dessus) de bois à pyrolyser puis le refermer
- Poser l'enceinte de confinement sur le tout (troisième vue)
- Allumer un feu dans le foyer de combustion (tube horizontal de section carrée)
- Comme pour le fonctionnement d'un four à pyrolyse *classique*, la température indique à quelle étape de la pyrolyse nous nous trouvons, il faut donc ajuster l'entrée d'air (non présente sur la modélisation) en fonction de ce paramètre. Le deuxième paramètre à prendre en compte est l'arrivée de gaz de bois émanant de la chambre de pyrolyse :
 - si nous désirons une montée en température, la vanne située sur le tube de reconduction des gaz (non présente sur la modélisation) permet de rediriger ces derniers vers la chambre de combustion
 - si la température est trop élevée, il faut ouvrir la vanne, ce qui permet de laisser s'échapper les gaz vers le haut, il faut alors les brûler à l'aide d'une torchère

Il est intéressant de noter que l'ajout de l'enceinte de confinement permet d'améliorer l'ergonomie de l'objet, car il est possible de retirer le cylindre de la chambre de pyrolyse pour remplir et vider le charbon.

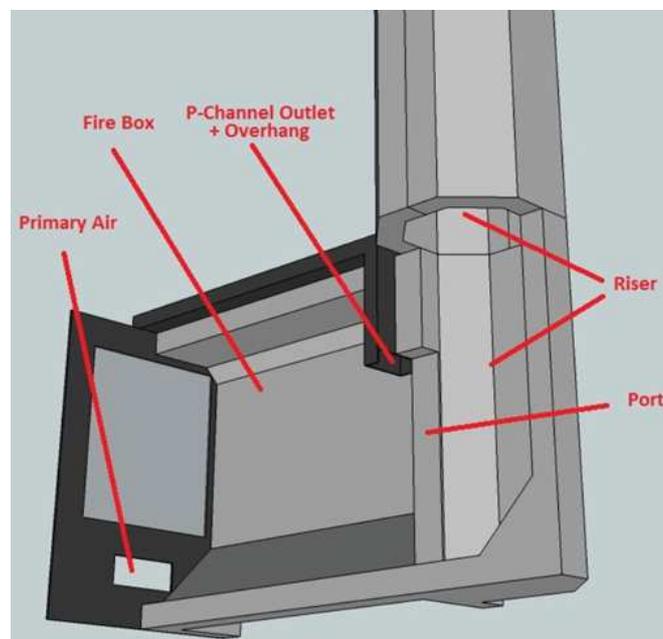
Pour favoriser une bonne qualité de charbon, il faut chercher à maintenir une température de pyrolyse uniforme. Pour ce faire, un certain niveau de contrôle est nécessaire. Il reste à savoir dans quelle mesure un bon dimensionnement couplé à une conception souple et adaptée permet de limiter le recours à des appareils sophistiqués. On peut toutefois noter qu'actuellement des fours électriques sont utilisés pour la pyrolyse car

le contrôle d'apport d'énergie est bien plus facile qu'avec une combustion. Cependant, c'est un niveau de complexité qui rend difficile la fabrication chez soi.

3.4. Présentation de la version finale

3.4.1. Présentation du fonctionnement

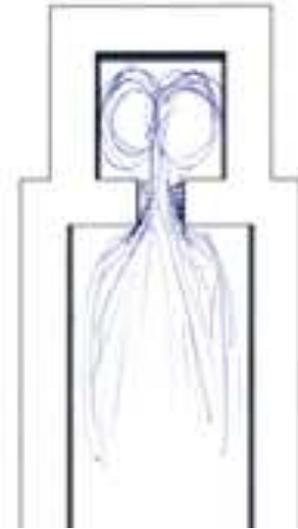
Comme expliqué ci-dessus, et à l'image du four utilisé par l'association, le four que nous avons conçu possède deux chambres distinctes. Le Batch Rocket en est le cœur et fait office de chambre de combustion. Son design est pensé pour maximiser les échanges thermiques entre le foyer et la cheminée qui est fabriquée à partir d'un matériau à inertie (habituellement des briques réfractaires). Cela permet à l'ensemble d'atteindre plus rapidement la température de fonctionnement optimale et améliore la combustion du mélange bois-gaz/oxygène qui est la base de l'efficacité du chauffage.



Plan du Batch Rocket¹¹

Cela est permis par le rétrécissement ("Port") situé entre le foyer ("Fire Box") et la cheminée ("Riser"). L'écoulement s'accélère par effet Venturi grâce à ce changement brusque de la section. Les molécules viennent ainsi percuter le bas de la colonne de cheminée en formant un double vortex. Les turbulences sont considérables dans la cheminée et permettent d'augmenter les échanges avec les parois. Les choix du concepteur sont justifiés jusque dans les moindres détails. Il souligne par exemple l'importance de faire un rétrécissement à bords carrés plutôt que lisses, pour favoriser les micro-turbulences et le bon mélange des gaz de réaction de combustion.

¹¹ Batch Box Rocket by Peter Van den Berg [consultée le 20 octobre 2021], licence CC BY SA, <https://batchrocket.eu/en/workings#mixing>



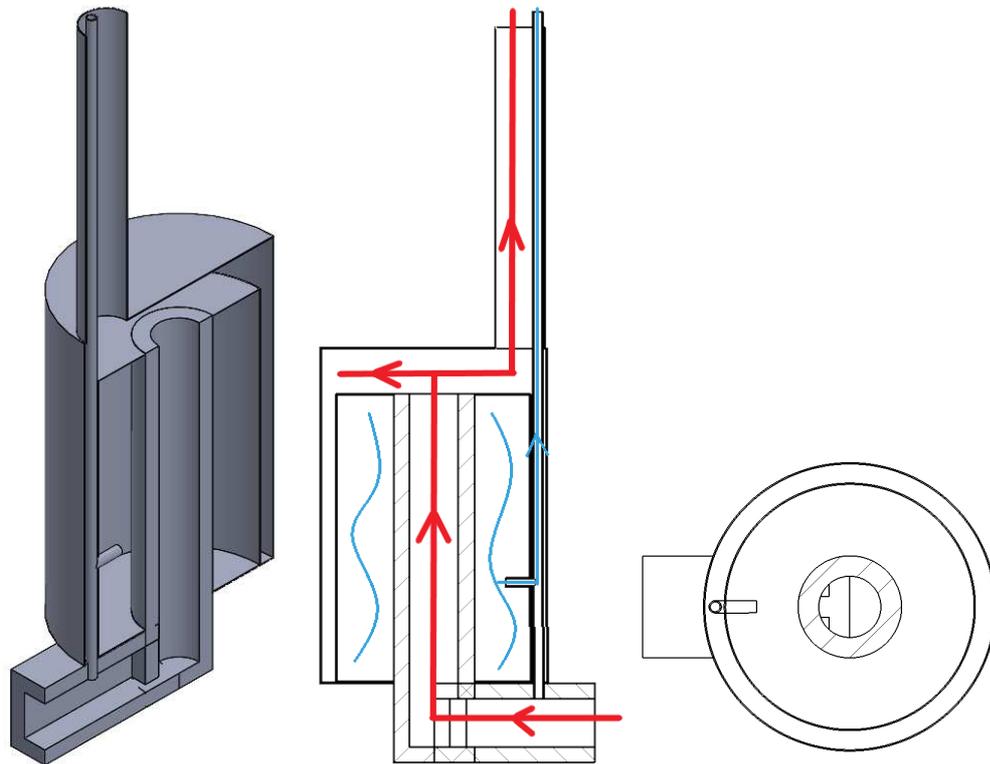
Dessin du double vortex dans le Batch Rocket (vue par le dessus)

La seconde idée originale de ce design est la canal ("P-Channel") d'acheminement d'air au cœur du foyer de combustion. L'avantage est que cet air est ainsi préchauffé et permet d'assurer une bonne alimentation en oxygène sans refroidir le cœur de combustion.

Autour de la cheminée du Batch Rocket, vient s'ajouter un baril qui fait office de chambre à pyrolyse. Les dimensions du Batch Rocket dépendent seulement du diamètre souhaité pour la cheminée (un coefficient qui a été trouvé par le concepteur), le point central du dimensionnement est l'épaisseur de la masse d'inertie qui sépare les deux chambres. En effet, comme expliqué plus haut, si nous arrivons à maximiser le temps où la chambre de pyrolyse est alimentée en chaleur par le brûlage de ses propres gaz au lieu d'utiliser de la biomasse, cela aura le double avantage de limiter les polluants à rejeter dans l'air et la quantité de bois utilisée comme carburant. Dans ces conditions, ce processus a des chances de revenir à un bilan carbone favorable comparé à une simple décomposition de la biomasse à l'air libre (voir partie "Bilan carbone"). C'est la question centrale pour savoir si l'usage d'un tel four a, d'un point de vue comptabilité carbone, un effet positif ou non sur le réchauffement climatique. Cependant, trouver la bonne épaisseur de masse d'inertie demande beaucoup d'expérimentations, ou bien, une modélisation thermique assez précise et plausible des échanges qui ont lieu entre les différentes parties au cours du temps (voir partie modélisation thermique).

Plans

La version du four à laquelle nous sommes arrivés est la suivante:



Vue isométrique en coupe verticale de la version finale ; schéma des flux de fumées (rouge) et de gaz de bois (bleu) ; vue en coupe horizontale

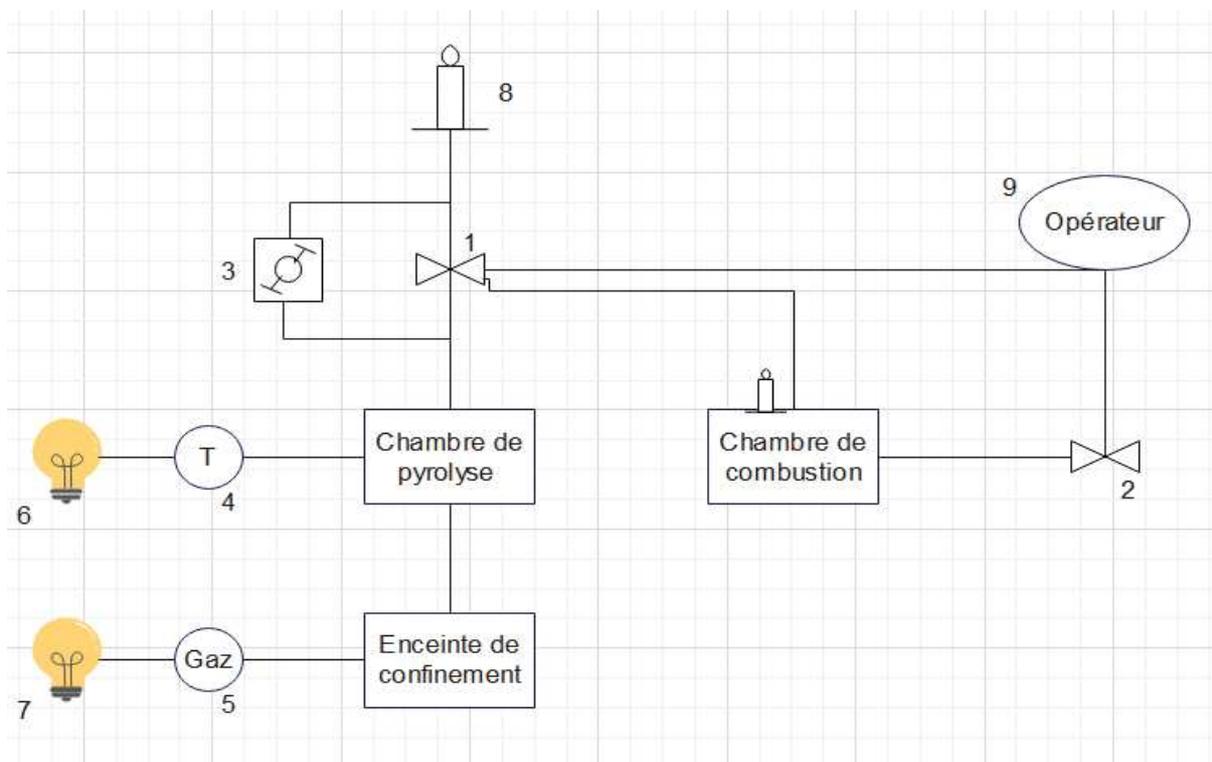


Schéma fonctionnel du four low-tech

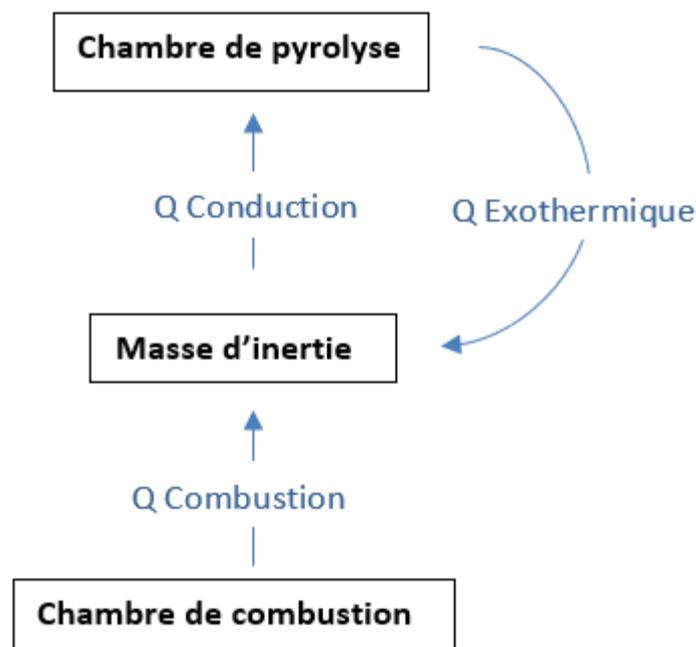
Légendes : Les éléments 1&2 sont des vannes ; 3 est une valve ; 4 un capteur de température ; 5 un capteur de gaz ; 6&7 des alarmes ; 8 est la torchère ; 9 l'opérateur. Les bougies illustrent les zones de flamme.

Pour la circulation des gaz de pyrolyse, un conduit couplé à une vanne permet de les diriger soit dans la chambre de combustion, soit dans la cheminée pour être brûlés par la torchère et renvoyés dans l'atmosphère. Dans ce dernier cas, des questions restent en suspens quant au placement des tuyaux de circulation et leur arrivée. Par exemple, bien que cela puisse paraître plus pratique et esthétique, il semble dangereux de faire passer le tuyau dans le conduit de la cheminée.

Les caractéristiques principales du four sont données en annexe, voir la mise en plan réalisée sur SolidWorks

Modélisation thermique

Ayant décidé de ne pas construire le four pour développer davantage son design en amont, nous avons tenté d'en réaliser une modélisation thermique. Il est important de rappeler que c'est un objet complexe qui est le siège de nombreux phénomènes interdépendants et difficiles à modéliser. Les principaux échanges qui ont lieu peuvent être représentés schématiquement de la manière suivante:



Échanges thermiques au sein du four

Pour appréhender cette complexité, nous avons commencé par représenter le système four avec une analogie électrique. L'idée est d'identifier les différentes parties du four à une résistance (transfert d'énergie), un condensateur (stockage d'énergie) ou à une source d'énergie et de représenter leur lien avec des fils. L'objectif est qu'à travers une

modélisation dynamique nous puissions voir l'évolution de la température dans la chambre de pyrolyse et l'énergie dégagée au cours du temps.

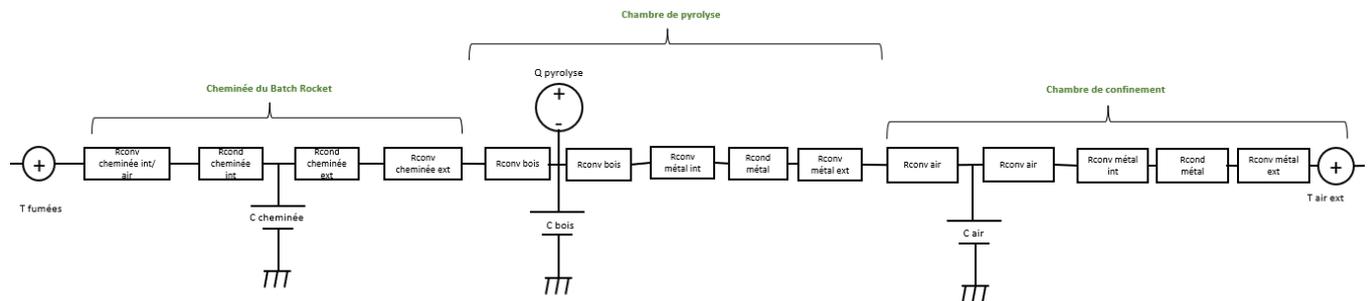


Schéma thermique du four

On identifie trois zones: la cheminée, en lien avec la chambre de pyrolyse remplie de bois, elle-même entourée d'une chambre de confinement où il y a seulement de l'air. Il y a trois lieux de stockage: dans la cheminée (qui est composé d'un matériau à forte inertie), dans le bois pyrolysé (qui prend de la chaleur pour se transformer) et dans l'air présent dans la chambre de confinement (qui agit d'une certaine manière comme un isolant). La température des fumées est fixée en entrée et est "véhiculée" dans les différentes résistances, qui modélisent soit un échange convectif (entre une paroi et l'environnement qui l'entoure), soit un échange conductif (à travers une paroi). La température extérieure au four clôt le schéma, c'est la deuxième condition limite du modèle. Enfin, les réactions chimiques ayant lieu dans la chambre de pyrolyse sont représentées par un générateur, qui capte de l'énergie (sous forme de chaleur) si la réaction est endothermique (signe - avec la convention bilan utilisée ici) ou qui en donne si elle est exothermique (signe +). Cela dépend de la phase de la pyrolyse à laquelle on est et donc du temps.

3.4.2. Analyse des risques

L'introduction à l'analyse et la gestion des risques a particulièrement aidé à pousser notre réflexion sur la conception d'un four à pyrolyse miniature. En effet, les dangers liés à son fonctionnement ont d'abord été négligés ou mal identifiés, ce qui a mené à réaliser un premier dimensionnement inadapté à un usage sécurisé. Ainsi, le premier travail a été d'identifier les différents types accidents possibles (explosion, toxicité de l'air, pollution atmosphérique) et leurs conséquences possibles, afin de réfléchir à des barrières pour limiter les risques d'apparition et d'amplification d'un événement potentiellement dangereux. Le diagramme suivant permet de synthétiser ce travail:

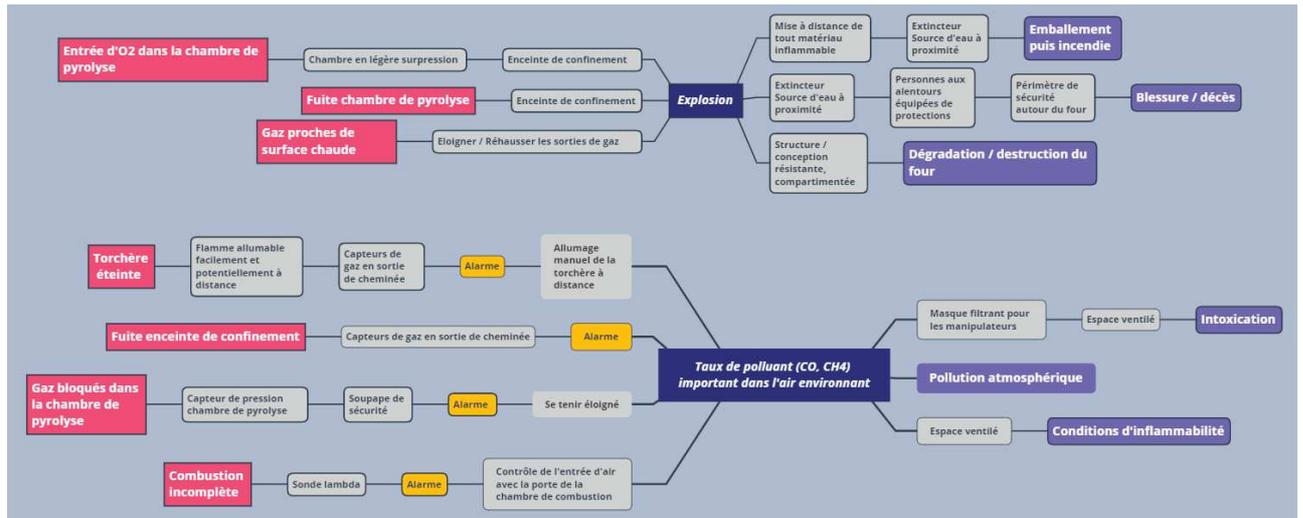
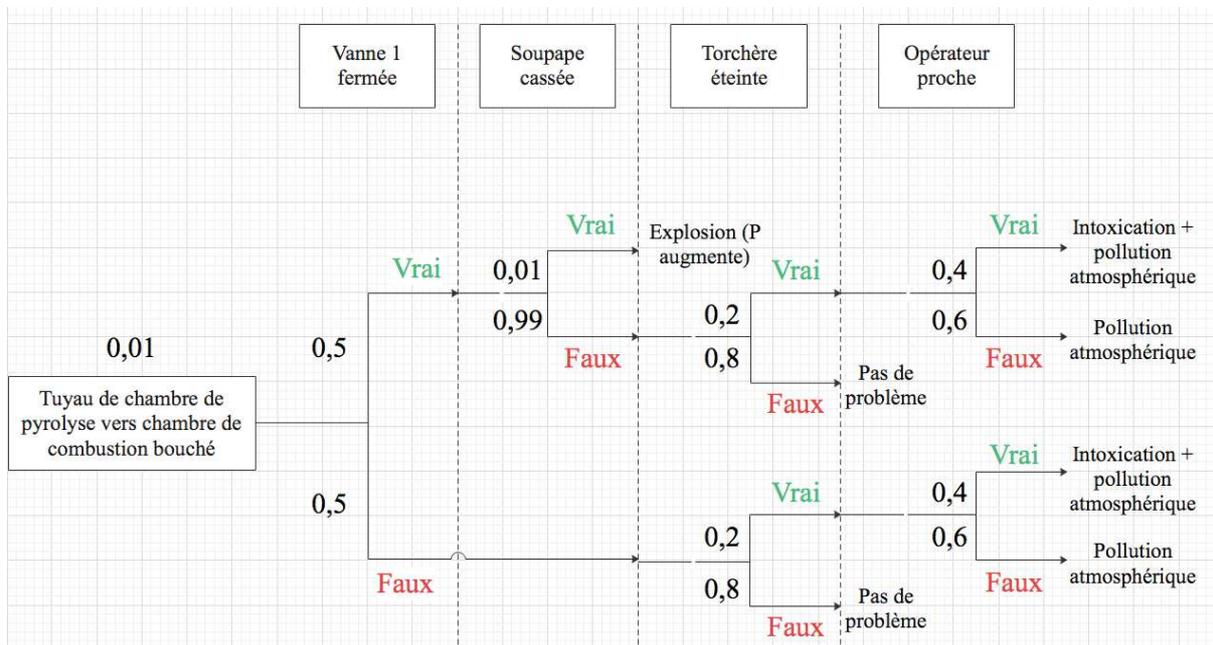


Diagramme papillon du four low-tech

D'autres méthodes ont aussi permis d'explorer davantage en détail le fonctionnement du four, pour finalement mettre à jour le diagramme ci-dessous en y incorporant de nouvelles barrières. Par exemple, la méthode HAZOP consiste à regarder chaque élément du four et anticiper les possibles dysfonctionnement et leur effet sur le reste des éléments. On peut aussi étudier les répercussions d'un événement en fonction de l'état du système (four + utilisateur):



Exemple d'un arbre de conséquence

On voit ainsi les différents scénarios possibles avec leur probabilité d'apparition. A noter que, dépendantes de notre niveau de connaissance du four, ces probabilités sont difficiles à évaluer et qu'elles sont donc à considérer comme un ordre de grandeur plutôt qu'un résultat précis et vrai. Pour résumer, trois phénomènes sont à surveiller car pouvant

mener aux événements dangereux identifiés: une trop haute montée en température et/ ou en pression du four et / ou un relargage de gaz non brûlés (voir annexe: Analyse de risque: arbres de défaillance). Il ressort qu'en complément de tous les dispositifs imaginables pour sécuriser l'usage de ce four, une bonne formation de l'utilisateur est primordiale.

3.4.3. Fabrication et utilisation

Fiche de fabrication

Pour réaliser le four miniature, nous avons d'ores et déjà quelques idées, dont la plupart s'inspirent grandement du tutoriel "Poelito" réalisé par le Low-Tech Lab ¹². Ainsi, le moulage du batch rocket peut être réalisé avec du carton. Par exemple, pour faire la cheminée en béton il faut fabriquer un moule à l'aide de 2 tubes de carton placés l'un dans l'autre. Le site internet du batch rocket (cité plus haut) donne aussi beaucoup d'astuces de fabrication.

La cheminée peut être coulée en béton réfractaire composé d'eau, de ciment fondu et de chamotte réfractaire. La chamotte est pertinente pour l'usage que l'on souhaite donner à la cheminée. Elle est composée d'argile cuite broyée et entre 25 et 40% d'alumine. Cette brique est dense (comparable au béton), ce qui lui procure une bonne inertie (davantage que la vermiculite, qui est plutôt utilisée pour isoler) et donc des propriétés de stockage de chaleur importantes. A priori, elle peut résister jusqu'à 1700°C.

On peut noter que pour améliorer la souplesse et donc la résistance du batch rocket, il faudra veiller à diviser le tout de manière à séparer les parties les plus chaudes des plus froides car c'est à leur jonction que la dilatation thermique est la plus forte. Les joints peuvent être scellés avec du papier de silicate d'aluminium et les pièces maintenues ensemble au moyen d'un fil d'acier, d'un grand collier de serrage ou d'un cadre de support en acier. Sinon, une solution plus simple peut consister à faire un liant en argile/ sable.

Pour le reste du four, nous nous sommes inspirés des tutoriels permettant de produire des cuiseurs, notamment le modèle Oxalis, documenté sur ce pad en ligne : https://pad.lescommuns.org/cuiseur_oxalis_PISTE#

Fiche d'utilisation

Équipement et dispositifs de sécurité

- Masque filtrant
- Eau à proximité/ extincteur

Explication du processus

- Allumer les capteurs du four, vérifier leur bon état de fonctionnement (température cohérente)

¹² Tutoriel du Poelito, réalisé par le Low-Tech Lab [consultée le 17 novembre 2021]
https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Poelito_-_Poêle_de_masse_semi-démontable

- Remplir la chambre de pyrolyse avec la matière organique destinée à être pyrolysée
- Fermer le couvercle de la chambre de pyrolyse et celle de l'enceinte de confinement
- Ouvrir la vanne d'évacuation de la chambre de pyrolyse
- Allumer le foyer de combustion (lien vers un site / tuto pour bien allumer un feu!)
- 1ère phase : déshumidification du bois de pyrolyse (s'assurer que la combustion est maintenue), **jusqu'au** changement de couleur des fumées en sortie de vanne (couleur blanche lors de cette phase, la vapeur d'eau est évacuée - température de 150°C environ dans la chambre de pyrolyse)
- 2ème phase : après constatation du changement de couleur de la fumée (passage de fumée d'une couleur blanche à une couleur grise / transparente) : fermer la vanne (les gaz de bois issus de la chambre de pyrolyse sont alors redirigés vers la chambre de combustion) : s'assurer visuellement qu'il y a une toujours une flamme dans le foyer pour brûler les gaz.
- **Lorsque** la température de la chambre de pyrolyse dépasse environ 450°C:
 - Dans un premier temps, ouvrir la vanne de sortie de pyrolyse afin de réduire le carburant entrant dans la chambre de combustion (avec pour effet de baisser la température) et **allumer la torchère** pour brûler les gaz de bois s'échappant de la chambre de pyrolyse. Veillez à toujours porter vos EPI pour éviter toute brûlure.
 - Dans un second temps, il est possible d'ajuster l'intensité de la combustion en jouant sur l'ouverture de la porte et donc sur l'entrée d'air. Veillez à consulter le capteur d'oxygène afin d'avoir une combustion complète (s'il reste de l'oxygène en sortie de cheminée, c'est que la combustion est quasi-complète, sinon, une partie des gaz peut ne pas avoir été brûlée).
 - Nous recherchons un régime stable lors de cette étape (c-à-d une température constante), il faut donc ajuster régulièrement l'ouverture de la vanne et celle de l'entrée d'air afin d'atteindre ce régime stable.
- A partir de ce régime (quasi) stable, lorsque la température de la chambre de pyrolyse commence à baisser malgré la reconduction totale des gaz de bois dans la chambre de combustion, cela indique la fin de la pyrolyse (cela correspond à une diminution de la production de gaz de bois) et donc le début de la phase de refroidissement.
- Observer l'évolution de la température dans la chambre de pyrolyse, attendre d'atteindre une température permettant d'ouvrir les couvercles et de manipuler le charbon (de plus, si la température de la chambre de pyrolyse est trop élevée (environ 500°C), le charbon risque de s'auto-enflammer au contact de l'oxygène présent dans l'air.
- Ouvrir les couvercles
- Récupérer le charbon

En cas d'alarme:

Du capteur de gaz en sortie de cheminée:

- Mettre un masque filtrant
- Si la vanne est:

- ouverte: s'assurer que la torchère est bien allumée
- fermée: s'assurer qu'il y a une flamme dans le foyer
- Se tenir éloigné

Du capteur de gaz au niveau du foyer de combustion (c-à-d mauvaise combustion):

- Mettre un masque filtrant
- Ouvrir davantage la porte pour faire entrer de l'air

Du capteur de pression de la chambre de pyrolyse:

- Se tenir éloigné

Du capteur de température de la chambre de pyrolyse (trop élevée):

- Fermer la porte de la chambre de combustion pour arrêter la combustion
- Ouvrir la vanne
- S'assurer que la torchère est bien allumée

Maintenance

- Ramonage régulier des tuyaux (la fréquence reste à voir avec l'expérience)
- S'assurer du fonctionnement des éléments électroniques, de la soupape et de la vanne
- Vérifier régulièrement l'état du four (identifier et colmater les possibles fissures, fuites...)

3.5. Impacts écologiques et sociétaux

3.5.1. Analyse de cycle de vie des fours

Afin de pouvoir comparer les impacts écologiques et sociétaux de l'utilisation d'un four à pyrolyse *Exeter Retort* à l'utilisation d'un four à pyrolyse low-tech, nous avons réalisé une Analyse de Cycle de Vie (ACV) des deux utilisations, qui est détaillée ici : https://pad.lescommuns.org/ACV_Four#

Une ACV suppose de nombreuses hypothèses et de nombreux choix, mais la base d'une ACV est la définition d'une Unité Fonctionnelle (UF), c'est-à-dire «l'unité de référence dans l'Analyse de Cycle de Vie. Elle permet d'exprimer les impacts sur un élément représentatif et bien caractérisé d'une construction, pendant une durée de vie prédéterminée.».

Pour cette ACV, nous avons décidé de définir l'UF comme suit :

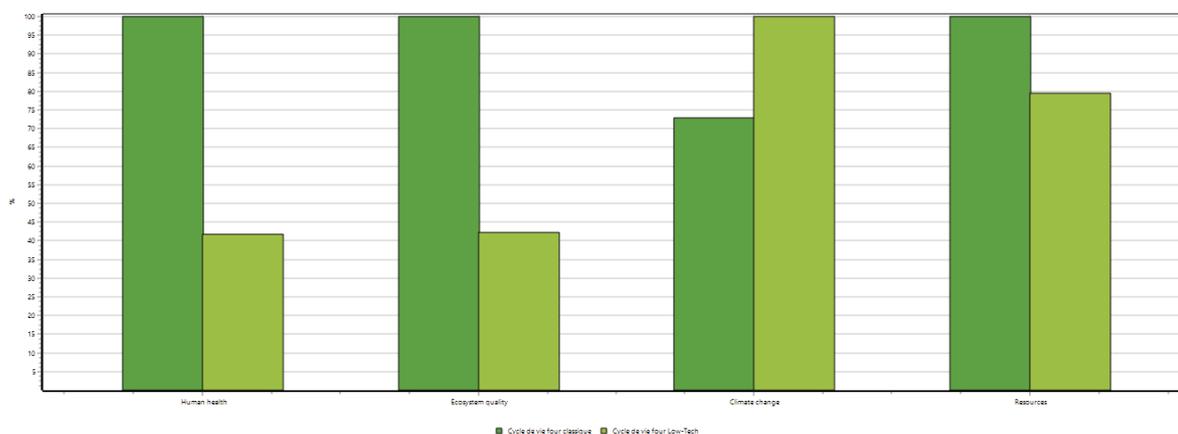
Fabriquer 300 kg de charbon par mois pendant 20 ans

En prenant en compte la capacité de production des fours, nous avons calculé que nous devons faire 7 fournées avec un four low-tech pour avoir une quantité de charbon produite équivalente à celle produite avec une fournée d'un four classique. Pour le calcul de l'ACV, nous considérerons que l'on réalise une fournée avec 7 fours low-techs. De même, les fours low-techs ayant une durée de vie de 5 ans, nous devons changer 4 fois le four LT sur les 20 ans.

Nous allons ainsi comparer l'impact de la fabrication d'un four industriel à 28 fours low-techs

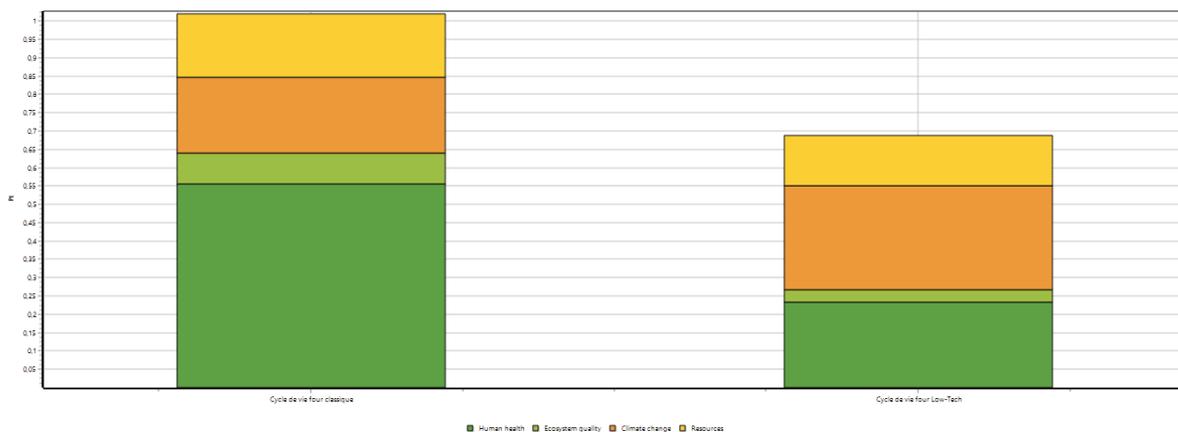
L'ensemble des hypothèses et des caractéristiques est détaillé dans le rapport d'ACV que nous avons joint en annexe.

Résultats :



Comparaison de 1 p Cycle de vie four classique avec 28 p Cycle de vie four Low-Tech, méthode: IMPACT 2002+ V2.14 / IMPACT 2002+ / Étude de dommages

Comparaison des impacts sur le changement climatique, la qualité des écosystèmes, le changement climatique et les ressources de l'utilisation du four Exeter Retort (vert foncé) et du four low-tech (vert clair)



Comparaison de 1 p Cycle de vie four classique avec 28 p Cycle de vie four Low-Tech, méthode: IMPACT 2002+ V2.14 / IMPACT 2002+ / Score unique

Accumulation des impacts pour l'utilisation du four Exeter Retort (à gauche) et du four low-tech (à droite)

Conclusions :

Nous pouvons observer que l'analyse dépendra des impacts choisis. L'impact sur le changement climatique et les ressources planétaires est plus important pour les 52 fours low-techs que l'impact d'un four industriel. En revanche, le four industriel aura un plus gros impact pour la santé humaine et la qualité de l'écosystème.

Les impacts étant fortement dépendants du transport des matériaux ainsi que de leur fabrication (ciment, acier), nous avons pensé à nous fournir en ciment au plus proche de la localisation de construction du four low-tech, et à réduire la quantité de ciment utilisée pour fabriquer la chambre de combustion, car seule une partie est utile pour faire chauffer la biomasse de la chambre de pyrolyse.

3.5.2. Bilan carbone

Dans cette partie, l'objectif est de réaliser un bilan carbone pour estimer la pertinence de la réduction de l'échelle d'un four à pyrolyse. Ainsi, on cherche à saisir les conditions limites au-delà desquelles la pyrolyse ne peut plus être considérée comme un moyen pour stocker durablement du carbone. En effet, comme nous l'avons vu, la pyrolyse rejette un certain nombre de polluants dont l'effet négatif peut surpasser le fait de produire du charbon s'ils ne sont pas bien utilisés ou traités. A noter qu'un certain nombre de recherches scientifiques identifient la production de biochar comme un levier pertinent pour extraire du carbone du cycle naturel et donc de limiter le réchauffement climatique ¹³.

Pour ce faire, l'idée est de comparer le cas où une certaine quantité de biomasse serait laissée à décomposer à l'air libre, du cas où elle serait pyrolysée. En sachant que dans ce dernier cas, le rendement et la qualité de la combustion et de la pyrolyse doivent être considérés suivant les caractéristiques du four utilisé (taille, réutilisation et traitement ou non d'une partie des gaz). A noter que dans ce cadre d'étude, la comparaison est limitée à un comptage d'émission carbone et ne compare pas, par exemple, les bénéfices respectifs du compostage direct de biomasse et de l'usage du biochar pour la fertilité du sol.

Décomposition à l'air libre

On peut chercher à estimer la quantité maximale de CO₂ qui peut se dégager dans une masse donnée de bois. Pour ce faire, en sachant que le taux de carbone (C) dans la biomasse se situe autour de 50%, on applique ensuite le rapport de masse molaire 44/12 pour convertir en masse de CO₂:

¹³ M. Koppe (2018), Enrichir les sols en carbone pour lutter contre le réchauffement climatique, *CNRS Le journal* [consultée le 19 décembre 2021]
<https://lejournal.cnrs.fr/articles/enrichir-les-sols-en-carbone-pour-lutter-contre-le-changement-climatique>

$$CO_2 \text{ bois air libre } [kg_{CO_2}] = m_{\text{bois}} * 0.5 * \frac{44}{12} \quad [1]$$

A noter qu'on fait ici l'hypothèse que du CO2 seulement est émis lors de la décomposition du bois (processus aérobie). En réalité, une part de cette biomasse est privée d'air et dégage de ce fait du méthane, mais nous considérons ici ce phénomène comme négligeable. En faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de stockage à moyen et long terme de ce carbone dans les organismes et le sol, nous utilisons cette quantité de CO2 à priori "maximale".

Partie combustion

En général, lorsque l'on souhaite calculer ce qu'émet en CO2 un carburant, on utilise son facteur d'émission. C'est une quantité de CO2 par quantité d'énergie dégagée par le carburant (souvent en [kgCO2/GJ]). Les tables de données de ces facteurs considèrent seulement le CO2 et font donc l'hypothèse forte que la combustion est complète (autrement on aurait une unité en équivalent CO2 pour prendre en compte les autres gaz émis). Le facteur d'émission de la combustion du bois vaut 95 kg CO2/GJ. On obtient la quantité totale de CO2 émis lors de la combustion d'une certaine quantité de bois avec la formule suivante:

$$CO_2 \text{ combu } [kg_{CO_2}] = m_{\text{bois combu}} * PCR_{\text{bois combu}} * FE_{\text{bois combu}}$$

Cette formule fait intervenir deux coefficients (le pouvoir calorifique et le facteur d'émission) avec des incertitudes liées aux hypothèses faites pour les calculer. On préférera garder la formule utilisée plus haut, qui est plus robuste:

$$CO_2 \text{ combu } [kg_{CO_2}] = m_{\text{bois combu}} * 0.5 * \frac{44}{12} \quad [2]$$

En considérant que du CO2 seulement est dégagé lors de la combustion, cela revient à nouveau à faire l'hypothèse qu'elle est complète. Cette hypothèse est optimiste, elle pourrait être ajustée par la suite avec une analyse des gaz de sortie de cheminée. Cependant, une alimentation suffisante du foyer en oxygène permet de s'en approcher, et le design du batch rocket est particulièrement conçu pour cela (avec le canal P notamment).

Partie pyrolyse

Pour la pyrolyse, on décide de ne prendre en compte que la pollution due au CO2, au CH4 et au CO (les autres gaz émis peuvent être négligés de par leur quantité), en supposant que l'ensemble du CO se transforme en CO2 dans l'air atmosphérique. On utilise ici le pouvoir de réchauffement global des gaz (PRG en [kg CO2/kg gaz]) qui représente la quantité de CO2 équivalente émise par une certaine quantité de gaz. Si on considère qu'il n'y a aucune valorisation des fumées on obtient:

$$CO_2 \text{ pyro } [kg_{CO_2}] = m_{\text{bois pyro}} * [(\%m_{CO_2} + \frac{44}{28} * \%m_{CO}) * PRG_{CO_2} + \%m_{CH_4} * PRG_{CH_4}]$$

où $\%m_{CO_2}$, $\%m_{CO}$ et $\%m_{CH_4}$ sont un pourcentage de gaz par rapport à la masse totale de bois mis dans la chambre de pyrolyse (ces valeurs varient énormément suivant les conditions d'expérimentation)

$PRG_{CO_2} = 1 \text{ kg } CO_2 / \text{kg } CO_2$ (référence) et $PRG_{CH_4} = 84 \text{ kg } CO_2 / \text{kg } CH_4$ (relatif à 20 ans)

Pour prendre en compte le fait que les fumées peuvent être brûlées soit dans la chambre de combustion, soit avec la torchère en haut de la cheminée, on fait l'hypothèse qu'une part du CH_4 devient du CO_2 lorsqu'il est brûlé. La formule précédente devient:

$$CO_2 \text{ pyro } [kg_{CO_2}] = m_{\text{bois pyro}} * \left[(\%m_{CO_2} + \frac{44}{28} * \%m_{CO} + \frac{44}{16} * \xi * \%m_{CH_4}) * PRG_{CO_2} + (1 - \xi) * \%m_{CH_4} * PRG_{CH_4} \right] \quad [3]$$

Avec $\xi \in [0; 1]$ correspond au pourcentage de CH_4 transformé en CO_2 .

Ainsi, $\xi = 1$ correspond à une combustion complète des gaz de pyrolyse et $\xi = 0$ au cas précédent, lorsque toutes les fumées de pyrolyse sont directement émises dans l'atmosphère.

Bilan

Pour comparer les deux processus, on réalise un bilan d'émission sur 100 kg de bois issu de la forêt ("déchets" forestiers) lorsque cette quantité est laissée à l'air libre et lorsqu'elle est utilisée pour faire du charbon (combustion + pyrolyse).

De la même manière que précédemment, la quantité de CO_2 stockée dans le sol si l'on considère que tout le charbon produit (avec un rendement massique de 30% environ) est mis dans le sols, correspond à:

$$CO_2 \text{ stocké charbon } [kg_{CO_2}] = m_{\text{bois pyro}} * \%_{\text{charbon}} * 0.5 * \frac{44}{12} \quad [4]$$

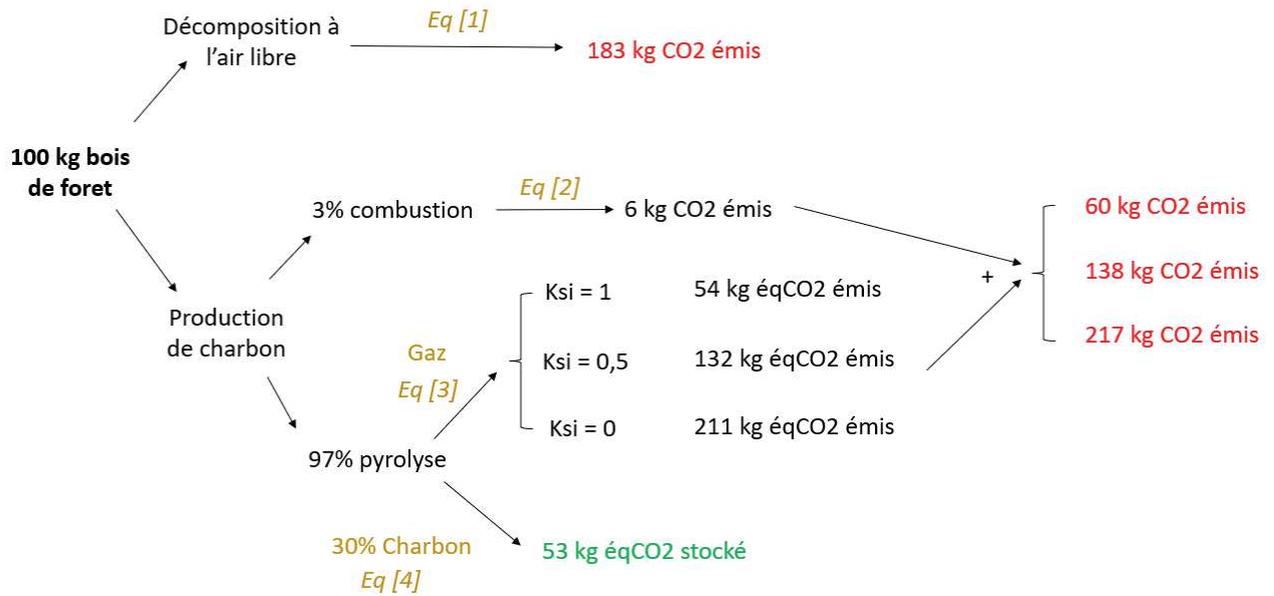


Schéma comparatif du bilan d'émission des deux processus

Le ratio de bois utilisé dans la chambre de combustion par rapport à celui utilisé dans la chambre de pyrolyse est une estimation faite à partir du four miniature. On estime 5 kg de bois brûlé pour 135 kg de bois pyrolysé, soit un ratio de 3%; A nouveau, ce ratio est très approximatif et ne pourra être réellement vérifié qu'avec des expérimentations sur un prototype.

Pour avoir un bilan carbone positif, c-à-d qui prélève effectivement du cycle plus de carbone qu'il n'en introduit sur le long terme, il faut respecter la condition suivante:

$$CO_2_{combu} [kg_{CO_2}] + CO_2_{pyro} [kg_{CO_2}] \leq CO_2_{bois\ air\ libre} [kg_{CO_2}] \quad [5]$$

On voit sur le schéma précédent que pour un ksi (ξ) situé entre 0 et 0.5 on a moins d'émissions CO2 pour le processus de fabrication de charbon. Cependant, il faut bien garder à l'esprit que les hypothèses faites sont fortes, à savoir que la combustion des gaz est complète dans tous les cas et qu'ainsi, tous le gaz émis est sous forme de CO2. De plus, seul le CO2, le CO et le CH4 sont ici pris en compte.

Cependant, cette première estimation permet de montrer que le bilan d'émission dépend grandement de la quantité de CH4 émis sous cette forme dans l'atmosphère (représentée par le ksi). On peut trouver la quantité limite de CH4 qu'il faut brûler pour qu'il y ait égalité dans l'équation [5]:

$$\xi \leq \frac{(CO_2_{bois\ air\ libre} - CO_2_{combu}) / m_{bois\ pyro} - (\%m_{CO_2} + \frac{44}{28} * \%m_{CO}) * PRG_{CO_2} - \%m_{CH_4} * PRG_{CH_4}}{\frac{44}{16} * \%m_{CH_4} * PRG_{CO_2} - \%m_{CH_4} * PRG_{CH_4}}$$

On trouve $\xi_{limite} = 0.07$, cela signifie qu'il faut brûler au minimum 93% des fumées de pyrolyse pour avoir un bilan positif, c'est-à-dire pour que la production de charbon émette moins que la décomposition à l'air libre.

On voit également qu'une part stable du carbone contenu dans le bois est transformé en charbon végétal si l'on considère un rendement de 30% (ordre de grandeur retenu pour une pyrolyse lente, le reste du carbone est utilisé pour former les gaz et le goudron) et peut donc être stocké dans les sols. D'un point de vue comptabilité d'émission CO₂, ce stockage est bénéfique que si la condition **[5]** est respectée. En réalité, pour être plus complet, il faudrait ajouter l'effet bénéfique à long terme du charbon sur la vie du sol (fertilisation, meilleure structure de l'humus, qui prévient ainsi de l'érosion), qui est plus important que la simple décomposition de biomasse à la surface du sol. De plus, cette augmentation de la densité carbone dans le sol permet potentiellement à davantage de végétaux d'y pousser et donc qu'il y a davantage de photosynthèse. Le lien entre la quantité de carbone dans un sol et l'activité de photosynthèse/ captage de CO₂ est certes difficile à établir et quantifier (il pourrait faire l'objet d'une thèse), mais bien présent. Bien entendu, tout cela n'a de sens que si la biomasse utilisée pour produire du charbon est un "déchet", que ce soit de l'exploitation forestière ou d'une production agricole. Cela sous-entend d'assurer une gestion réellement durable des écosystèmes où sont prélevés cette biomasse.

3.5.3. Expérience utilisateur (voir Annexes)

La méthode « expérience utilisateur », cherche à questionner la pertinence d'un prototype au contact de potentiels futurs utilisateurs. S'entretenir avec eux de manière neutre est primordial, pour ne pas influencer leur avis. Nous avons réalisé des entretiens auprès de professionnels, un agriculteur et un pépiniériste. Les réponses et questions ont permis de nourrir notre réflexion sur leur design et leur usage. En particulier sur le four, nous avons d'abord jugé que ce n'était pas la priorité étant donné que nous n'avions pas une idée assez claire de l'objet pour qu'il soit présenté. A mesure que se précisait la conception de l'objet, nous ressentions l'importance d'avis extérieurs pour questionner à nouveau notre proposition et confirmer ou non l'hypothèse initiale qu'un four de plus petite taille et accessible puisse être pertinent écologiquement, économiquement et socialement. Ainsi, à la suite d'une première phase de recherche, le design et la compréhension des enjeux liés à la pyrolyse étaient suffisants pour entamer un sondage de personnes potentiellement intéressées. Les résultats ont été riches d'enseignements et ont permis de soulever deux points importants : le manque de preuve concernant l'effet bénéfique du charbon végétal sur les sols, avec un climat comme le nôtre, et l'absence d'un modèle économique associé à l'usage de ce four. En particulier pour ces professionnels qui questionnent très justement la plus-value d'un tel objet (intérêt par rapport au temps passé). La simplicité d'usage (comprenant donc l'autonomie de fonctionnement du four) est un des critères de notre cahier des charges mais n'ayant pas fabriqué de prototype réel, il est actuellement encore difficile de se prononcer sur la durée d'un cycle de pyrolyse et de l'autonomie du processus.

3.5.4. Le four : un Commun?

La notion de commun comme regroupement d'une ressource, d'une propriété partagée et d'une structure de gouvernance nous semble être au cœur de la fabrication de charbon végétal à l'aide du four à pyrolyse. Historiquement, les charbonniers faisaient partie de ces gérants de la forêt qui valorisaient la ressource bois. Aujourd'hui, l'association ajoute à cette dimension la convivialité qu'apporte la mobilité et le partage du four pour valoriser la matière organique non utilisée. Le feu est au fondement des relations humaines, ce qui fait du four à pyrolyse un objet fédérateur, autour duquel se rassemble un groupe. Si les besoins et l'implication des habitants est suffisante, il pourrait être pertinent de considérer le four à pyrolyse comme un commun à l'échelle d'un village ou d'une communauté pour en faire un objet partagé, potentiellement mis en fonctionnement par et pour plusieurs personnes cherchant à faire du charbon avec leurs "déchets" de jardin ou d'exploitation. Ainsi, cela permettrait de répartir la charge que représente la mise en fonctionnement, la surveillance, la maintenance et également d'assurer une utilisation plus "optimale". On pourrait ainsi imaginer le four à pyrolyse comme les fours à pain d'autrefois mis au milieu des villages. Les fournées profitaient à toute la communauté et un roulement devait avoir lieu pour l'allumage, la cuisson etc. On pourrait également penser à raccorder le four à un réseau de chaleur commun à plusieurs habitations, qu'un agriculteur alimenterait pour valoriser sa biomasse inutilisée et qu'ainsi la surveillance de la pyrolyse soit assurée par une personne disponible parmi ceux qui profitent de la chaleur apportée par le four. La limite de cette idée est l'intermittence du fonctionnement du four et donc de l'apport en chaleur. De plus, cette vision sous-entend une taille conséquente du four. La question est de savoir pour chaque contexte quelle échelle est la plus adaptée. C'est dans cette optique, qu'en parallèle du four utilisé actuellement par l'association, nous avons développé un four de plus petite échelle, avec moins de capacité mais plus accessible et appropriable. Dans tous les cas, le processus de pyrolyse est complexe et son contrôle nécessite un bon niveau d'expérience et de connaissance. Cependant, comme nous avons commencé à le faire avec le four miniature, on peut faciliter le suivi de la pyrolyse en comprenant ce qu'il se passe à l'intérieur (dans une certaine mesure, c'est ce que permet une modélisation thermique) pour formaliser davantage (résumé dans la fiche "utilisation" pour l'utilisateur) et, s'il le faut, mettre en place des dispositifs pour améliorer le suivi et le contrôle du processus (capteurs, sondes, alarmes). Ainsi, la prise en main de l'objet serait facilitée et la contrainte d'origine sur le temps d'une pyrolyse et son suivi pourrait être réduite avec une gouvernance pertinente.

En fin de compte, beaucoup de manières de gérer un tel objet semblent possibles et une gouvernance pensée à la manière d'un commun pourra s'avérer pertinente dans certains cas. D'autant plus si l'on souhaite développer le rôle fédérateur et convivial du four au sein d'un groupe de personnes.

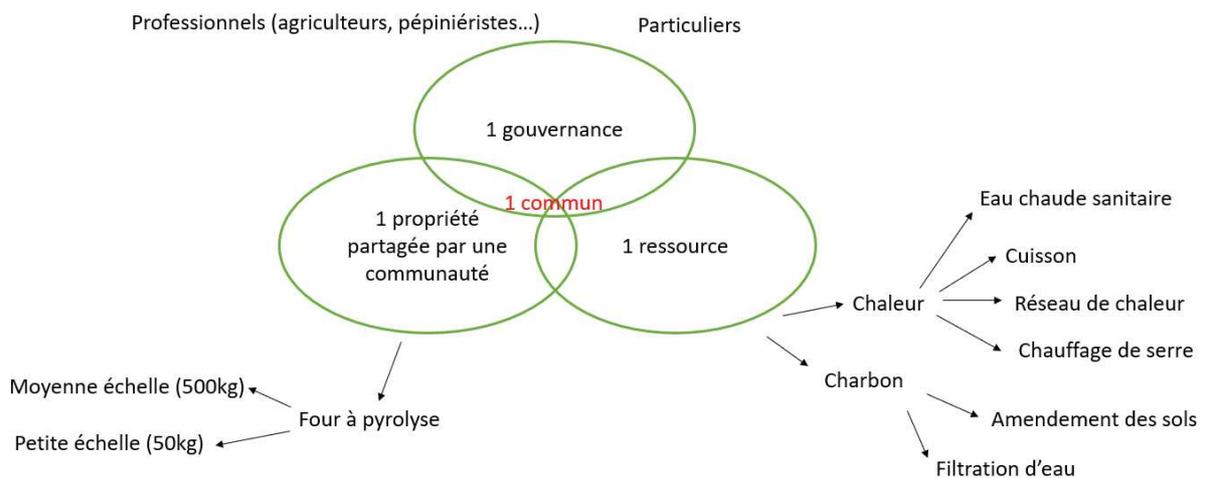


Schéma du commun four à pyrolyse

3.6. Limites et pistes d'amélioration

Au regard de ce qui précède, il apparaît qu'un four à pyrolyse de petite taille tel que nous l'avons développé soit vraiment pertinent si, en plus d'un bilan d'émission favorable, la chaleur produite est valorisée au maximum. D'un point de vue purement comptable, c'est un moyen pour assurer que la pyrolyse soit plus intéressante que la décomposition à l'air libre, car ainsi l'énergie produite pourra rentrer dans le bilan comme des émissions évitées. Nous avons identifié plusieurs manières d'utiliser cette chaleur :

- cuisson, directement sur la partie supérieure du four
- chauffage de serre agricole (pour une production en hiver)
- couplage du four avec un réseau de chaleur qui peut alimenter :
 - le chauffage d'un bâtiment
 - un ballon d'eau chaude sanitaire
 - un réservoir d'eau pour faire du stockage thermique intersaisonnier
- chauffage direct d'eau sanitaire (avec un tuyau enroulé autour du four)

Ces idées sont à l'heure actuelle des pistes, que nous n'avons pas eu le temps d'explorer sérieusement. A noter que la valorisation de la chaleur dépend aussi grandement des risques d'explosion et d'émission liés au four. En effet, si le risque est jugé vraiment important, on ne pourra pas placer le four en intérieur et donc profiter "directement" de la chaleur. A l'heure actuelle, il semble que son usage en intérieur n'est envisageable que dans une serre (voir la ferme du Bec Hellouin, nous recommandons toutefois une sonde de gaz pour identifier les possibles fuites de gaz dangereux), mais qu'il est plus sûr et pratique de placer le four en extérieur et de développer un moyen de récupérer le maximum de chaleur, pour que celle-ci soit par exemple utilisée pour du chauffage.

En plus de poursuivre le développement de la modélisation thermique, la conception actuelle nous paraît suffisante pour pouvoir réaliser un premier prototype. Bien que le dimensionnement de la soupape, le protocole précis de fabrication, la programmation des dispositifs de contrôle et leur placement sur le four restent à penser, de nombreuses choses pourraient être vérifiées et testées avec un protocole de caractérisation pertinent. Telles que la faisabilité de fabrication, le tirage de la cheminée, la circulation des gaz, la nature et la quantité d'émissions de gaz, la durée d'un cycle de pyrolyse etc. Ainsi, l'amélioration du four pourrait être poursuivie et sa connaissance complétée. Ces nouvelles informations pourraient également nous aider à développer un modèle économique plus précis pour les professionnels (agriculteurs, pépiniéristes...) qui naturellement demandent une preuve de l'intérêt financier, agronomique ou énergétique par rapport au temps investi pour fabriquer du charbon. De plus, cela pourra servir à l'ergonomie du four, qui jusque-là n'a pas encore été étudiée. Il serait notamment pertinent de réfléchir à rendre le retraitage du charbon situé dans le four plus pratique. Enfin, un point technique important et complexe reste à être abordé: la récupération des gaz et leur traitement/ réutilisation potentielle. Des charbonniers anglais ont visiblement réussi à valoriser les gaz voués à être émis, en énergie pour alimenter un groupe électrogène, et ce de manière relativement abordable.

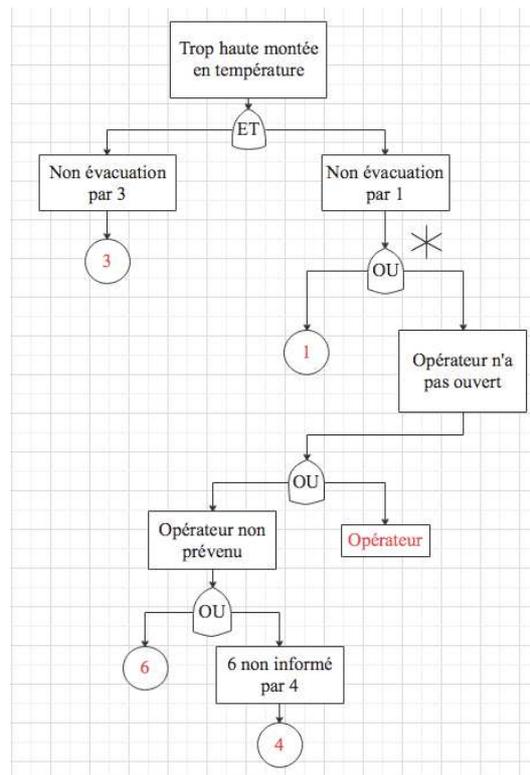
Conclusion

Ce travail peut d'abord être perçu comme un apport de connaissances général visant à mieux comprendre la pyrolyse et ainsi apporter des améliorations au four existant et à la manière dont il est utilisé. Mais ce travail étant principalement orienté vers une réflexion sur la réduction d'échelle, il apporte également des clés pour penser une manière de produire du charbon végétale de manière plus abordable. De nombreuses réflexions et expérimentations restent à être menées. En premier lieu, le recueil d'avis de potentiels futurs utilisateurs doit être poursuivi et diversifié, le lien avec des chercheurs en agronomie doit être maintenu pour connaître plus précisément les effets bénéfiques du charbon végétal sous nos latitudes. A en juger par les résultats présentés ci-dessus, nous pensons que l'idée de départ est pertinente, en particulier pour donner les moyens d'être plus résilient à une échelle réduite (fertilisation des sols, traitement de l'eau, esprit de partage et de convivialité) et que donc la réflexion mérite d'être poursuivie.

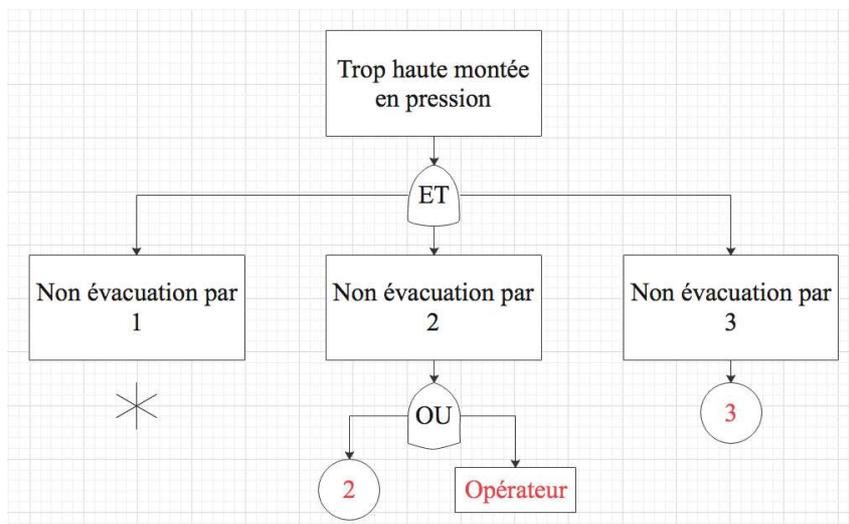
Annexes

Analyse de risque: arbres de défaillance

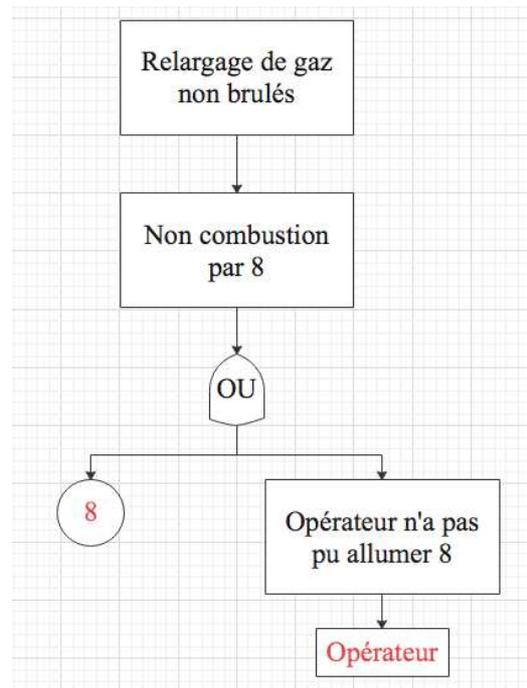
A partir du schéma fonctionnel du four présenté dans le rapport, on peut lire les arbres de défaillance suivants, qui cherchent à illustrer comment s'articulent les différentes causes pouvant menées au phénomène mentionné en haut de l'arbre.



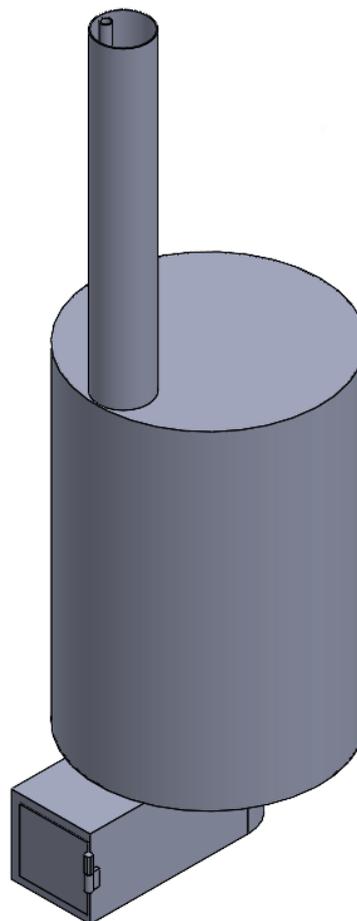
Arbre de défaillance menant à une trop haute montée en température



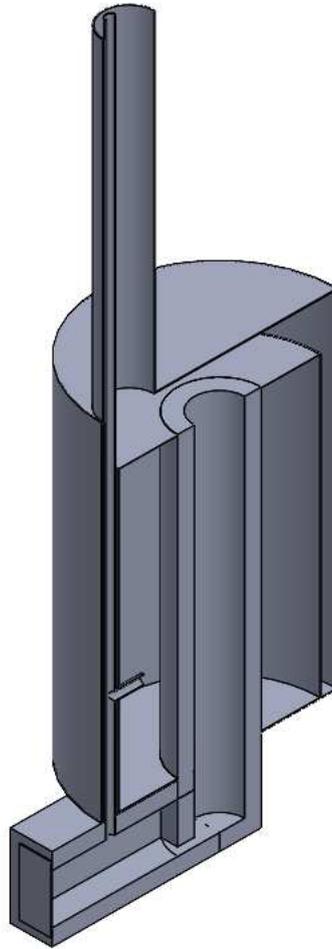
Arbre de défaillance menant à une trop haute montée en pression



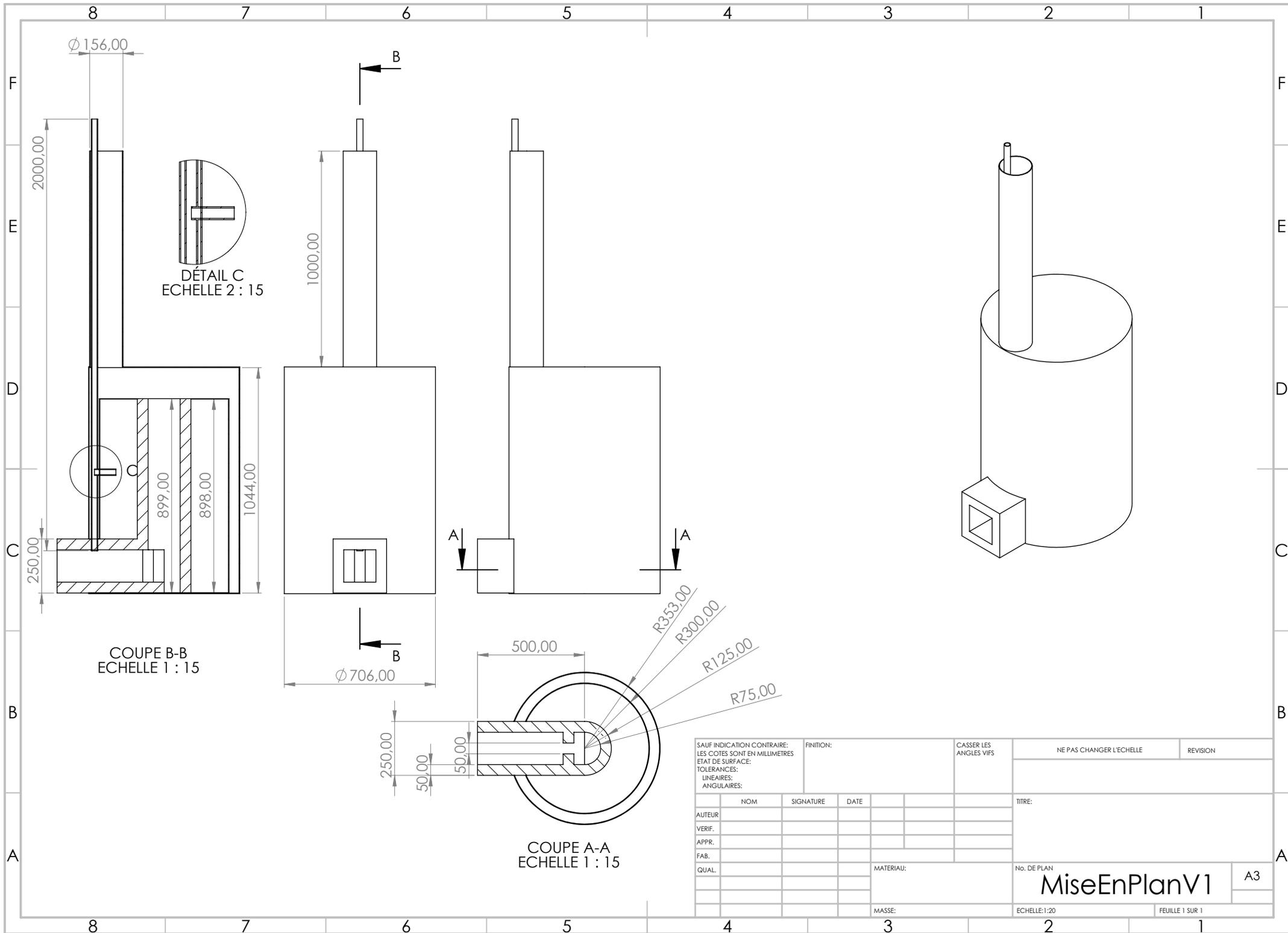
Arbre de défaillance menant à un relargage de gaz non brûlés



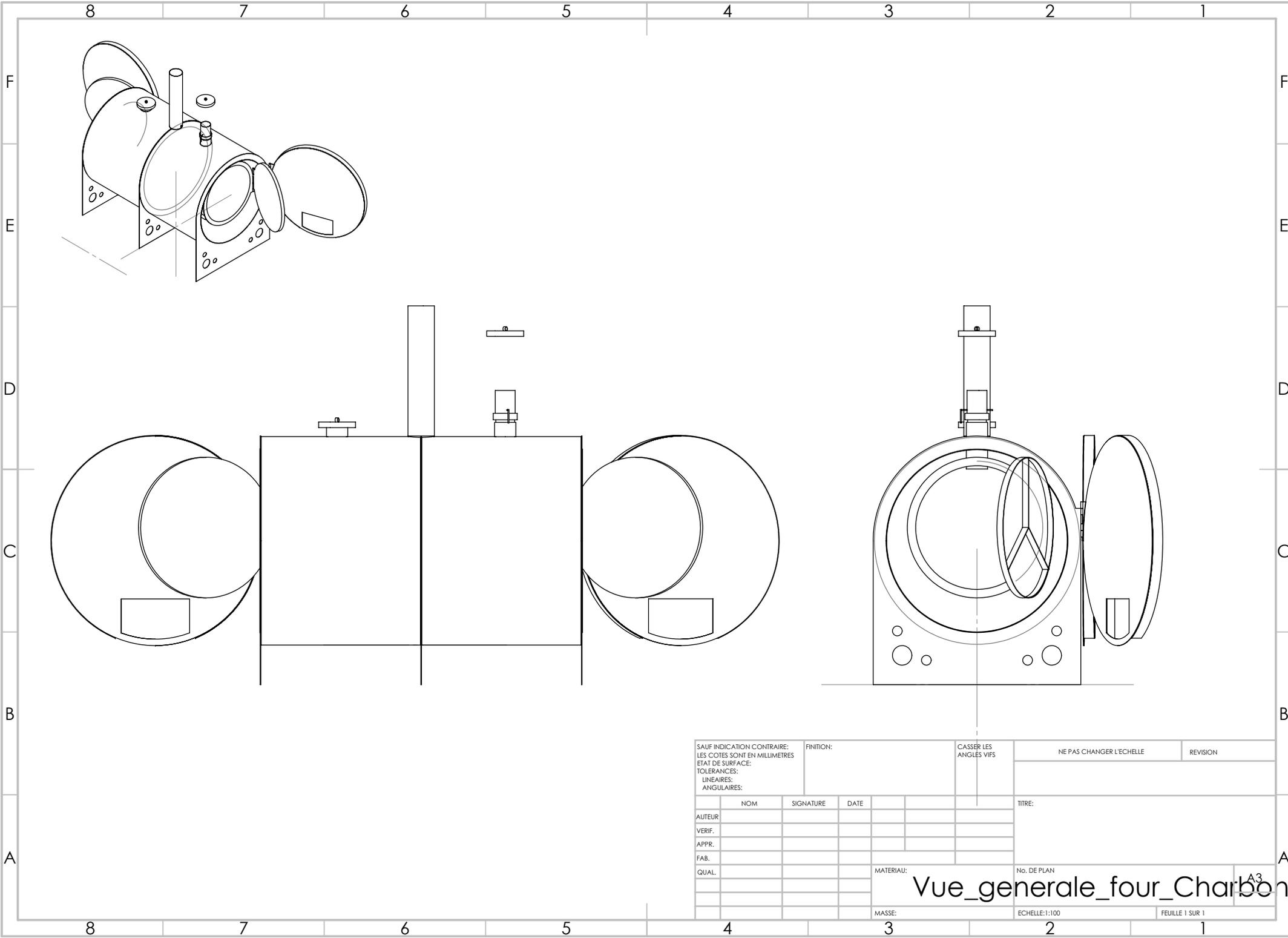
Vue isométrique de la V2 du four à pyrolyse low-tech



Coupe verticale de la vue isométrique de la V2 du four à pyrolyse low-tech



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:			
AUTEUR						<p style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">MiseEnPlanV1</p>			
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.									
				MATERIAU:		No. DE PLAN	A3		
				MASSE:		ECHELLE: 1:20	FEUILLE 1 SUR 1		



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:			
AUTEUR						No. DE PLAN Vue_generale_four_Charbonnier A3			
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.									
						MATERIAU:			
						MASSE:			
						ECHELLE:1:100			FEUILLE 1 SUR 1

Résultats des entretiens

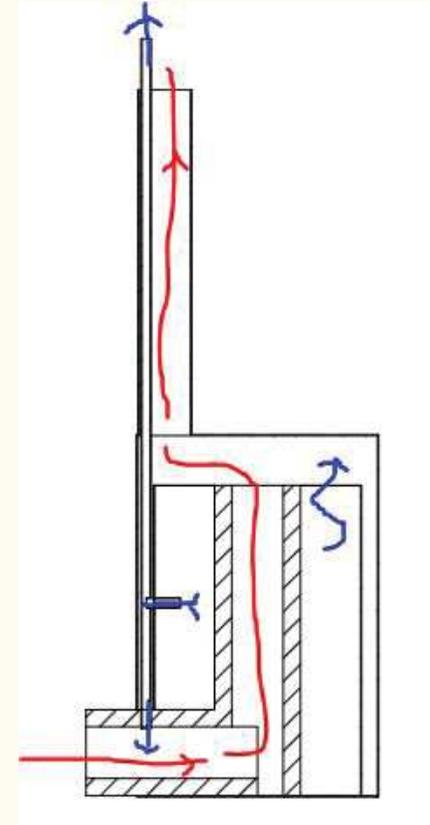
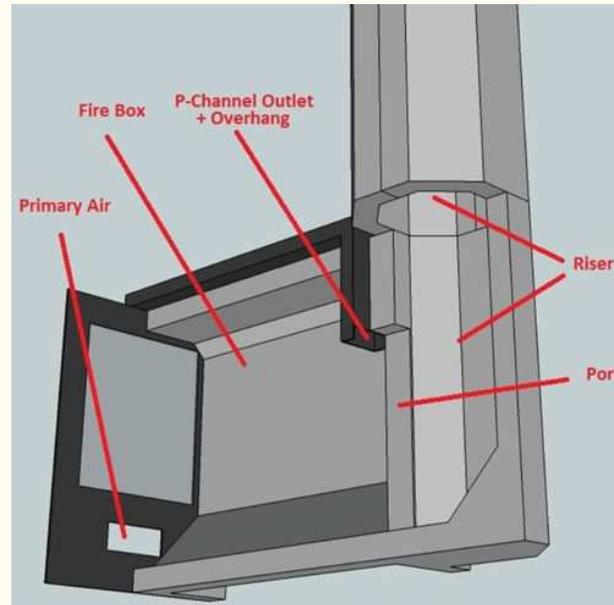


Expérience
utilisateur

Axel, Jean, Marc, Louis, Octave, Zoé

Le speech : Notre four à pyrolyse

- C'est quoi le charbon végétal ?
- A quoi ca sert ?
- Utilisation du four
- Fonctionnement



Notre démarche

- Pas de réponse des contacts proposés par l'association
- Démarchage par téléphone de fermes et pépinières, entretien en direct pour l'un, rendez-vous téléphonique pour l'autre.

Qui avons nous rencontré ?

- **Gérant de La ferme de la plaine**, ferme pédagogique en Isère
Fruits et légumes, plants de légumes, production d'huile essentielles ...
Appel téléphonique de 15 minutes

- **Directeur du site Cerdys**, pépinière en Maine-et-Loire
Horticulture et production de plants de petits fruit
Appel téléphonique de 30 minutes

Résumé de la présentation donnée aux interlocuteurs

Présentation du **contexte** : projet d'ingénierie avec association, 6 étudiants

Public visé : particuliers/professionnels qui produisent de la biomasse (Déchets verts, forestiers, maraîcher...)

Objet de l'entretien : **Four fabriquant du charbon végétal**

- Présentation des **propriétés** de filtration, de rétention et de stabilité des nutriments dans le sol (+ stockage carbone dans le sol)
- Principe de la **pyrolyse** : Chauffer de la matière végétale en absence d'oxygène

Utilité :

- Produire du **charbon** : usage agricole, filtration d'eau, toilette sèches,
- **Chaleur** importante à valoriser (chauffage de serre, eau sanitaire, cuisson ...)

Explication des **étapes d'utilisation** du four

Retours des interlocuteurs

Interlocuteur	Verbatim	Punchline	Besoin de la preuve de l'efficacité du produit	Expression de l'intérêt / du potentiel pour la solution	Limites perçues
Cerdys	"Combien de fois il faut introduire du charbon dans le sol?"		X		
Cerdys	"(...) la matière charbon me semble intéressante, pour améliorer la qualité des sols sur la partie pleine terre (...) on a des sols assez légers, par forcément avec une grande capacité de rétention à la fois en eau et en minéraux"			X	
Cerdys	"Si ça se confirme (...) ça pourrait être intéressant pour nos sols"		X	X	
Cerdys	"On cherche à la fois avec la pression de nos clients, et les restrictions qui arrivent sur l'emploi des tourbes, considérées comme ressource non-renouvelable, et de plus en plus de tourbières sont protégées donc on avait déjà commencé à travailler sur de nouveaux substrats renouvelables sans tourbes, dont le charbon végétal fait partie"			X	

Interlocuteur	Verbatim	Punchline	Besoin de la preuve de l'efficacité du produit	Expression de l'intérêt / du potentiel pour la solution	Limites perçues
Cerdys	"Ce qui est très important dans les substrats c'est la stabilité, c'est ce qu'on recherche, c'est pour ça qu'on emploie les tourbes"			X	
Cerdys	"Le produire en interne (...) ce serait possible, parce qu'on a la ressource (...) on génère du déchet végétal"			X	
Cerdys	"Est-ce qu'il y a une limite en teneur en eau pour faire du charbon végétal?"		X		X
Cerdys	"Il faudrait estimer combien de temps il nous faut pour générer la quantité de charbon nécessaire"		X		X
Cerdys	"Ca fait 700 fournées à faire (...) par rapport à la taille de la pépinière, le système paraît sous-dimensionné (...) c'est peut-être plus adapté à des structures plus petites"				X
Cerdys	"La limite c'est ça, c'est le temps à passer à générer la quantité nécessaire pour le site si on voulait l'utiliser en pleine terre (...) c'est la faisabilité de le faire en interne (...) et après c'est la compétence technique (...) ça demande un peu de formation et de compétences"				X

Interlocuteur	Verbatim	Punchline	Besoin de la preuve de l'efficacité du produit	Expression de l'intérêt / du potentiel pour la solution	Limites perçues
Cerdys	"Même si le produit est très intéressant, c'est pas une priorité pour nous de lancer ce type de processus, il faudrait revoir le coût, voir l'intérêt par rapport à l'achat en matière externe"		X		X
Cerdys	"Ce déchet végétal on le réutilise en interne, il y a un broyage quand même" "Ca n'a pas de coût pour notre activité"				X
Cerdys	"On serait intéressés d'avoir plus de résultats d'essais sur cette matière avant éventuellement d'aller plus loin sur la production chez nous"		X	X	
Cerdys	"Sur la partie stockage de carbone c'est un point qui pourrait être valorisé, commercialement, et montrer qu'en plantant, on stocke aussi grâce au substrat, on peut valoriser chez nos clients"			X	
Ferme de la plaine	"On a besoin que d'une chose c'est pailler nos sols"				X

Interlocuteur	Verbatim	Punchline	Besoin de la preuve de l'efficacité du produit	Expression de l'intérêt / du potentiel pour la solution	Limites perçues
Ferme de la plaine	"Ca me parait compliqué d'être toujours là, on est déjà beaucoup occupé"				X
Ferme de la plaine	"Il va falloir couper, broyer, pour que ca rentre dans le four"				X
Ferme de la plaine	"On se débarrasse très rapidement de nos déchets verts pour nourrir le sol et faire des haies. Le but premier étant d'aller vite"				X
Ferme de la plaine	"Ca peut être bien pour la valorisation de la chaleur surtout"		X	X	
Ferme de la plaine	"On fait de l'huile essentielle, c'est aussi prenant, mais matière bien valorisée"				X

Interlocuteur	Verbatim	Punchline	Besoin de la preuve de l'efficacité du produit	Expression de l'intérêt / du potentiel pour la solution	Limites perçues
Ferme de la plaine	"Aujourd'hui je ne vois pas l'utilité du charbon qu'on va récupérer. Et surement peu valorisable pour la vente comme l'huile essentielle non ?"		X		X
Ferme de la plaine	"Ca m'intéresse, si vous êtes dans le coin venez faire une démonstration"		X		

Phrases-clés

“On se débarrasse très rapidement de nos déchets verts pour nourrir le sol et faire des haies. Le but premier étant d’aller vite”

“On serait intéressés d’avoir plus de résultats d’essais sur cette matière avant éventuellement d’aller plus loin sur la production chez nous”

“Le produire en interne (...) ce serait possible, parce qu’on a la ressource (...) on génère du déchet végétal”

“Ce déchet végétal on le réutilise en interne, il y a un broyage quand même”

“Ca n’a pas de coût pour notre activité”

Les résultats

- Intérêt global pour l'utilisation, curiosité d'avoir davantage d'informations
- Identification de plusieurs limites (temps, rentabilité, compétences techniques)
- Intérêt environnemental et social

- Questionnements des potentiels utilisateurs :
 - Temps demandé et conditions d'utilisation du four pour son usage
 - Propriétés du charbon végétal
 - Rentabilité économique

- Pas de questionnements très techniques sur l'utilisation du four (prise en main, etc.)
- Pas de retour sur la possibilité de valoriser la chaleur du procédé

Conclusions

- Difficile de parler uniquement du four, le charbon revient au centre de la discussion
- Manque aux Charbonniers l'argumentaire autour du charbon, et surtout l'appui scientifique de résultats attendus : argumentaire "marketing" à développer
- Travailler sur la simplicité d'usage : gestion du four trop chronophage

Points de décision

- Prouver / documenter / annoncer la certitude de l'amélioration des sols grâce au charbon
- Déterminer la rentabilité économique de l'utilisation du four et la valorisation de l'énergie produite.