
Présentation et évaluation du four tournant pilote

Dans cette partie, le four tournant pilote est présenté. Ce four n'ayant pas été conçu pour la torréfaction, certaines faiblesses ont été identifiées. Des solutions techniques sont donc proposées et leur mise en œuvre est décrite. Les protocoles expérimentaux établis pour réaliser les essais de torréfaction seront également détaillés.

Les différentes biomasses qui ont été envisagées pour mener l'étude seront ensuite exposées, et la démarche adoptée pour leur sélection sera justifiée.

Enfin, deux essais seront sommairement présentés afin d'évaluer la stabilité du traitement et la répétabilité des essais à l'échelle pilote.

I. Le dispositif expérimental

I.1. Présentation du four tournant pilote

Une photographie du four tournant pilote utilisé pour les essais est présentée **Figure 26**.

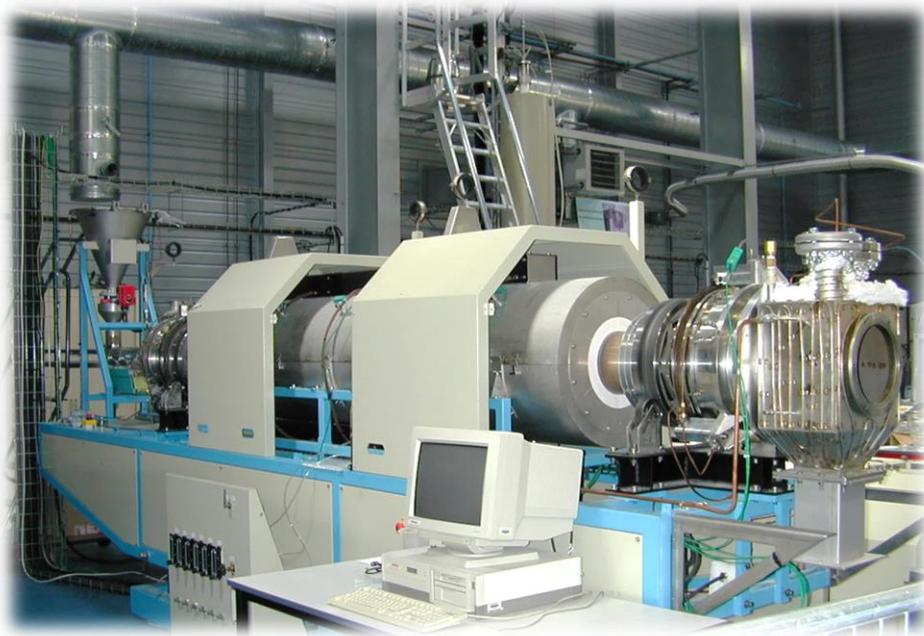


Figure 26 : Le four tournant pilote.

Ce four est constitué d'un cylindre en chromel (alliage nickel/chrome) dont la longueur L est de 4,2 m, le rayon interne R_i de 0,105 m et le rayon externe R_e de 0,107 m. La paroi interne est recouverte d'une grille métallique amovible qui augmente l'adhérence de la charge. Un moteur électrique permet la mise en rotation du cylindre à des vitesses comprises entre 0,5 et 21 tr/min. L'ensemble du four peut être incliné de 0 à 7 °.

Le matériau à traiter est introduit dans une trémie d'alimentation d'une contenance de 30 L fermée hermétiquement (voir **Figure 27**). Il est ensuite convoyé jusqu'à l'entrée du cylindre grâce à un couloir vibrant dont l'amplitude de vibration est réglable afin d'ajuster le débit. La liaison entre le couloir vibrant et la trémie est réalisée par un manchon souple. A l'autre extrémité du cylindre, le produit est récupéré dans des pots en métal fixés de manière étanche au caisson de sortie. Les gaz produits lors du traitement sont évacués vers un oxydateur thermique alimenté en propane qui permet leur combustion avant de les relâcher à l'extérieur.

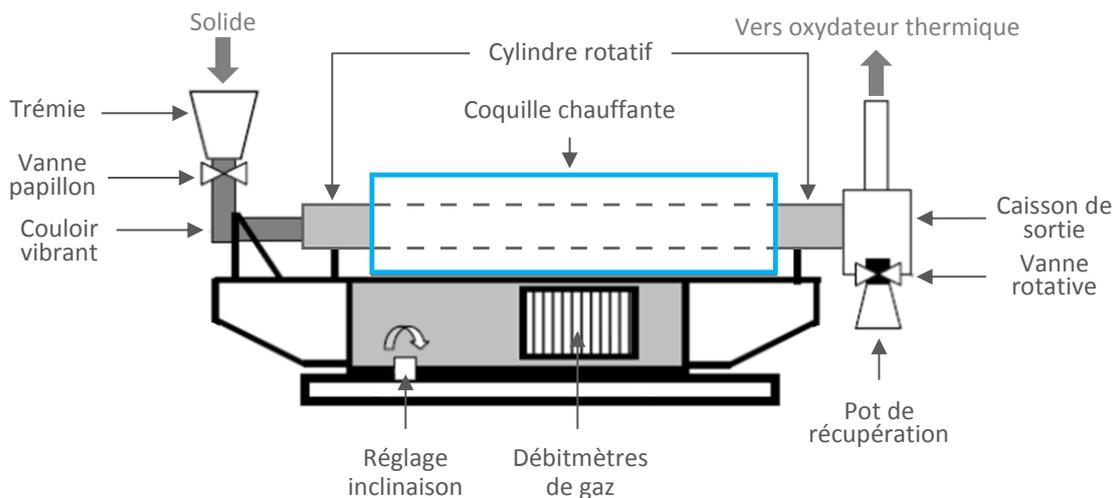


Figure 27 : Représentation schématique du four tournant pilote.

Une partie du cylindre est insérée dans une coquille chauffante présentée **Figure 27**. Cette coquille est divisée en 5 zones de longueur L_{zone} encadrées par 2 zones d'isolant de longueur L_{isol} (voir **Figure 28a**). Les principales dimensions sont récapitulées dans le **Tableau 9**.

Tableau 9 : Caractéristiques dimensionnelles de la coquille chauffante (en m).

| L_{zone} | L_{isol} | L_{amont} | L_{aval} | R_{coq} |
|------------|------------|-------------|------------|-----------|
| 0,5 | 0,125 | 0,65 | 0,8 | 0,147 |

La chauffe de ces zones est assurée de manière indépendante par des résistances électriques englobées dans de la fibre d'alumine. Une couche d'air sépare le cylindre de cette fibre qui est entourée par une épaisse couche d'isolant thermique (voir **Figure 28b**). La régulation de chaque zone est basée sur des mesures de température réalisées par deux thermocouples positionnés dans la couche d'air au centre de chaque zone. La température de la coquille est assimilée à ces températures [134]. La puissance délivrable par les résistances des zones 1 et 5 est de 10,8 kW et celle des zones 2, 3 et 4 est de 5,4 kW. Le caisson de sortie ainsi que la

liaison four tournant-oxydateur thermique sont tracés thermiquement à 200 °C afin d'éviter la condensation des matières volatiles.

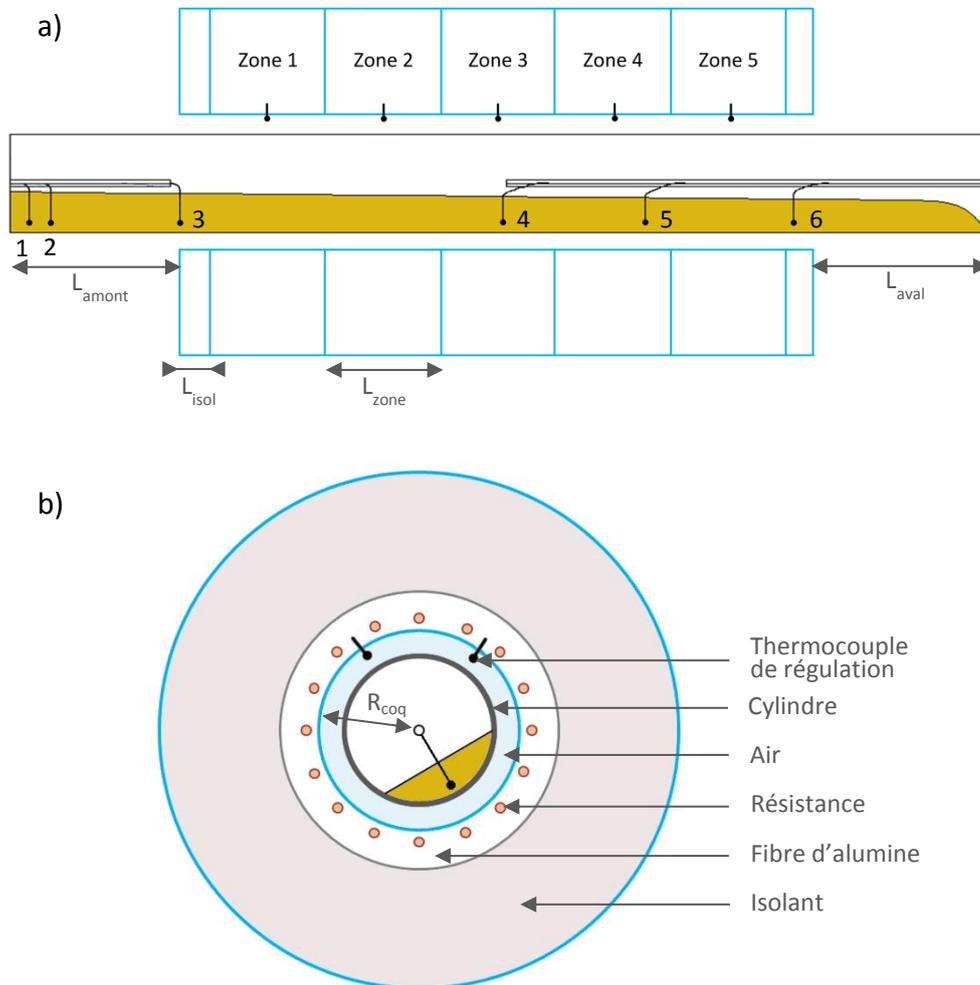


Figure 28 : Schémas de constitution du four électrique et position des thermocouples a) dans la longueur et b) en coupe.

Des débitmètres à flotteurs permettent de gérer la répartition des gaz (air ou azote). Pour des raisons de sécurité, des disques de rupture sont positionnés aux deux extrémités du four afin d'éviter une montée en pression de l'installation.

Enfin, la mesure de la température du lit de particules est réalisée grâce à 6 thermocouples :

- 3 sont insérés à l'entrée du cylindre (thermocouples 1, 2 et 3 **Figure 28a**) mais leur position exacte n'est pas connue et il est difficile d'accéder à cette extrémité pour les repositionner avec précision,
- 3 sont amenés *via* une canne fixe au niveau des zones de chauffe 3 et 4 et à la sortie du four. Leur position est connue précisément.

I.2. Evaluation des faiblesses du dispositif et solutions proposées

Ce pilote ayant été développé pour calciner des produits sous forme de poudre, certaines modifications ont dû être réalisées afin de l'adapter à la torréfaction de plaquettes de bois.

I.2.1. Régulation du débit d'alimentation

Initialement, le débit d'alimentation était réglé par étalonnage. Le signal électrique (0 – 20 mA) commandant l'amplitude de vibration du couloir vibrant était corrélé expérimentalement au débit d'alimentation avant chaque expérience. Il n'y avait donc pas de mesure ni de régulation continue du débit. Celui-ci était par conséquent soumis à des fluctuations comme présenté **Figure 29**.

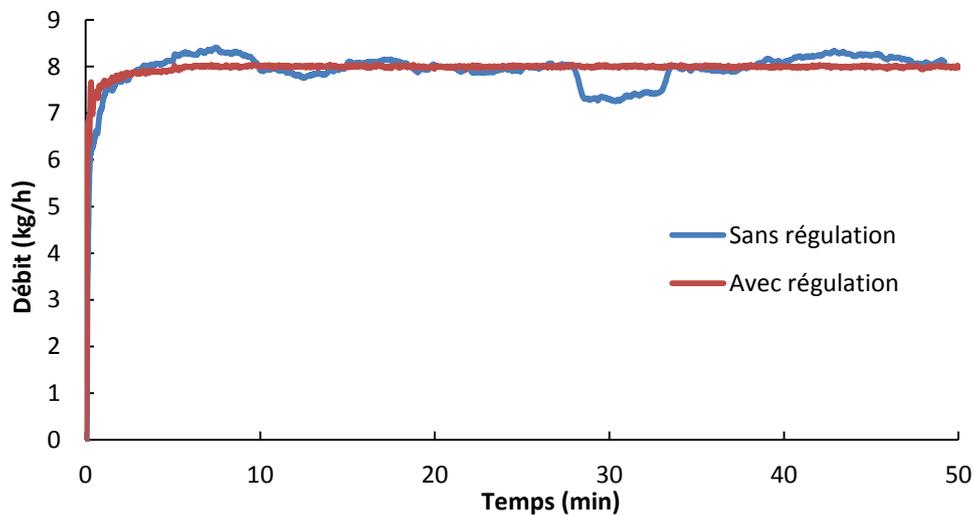


Figure 29 : Comparaison du débit délivré par le couloir vibrant avec et sans système de régulation.

Un doseur pondéral a donc été installé. La précision de la balance est de 0,2 g pour une portée de 300 kg. La masse du système d'alimentation (trémie + couloir vibrant) est ainsi mesurée en continu et une boucle de régulation PID a été implémentée afin de commander l'amplitude de vibration du couloir vibrant. Le débit d'alimentation peut ainsi être régulé entre 0 et 10 kg/h avec une précision de 50 g/h. La régularité du débit obtenu est très satisfaisante, comme illustré **Figure 29**.

Il faut également noter que la manipulation des plaquettes de bois implique l'apparition fréquente de voûtes (notamment à la base de la trémie). Lorsqu'un tel phénomène se produit, le débit d'alimentation diminue. Le système de régulation réagit alors en augmentant fortement l'amplitude de vibration ce qui permet l'élimination de la voûte sans intervention extérieure. Ceci contribue également à l'amélioration de la régularité du débit.

I.2.2. Interface de commande

La mise en place du système de régulation du débit présenté précédemment a été accompagnée d'une refonte totale de l'interface de commande du four devenue obsolète. La nouvelle interface, implémentée sous Labview® (National Instruments, Austin, États-Unis) permet le contrôle des paramètres opératoires :

- Vitesse de rotation du cylindre,
- Débit d'alimentation (réglage manuel ou régulation automatique),
- Température de consigne des différentes zones,
- Température de traçage du caisson de sortie.

Elle permet également l'acquisition des données expérimentales au cours du temps :

- Débit d'alimentation réel,
- Température de coquille des différentes zones,
- Puissance consommée par les résistances de chaque zone,
- Température du lit de particules.

Cette acquisition s'accompagne d'un tracé en temps réel de l'évolution des températures et permet d'évaluer la mise en régime permanent.

I.2.3. Fonctionnement en atmosphère inerte

Inertage du four

Jusqu'alors, le four tournant n'avait été utilisé que pour la calcination sous air. L'étanchéité de l'installation n'était donc pas problématique. Pour torréfier de la biomasse, il est cependant impératif de contrôler la qualité de l'inertage.

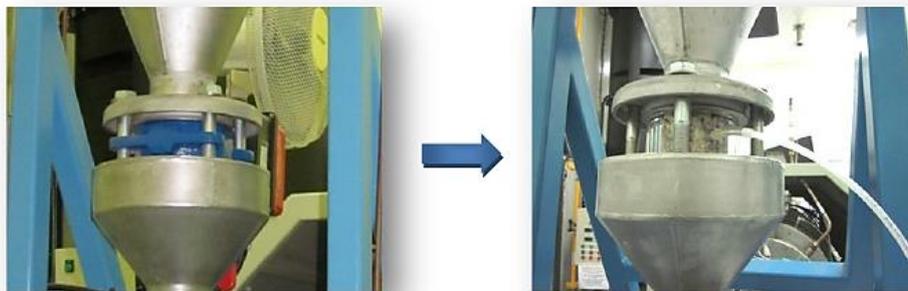


Figure 30 : Remplacement de la vanne papillon par une bride transparente avec injection d'azote.

La vanne rotative positionnée sous le caisson de sortie (voir **Figure 27**) – chargée de limiter l'entrée d'air lors d'un changement de pot – a été remplacée par une vanne à guillotine plus étanche.

Pour éviter les phénomènes de voûtage, la vanne papillon située à la base de la trémie a été remplacée par une bride transparente (voir **Figure 30**). Celle-ci permet d'une part le contrôle visuel du bon écoulement du solide et, d'autre part, l'injection d'azote afin de contrer l'entrée d'air lors de l'ouverture de la trémie durant une phase de rechargement. L'ensemble des positions auxquelles l'injection de l'azote est possible sont représentées sur le schéma du four tournant modifié **Figure 31**.

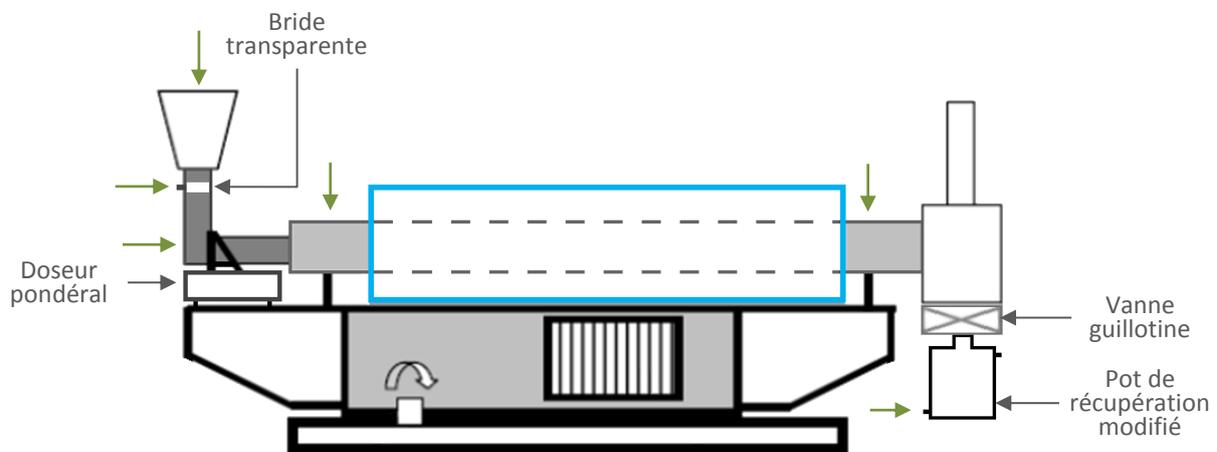


Figure 31 : Représentation schématique du four tournant pilote modifié et localisation des points d'injection d'azote (flèches vertes).

L'injection est donc réalisée :

- Au niveau des joints dynamiques qui assurent l'étanchéité des liaisons entre le cylindre en rotation et les parties fixes,
- Au niveau de la trémie d'alimentation pour limiter l'entrée d'air lors du rechargement,
- Au niveau de la bride transparente à la base de la trémie,
- A l'extrémité libre du couloir vibrant,
- Au niveau du caisson de sortie et des pots de récupération,
- A l'entrée ou à la sortie du cylindre rotatif suivant le mode de fonctionnement souhaité (co- ou contre-courant).

Un test d'étanchéité a été effectué. Les consignes de température des 5 zones ont été fixées à 250 °C. Le four est alors balayé avec un débit d'azote de 1 Nm³/h. Une fois les températures stabilisées, la teneur en oxygène dans le caisson de sortie a été mesurée à

l'aide d'un analyseur de fumées TESTO® 350 (Testo, Lenzkirch, Allemagne). Cette teneur est de 0,7 %vol. Lorsque le pot de récupération est enlevé, seule la vanne guillotine empêche l'entrée d'air et la teneur en oxygène atteint 1 %vol. Enfin, si la trémie est ouverte pendant 1 minute, cette teneur atteint 4,8 %vol.

Ces résultats sont donc satisfaisants, notamment au vu des tendances reportées dans la littérature. Il a en effet été observé [81] que la teneur en oxygène n'influence significativement le procédé que pour les teneurs supérieures à 10 %vol. De plus, il faut noter qu'en conditions réelles de torréfaction le rechargement en biomasse est réalisé lorsqu'il reste de la matière à la base de la trémie. L'entrée d'air dans le four est donc limitée, d'autant plus que le rechargement peut être effectué en moins d'une minute.

Inertage des pots de récupération

Une autre problématique inhérente au procédé de torréfaction est le risque d'emballement thermique lors du refroidissement du produit. Le principal facteur menant à l'apparition de tels phénomènes est le contact avec l'air. Il est donc nécessaire d'inertiser les pots de récupération.

De nouveaux pots ont donc été conçus et un exemple est présenté **Figure 32**.



Figure 32 : Pot de récupération conçu pour la torréfaction.

Le corps du pot, en aluminium mécano-soudé, a une contenance de 30 L. Le couvercle est équipé d'un joint torique et de trois points de serrage qui permettent sa fermeture hermétique. Un hublot facilite le contrôle visuel du niveau de remplissage du pot. Deux vannes ont été fixées de part et d'autre du corps du pot pour réaliser un balayage d'azote.

I.3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental établi pour réaliser la torréfaction dans ce four tournant est présenté **Figure 33**.

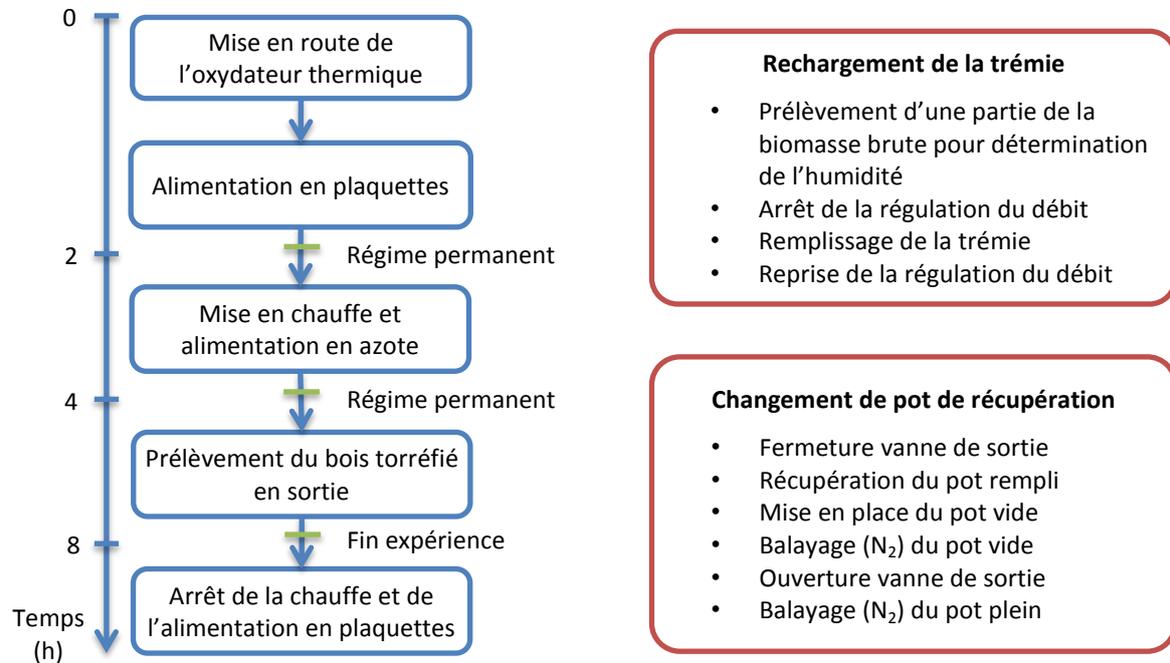


Figure 33 : Déroulement d'une expérience de torréfaction en four tournant et protocoles des phases critiques (rechargement de la trémie et changement de pot de récupération).

L'**incinérateur** est mis en route dès le début de l'expérience afin d'éviter l'accumulation de poussières pouvant créer une atmosphère explosive dans la chambre de combustion. L'**alimentation en plaquettes** de bois est ensuite activée et la chauffe n'intervient qu'une fois le régime permanent de l'écoulement atteint. Lors de cette phase d'écoulement à froid, une balance est placée en sortie du four pour évaluer le régime permanent. L'égalité des débits de sortie et d'entrée est typiquement observée au bout de 2 à 3 h.

Le **balayage d'azote** débute en même temps que la **chauffe**. Lorsque la température de la charge est stabilisée, un délai équivalent au temps de séjour de la biomasse dans le cylindre est imposé avant de débiter les **prélèvements**. Un pot vide de masse connue est alors mis en place et la durée du prélèvement $t_{\text{prélèvement}}$ est chronométrée.

Les phases critiques sont le rechargement de la trémie et le changement de pot. Leur réalisation suit un protocole strict afin de limiter les perturbations sur le procédé :

- Lors du **rechargement de la trémie**, un prélèvement est effectué afin de mesurer l'humidité sur sec H_s de la biomasse. Le système d'alimentation est ensuite passé en mode manuel car le rechargement perturbe les mesures de la balance. La trémie peut alors être remplie, puis la régulation du débit d'alimentation est réactivée.

- Lors du **changement de pot de récupération**, la vanne guillotine est fermée. Le pot rempli est récupéré, fermé hermétiquement et le pot vide est mis en position. Un tuyau relié au réseau d'azote est branché à l'une de ses vannes et un tuyau débouchant à l'extérieur du bâtiment est branché sur l'autre vanne. Un balayage est alors effectué pendant 5 min avec $1,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ d'azote. Les vannes sont ensuite fermées et la vanne guillotine est ouverte. Le même protocole est appliqué pour le balayage du pot plein. Il a été constaté que l'intérieur du pot reste en surpression pendant plusieurs heures après le balayage. Le contact avec l'air est ainsi évité.

La température au centre d'un pot de récupération a été mesurée au cours d'une expérience de torréfaction à $270 \text{ }^\circ\text{C}$. Le résultat est présenté **Figure 34**. Lors du remplissage du pot (durant 1 h), la température augmente jusqu'à une température maximale de $94 \text{ }^\circ\text{C}$, le thermocouple étant immergé dans la biomasse. Cette faible température traduit un fort refroidissement de la biomasse dans la partie non chauffée du cylindre. La diminution brutale de la température (à $t=29 \text{ min}$) correspond ensuite à l'arrêt du remplissage et au balayage à l'azote.

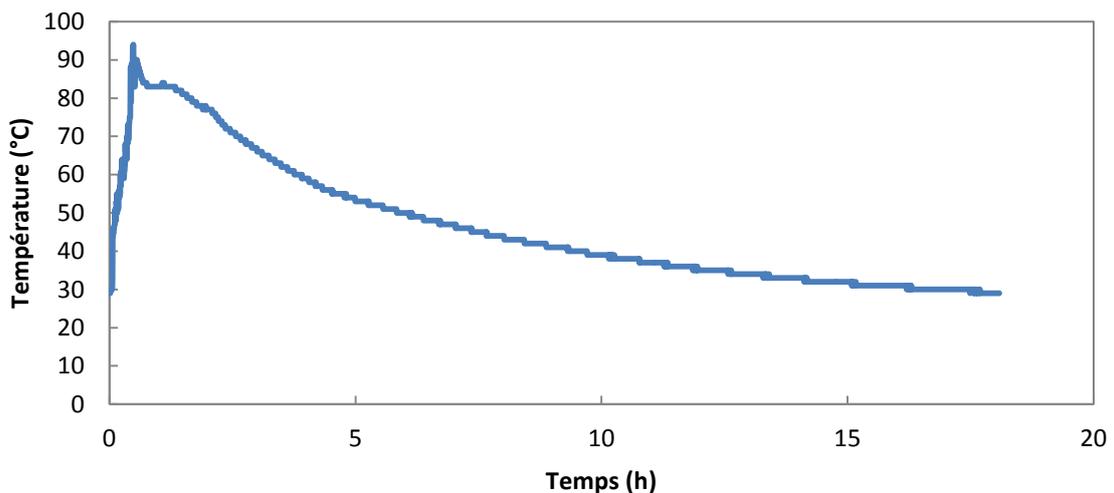


Figure 34 : Évolution de la température à l'intérieur d'un pot de récupération au cours du remplissage et du refroidissement.

Il apparaît également que le refroidissement jusqu'à la température ambiante nécessite une quinzaine d'heures. La pesée du pot plein n'est donc réalisée qu'après cette période. La

masse de bois torréfié m_{tor} est utilisée pour calculer la perte de masse sèche ML (ou le rendement massique sur sec η) en % :

$$ML = 100 - \eta = 100 - \frac{m_{tor}}{\dot{Q} \times t_{pr\grave{e}l\grave{e}vement}} \times \left(1 + \frac{H_s}{100}\right) \times 100 \quad \text{Équation 43}$$

II. La biomasse utilisée

Comme présenté dans le **Chapitre 1**, le comportement de la biomasse lors de la torréfaction est intimement lié à sa composition et à ses propriétés. Cette partie présente donc les critères de sélection de la biomasse utilisée pour cette étude puis les principales propriétés de cette biomasse.

II.1. Choix de la biomasse

Afin de pouvoir comparer les résultats avec la littérature, le choix s'est orienté vers des biomasses couramment utilisées. Il a donc été décidé d'utiliser des plaquettes de bois. De plus, des plaquettes de grande taille et présentant une forte dispersion granulométrique semblaient plus représentatives de la réalité industrielle.

Les trois biomasses dont l'injection dans le four tournant pilote a été testée sont présentées **Figure 35**.



Figure 35 : Les trois types de biomasses testées pour l'injection dans le four tournant pilote :
a) mélange de résineux, b) pin maritime et c) hêtre.

Dans un premier temps, une biomasse fournie par une scierie Aveyronnaise (**Figure 35a**) a été choisie. Les espèces qui la composent sont le sapin, l'épicéa et le douglas. Ces espèces représentent la majorité des résineux disponibles sur le territoire français et sont donc un

matériau d'étude de choix. Cependant, l'hétérogénéité en tailles et en formes des plaquettes a posé des problèmes de blocage à la base de la trémie. La formation de ces voûtes est intervenue généralement à l'occasion d'un rétrécissement de la section de passage. Afin d'identifier le comportement des plaquettes en l'absence de rétrécissement, un tube lisse de diamètre identique à celui de la base de la trémie a été utilisé. Le résultat est présenté **Figure 36**. Des voûtes se forment même en l'absence de rétrécissement. Il apparaît ainsi qu'une modification de la trémie n'aurait pas résolu le problème. Seul un système de dessilage aurait pu favoriser le transport de ces plaquettes. La mise en place d'un tel système n'étant pas envisageable sur l'installation pilote, il a été décidé d'utiliser des plaquettes plus homogènes en taille.

Des plaquettes de pin maritime, produites en Ardèche, ont alors été testées (**Figure 35b**). Malgré une granulométrie plus uniforme et des tamisages successifs, le transport de ces plaquettes de la trémie vers le cylindre rotatif est resté impossible.



Figure 36 : Formation de voûtes dans un tube lisse.

Enfin, des plaquettes de hêtre de petites dimensions (**Figure 35c**), fournies par SPPS (Société de Participation Parisienne des Sciures, Frasne, France), ont été utilisées. Celles-ci s'écoulent facilement dans le système d'alimentation et les quelques voûtes qui se forment sont éliminées automatiquement par le système de régulation comme expliqué précédemment.

II.2. Propriétés de la biomasse d'étude

Les principales caractéristiques des plaquettes de hêtre sont présentées dans le **Tableau 10**.

Tableau 10 : Caractéristiques des plaquettes de hêtre utilisées pour les expériences.

| Propriété | Valeur | Méthode de mesure |
|----------------------------------|----------------------------|---|
| Longueur des particules | 5 – 15 mm | Pied à coulisse / 200 particules |
| Largeur des particules | 2 – 7 mm | Pied à coulisse / 200 particules |
| Epaisseur des particules | 1 – 3 mm | Pied à coulisse / 200 particules |
| Humidité sur sec | 10 – 12 % | NF EN 14774-1 : 2010-01 |
| Angle de repos dynamique | 42 ° | Analyse d'images en four tournant |
| Masse volumique des particules | 656 ± 30 kg/m ³ | Pied à coulisse / pesée / 30 particules |
| Masse volumique apparente du lit | 280 ± 10 kg/m ³ | NF EN 15103 : 2010-03 |

Les dimensions des particules ont été déterminées par mesure au pied à coulisse avec une précision de 0,1 mm sur 200 plaquettes. Le détail des répartitions des dimensions est présenté **Figure 37**.

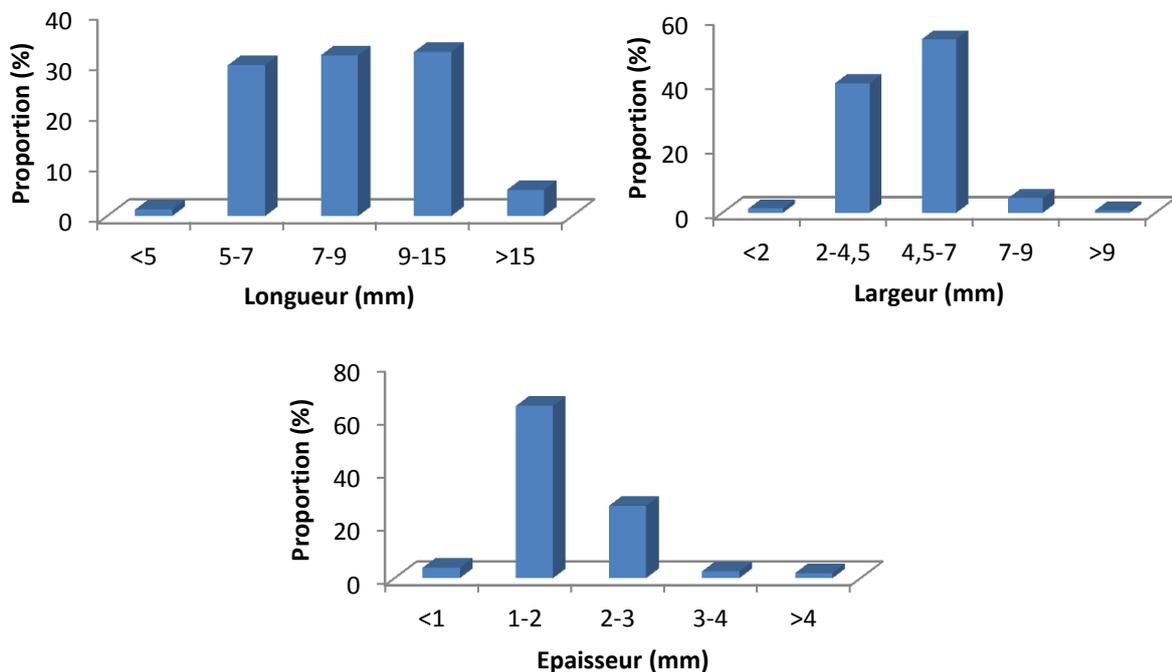


Figure 37 : Répartition des dimensions des plaquettes de hêtre.

Chez le producteur, ces plaquettes sont calibrées et séchées puis livrées en sacs de 25 kg. Ce traitement permet l'obtention d'un produit homogène comme cela est visible sur la

répartition des tailles de particules. Il apparaît que la plus forte dispersion concerne la longueur des particules avec des tailles variant entre 5 et 15 mm.

L'angle de repos dynamique β a été mesuré par analyse d'images lors d'essais d'écoulement en four tournant : des photographies du lit de plaquettes en mouvement ont été réalisées puis traitées avec le logiciel ImageJ® (National Institutes of Health, États-Unis).

Pour mesurer la masse volumique des particules ρ_{part} , celles-ci ont été poncées (pour obtenir des parallélépipèdes), dépoussiérées puis mesurées dans les 3 dimensions et pesées. La forte incertitude sur la valeur obtenue provient du fait que ce protocole est difficile à appliquer à des particules de petite taille. La connaissance de la masse volumique apparente du lit ρ_{lit} permet ensuite de calculer la porosité du lit ε_{lit} suivant l'**Équation 44**.

$$\varepsilon_{lit} = 1 - \frac{\rho_{lit}}{\rho_{part}} \approx 0,6 \quad \text{Équation 44}$$

Ces caractéristiques seront utilisées lors de la modélisation du procédé de torréfaction.

III. Évaluation du dispositif

Dans cette partie, des essais de torréfaction en four tournant seront présentés avec l'objectif d'évaluer les points faibles et les points forts de l'installation.

III.1. Stabilité du traitement

Lors des essais de torréfaction en four tournant, il a été décidé de travailler avec des profils de température isothermes : la même consigne est appliquée aux 5 zones de chauffe. L'évolution de la température de la coquille chauffante au niveau de ces 5 zones est présentée **Figure 38**.

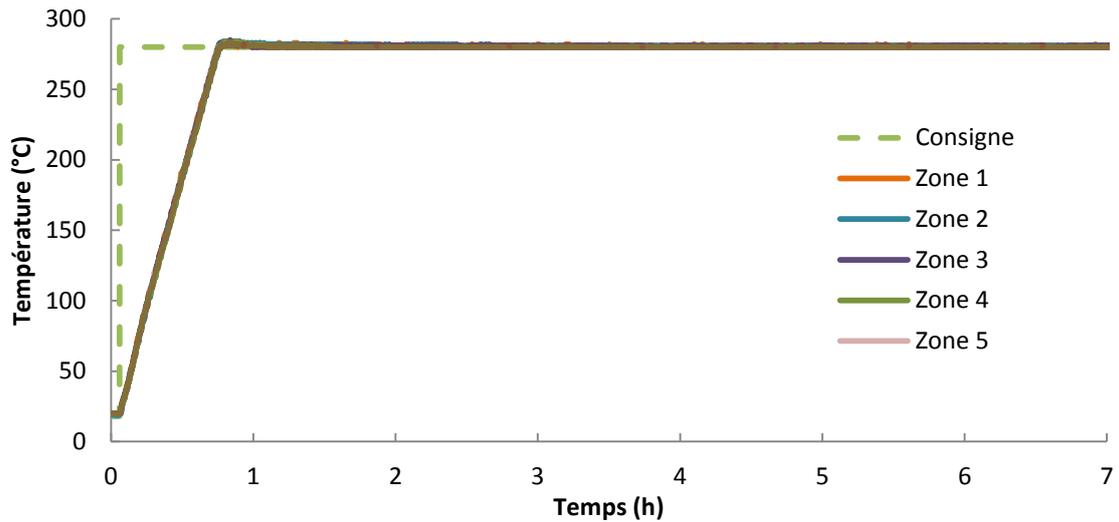


Figure 38 : Évolution de la température de coquille des différentes zones au cours d'un essai à 280 °C, avec $\bar{t}_s=69$ min et $H=9,8$ %.

Lorsque la chauffe est activée, La vitesse de montée en température de la coquille est de 360 °C/h. La température des zones est ensuite stabilisée à la température de consigne à 2 °C près. Pour plus de lisibilité, seule la température de consigne sera représentée dans la suite de ces travaux.

Les températures mesurées au sein du lit de particules sont présentées **Figure 39**. Les thermocouples (TC) correspondent à ceux représentés **Figure 28a** numérotés de 1 à 6 de l'entrée vers la sortie. Il apparait clairement que la température mesurée par les thermocouples 1, 2 et 3 est faible (inférieure à 100 °C), ce qui s'explique par leurs positions en dehors des zones de chauffe.

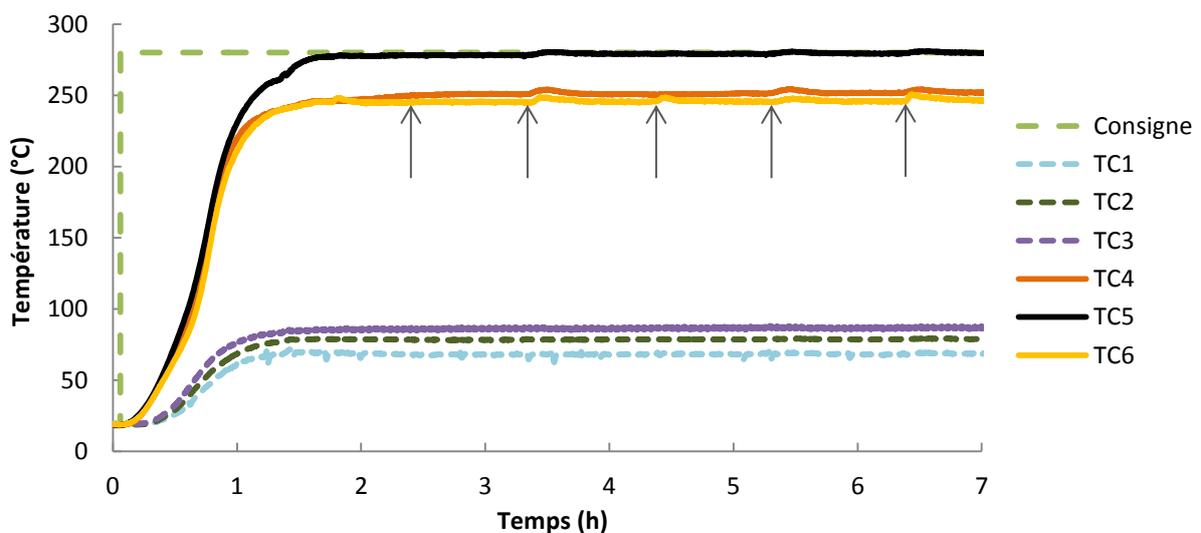


Figure 39 : Évolution de la température du lit au cours d'un essai long à 280 °C, avec $\bar{t}_s=69$ min et $H=9,8$ %.

Les thermocouples 4, 5 et 6 sont disposés dans les zones de chauffe et les températures mesurées sont stables. Les flèches signalent les phases de rechargement de la trémie. Des perturbations sont observées après ces interventions. L'une des hypothèses pour expliquer ces hausses de température serait la réaction exothermique entre l'oxygène (contenu dans l'air admis lors du remplissage) et le bois torréfié.

Mis à part ces légères perturbations, les températures restent stables. La perte de masse a été mesurée sur 4 prélèvements de 1 h chacun. Le résultat est de $15,5 \pm 1,1$ %.

III.2. Répétabilité des essais

L'**essai long**, présenté précédemment, a été répété à deux mois d'intervalle dans les mêmes conditions en ne réalisant qu'un seul prélèvement d'une heure une fois le régime permanent atteint. Ce nouvel essai est donc qualifié ici d'**essai court**. La perte de masse calculée à partir de ce prélèvement est de 16,4 %. Cette valeur se situe dans l'intervalle de confiance calculé lors de l'essai long, ce qui est très satisfaisant.

La température moyenne mesurée par les thermocouples dans la charge lors des deux essais a été calculée et est représentée **Figure 40**, en fonction de la distance à l'entrée du four.

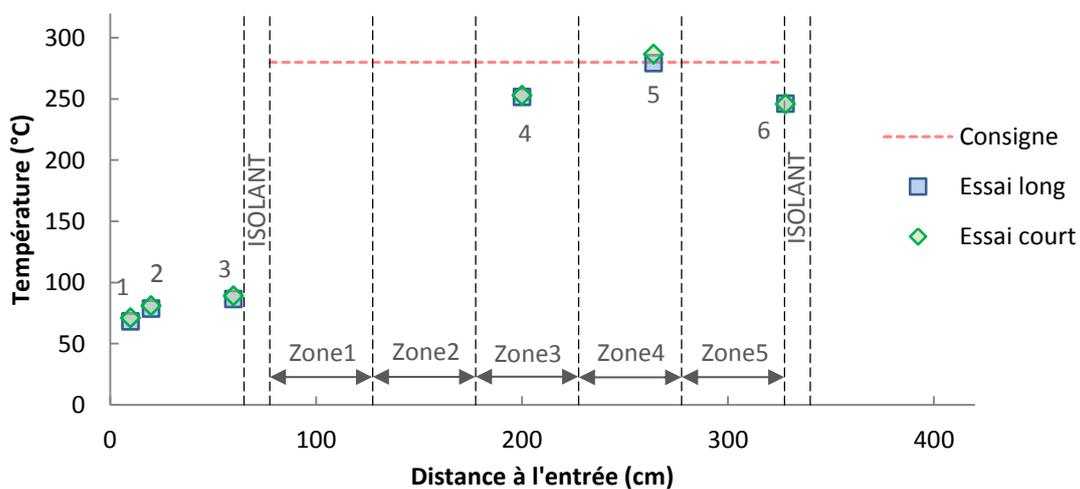


Figure 40 : Comparaison du profil de température le long du four mesuré lors de deux essais dans les mêmes conditions opératoires à deux mois d'intervalle.

Sur ce graphique, les traits verticaux en pointillés représentent les limites des zones isolées et des zones de chauffe. Les températures positionnées avant la première zone d'isolant sont mesurées par les thermocouples 1, 2 et 3. Leur position sur ce graphique est donc approximative. Par la suite, ces thermocouples ne seront plus représentés.

Par observation des valeurs enregistrées par les thermocouples 4, 5 et 6, il apparaît que les deux essais ont mené à des profils de température très similaires. Le décalage maximum, obtenu par le thermocouple 5, est de 7 °C. Ceci prouve donc que les essais de torréfaction menés en four tournant pilote présentent une bonne répétabilité.

IV. Conclusions

L'adaptation du four tournant pilote avait plusieurs objectifs. D'une part, il était nécessaire de rendre l'installation compatible avec le procédé de torréfaction de plaquettes de bois. Ceci a été permis par l'installation d'un système de balayage à l'azote, d'une vanne étanche en sortie du four et par la conception de nouveaux pots de récupération avec possibilité d'inertage. Ensuite, le contrôle de l'installation a été amélioré grâce à la mise en place d'un doseur pondéral et à l'implémentation d'une nouvelle interface de commande.

Le choix de la biomasse d'étude a été fortement conditionné par les capacités de l'installation. Les premiers essais ont été menés avec succès et montrent une bonne stabilité et répétabilité des expériences de torréfaction. L'obtention de tels résultats a été facilitée par l'établissement de protocoles détaillés des différentes phases de fonctionnement de l'installation.

Le principal point faible de ce pilote est sans nul doute le faible nombre de points de mesure de la température de la charge et de la phase gaz. En effet, seuls 3 thermocouples fournissent des informations fiables sur la température du lit de particules. La connaissance du profil de température n'est donc que parcellaire. Il faut également noter que la température mesurée dans le lit correspond à une température intermédiaire entre celle des plaquettes de bois et celle du gaz interstitiel. Enfin, la température et la composition de la phase gaz ne sont pas mesurées.

Il faut cependant noter que l'amélioration de ces problèmes de métrologie se heurte à la nécessité de conserver une installation étanche et à la difficulté que représente l'instrumentation d'un cylindre en rotation.