



HAL
open science

Etude de paramètres liés à l'inflammabilité et à l'explosivité d'échantillons de poussières de bois humide

L. Perrin, O. Dufaud, J.M. Petit, B. Sale

► To cite this version:

L. Perrin, O. Dufaud, J.M. Petit, B. Sale. Etude de paramètres liés à l'inflammabilité et à l'explosivité d'échantillons de poussières de bois humide. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 284, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2008, 65 p., ill., bibliogr. (En français). hal-01420310

HAL Id: hal-01420310

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420310v1>

Submitted on 20 Dec 2016

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

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

scientifique & technique
chnique note tech
note scientifique
technique & technique
entifique scientifi
technique

**Etude de paramètres liés à
l'inflammabilité et à l'explosivité
d'échantillons de poussières
de bois humide**

Etude de paramètres liés à l'inflammabilité et à l'explosivité d'échantillons de poussières de bois humide

L. Perrin, O. Dufaud
Laboratoire des Sciences du génie Chimique - CNRS - Nancy

J-M. Petit, B. Salé
INRS - Paris

Après avoir rappelé le mécanisme des explosions de poussières ainsi que les définitions de quelques caractéristiques des atmosphères poussiéreuses, cette brochure présente les résultats expérimentaux portant sur les caractéristiques d'explosivité obtenues avec trois poussières de bois humides, prélevées dans des entreprises industrielles et transmises par les services prévention de Caisses Régionales d'Assurance Maladie (CRAM). Cette étude a été réalisée au sein du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (UPR CNRS 6811) dans le cadre d'une convention signée (via le Centre de Promotion du Génie des Procédés dans l'Industrie Progepi - Nancy) avec l'INRS.

NS 284
juillet 2008

ÉTUDE DE PARAMÈTRES LIÉS À L'INFLAMMABILITÉ ET À L'EXPLOSIVITÉ D'ÉCHANTILLONS DE POUSSIÈRES DE BOIS HUMIDE

Après avoir rappelé le mécanisme des explosions de poussières ainsi que les définitions de quelques caractéristiques des atmosphères poussiéreuses, cette brochure présente les résultats expérimentaux portant sur les caractéristiques d'explosivité obtenues avec trois poussières de bois humides, prélevées dans des entreprises industrielles et transmises par les services prévention de Caisses Régionales d'Assurance Maladie (CRAM). Cette étude a été réalisée au sein du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (UPR CNRS 6811) dans le cadre d'une convention signée (via le Centre de Promotion du Génie des Procédés dans l'Industrie Progepi – Nancy) avec l'INRS.

L. PERRIN

O. DUFAUD

Laboratoire des Sciences du Génie Chimique – CNRS - Nancy

J-M. PETIT

B. SALLÉ

INRS – Paris

07/07/2009

SOMMAIRE

I – Introduction

II – Les explosions de poussières

II.1 – Mécanismes

II.2 – Paramètres influents

II.2.1 – La composition chimique

II.2.2 – La distribution granulométrique

II.2.3 – L’humidité et la rétention de solvant

III – Caractéristiques des inflammations et explosions de poussières

III.1 – Inflammabilité des couches de poussières

III.1.1 – La température minimale d’inflammation (TMI) en couche

III.1.2 – Les caractéristiques d’auto-inflammation (TAI)

III.1.3 – L’énergie minimale d’inflammation (EMI)

III.1.4 – La température minimale d’inflammation (TMI) en nuage

III.1.5 – La concentration minimale d’explosion (CME)

III.2 – Explosivité des nuages de poussières

IV – Caractéristiques et analyse physico-chimique des échantillons

IV.1 – Distribution granulométrique

IV.2 – Masse volumique

IV.3 – Teneur en eau

IV.4 – Taux de cendre

IV.5 – Analyse élémentaire

V – Mesures relatives à l’inflammabilité et à l’explosivité des échantillons

V.1 – Mesure de la température minimale d’inflammation en couche

V.2 – Mesure des températures et dimensions critiques de stockage

V.3 – Mesure de la température minimale d’inflammation

V.4 – Mesure de la température minimale d’inflammation en nuage

V.5 – Mesures d’explosivité

VI – Visite sur site

VII – Récapitulatif et conclusion

VIII – Références bibliographiques

ANNEXES A, B, C, D et E

I. INTRODUCTION

Les explosions de poussières, connues et étudiées comme telles depuis 1785, ont ponctué l'ère industrielle (Courrières, 1906 ; Metz, 1982 ; Blaye, 1997...). En France, une étude succincte de la base de données ARIA du BARPI montre que près de 110 accidents peuvent être recensés pour une période allant de 1980 à 2005 ; sans pour autant que cette information soit exhaustive. Toutes les poussières de matières combustibles sont intrinsèquement capables de provoquer une explosion. C'est le cas par exemple des poussières :

- alimentaires (amidon, sucre, farine, céréales, etc.),
- végétales (liège, coton, bois, spores de lycopode, etc.),
- métalliques (aluminium, magnésium, nickel, ferroalliages, etc.),
- industrielles (engrais, matières plastiques, pigments, déchets pulvérulents, etc.)

Il s'agit donc d'un phénomène qui concerne de nombreux secteurs d'activités et applications industrielles. Sa fréquence n'est pas négligeable puisqu'on estime qu'en France se produit, en moyenne, une explosion de poussières par jour. Le risque a été amplifié par l'industrialisation croissante, par la mécanisation, par la généralisation des automatismes, par l'augmentation des capacités de stockage, par l'accroissement des débits de manutention et enfin par le nombre de plus en plus élevé de produits présentés sous forme pulvérulente avec des granulométries de plus en plus faibles (diamètres médians de l'ordre de quelques dizaines de micromètres jusqu'au domaine des nanoparticules). Toutes les entreprises qui manipulent des produits pulvérulents combustibles sont donc confrontées à un risque potentiel d'inflammation et d'explosion de poussières. La prévention passe d'abord par la connaissance des caractéristiques d'explosivité des poussières ; il est en effet nécessaire de détenir ces paramètres pour choisir, dans les conditions particulières d'une installation donnée, les meilleurs modes de prévention et protection possibles. La détermination expérimentale des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosibilité est donc indispensable lorsqu'elles sont totalement inconnues ou lorsqu'elles ont été déterminées dans des conditions fortement différentes de celles de l'environnement particulier étudié (**cas des échantillons possédant une humidité importante**).

La présence d'humidité en terme d'explosion de poussières est souvent considérée comme un bienfait. Qu'elle entraîne l'agglomération et donc la sédimentation des particules, qu'elle inhibe le processus d'inflammation ou qu'elle absorbe une partie de la chaleur libérée par ces réactions exothermiques, l'eau est quelques fois présentée comme le meilleur des remèdes. Or, si ces bénéfiques sont patents avec la plupart des produits organiques (amidon, poudres polymères...) ils sont loin d'être évidents pour les poussières métalliques et pour les matériaux organiques en présence de réaction d'hydrolyse ou de fermentation.

Ainsi, il est légitime de se demander si les entreprises où se retrouvent des poussières de bois humide sont également confrontées à un risque potentiel d'inflammation et d'explosion de poussières ? Il a donc semblé nécessaire au Réseau-Prévention de détenir des éléments sur les paramètres de ce type de produits.

Cette publication, après avoir rappelé le mécanisme des explosions de poussières ainsi que quelques données et caractéristiques des atmosphères poussiéreuses, présentera les résultats expérimentaux obtenus avec trois poussières de bois humide d'essences différentes (sapin, épicéa et peuplier), transmises par des services prévention de Caisses Régionales d'Assurance Maladie (CRAM).

II – LES EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES

II.1 Mécanismes

Pour qu'une explosion (transformation/oxydation brutale d'un système matériel avec émission de gaz chauds) soit possible, il est notamment indispensable d'avoir trois conditions simultanées :

- Présence d'un gaz comburant (pratiquement toujours l'oxygène de l'air).
- Présence d'un produit pulvérulent combustible à l'état suffisamment divisé (au moins une partie des particules dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm).
- Présence d'une source d'inflammation suffisamment énergétique.

Pour amorcer l'explosion, l'action principale de la source d'inflammation est d'élever, au moins localement, le nuage de poussières à une température telle que la réaction d'oxydation responsable de la combustion se produise à une vitesse suffisante. La réaction peut se faire en phase hétérogène ou homogène.

Dans la pratique industrielle, les principales sources d'inflammation sont (NF EN 1127, 1997) :

- les étincelles d'origine métallique qui résultent de l'impact ou de la friction entre deux pièces métalliques,
- les décharges d'électricité statique (étincelles, décharges en aigrette, en cône, de surface...),
- les flammes et gaz chauds (travaux par point chaud, soudure),

- les surfaces chaudes,
- les réactions exothermiques comme par exemple l'auto-inflammation d'un dépôt de poussières et les particules incandescentes, etc.

Ce fameux "triangle du feu" indique que l'explosion n'est qu'un cas particulier de la combustion ; il s'agit d'une combustion très vive conduisant à une libération brutale d'énergie.

Pour que cette combustion puisse être qualifiée d'explosion, trois conditions complémentaires sont nécessaires :

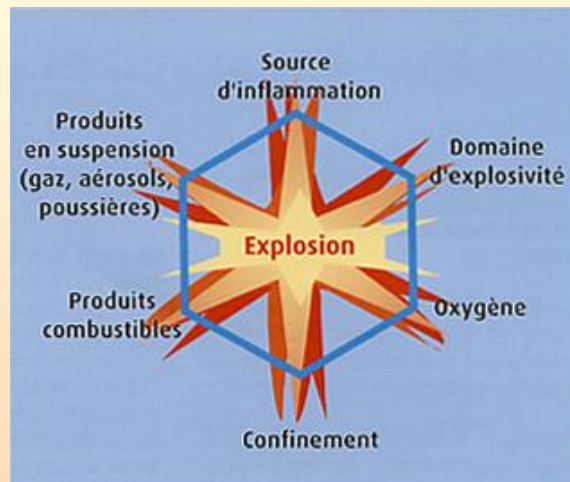
- Présence de poussières en suspension. Un nuage de poussières peut être créé par le processus même du traitement du produit, broyage, séchage en lit fluidisé, par exemple. Il peut l'être aussi par les manutentions qu'il subit : vidange de silos, transport pneumatique, décolmatage de filtres, etc. Il peut également être provoqué par le démarrage de l'explosion elle-même.

- Obtention d'un domaine d'explosivité. Des limites d'explosivité délimitent le domaine de concentration de poussières dans l'air à l'intérieur duquel les explosions sont possibles. Comme pour les gaz, on définit pour les poussières une concentration minimale explosive au-dessous de laquelle l'explosion ne peut pas se propager dans un nuage préformé ; mais autant cette grandeur peut être mesurée avec assez de précision dans le cas des gaz, autant il est difficile expérimentalement de réaliser des suspensions homogènes de poussières, surtout si elles sont grossières. De plus, les valeurs trouvées dépendent de l'énergie de la source d'inflammation et du volume de l'enceinte dans laquelle la mesure a été faite. Il faut donc considérer avec prudence les chiffres de concentrations minimales explosives parfois avancés. Les concentrations minimales explosives des poussières dont le diamètre est inférieur à 100 μm se situent couramment dans la fourchette 10 à 100 g.m^{-3} , ce qui correspond déjà à des nuages de poussières relativement denses. Quant à la concentration maximale explosive des poussières, elle est encore bien plus incertaine et se situe généralement dans la gamme de plusieurs kg.m^{-3} .

- Confinement suffisant. En absence de confinement, on obtient fréquemment un phénomène de flambée ou boule de feu (combustion rapide avec flamme importante certes mais sans effet de pression notable), pouvant nonobstant entraîner des dégâts lourds.

Ces six conditions sont schématisées sur la figure 1 suivante.

Hexagone de l'explosion



Présentation Explosions sur lieux de travail

Figure 1 : Hexagone de l'explosion

Une explosion de poussières résulte donc de la présence d'un solide combustible finement divisé en suspension dans l'air constituant ainsi un nuage de concentration convenable, plus ou moins homogène, subissant l'effet d'une source d'inflammation ou d'une élévation de température. Cette simultanéité induit des réactions exothermiques :

- d'oxydation de surface, prépondérante pour les poussières métalliques par exemple,
- de pyrolyse avec émission de gaz souvent combustibles pour les matières organiques, par exemple le charbon.

Cette combustion initiale des particules engendre une inflammation des zones de suspension immédiatement contiguës à la zone de combustion. La flamme se propage ainsi dans le nuage, précédée d'une onde de pression provoquée par l'expansion des gaz chauds formés par la combustion et entraînant ainsi les poussières du nuage. L'ensemble de ce processus, initié dans un appareil industriel, conduit évidemment à un risque d'endommagement de l'installation.

Diverses observations ont pu montrer qu'à un instant donné, dans un nuage qui vient d'être enflammé, l'atmosphère poussiéreuse est séparée en deux régions. La partie en arrière du front de flamme contient des gaz et des résidus solides déjà partiellement brûlés, la partie en avant du front de flamme contient des poussières non brûlées.

Dans une enceinte fermée, on constate donc l'apparition d'une surpression due au fait que les gaz de combustion créent une chasse d'air qui pourra soulever les poussières présentes en dépôt. La flamme qui se propage en arrière enflammera les poussières

soulevées et ce phénomène pourra ainsi se reproduire de proche en proche tant que la poussière est présente, entraînant des explosions secondaires aggravant la nature des dégâts.

Une explosion peut se produire selon deux régimes : la **déflagration** ou la **détonation**. Seules des mesures sur les caractéristiques de l'explosion (pression et vitesse de flamme) permettent de savoir si l'un ou l'autre régime est atteint.

Le régime d'explosion le plus souvent considéré est la déflagration, caractérisée par une onde de pression se développant en avant du front de flamme à des vitesses de quelques mètres par seconde à quelques dizaines de mètres par seconde. Les surpressions engendrées dans un mélange initialement à la pression atmosphérique sont de l'ordre de 10^5 à 10^6 Pa.

Ainsi, dans un récipient peu allongé, l'expansion des gaz de combustion précomprime l'atmosphère poussiéreuse en avant du front de flamme ; la vitesse de flamme est assez faible et le régime d'explosion est celui de la déflagration. Toutefois Le régime d'explosion de détonation n'est pas à exclure, en particulier dans les récipients allongés (enceinte pour laquelle le rapport longueur ou hauteur sur diamètre est supérieur à 5) et les canalisations de liaison des enceintes, mais la prévision a priori de l'existence potentielle de ce régime reste difficile. La vitesse de flamme est alors supersonique dans le milieu considéré (de l'ordre de 1500 m.s^{-1}), la pression présente une variation brutale et on peut atteindre pendant des temps courts, de l'ordre de la milliseconde, des surpressions de quelques dizaines de bars. C'est cette onde de pression qui chauffe le mélange réactionnel suffisamment brutalement pour que la réaction de combustion se produise immédiatement. Pour la pratique industrielle, il faut retenir que de tels phénomènes de quasi détonation peuvent être obtenus dans des canalisations de diamètre compris entre 50 et 400 mm à condition que la longueur de canalisation atteigne au moins une vingtaine de mètres et qu'ils sont encore plus à craindre si la canalisation est reliée à un récipient fermé, siège de l'explosion, de volume supérieur à celui de la canalisation. Notons enfin que la présence d'obstacles modifiera notablement la propagation de l'explosion.

Toutes ces remarques, mettant en évidence la complexité des phénomènes d'explosion de poussières et leur variabilité en fonction des divers paramètres précités, font qu'il n'est souvent pas possible de caractériser de telles explosions uniquement au travers de vitesses de propagation de flamme et de pressions maximales d'explosion prédéterminées et tabulées.

II.2 Paramètres influents

Ce paragraphe présente quelques paramètres possédant une influence notable sur le mécanisme d'explosion de poussières. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, les termes de pression initiale, température, turbulence... devant être également considérés.

II.2.1 La composition chimique

Lors d'une explosion de poussières, la vitesse de consommation de l'oxygène de l'air est directement fonction de la nature chimique de la poussière. Les groupes spécifiques comme COOH, OH, NH₂, NO₂, C=N et N=N augmentent la potentialité d'explosion alors que les halogènes Cl, Br et F induisent un effet inverse. Cependant, la composition chimique n'est pas suffisante pour estimer les risques d'explosion d'une poussière, elle peut juste apporter une indication, notamment à travers certaines méthodes prédictives comme la méthode CHETAH.

II.2.2 La distribution granulométrique

La poussière est constituée de petites particules solides qui dans l'atmosphère se déposent sous l'effet de leur propre poids mais peuvent rester en suspension dans l'air un certain temps. D'après la loi de Stokes (voire de Newton ou Van Allen selon le régime d'écoulement), les nuages de poussières se forment d'autant plus facilement et sont d'autant plus stables que les particules sont fines. Ces fines particules sont d'autant plus dangereuses que leur surface spécifique est grande. Sauf exception et majoritairement du fait de la présence des phénomènes d'attrition et d'érosion, il est rare que l'absence de fines soit totale. La distribution granulométrique des particules est donc un élément essentiel car elle donne une indication sur la proportion de fines. Elle peut être déterminée par simple tamisage ou, par exemple, à l'aide de granulomètres laser.

Il est difficile d'indiquer une dimension limite supérieure de particules au-delà de laquelle la probabilité d'explosion devient très faible. Mais, l'explosion peut être qualifiée d'improbable à partir d'une zone de coupure initiée à 500 µm. La forme des particules est également un facteur influent puisqu'elle est directement liée à la surface spécifique. Le diamètre de Sauter (d_{32} - diamètre de la particule dont le rapport volume/surface est le même que le rapport volume/surface calculé sur l'ensemble des particules de l'échantillon) ou le diamètre BET obtenu après une analyse du même nom sont d'ailleurs des paramètres

fréquemment employés pour rendre compte de la dispersion granulométrique de particules réactives.

Du fait de la diversité des paramètres influant sur ce phénomène, la dispersibilité des poussières (D_{max}) est difficile à caractériser avec précision (Eckhoff, 2008). Elle est en principe d'autant plus grande que la masse volumique de la poussière est faible. De plus, elle dépend de sa cohésion, celle-ci étant particulièrement liée à l'humidité et à la forme des particules.

Les poussières fines restent le plus longtemps en suspension : il y a donc là une raison supplémentaire pour qu'elles soient les plus dangereuses.

Le tableau 1 suivant indique les vitesses de sédimentation en fonction de la taille des particules, lorsqu'il n'y a pas de turbulence.

| Diamètre des particules en micromètres | Vitesse de Sédimentation en $m.s^{-1}$ |
|--|--|
| 200 | 1,2 |
| 100 | 0,3 |
| 50 | 0,03 |
| 10 | 0,003 ou 11 $m.h^{-1}$ |
| 5 | 0,0007 ou 2,52 $m. h^{-1}$ |
| 1 | 0,00003 ou 0,1 $m h^{-1}$ |

Tableau 1 : Vitesses de sédimentation de particules solides ($\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) isolées dans l'air – loi de Stokes ($Re < 1$)

II.2.3 L'humidité et la rétention de solvant

La présence d'humidité dans les poussières est souvent perçue comme un facteur bénéfique (mis à part lorsque l'eau peut réagir avec le produit, réaction par exemple de l'eau sur certains métaux pouvant libérer de l'hydrogène) puisqu'en général, il diminue l'inflammabilité et l'explosivité des échantillons. L'humidité favorise la cohésion des poussières et leur agglomération. De plus, elle rend l'inflammation initiale plus difficile, peut inhiber la propagation de flamme et surtout absorbe l'énergie calorifique pour vaporiser l'eau au détriment de la combustion. On observe fréquemment que les poussières contenant une humidité résiduelle d'au moins 30% ne sont pas initiatrices d'explosion. Ce fait ne doit pas être généralisé et dépend fortement de la nature chimique de la poussière. La présente étude apporte ainsi quelques éclairages à ce niveau.

La rétention de solvant, contrairement à l'humidité, peut fortement augmenter les caractéristiques de l'explosion. C'est pourquoi les mélanges hybrides gaz/poussières et vapeurs/poussières nécessitent des mesures d'étude et de prévention spécifiques.

III. CARACTERISTIQUES DES INFLAMMATIONS ET EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES

III.1 Inflammabilité des poussières

III.1.1 La température minimale d'inflammation (TMI) en couche

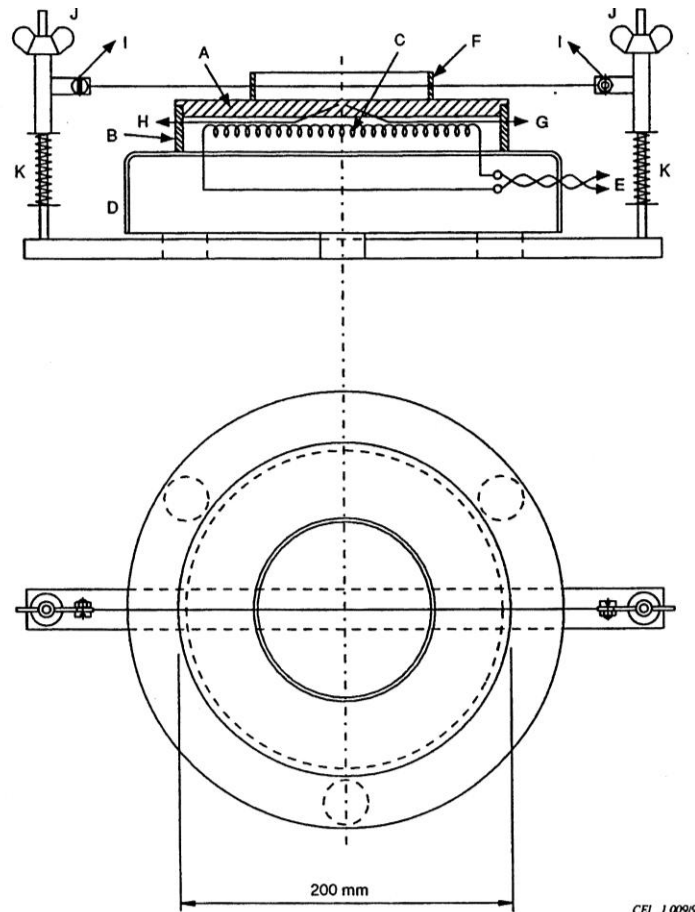
Les méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière sont exposées dans la norme internationale CEI 1241-2-1 (*méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de poussières combustibles*). Le premier paragraphe de celle-ci concerne la température minimale d'inflammation d'une couche de poussière sur une surface chauffée.

L'inflammation d'une couche de poussière est considérée comme s'étant produite si l'une des conditions suivantes est satisfaite : apparition de flammes voire de rougeoiement dans le matériau ; mesure d'une température d'au minimum 450°C ; accroissement de la température de 250°C ou plus par rapport à la température de surface.

L'appareil d'essai est représenté schématiquement sur la figure 2. La plaque chauffante et le dispositif de régulation doivent satisfaire un certain nombre de conditions qui concernent l'uniformité et la constance de la température, et l'étalonnage du régulateur et des dispositifs de mesure. La température ambiante, mesurée par un thermomètre placé à moins d'un centimètre de la plaque chaude, doit être comprise entre 15 et 35°C.

Pour préparer la couche de poussière, une cavité formée en plaçant un anneau métallique de 100 mm de diamètre intérieur sur la surface chaude doit être remplie sans compression, et la couche au sommet de l'anneau doit être aplanie. L'anneau est laissé en place durant l'essai (figure 3). Une poussière donnée doit être testée avec un anneau d'épaisseur de 5,0 mm \pm 0,1 mm (CEI 1241-2-1). L'essai est poursuivi jusqu'à ce que la couche se soit enflammée ou auto-échauffée sans inflammation, puis refroidie. Si après 30 minutes, aucun auto-échauffement n'est apparu, l'essai est recommencé à une température plus élevée (jusqu'à 400°C si nécessaire). Si l'inflammation ou l'auto-échauffement se produit, l'essai doit être recommencé à une température inférieure en prolongeant l'essai au-delà de

30 minutes (la « période d'induction » avant l'inflammation est de plus en plus longue quand la température diminue).



- | | | | |
|---|--|---|--|
| A | Plaque chauffée | H | Thermocouple inséré dans la plaque relié à l'enregistreur |
| B | Rebord | I | Thermocouple placé dans la couche de poussière et relié à l'enregistreur |
| C | Filament chauffant | J | Ajustement par vis de la hauteur du thermocouple |
| D | Support du dispositif de chauffage | K | Ressort |
| E | Alimentation et régulation du chauffage | | |
| F | Anneau pour réaliser le dépôt de poussière | | |
| G | Thermocouple inséré dans la plaque et relié à la régulation du chauffage | | |

Figure 2 : Schéma de la plaque chauffante normalisée (CEI 1241 – 2 – 1)



Figure 3 : Test d'inflammation en couche de 5 mm

Les essais sont poursuivis jusqu'à ce qu'une température d'inflammation soit trouvée. Cette température est suffisamment élevée pour provoquer l'inflammation ou l'auto-échauffement, mais n'est pas supérieure de plus de 10°C à la température qui ne provoque ni inflammation ni auto-échauffement. Cette température est arrondie au multiple de 10°C inférieur.

Des caractéristiques telles que l'indice de combustibilité et la vitesse de combustion d'une traînée de poussière, bien que moins bien référencés que la TMI en couche, peuvent également caractériser l'inflammabilité en couche des poudres.

III.1.2 Les caractéristiques d'auto-inflammation

L'auto-inflammation correspond à l'ignition de la matière combustible soumise à une énergie thermique de l'air. La température de l'air environnant qui initie l'auto-inflammation après un auto-échauffement du produit est appelée la température d'auto-inflammation. L'auto-échauffement est possible si la chaleur générée par l'oxydation du produit dans l'air est supérieure à la chaleur transmise. La température d'auto-inflammation (TAI) dépend du type de poudre, mais aussi du mode de stockage, de la forme et de la taille des conteneurs et de la durée d'exposition à la chaleur. Il existe deux tests pour la déterminer : le test de Grewer (ou test d'exothermie en courant d'air) et le test de stockage à chaud dans un panier en treillis métallique. Ce dernier est souvent réalisé pour des stockages de grande quantité de matière (silos, etc.).

Le test de stockage de produits pulvérulents dans des paniers en acier inoxydable placés dans une étuve ventilée est utilisable directement dans la pratique industrielle, si les dimensions du panier reflètent l'épaisseur de la couche de poussière déposée dans les conditions industrielles (NF 15188, 2007) (figure 4). Cependant, si une extrapolation en taille

et en durée de stockage est envisagée, il est nécessaire de reproduire le test dans des paniers de différentes tailles, avec des temps de séjour représentatifs. Des nacelles cubiques en toile métallique de différentes tailles (par exemple 15,63 ; 125 ; 1000 cm³) sont remplies de matériaux pulvérulents, en prenant garde à ne pas tasser la poussière afin de permettre la diffusion de l'oxygène au sein de l'échantillon. Les nacelles sont ensuite placées au centre d'un four isotherme alimenté par une arrivée d'air. La température de l'étuve et la température au centre du produit sont enregistrées en fonction du temps. Le solide pulvérulent peut être soumis à la convection naturelle (conditions les plus sévères, adoptées ici) ou bien soumis à un balayage d'air de l'ordre de 100 L.h⁻¹. Le test est mis en œuvre à différentes températures et avec des durées d'observation pouvant être différentes.

Lorsque la différence de température entre le four et le solide pulvérulent dépasse 50°C, on considère que le produit est le siège d'un auto-échauffement. Si la température s'élève au-dessus de 400°C, on considère qu'il y a auto-inflammation. On renouvelle ensuite l'essai à une température plus basse jusqu'à ne plus observer une telle élévation de température dans l'échantillon. La température de stockage la plus élevée qui ne conduit pas à l'inflammation du produit est considérée comme la TAI. Pour chaque taille de cube, on obtient une température critique d'auto-échauffement, au-delà de laquelle le produit s'enflamme. Les résultats du test doivent indiquer les éléments suivants :

- le volume V de l'échantillon et sa géométrie ;
- la température de stockage T₀ ;
- la température maximale atteinte par le produit ;
- le temps au bout duquel cette température maximale a été atteinte, en prenant pour origine des temps le moment où la température du produit était égale à la température de l'étuve ;
- la durée d'observation t si aucun auto-échauffement n'a été observé.

Ces deux derniers paramètres, bien qu'observés et notés, ne seront pas spécifiés dans les études suivantes.

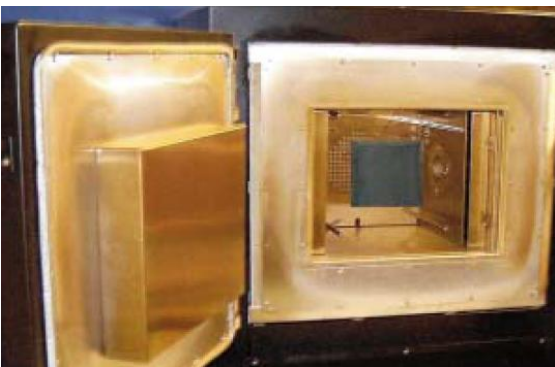


Figure 4 : Four isotherme à paniers et paniers cubiques de 25 et 50 mm

La température d'auto-inflammation peut être déterminée en fonction de la taille des paniers utilisés. On peut alors porter sur un diagramme le volume du panier ou de l'échantillon en échelle logarithmique, en fonction de la température en échelle réciproque : $\log V$ versus $1/T_0$.

Les différentes températures critiques obtenues en fonction de la taille de l'échantillon donnent, par extrapolation à partir des théories thermiques de Thomas, Semenov ou encore de Frank-Kamenetskii, la valeur de la température critique d'un stockage de taille donnée, température à laquelle un feu couvant peut démarrer spontanément. Réciproquement, à une température donnée correspond une dimension critique de stockage, assimilée dans le cas présent à la demi-arête d'un cube. Il est possible également de représenter la période d'induction de l'auto-inflammation en fonction de la température de l'étuve choisie à volume constant, ou bien en fonction du volume des paniers à température de l'étuve constante. Afin de permettre des comparaisons entre différents produits ou conditions opératoires, la TAI dans des paniers de volume $1\ 000\text{ cm}^3$ est généralement fournie.

III.1.3 L'énergie minimale d'inflammation (EMI)

La section 3 de la norme CEI 1241-2-1 indique une méthode d'essai pour la détermination de l'énergie minimale d'inflammation d'un mélange air/poussière par une étincelle d'origine électrique haute tension continue. L'énergie minimale d'inflammation est la plus faible énergie qui est capable d'enflammer la concentration du mélange air/poussière qui s'enflamme le plus facilement et de maintenir la combustion.

Les appareillages recommandés pour ces essais sont la sphère de 20 litres et le tube de Hartmann modifié (figures 5 et 6). Les essais doivent être réalisés sur des échantillons de poussières dans un état de préparation correspondant à ce qui peut être trouvé en pratique dans les conditions de l'installation. L'énergie d'inflammation décroît avec le diamètre des particules. L'échantillon doit donc posséder au maximum une distribution granulométrique correspondant à celle du produit le plus fin présent dans l'installation ou à une granulométrie inférieure à $63\ \mu\text{m}$. Il doit également posséder une humidité constante.

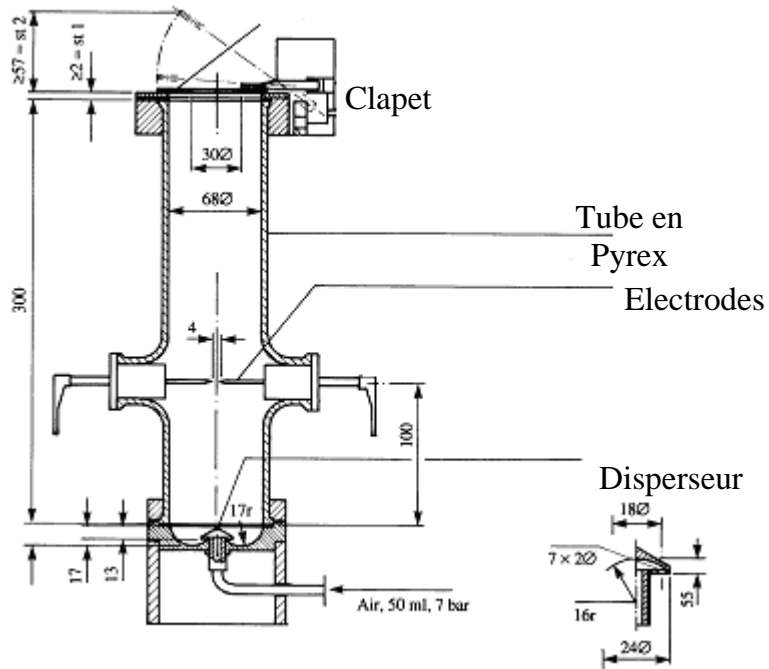


Figure 5 : Appareil de Hartmann modifié



Figure 6 : Photographie du tube de Hartmann modifié dit Mike 3 (Kühner AG)

Pour obtenir le nuage de poussière le plus inflammable, il est nécessaire de prendre en considération :

- La turbulence du mélange air/poussière qui est induite par le délai d'ignition (intervalle entre la dispersion et l'apparition de l'étincelle) et la pression de dispersion.
- La concentration en poussière : l'énergie d'inflammation diminue puis augmente avec la concentration, le minimum correspond à la condition optimale de concentration.
- Les caractéristiques du circuit (inductance) et celles des électrodes.

Une fois les conditions optimales d'inflammation déterminées, l'énergie de l'étincelle est successivement réduite jusqu'à ce qu'aucune inflammation n'apparaisse lors de 20 essais. On considère que l'inflammation s'est produite lorsque l'on observe une flamme qui se propage dans le tube.

L'EMI est comprise entre la plus forte énergie à laquelle l'inflammation n'apparaît plus et la plus faible énergie à laquelle l'inflammation se produit au cours de 20 essais.

Il est important de noter que l'EMI diminue lorsque la température augmente. La relation entre la température et l'EMI est linéaire en coordonnées logarithmiques. L'EMI diminue également avec une augmentation de la concentration en oxygène ou en vapeurs inflammables dans le gaz disperseur.

III.1.4 La température minimale d'inflammation (TMI) en nuage

Les méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière sont exposées dans la norme CEI 1241-2-1. Le deuxième paragraphe concerne la température minimale d'inflammation d'un nuage de poussière dans un four chauffé.

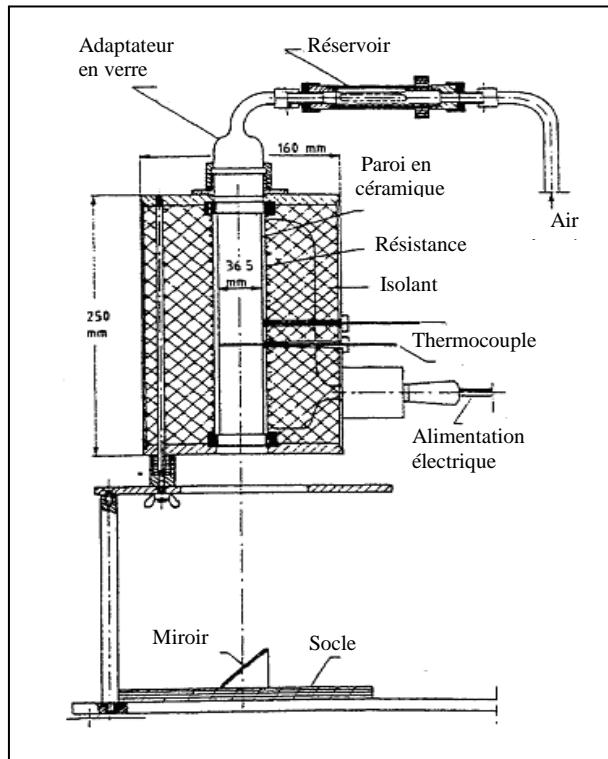
L'échantillon représentatif et homogène doit traverser un tamis de 71 μm . S'il est nécessaire de tester une poussière plus grossière (jusqu'à 500 μm), il faut indiquer l'ouverture nominale du tamis dans le rapport. La teneur en humidité de l'échantillon doit également être notifiée.

L'appareil utilisé est un four Godbert-Greenwald (Chilworth) (Figure 7). L'inflammation se produit quand un jet de flamme est visible au-delà de la base du tube du four ou qu'une inflammation est visualisée à l'aide du miroir. Un délai d'inflammation est accepté. Les étincelles seules sans flamme ne sont pas considérées comme inflammation.

Une fois la première inflammation obtenue, il faut faire varier la masse d'échantillon (en général, sur une plage allant de 0,01 à 1 gramme) et la surpression de l'air de dispersion (de 2 à 50 kPa environ) pour avoir l'inflammation la plus vigoureuse. Notons que le choix de l'inflammation la plus vigoureuse, repose donc sur une méthode visuelle, ce qui introduit par conséquent une part de subjectivité dans ce type d'essais. Ensuite, en utilisant les mêmes

masse et pression, les essais continuent en réduisant la température par palier de 20°C (ou par palier de 10°C en dessous de 300°C) jusqu'à ne plus avoir d'inflammation sur 10 essais.

a)



b)



c)

Figure 7 : Four Godbert-Greenwald

a) représentation schématique, b) photographie de l'appareil utilisé, c) Test d'inflammation

La température minimale d'inflammation obtenue après variation des paramètres de masse et de surpression est alors corrigée par une diminution de 20°C pour les températures du four supérieures à 300°C et par une diminution de 10°C pour les températures du four inférieures ou égales à 300°C. Cette diminution correspond à une marge de sécurité pour une exploitation au sein d'une atmosphère explosible.

III.1.5 La concentration minimale d'explosion (CME)

La concentration minimale d'explosion (CME) peut être déterminée à l'aide de deux appareils : un tube de Hartmann modifié ou une sphère d'explosion (20 L ou 1 m³). Dans le cadre de notre travail, la CME a été estimée exclusivement à l'aide de la sphère de 20 L. La détermination de la CME est réalisée en accord avec les normes ISO 6184-1 et NF EN 14034-

3 (2006). Elle est définie comme étant la plus forte concentration pour laquelle aucune inflammation n'est observée après trois tests consécutifs. Ces tests sont généralement réalisés à l'aide d'inflammateurs de 2,5 kJ au lieu d'inflammateurs de 10 kJ comme préconisés pour la détermination de la sévérité d'explosion.

III.2 Explosivité des nuages de poussières

Des tests simples permettent d'obtenir une estimation qualitative du risque, mais seuls les tests en sphère de 20 litres (figures 8 et 9) ou en réservoir de 1 m³ permettent de mesurer les valeurs caractéristiques de l'explosion.



Figure 8 : Photographie de la sphère d'explosion de 20 L

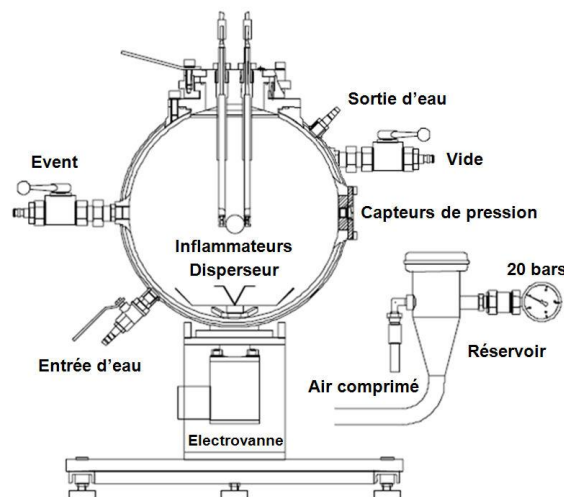


Figure 9 : Schéma de la sphère de 20 L (Kühner AG)

La vitesse d'accroissement de la pression (dP/dt) atteint une valeur maximale $(dP/dt)_m$ au cours de l'explosion (figure 10). Les vitesses maximales de montée en pression, mesurées dans des conditions relatives identiques sur une grande plage de concentrations, permettent de déterminer le maximum $(dP/dt)_{max}$ des $(dP/dt)_m$. De même, P_{max} est la surpression maximale observée sur une large plage de concentration. La violence d'une explosion est ainsi caractérisée par la surpression maximale d'explosion (P_{max}) et la vitesse maximale de montée en pression $(dP/dt)_{max}$.

Dans une enceinte confinée, alors que la pression maximale d'explosion est pratiquement indépendante du volume, la vitesse maximale de montée en pression varie en fonction du volume selon la relation dite « loi cubique » :

$$(dP/dt)_{max} = K_{St} V^{-1/3}$$

où K_{St} est une constante caractéristique de la suspension permettant de classer les poussières en diverses catégories en vue de la protection des enceintes par événements. Cette relation a été établie expérimentalement sur des enceintes de volumes compris entre 0,020 m³ et 60 m³ dont la forme était définie par un rapport longueur ou hauteur sur diamètre inférieur à 5 et a été vérifiée pour une enceinte de 100 m³.

La littérature anglo-saxonne propose ainsi d'identifier quatre classes d'explosions de poussières en fonction du K_{St} (tableau 2). La présentation la plus simple est la suivante :

| Classes d'explosions | Valeurs de K_{St} (bar.m.s ⁻¹) |
|----------------------|--|
| St 0 | 0 |
| St 1 | 1 à 200 |
| St 2 | 201 à 300 |
| St 3 | > 300 |

Tableau 2 : Classes d'explosion en fonction des valeurs de K_{St}

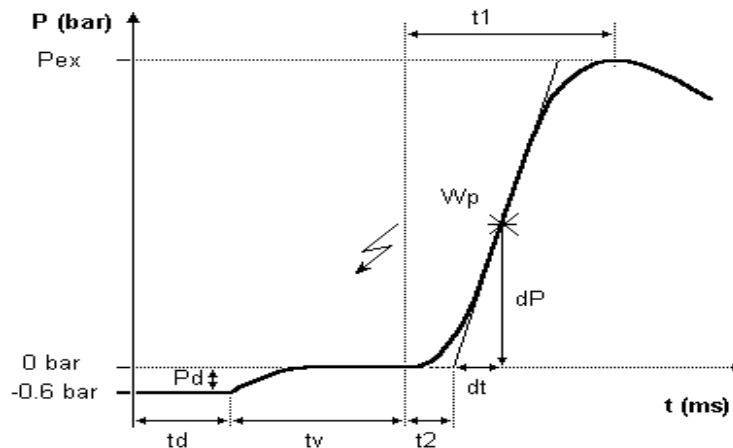


Figure 10 : Variation de la pression dans la sphère en fonction du temps durant une explosion

Les déterminations des pressions maximales et des vitesses de montée en pression sont déterminées à l'aide d'une sphère de 20 litres qui fut développée initialement par Siwek en 1988 en vue d'obtenir des pressions maximales d'explosion et des vitesses d'explosion. La sphère utilisée au sein du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) est commercialisée par la société Kühner AG.

L'appareillage est constitué essentiellement d'une chambre d'essai sphérique de 20 litres de volume, en acier inoxydable (Figures 8 et 9). Un récipient (réservoir à poussières) de 0,6 litre de capacité, pouvant être pressurisé à l'air sous 20 bars relatifs, est raccordé à la chambre d'explosion. Ce récipient est muni d'une vanne à ouverture rapide permettant l'injection libre du contenu du récipient dans les 10 ms suivant la commande d'ouverture. Le récipient est raccordé à la chambre d'explosion par un disperseur à plaques.

La source d'inflammation comprend généralement deux allumeurs pyrotechniques de 5 kJ, l'énergie totale étant de 10 kJ ; elle est disposée de façon à provoquer l'inflammation après un retard d'inflammation spécifié de $t_v = 60$ ms (10) (délai de mise à feu : ce paramètre expérimental caractérise le degré de turbulence prédominant au moment de l'inflammation). Elle est placée au centre géométrique de la chambre d'explosion. Deux capteurs de pression piézoélectriques reliés à des amplificateurs puis au système d'acquisition sont fixés à la chambre d'explosion pour mesurer sa pression interne.

Les tests en sphère de 20 litres sont considérés comme étant un standard en test d'explosivité dans de très nombreux pays comme les USA, le Royaume Uni, l'Allemagne et la France. Le protocole expérimental retenu est celui décrit dans la norme NF EN 26 184-1 ; cette norme préconise notamment que les essais soient menés sur les fines obtenues après un tamisage à $63 \mu\text{m}$.

IV. CARACTERISTIQUES ET ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES ECHANTILLONS

Certaines analyses furent réalisées afin de connaître des caractéristiques des trois types de bois (sapin, épicéa, peuplier) qui ont été testés.

Comme vu précédemment, l'une des conditions demandées par certaines normes, est que la taille des particules de bois doit être inférieure à 63 μm . Pour cette raison il a fallu tamiser les trois types de bois fournis, puisqu'ils étaient tous de taille supérieure à celle souhaitée. Cette manipulation nous a permis d'obtenir des distributions granulométriques comparables pour les échantillons de bois étudiés et donc de nous focaliser uniquement sur l'influence de l'humidité sur l'inflammabilité et l'explosivité de ceux-ci.

La tamiseuse utilisée est de type Alpine, elle fonctionne par aspiration et permet de récupérer les poussières à la base d'un cyclone.

IV.1 Distribution granulométrique

Les distributions granulométriques des trois échantillons de particules de bois après tamisage furent réalisées au moyen d'un granulomètre laser de type Mastersizer 2000S (tableau 3).

| Diamètre en μm | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|---------------------------|-------|--------|----------|
| d₁₀ | 22 | 11 | 15 |
| d₅₀ | 64 | 50 | 57 |
| d₉₀ | 147 | 158 | 156 |
| d₃₂ | 16 | 13 | 17 |

Tableau 3: Principales valeurs représentatives des analyses granulométriques des échantillons de bois

Le diamètre de Sauter des trois échantillons est très proche du d_{10} , ce qui laisse supposer que la surface spécifique des particules est très importante.

Les rapports d'analyses détaillés sont présentés dans les figures 11, 12 et 13 suivantes.

Result: Analysis Report

Measured by:

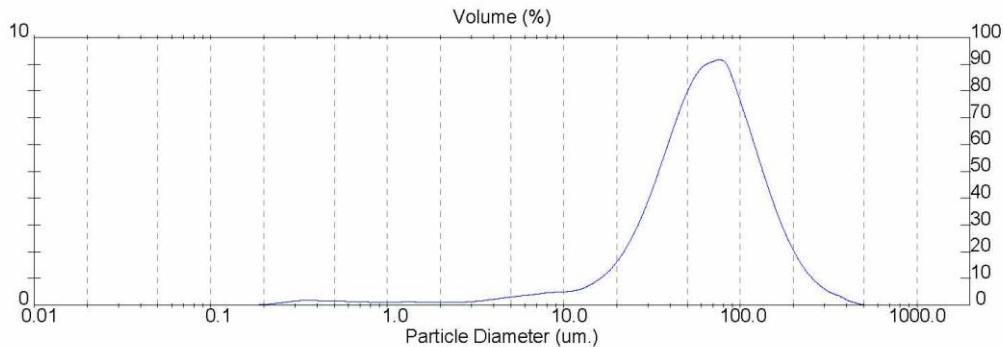
Security Level: 0

| Sample Details | | |
|------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Sample ID: sapin | Run Number: 1 | Measured: Mon 17 Jul 2006 10:09 |
| Sample File: PFE-LO | Record Number: 1 | Analysed: Mon 17 Jul 2006 10:09 |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 15.8 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | |
| Analysis Model: Polydisperse | | | Residual: 0.313 % |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|
| Distribution Type: Volume | Conc. = 0.0571 %Vol | Density = 1.000 g/cm ³ | Specific S.A. = 0.3704 m ² /g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 22.27 um | D (v, 0.5) = 64.64 um | D (v, 0.9) = 147.40 um |
| D [4, 3] = 77.64 um | D [3, 2] = 16.20 um | Span = 1.936E+00 | Uniformity = 6.199E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 6.63 | 0.42 | 7.72 | 4.03 |
| 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 7.72 | 0.47 | 9.00 | 4.51 |
| 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 9.00 | 0.50 | 10.48 | 5.01 |
| 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 10.48 | 0.53 | 12.21 | 5.54 |
| 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 12.21 | 0.66 | 14.22 | 6.20 |
| 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 14.22 | 0.90 | 16.57 | 7.10 |
| 0.13 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 16.57 | 1.25 | 19.31 | 8.36 |
| 0.15 | 0.01 | 0.17 | 0.01 | 19.31 | 1.78 | 22.49 | 10.13 |
| 0.17 | 0.02 | 0.20 | 0.02 | 22.49 | 2.52 | 26.20 | 12.65 |
| 0.20 | 0.04 | 0.23 | 0.07 | 26.20 | 3.46 | 30.53 | 16.10 |
| 0.23 | 0.09 | 0.27 | 0.16 | 30.53 | 4.61 | 35.56 | 20.71 |
| 0.27 | 0.15 | 0.31 | 0.30 | 35.56 | 5.88 | 41.43 | 26.59 |
| 0.31 | 0.18 | 0.36 | 0.48 | 41.43 | 7.14 | 48.27 | 33.73 |
| 0.36 | 0.17 | 0.42 | 0.65 | 48.27 | 8.19 | 56.23 | 41.92 |
| 0.42 | 0.17 | 0.49 | 0.82 | 56.23 | 8.86 | 65.51 | 50.78 |
| 0.49 | 0.16 | 0.58 | 0.98 | 65.51 | 9.09 | 76.32 | 59.87 |
| 0.58 | 0.14 | 0.67 | 1.12 | 76.32 | 9.02 | 88.91 | 68.89 |
| 0.67 | 0.12 | 0.78 | 1.24 | 88.91 | 7.93 | 103.58 | 76.81 |
| 0.78 | 0.12 | 0.91 | 1.36 | 103.58 | 6.61 | 120.67 | 83.42 |
| 0.91 | 0.12 | 1.06 | 1.47 | 120.67 | 5.23 | 140.58 | 88.65 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 1.59 | 140.58 | 3.91 | 163.77 | 92.56 |
| 1.24 | 0.12 | 1.44 | 1.72 | 163.77 | 2.77 | 190.80 | 95.33 |
| 1.44 | 0.12 | 1.68 | 1.83 | 190.80 | 1.86 | 222.28 | 97.19 |
| 1.68 | 0.11 | 1.95 | 1.94 | 222.28 | 1.20 | 258.95 | 98.40 |
| 1.95 | 0.10 | 2.28 | 2.04 | 258.95 | 0.75 | 301.68 | 99.15 |
| 2.28 | 0.11 | 2.65 | 2.15 | 301.68 | 0.47 | 351.46 | 99.62 |
| 2.65 | 0.12 | 3.09 | 2.27 | 351.46 | 0.28 | 409.45 | 99.90 |
| 3.09 | 0.16 | 3.60 | 2.43 | 409.45 | 0.10 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.21 | 4.19 | 2.64 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.27 | 4.88 | 2.91 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.33 | 5.69 | 3.24 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.37 | 6.63 | 3.61 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Operator: 'perrin' Level:0

Mastersizer S long bed Ver. 3.10
Serial Number:
21 CFR part 11 mode

p. 1
22 Sep 06 06:36

Figure 11 : Distribution granulométrique des poussières de sapin

Result: Analysis Report

Measured by:

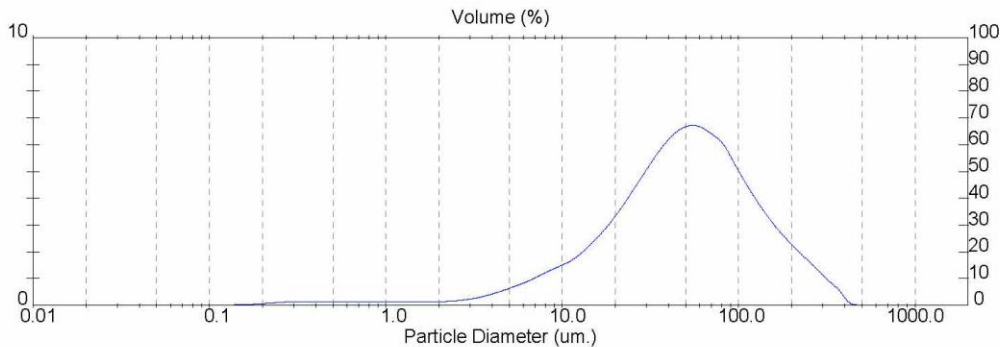
Security Level: 0

| Sample Details | | |
|------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Sample ID: bois epicea | Run Number: 7 | Measured: Mon 17 Jul 2006 10:17 |
| Sample File: PFE-LO | Record Number: 7 | Analysed: Mon 17 Jul 2006 10:17 |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 19.4 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | |
| Analysis Model: Polydisperse | | | Residual: 0.400 % |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|
| Distribution Type: Volume | Conc. = 0.0557 %Vol | Density = 1.000 g/cm ³ | Specific S.A. = 0.4663 m ² /g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 11.39 um | D (v, 0.5) = 49.96 um | D (v, 0.9) = 157.68 um |
| D [4, 3] = 70.38 um | D [3, 2] = 12.87 um | Span = 2.928E+00 | Uniformity = 9.012E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 6.63 | 1.05 | 7.72 | 6.38 |
| 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 7.72 | 1.27 | 9.00 | 7.65 |
| 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 9.00 | 1.46 | 10.48 | 9.11 |
| 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 10.48 | 1.68 | 12.21 | 10.79 |
| 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.01 | 12.21 | 2.01 | 14.22 | 12.80 |
| 0.11 | 0.01 | 0.13 | 0.02 | 14.22 | 2.44 | 16.57 | 15.24 |
| 0.13 | 0.02 | 0.15 | 0.04 | 16.57 | 2.91 | 19.31 | 18.15 |
| 0.15 | 0.03 | 0.17 | 0.06 | 19.31 | 3.48 | 22.49 | 21.63 |
| 0.17 | 0.05 | 0.20 | 0.11 | 22.49 | 4.12 | 26.20 | 25.75 |
| 0.20 | 0.08 | 0.23 | 0.19 | 26.20 | 4.78 | 30.53 | 30.53 |
| 0.23 | 0.11 | 0.27 | 0.30 | 30.53 | 5.45 | 35.56 | 35.98 |
| 0.27 | 0.13 | 0.31 | 0.43 | 35.56 | 6.04 | 41.43 | 42.02 |
| 0.31 | 0.14 | 0.36 | 0.56 | 41.43 | 6.48 | 48.27 | 48.50 |
| 0.36 | 0.14 | 0.42 | 0.70 | 48.27 | 6.69 | 56.23 | 55.19 |
| 0.42 | 0.13 | 0.49 | 0.83 | 56.23 | 6.65 | 65.51 | 61.83 |
| 0.49 | 0.13 | 0.58 | 0.96 | 65.51 | 6.37 | 76.32 | 68.20 |
| 0.58 | 0.12 | 0.67 | 1.08 | 76.32 | 5.96 | 88.91 | 74.17 |
| 0.67 | 0.13 | 0.78 | 1.21 | 88.91 | 5.20 | 103.58 | 79.36 |
| 0.78 | 0.13 | 0.91 | 1.34 | 103.58 | 4.45 | 120.67 | 83.81 |
| 0.91 | 0.14 | 1.06 | 1.48 | 120.67 | 3.77 | 140.58 | 87.58 |
| 1.06 | 0.14 | 1.24 | 1.62 | 140.58 | 3.16 | 163.77 | 90.73 |
| 1.24 | 0.15 | 1.44 | 1.77 | 163.77 | 2.63 | 190.80 | 93.36 |
| 1.44 | 0.14 | 1.68 | 1.91 | 190.80 | 2.17 | 222.28 | 95.53 |
| 1.68 | 0.14 | 1.95 | 2.05 | 222.28 | 1.74 | 258.95 | 97.28 |
| 1.95 | 0.14 | 2.28 | 2.19 | 258.95 | 1.32 | 301.68 | 98.59 |
| 2.28 | 0.17 | 2.65 | 2.36 | 301.68 | 0.89 | 351.46 | 99.49 |
| 2.65 | 0.21 | 3.09 | 2.57 | 351.46 | 0.47 | 409.45 | 99.96 |
| 3.09 | 0.29 | 3.60 | 2.86 | 409.45 | 0.04 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.40 | 4.19 | 3.26 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.53 | 4.88 | 3.79 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.69 | 5.69 | 4.48 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.85 | 6.63 | 5.33 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Operator: 'perrin' Level:0

Mastersizer S long bed Ver. 3.10
Serial Number:
21 CFR part 11 mode

p. 3
22 Sep 06 06:39

Figure 12 : Distribution granulométrique des poussières d'épicéa

Result: Analysis Report

Measured by:

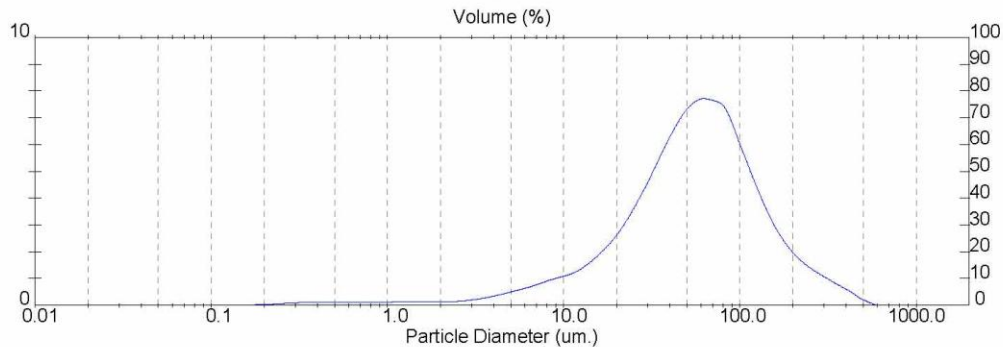
Security Level: 0

| Sample Details | | |
|------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Sample ID: peuplier | Run Number: 4 | Measured: Mon 17 Jul 2006 10:14 |
| Sample File: PFE-LO | Record Number: 4 | Analysed: Mon 17 Jul 2006 10:14 |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 13.5 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | |
| Analysis Model: Polydisperse | | | Residual: 0.350 % |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|
| Distribution Type: Volume | Conc. = 0.0445 %Vol | Density = 1.000 g/cm ³ | Specific S.A. = 0.3515 m ² /g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 14.71 um | D (v, 0.5) = 56.72 um | D (v, 0.9) = 156.05 um |
| D[4, 3] = 76.11 um | D [3, 2] = 17.07 um | Span = 2.492E+00 | Uniformity = 8.073E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 6.63 | 0.78 | 7.72 | 4.99 |
| 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 7.72 | 0.94 | 9.00 | 5.92 |
| 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 9.00 | 1.06 | 10.48 | 6.99 |
| 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 10.48 | 1.20 | 12.21 | 8.19 |
| 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 12.21 | 1.45 | 14.22 | 9.64 |
| 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 14.22 | 1.80 | 16.57 | 11.44 |
| 0.13 | 0.00 | 0.15 | 0.01 | 16.57 | 2.23 | 19.31 | 13.67 |
| 0.15 | 0.01 | 0.17 | 0.02 | 19.31 | 2.77 | 22.49 | 16.44 |
| 0.17 | 0.02 | 0.20 | 0.04 | 22.49 | 3.46 | 26.20 | 19.90 |
| 0.20 | 0.04 | 0.23 | 0.07 | 26.20 | 4.25 | 30.53 | 24.15 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 0.14 | 30.53 | 5.13 | 35.56 | 29.29 |
| 0.27 | 0.09 | 0.31 | 0.22 | 35.56 | 6.03 | 41.43 | 35.31 |
| 0.31 | 0.10 | 0.36 | 0.33 | 41.43 | 6.84 | 48.27 | 42.15 |
| 0.36 | 0.10 | 0.42 | 0.43 | 48.27 | 7.42 | 56.23 | 49.57 |
| 0.42 | 0.10 | 0.49 | 0.53 | 56.23 | 7.69 | 65.51 | 57.26 |
| 0.49 | 0.11 | 0.58 | 0.64 | 65.51 | 7.63 | 76.32 | 64.89 |
| 0.58 | 0.10 | 0.67 | 0.74 | 76.32 | 7.34 | 88.91 | 72.23 |
| 0.67 | 0.11 | 0.78 | 0.85 | 88.91 | 6.30 | 103.58 | 78.52 |
| 0.78 | 0.11 | 0.91 | 0.96 | 103.58 | 5.16 | 120.67 | 83.69 |
| 0.91 | 0.12 | 1.06 | 1.08 | 120.67 | 4.08 | 140.58 | 87.77 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 1.21 | 140.58 | 3.13 | 163.77 | 90.90 |
| 1.24 | 0.13 | 1.44 | 1.33 | 163.77 | 2.40 | 190.80 | 93.30 |
| 1.44 | 0.13 | 1.68 | 1.46 | 190.80 | 1.86 | 222.28 | 95.16 |
| 1.68 | 0.12 | 1.95 | 1.58 | 222.28 | 1.47 | 258.95 | 96.63 |
| 1.95 | 0.13 | 2.28 | 1.71 | 258.95 | 1.18 | 301.68 | 97.81 |
| 2.28 | 0.14 | 2.65 | 1.86 | 301.68 | 0.93 | 351.46 | 98.73 |
| 2.65 | 0.18 | 3.09 | 2.04 | 351.46 | 0.67 | 409.45 | 99.41 |
| 3.09 | 0.24 | 3.60 | 2.28 | 409.45 | 0.42 | 477.01 | 99.83 |
| 3.60 | 0.32 | 4.19 | 2.60 | 477.01 | 0.17 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.42 | 4.88 | 3.02 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.53 | 5.69 | 3.56 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.65 | 6.63 | 4.20 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Operator: 'perrin' Level:0

Mastersizer S long bed Ver. 3.10
Serial Number:
21 CFR part 11 mode

p. 2
22 Sep 06 06:37

Figure 13 : Distribution granulométrique des poussières de peuplier

IV.2 Masse volumique

Les masses volumiques réelles (g.cm^{-3}) des trois échantillons furent mesurées à 20°C à l'aide d'un pycnomètre à hélium dans une cellule de mesure de 10 cm^3 . Les mesures dites sur produits bruts furent réalisées directement sur les produits au moment de leurs réceptions, les mesures furent reproduites après tamisage au travers d'un tamis de $63 \mu\text{m}$ (tableau 4).

| Masse volumique (g.cm^{-3}) | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|--|-------|--------|----------|
| Echantillon brut | 1,60 | 1,67 | 1,63 |
| Echantillon tamisé à $63 \mu\text{m}$ | 1,58 | 1,54 | 1,59 |

Tableau 4 : Masses volumiques de différents échantillons.

IV.3 Teneur en eau

La teneur en eau (% massique) des trois échantillons a été mesurée par séchage dans une étuve sous vide dynamique chauffée pendant une heure à 100°C. La moyenne des pertes de masse après séchage a permis d'obtenir le pourcentage d'eau qui était contenu dans les différents échantillons de bois (tableau 5).

| | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|-------------------|-------|--------|----------|
| Teneur en eau (%) | 9,33 | 6,93 | 7,53 |

Tableau 5 : Teneurs en eau dans chaque échantillon de bois.

Le calcul de la teneur massique en eau x^* (en kg d'eau par kg de bois sec) à partir de la corrélation proposée par Lartigue et Puigalli conduit à des résultats très approchants, respectivement 6,7 et 9,5 % pour 20 et 35 % d'humidité relative H_r de l'air pour une température T de 293°K :

$$x^* = \frac{\ln Q}{100 \cdot \ln B} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{C - \ln H_r}{A}$$

où

$$A = -2,86 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,075 \cdot 10^{-2} \cdot T + 10,238$$
$$B = -5,414 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,0134$$
$$C = 4,97 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 2,667 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,3548$$

IV.4 Taux de cendre

Le taux de cendre des différents types de bois a été déterminé après calcination à l'aide d'un four à moufle (MF2 Herrmann-Moritz – puissance 2,6 kW). Les trois échantillons (d'une soixantaine de grammes chacun) furent positionnés dans des creusets et disposés en même temps dans le four. Ils furent ensuite portés graduellement à une température de 815°C et furent ensuite laissés à cette température pendant deux heures avant refroidissement.

Le tableau 6 présente les valeurs obtenues par ces manipulations :

| | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|----------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| Taux de cendres (%) | 0,37 | 0,32 | 0,18 |

Tableau 6 : Taux de cendre pour chaque type de bois.

IV.5 Analyse élémentaire

Les échantillons furent préparés pour l'analyse élémentaire qui a été réalisée à l'aide d'un Thermofinnigan FlashEA 1112. Les résultats obtenus figurent dans le tableau 7 :

| | % C | % H | % N | % O | % S |
|---------------------------------|---------------|--------------|------------|---------------|------------|
| Sapin - échantillon 1 | 47,16 | 5,55 | 0 | 39,34 | 0 |
| Sapin - échantillon 2 | 47,26 | 5,88 | 0 | 39,39 | 0 |
| Moyenne sapin | 47,21 | 5,715 | 0 | 39,365 | 0 |
| Epicéa - échantillon 1 | 47,34 | 6,08 | 0 | 41,07 | 0 |
| Epicéa - échantillon 2 | 47,26 | 6,10 | 0 | 42,23 | 0 |
| Moyenne epicéa | 47,30 | 6,09 | 0 | 41,65 | 0 |
| Peuplier - échantillon 1 | 45,45 | 5,77 | 0 | 42,27 | 0 |
| Peuplier - échantillon 2 | 45,26 | 5,71 | 0 | 42,07 | 0 |
| Moyenne peuplier | 45,355 | 5,74 | 0 | 42,17 | 0 |

Tableau 7 : Résultats de l'analyse élémentaire pour chaque type de bois.

V. MESURES RELATIVES À L'INFLAMMABILITÉ ET À L'EXPLOSIVITÉ DES ÉCHANTILLONS

V.1 Mesure de la température minimale d'inflammation en couche

Cette étude a été réalisée à l'aide d'une plaque chauffante normalisée suivant la norme CEI 1241-2-1 avec une épaisseur de poussière de 5 mm. Les poussières de bois ont été préalablement stockées pendant deux journées à une humidité contrôlée et constante de 20 % HR. L'humidité et la température ambiantes ont été systématiquement notées.

Les valeurs obtenues lors des mesures de températures minimales d'inflammation en couche de 5 mm sont rassemblées en annexe A et synthétisées dans le tableau 8 :

| Type de bois | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|--------------------|-------|--------|----------|
| TMI couche de 5 mm | 250°C | 270°C | 260°C |

Tableau 8 : Valeurs des températures minimales d'inflammation en couche pour les poussières de bois

La nature du bois influence apparemment assez peu la température minimale d'inflammation en couche de leurs poussières. Nous pouvons néanmoins souligner que la TMI en couche de l'épicéa semble être très légèrement supérieure à celles du sapin et du peuplier.

V.2 Mesure des températures et dimensions critiques de stockage

Les poudres stockées à des températures élevées peuvent subir une réaction chimique menant à un auto-échauffement qui peut conduire à son inflammation. Plusieurs facteurs doivent être considérés pour la détermination des températures de stockage sûres. Le volume et la superficie du récipient de stockage, la température proposée de stockage et la durée de stockage doivent tous être pris en considération. La méthode d'essai utilisant des paniers dans un four isotherme (Chilworth) est normalisée selon la norme NF EN 15188 2007.

Les échantillons brunissent en cas de non-inflammation à température élevée. La figure 14 présente les différences entre l'échantillon initial de sapin et les échantillons soumis à des températures de 220 et de 240°C dans le panier de 25 mm de côté.



Figure 14 : Brunissement d'un échantillon de sapin : a) aspect initial, b) après stockage à 220 °C, c) après stockage à 240 °C.

Les risques liés à un auto-échauffement sont de manière évidente l'élévation de température ainsi que le dégagement de gaz inflammables. Le taux d'humidité des produits est l'un des paramètres déclencheurs d'une éventuelle fermentation qui conduit à une montée de température qui souvent plafonne à 60-70°C. Dans ces conditions et si la taille du stockage dépasse la taille critique pour le produit considéré, l'échauffement peut conduire par oxydation chimique (entraînant la présence d'oxygène) à l'auto-inflammation dès lors qu'aucun changement de phase (fusion, évaporation) n'entrave ce processus.

Les résultats obtenus lors de ces tests sont présentés en annexe B et synthétisés dans le tableau 9 suivant.

Le tableau 12 et la figure 15 montrent les résultats obtenus sur le four isotherme par chaque type de bois sur différentes tailles de paniers.

| Type de bois | Volume du panier (cm ³) | Température d'auto-inflammation (°C) |
|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Sapin | 15,63 | 250 |
| | 125 | 220 |
| | 1 000 | 190 |
| Epicéa | 15,63 | 240 |
| | 125 | 210 |
| | 1 000 | 180 |
| | 15,63 | 230 |

| | | |
|-----------------|-------|-----|
| Peuplier | 125 | 200 |
| | 1 000 | 180 |

Tableau 9 : Résultats obtenus sur le four isotherme.

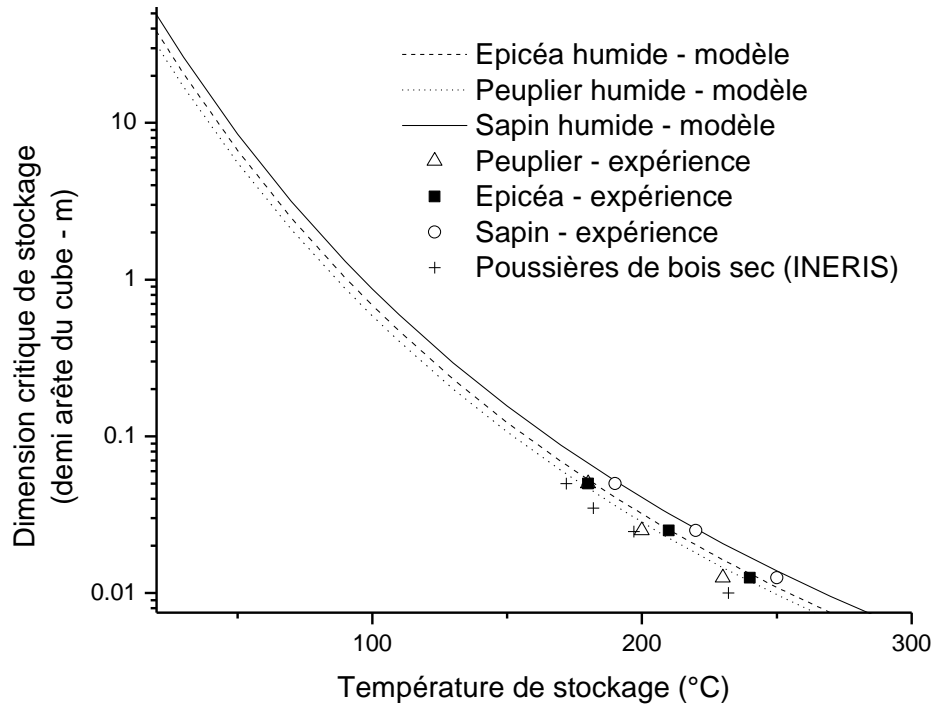


Figure 15 : Variation de la taille du stockage en fonction de la température pour les poussières de bois étudiées

Le potentiel d'auto-échauffement d'un stockage dépend de l'équilibre entre la production de chaleur dans le stockage et les pertes de chaleur vers le milieu environnant. Ainsi, le modèle de Frank Kamenetskii, établi à partir d'un bilan thermique sur un volume de conductivité thermique apparente λ_{app} , d'un produit combustible et de masse volumique ρ_s repose sur les hypothèses suivantes :

- le régime stationnaire est atteint,
- le produit combustible est homogène dans son ensemble,
- la génération de chaleur par le solide pulvérulent suit une loi d'ordre 0 et de type Arrhenius,
- l'énergie d'activation E_a du processus étudié est suffisamment élevée de telle sorte que $E_a/RT \gg 1$,
- le transfert de chaleur au sein du stockage se fait uniquement par conduction,
- la température de surface du stockage est la même que celle du milieu environnant T_g , i.e. le nombre de Biot est très élevé.

$$\lambda_{app} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{j}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_s \cdot \left(\Delta H_r \right) \cdot A_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T} \right) = 0$$

avec $j = 0, 1$ ou 2 respectivement pour un stockage cubique, cylindrique ou sphérique, A_0 , le facteur préexponentiel et ΔH_r , l'enthalpie de réaction.

En linéarisant l'équation précédente dans le cas d'un stockage cubique, nous obtenons :

$$\ln\left(\delta_c \cdot \frac{T_{AI}^2}{r^2} \right) = -\frac{E_a}{R \cdot T_{AI}} + \ln\left(\frac{E_a \cdot \rho_s \cdot A \cdot \Delta H_r}{R \cdot \lambda_{app}} \right)$$

A partir d'essais réalisés en four isotherme, plusieurs couples (température critique d'auto-échauffement T_{AI} , dimension r du stockage) peuvent être déterminés. Par régression linéaire, les paramètres N et M peuvent être obtenus :

$$M = \frac{E_a \cdot \rho_s \cdot A \cdot \Delta H_r}{R \cdot \lambda_{app}} \text{ et } N = -\frac{E_a}{R}$$

Le paramètre r_{crit} en dessous duquel, il n'y a pas d'auto-inflammation peut donc s'exprimer selon :

$$r_{crit} = \sqrt{\frac{\delta_c \cdot T_{AI}^2}{M} \exp\left(\frac{N}{T_{AI}} \right)}$$

L'utilisation de ce modèle nécessite de connaître ou d'estimer de nombreuses données pour les bois concernés secs, mais également humides. Le tableau 10 suivant synthétise les données employées dans ce modèle :

| Propriétés | | ρ_s (kg/m ³) | λ_s (W/m/K) | C_{ps} (kJ/kg/K) | $\Delta_c H$ (MJ/kg) | d_p (μ m) |
|------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| Sapin | Sec | 510 | 0,12 | 1,2 | 11,60 | 64 |
| | $x^* = 10 \%$ | 571 | 0,14 | 1,6 | | |
| Epicéa | Sec | 420 | 0,1 | 1,2 | 15,65 | 50 |
| | $x^* = 10 \%$ | 470 | 0,12 | 1,6 | | |
| Peuplier | Sec | 460 | 0,11 | 1,2 | 15,15 | 57 |
| | $x^* = 10 \%$ | 515 | 0,13 | 1,6 | | |

Tableau 10 : Caractéristiques des bois en fonction de leur teneur massique en eau x^* - (Wood handbook, 1999)

La teneur en eau de 10 % massique correspond environ à une mise en contact du bois sec avec de l'air à une humidité relative d'environ 35 % (Corrélation de Lartigue et Puigalli). L'application de la théorie de Frank-Kamenestkii montre la bonne adéquation entre le modèle

et les résultats expérimentaux présentés en figure 15. Aux humidités considérées, le sapin possède une température d'auto-inflammation supérieure à celle de l'épicéa et du peuplier. Nous pouvons noter que ces caractéristiques semblent significativement supérieures à celles d'un bois sec.

L'étude des conditions de stockage d'une poudre vise à déterminer la dimension critique d_c du stockage de produits pulvérulents à une température donnée, de même que la température critique T_c pour une dimension donnée d'un produit stocké en masse sous air et susceptible de donner lieu à un auto-échauffement. Les différentes températures critiques obtenues en fonction de la taille de l'échantillon donnent par extrapolation, à partir des théories thermiques de Thomas, Semenov ou encore de Frank Kamenetskii, la valeur de la température critique d'un stockage de taille donnée, température à laquelle un feu couvant peut démarrer spontanément. Réciproquement, à une température donnée correspond une dimension critique de stockage, assimilée dans le cas présent à la demi-arête d'un cube. Le tableau 11 synthétise quelques résultats significatifs obtenus pour les bois étudiés.

| Type de bois | Température de stockage (°C) | d_c Diamètre critique correspondant (m) |
|--------------|------------------------------|---|
| Sapin | 50 | 2 |
| | 70 | 1,2 |
| Epicéa | 50 | 1,5 |
| | 70 | 0,85 |
| Peuplier | 50 | 15 |
| | 70 | 6 |

Tableau 11 : Diamètres critiques à 50 et 70 °C obtenus par extrapolation des données obtenues à l'aide du four isotherme (modélisation mathématique ne prenant pas en compte les caractéristiques réelles des bois).

La prise en compte de l'humidité et des essences grâce à l'évolution des différents paramètres présentés dans le tableau 11 est donc très satisfaisante, comme en témoigne la figure 16 :

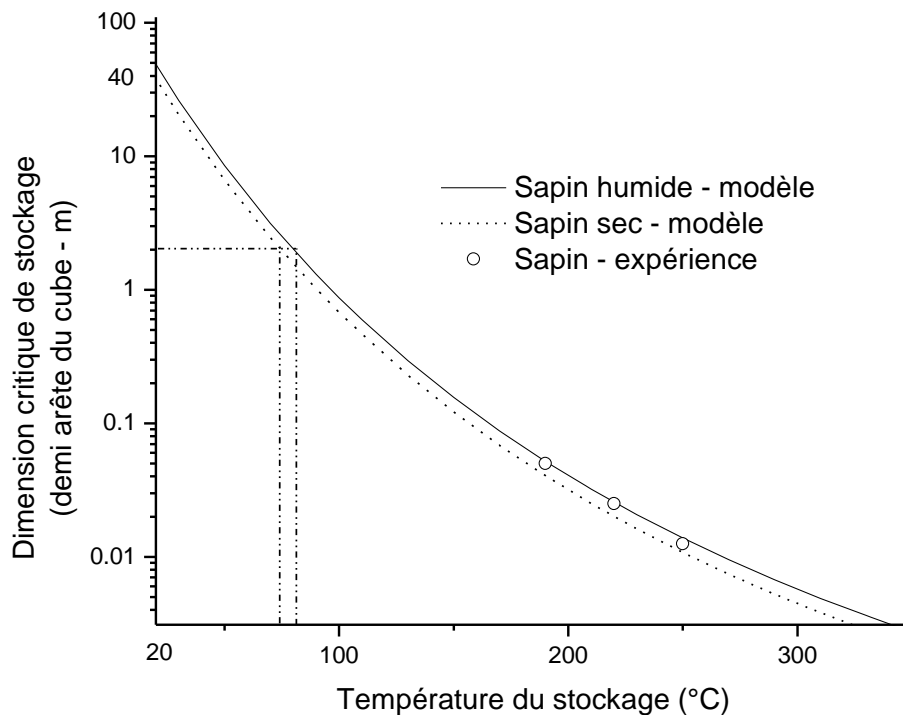


Figure 16 : Variation de la taille du stockage en fonction de la température pour les poussières de sapin

A une taille de stockage donnée, l'augmentation de la teneur en eau dans le bois tend à accroître sensiblement la température critique T_c . Par exemple, pour un stockage cubique de 4 mètres de côté, T_c chute de 85°C à 70°C respectivement pour des poussières de sapin à 10% de teneur en eau et des poussières sèches (figure 16).

Il convient de préciser que les cellules ayant un taux de rotation élevé ne sont pas concernées par les phénomènes d'auto-échauffement. À titre indicatif, on peut indiquer que les phénomènes de fermentation peuvent se développer en 3 à 4 jours et l'auto-inflammation sous des délais de l'ordre de 4 à 5 jours.

V.3 Mesure de l'énergie minimale d'inflammation

Pour une évaluation quantitative du risque, notamment dans les installations de traitement des poussières, la connaissance de l'énergie minimale d'inflammation (EMI) est indispensable. Elle correspond à la plus faible énergie d'une décharge de condensateur permettant d'enflammer le mélange poussière/air. La concentration en poussière et le délai t_v

entre la dispersion et l'inflammation doivent être systématiquement changés jusqu'à ce qu'une valeur minimum de l'énergie d'inflammation soit trouvée. Tous les essais sont réalisés à la pression atmosphérique et à la température ambiante. Cette étude a été réalisée à l'aide d'un tube de Hartmann modifié commercialisé sous le nom de Mike 3 (Kühner AG) normalisé selon la norme CEI 1241-2-3.

Afin de comparer les valeurs d'EMI pour différents appareils, seule une valeur statistique de l'EMI (E_s) au lieu de la gamme d'énergie (E_1 , E_2) devrait être employée. Cette valeur simple (E_s) peut être estimée par l'utilisation de la probabilité de l'inflammation comme suit :

$$E_s = 10^{\left(\log E_2 - I_{E_2} \cdot \frac{(\log E_2 - \log E_1)}{(NI+I)_{E_2} + 1} \right)}$$

où : $I [E_2]$ = nombre d'essais avec inflammation à l'énergie E_2 .

$(NI+I) [E_2]$ = nombre total des essais à l'énergie E_2 .

Selon la norme internationale CEI 1241-2-3, l'énergie d'inflammation est comprise entre la plus forte énergie à laquelle l'inflammation ne se poursuit pas lors d'au moins 20 essais successifs et la plus faible énergie à laquelle l'inflammation se produit au cours de 20 essais successifs. Lors de ces tests, seuls 10 essais successifs avec changement de poudre ont été effectués afin de conclure à une non inflammation.

Les tableaux et figures fournis en annexe C présentent les résultats d'EMI obtenus pour les échantillons de bois. Pour ces essais les échantillons furent conditionnés dans une boîte à gants, ainsi stockés à 21°C sous une humidité relative de 20%.

Les valeurs des énergies minimales d'inflammations trouvées pour les trois échantillons de bois sont présentées dans le tableau 12 :

| Type de bois | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|--------------|-------|--------|----------|
| EMI | 55 mJ | 23 mJ | 45 mJ |

Tableau 12: Energies minimales d'inflammation des trois échantillons de bois

Contrairement aux valeurs de températures minimales d'inflammation et températures d'auto-inflammation, l'EMI de l'épicéa semble être significativement plus faible que celles des autres composés.

Des modèles permettent d'estimer l'énergie minimale d'inflammation d'une poussière. Eckhoff (Eckhoff, 2003) cite notamment le modèle de Kalkert et Schecker (1979) :

$$EMI = \left(\frac{4\pi \cdot \lambda_{air}}{\rho_{air} \cdot C_{pair}} \right)^{3/2} \cdot \rho_{air} \cdot C_{pair} \cdot \left[\frac{\ln 2}{12} \cdot \frac{\rho_s \cdot C_{ps}}{\lambda_{air}} \right]^{3/2} \cdot T_{ad,flamme} \cdot d_p^3$$

où λ_{air} , ρ_{air} et C_{pair} sont respectivement la conductivité thermique, masse volumique et capacité calorifique de l'air ; d_p , ρ_s et C_{ps} sont le diamètre moyen, la masse volumique et la capacité calorifique de la particule et $T_{ad,flamme}$ est la température adiabatique de flamme du mélange. Ce dernier paramètre est défini comme suit :

$$n_{bois} \cdot \Delta_c H_{bois} - n_{eau} \Delta_{vap} H_{eau} = n_{gaz} \cdot \bar{\gamma} \cdot \bar{C}_{pgaz} (T_{ad,flamme} - T_0)$$

avec n_{bois} , le nombre de moles de combustible, n_{eau} , le nombre de moles d'eau vaporisée par le processus, n_{gaz} , le nombre final de moles de gaz (typiquement du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau et de l'azote), $\Delta_c H_{bois}$, l'enthalpie de combustion du bois, $\Delta_{vap} H_{eau}$, l'enthalpie de vaporisation de l'eau, T_0 , la température initiale du mélange, $\bar{\gamma}$, le ratio des chaleurs spécifiques et \bar{C}_{pgaz} , la capacité calorifique, tous deux moyennés en fonction de la composition du mélange final. \bar{C}_{pgaz} dépendant de la température, il faut avoir recours à des polynômes de degré trois, sous la forme :

$$C_p(T) = a + b.T + c.T^2 + d.T^3$$

Lors de cette modélisation, l'enthalpie de combustion du bois n'a pas été intrinsèquement modifiée pour prendre en compte la présence d'eau. Toutefois, le nombre de moles d'eau vaporisée a été ajusté lors du calcul de la température adiabatique de flamme, afin de prendre en compte ce paramètre (tableau 13). Toutefois, nous pouvons remarquer que ce n'est pas le paramètre le plus sensible lors de l'estimation de l'EMI.

| Propriétés | | $T_{ad,flamme}$ (°K) | EMI _{model} (mJ) | EMI _{exp} (mJ) | d_{ag} (µm) |
|------------|----------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------|
| Sapin | Sec | 2192 | 5 | 55 | 117 |
| | 10 % mc. | 1594 | 9 | | |
| Epicéa | Sec | 2807 | 2,3 | 23 | 89 |
| | 10 % mc. | 2041 | 4,1 | | |
| Peuplier | Sec | 2731 | 3,8 | 45 | 107 |
| | 10 % mc. | 1986 | 6,8 | | |

Tableau 13 : EMI estimées et expérimentales des bois en fonction de leur teneur massique en eau (mc)

d_{ag} est le diamètre des agglomérats qui permettrait d'atteindre par le modèle, la valeur expérimentalement observée de l'EMI. Ce diamètre théorique est assez proche des valeurs observées par microscopie optique.

V.4 Mesure de la température minimale d'inflammation en nuage

Cette étude a été réalisée à l'aide d'un four Godbert-Greenwald (Chilworth) normalisé suivant la norme CEI 1241-2-1. Pour détermination de la température minimale d'inflammation, des masses de 0,1, 0,2 et 0,3 grammes ont été choisies pour les essais sur les poussières de sapin. Les expériences ont été uniquement réalisées avec 0,1 et 0,2 gramme pour l'épicéa et le peuplier ; le remplissage de la nacelle étant difficile pour une masse de 0,3 gramme du fait de l'encombrement des poussières. De même, les pressions relatives de dispersion des échantillons choisies pour les tests furent de 0,15, 0,3 et 0,6 .10⁵ Pa.

Les poussières de bois ont été préalablement stockées pendant deux journées à une humidité contrôlée et constante de 20 % HR. L'humidité et la température ambiantes ont été systématiquement notées.

Le tableau 14 suivant synthétise les résultats obtenus pour différents échantillons de bois à des pressions et des masses variables. Les valeurs minimales ont généralement obtenues pour des masses de 0,2 gramme et des surpressions de 600 hPa. Les tableaux détaillés des essais sont portés en annexe D.

| Type de bois | Température minimale d'inflammation (°C) | TMI (°C) selon la norme CEI |
|-----------------|--|-----------------------------|
| Sapin | 480 | 460 |
| Épicéa | 510 | 490 |
| Peuplier | 490 | 470 |

Tableau 14 : Températures minimales d'inflammation des différents types de bois.

La nature du bois influence, dans notre cas, assez peu la température minimale d'inflammation en nuage de leurs poussières. Remarquons simplement que la TMI en nuage de l'épicéa semble être légèrement supérieure à celles du sapin et du peuplier. Cette tendance correspond à celle observée précédemment pour les TMI en couche.

Un bilan de chaleur appliqué à un nuage de n particules à l'équilibre thermique permet de définir sa température d'inflammation :

$$n \cdot \dot{m}_C \cdot \Delta_c H = n \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot h \cdot (T_s - T_g) + \pi \cdot L^2 \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \sigma (T_s^4 - T_w^4)$$

où $\Delta_c H$ est l'enthalpie de combustion du bois, \dot{m}_C est le vitesse massique de combustion, h est le coefficient convectif, ε est l'émissivité, F est le facteur de forme, L est le diamètre du nuage de poussières, σ est la constante de Stefan-Boltzmann, T_s est la température des

particules, T_g est la température des gaz environnants et T_w est la température de paroi du four.

En ne prenant en compte que l'évolution de l'enthalpie de combustion en fonction de l'humidité et de la nature du bois et en considérant les diamètres spécifiques des produits, nous pouvons constater que le modèle permet tout au moins de conserver la hiérarchie des températures minimales d'inflammation en nuage (figure 17). L'écart à la proportionnalité peut notamment s'expliquer par l'influence certaine de la nature du bois et de l'humidité sur la vitesse de combustion et sur les coefficients de transfert thermiques h et ε .

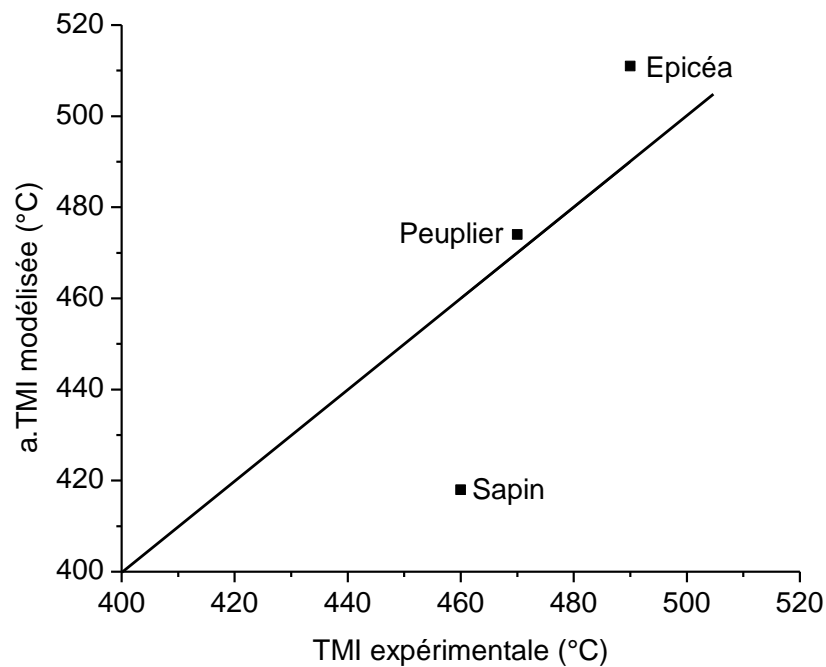


Figure 17 : Evolution de la température minimale d'inflammation en nuage en fonction de la nature du bois humide

V.5 Mesures d'explosivité

Cette étude a été réalisée à l'aide d'une sphère d'explosion de 20 litres normalisée selon l'ISO 6184-1 et suivant la norme NF EN 26-184-1.

Différents échantillons de bois ont été préparés et conditionnés dans une boîte à gants, ils sont stockés à 21°C sous une humidité relative de 20%. L'eau de refroidissement de la sphère a été fixée à une température de 16°C.

Les résultats obtenus sur les trois échantillons de bois sont présentés dans les tableaux portés en annexe E. Ces mesures permettent notamment de déterminer la classe St de l'échantillon de bois de sapin à partir d'une valeur K_{st} de 155 bar.m.s^{-1} . Cet échantillon de bois de sapin est donc de type St1. Des mesures similaires permettent de déterminer la classe St des échantillons d'épicéa et de peuplier, à partir de valeurs de K_{st} de 140 bar.m.s^{-1} et K_{st} de 159 bar.m.s^{-1} , respectivement. Ces échantillons sont également de type St1.

Le tableau 15 présente une synthèse des résultats obtenus vis-à-vis de l'explosivité des trois échantillons. Ces trois échantillons sont assez comparables ; ils sont tous les trois de type St1 et peuvent générer des explosions à partir de concentrations proches de 60 g.m^{-3} (125 g.m^{-3} pour le sapin), créant des surpressions proches de 8 bars en milieux confinés. La surpression maximale est observée à partir d'une concentration de 500 g.m^{-3} , la vitesse maximale de montée en pression à des concentrations de $1\ 000 \text{ g.m}^{-3}$. Ces valeurs sont cohérentes avec celles observées pour les bois séchés. Toutefois, si les valeurs de pressions maximales sont sensiblement constantes, la vitesse maximale de montée en pression est réduite en présence d'humidité.

| Type de bois | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|------------------------------|---|--|--|
| Estimation de CME | 125 g.m^{-3} | 60 g.m^{-3} | 60 g.m^{-3} |
| P_{max} | $7,8.10^5 \text{ Pa}$ à 750 g.m^{-3} | $8,2.10^5 \text{ Pa}$ à 500 g.m^{-3} | $8,1.10^5 \text{ Pa}$ à 500 g.m^{-3} |
| (dP/dt)_{max} | $570.10^5 \text{ Pa.s}^{-1}$ à 1000 g.m^{-3} | $517 .10^5 \text{ Pa.s}^{-1}$ à 1000 g.m^{-3} | $585 .10^5 \text{ Pa.s}^{-1}$ à 1000 g.m^{-3} |
| Classe St | St1 | St1 | St1 |

Tableau 15 : Valeurs d'explosivité mesurées à l'aide de la sphère de 20 litres.

VI. VISITE SUR SITE

La société « Norman Emballages » est spécialisée dans la fabrication des emballages légers en bois déroulé, elle est située au lieu dit « La Courbure » à TADEN - DINAN (Côtes d'Armor).

Cette entreprise fabrique plus d'une cinquantaine de références de cagettes, cageots, bourriches, caisses, plateaux et autres barquettes en bois (figure 18). Les caractéristiques de ces emballages sont essentiellement liées à leur robustesse et donc préservation des produits contenus, aux qualités hydrométriques du matériau (absorption - restitution d'humidité) et donc conservation des denrées.



Figure 18 : Exemple de produits fabriqués par la société Norman.

Les denrées destinées à être utilisées dans ces emballages sont principalement des fruits, des légumes, des huîtres et des coquillages, mais également des emballages pour fleurs (cache-pot), vin, confiseries et pour la chocolaterie.

Cette entreprise familiale a été fondée en 1908, elle appartient au Groupe « Norman Limited » de Jersey dont l'origine remonte à 1840, elle est affiliée au « Syndicat des Industries de l'Emballage Léger » en bois (SIEL).

Pour la fabrication des différents emballages Norman dispose d'un parc de matériel lui permettant de transformer les grumes dans le respect des normes de sécurité alimentaire (démarche HACCP).

Une visite des locaux de l'entreprise Norman fut réalisée en juillet 2007. La configuration de cette entreprise peut être visualisée sur la figure 19.



Figure 19 : Vue aérienne de l'entreprise Norman (IGN, 2007)

Le retour d'expérience sur l'inflammation ou l'explosion de sciure de bois connu et cité par l'entreprise est assez limité car les sciures humides ne s'échauffent généralement que lors des stockages de longues durées qui peuvent amener le stockage à fermenter ou à s'auto-échauffer.

Les différentes étapes du procédé de transformation des grumes en emballages légers en bois déroulé sont matérialisées sur la figure 20.



Figure 20 : Matérialisation des différentes activités de l'entreprise Norman

Outre les bâtiments administratifs positionnés en 1, les autres installations sont directement liées au travail des grumes.

Les grumes utilisées sont exclusivement des peupliers de type Robusta ; elles contiennent généralement un taux d'humidité de 50% à leur arrivée. Ces grumes sont stockées en 2, ce stockage n'excède généralement pas les trois mois.

Les premières opérations réalisées sont l'écorçage et le criblage qui sont réalisés en 3. L'écorçage consiste à ôter l'écorce sur l'ensemble de la grume, il est réalisé au moyen d'un rotor qui tourne sur l'ensemble de la grume, l'écorce représente entre 6 à 12% du volume d'une grume, par la suite ces écorces seront grossièrement broyées et destinées soit en bois de chauffe, soit au paillage des sols. Le bois écorcé est ensuite scié en bille d'environ un mètre, la sciure et les copeaux sont passés au crible ; les poussières les plus fines (de l'ordre de 30 à 40 µm) sont stockées en 5, ces poussières peuvent être réutilisées en papeterie ou pour la réalisation de briques isolantes (après compactage). L'acheminement des poussières du point 3 au point 5 se fait via une canalisation aérienne relativement longue et composée de trois segments d'environ 7, 25 (à l'intérieur du bâtiment) et 5 mètres. Les poussières forment ensuite un tas de quelques mètres de haut et restent alors à l'air libre jusqu'à leur enlèvement par un petit tractopelle. Ce tas de poussières reste généralement une dizaine voire une quinzaine de jours à cet endroit, le risque d'inflammation dans la canalisation ou dans le tas semblent très faible vu la granulométrie des poussières (il y a seulement environ 5% de poussières fines de moins de 100 µm) et son humidité importante.

Une fois le bois découpé en bille d'environ un mètre, le bois est ensuite déroulé et découpé en 4. Le déroulage consiste à trancher une feuille assez fine de bois (un à trois millimètres) puis à la découper en lamelles larges de quelques centimètres, nous obtenons alors les éléments de base servant à la construction des différentes sortes de cagettes. Ce déroulage et ce découpage sont réalisés avec du bois totalement mouillé et ne génère donc que très peu de fines ou de poussières.

Les lamelles réalisées en 4, sont ensuite acheminées en 6 pour permettre l'assemblage et l'agrafage des cagettes. Cet assemblage essentiellement manuel nécessite la découpe des tasseaux qui sont les petites pièces en bois que l'on positionne aux quatre coins des cagettes.

La découpe de ces tasseaux génère des fines qui sont aspirées puis entreposées dans un petit local de plusieurs mètres cubes en 7. Les poussières fines aspirées lors de ces étapes d'assemblage sont humides, mais leur aspiration et leur stockage pourraient réduire leur taux d'humidité. L'évacuation des fines stockées en 7 est réalisée lorsque le local est quasiment plein, cette évacuation est faite par un tractopelle après ouverture de deux portes battantes. Il n'a pas été possible d'assister à cette évacuation, mais on peut estimer qu'elle est une des rares possibilités de mise en suspension de poussières fines qui pourraient éventuellement s'enflammer en cas de présence d'une source d'inflammation suffisante.

VII. RECAPITULATIF - CONCLUSION

Lors de cette étude, le comportement de trois échantillons de bois vis-à-vis de leurs inflammabilité et explosivité a été testé et étudié. L'originalité de ce travail consistait essentiellement dans la teneur en eau des échantillons. Les mesures habituellement réalisées suivent généralement les normes CEI et ISO qui demandent (afin d'obtenir des valeurs majorantes) que les mesures soient réalisées sur des poussières inférieures à 63 μm ainsi qu'à très faible humidité. Cette étude permet donc de se rapprocher des conditions industrielles en utilisant des poussières ayant des distributions granulométriques plus élevées ainsi qu'un taux d'humidité de l'ordre de 20%.

Les résultats montrent que ces échantillons de bois peuvent tout de même s'enflammer en laboratoire malgré ce taux d'humidité assez important. Une visite sur site a permis d'identifier les différentes étapes d'une usine travaillant du peuplier pour la fabrication de cagettes et de voir à quels moments des poussières comparables à celles étudiées en laboratoire étaient générées.

Le tableau 16 récapitule les données obtenues lors des essais réalisés en laboratoire :

| Type de bois | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|---|--------|--------|----------|
| d₁₀ (μm) | 22 | 11 | 15 |
| d₅₀ (μm) | 64 | 50 | 57 |
| d₉₀ (μm) | 147 | 158 | 156 |
| d₃₂ (μm) | 16 | 13 | 17 |
| Masse volumique (g.cm^{-3}) | 1,58 | 1,54 | 1,59 |
| Taux de cendre | 0,37 | 0,32 | 0,18 |
| %C | 47,21 | 47,30 | 45,335 |
| %H | 5,715 | 6,09 | 5,74 |
| %O | 39,365 | 41,65 | 42,17 |
| TMI nuage ($^{\circ}\text{C}$) | 460 | 490 | 470 |
| TMI couche de 5 mm ($^{\circ}\text{C}$) | 250 | 270 | 260 |
| EMI (mJ) | 55 | 23 | 45 |
| CME (g.m^{-3}) estimée en sphère | 125 | 60 | 60 |
| d_c dimension critique (m) à 50$^{\circ}\text{C}$ -extrapolation des données- | 2 | 1,5 | 15 |
| Pm (bar) | 7,8 | 8,2 | 8,1 |
| (dP/dt)_{max} (bar.s^{-1}) | 570 | 517 | 585 |
| K_{st} (bar.m.s^{-1}) | 155 | 140 | 159 |

| | | | |
|------------------|-----|-----|-----|
| Classe St | St1 | St1 | St1 |
|------------------|-----|-----|-----|

Tableau 16 : Récapitulatif des mesures réalisées

La transposition des résultats de laboratoire dans le monde industriel n'est pas très aisée car nous ne devons pas oublier que les résultats obtenus sont encore majorants en comparaison des poussières rencontrées sur le site industriel visité.

Nous pouvons par exemple citer que :

- Les poussières avaient en grande majorité une distribution granulométrique plus importante sur le site industriel visité,
- L'humidité ambiante était supérieure à 20%,
- La valeur de l'énergie d'inflammation utilisée en sphère de 20 litres (10 kJ) est la valeur requise par les normes ISO et NF EN 26-184-1, il est possible que cette énergie très importante fournisse des valeurs de P_{max} et de $(dP/dt)_{max}$ plus importantes que si l'on utilisait une source d'inflammation plus proche des sources présentes sur les sites industriels.

Il pourrait donc être intéressant de compléter cette étude pour étudier la variation de l'inflammabilité et de l'explosivité en fonction de l'humidité, de la distribution granulométrique et éventuellement de l'énergie d'inflammation en réalisant des explosions avec une source d'inflammation inférieure à 1 kJoule.

Dans tous les cas, une explosion de poussières ne peut être empêchée qu'en supprimant une ou plusieurs des conditions qui rendent l'explosion possible. Ces suppressions peuvent s'exercer au niveau du combustible, du comburant et des sources d'inflammation de façon à éradiquer, dès son origine, l'explosion potentielle.

Il existe ainsi de nombreuses possibilités pour éviter en pratique les inflammations et explosions de poussières (méthodes préventives). Ces méthodes peuvent bien entendu être mises en pratique dans le cadre des poussières utilisées dans cette étude vu le caractère localisé du risque d'inflammation. Les actions applicables sur le combustible consisteraient de façon idéale à éliminer toute poussière à la source en supprimant ainsi tout risque d'explosion ; ceci est évidemment utopique, aussi faut-il essayer systématiquement d'empêcher la création de fines ou, pour le moins, de minimiser leur émission. La conception des bâtiments, des structures et des appareils doit éviter au maximum les zones favorisant les dépôts de poussières et leur accumulation dans certains volumes. La propreté des installations est donc un facteur important de prévention. En conséquence, leur nettoyage doit être mis en œuvre par des moyens adéquats évitant la remise en suspension des poussières et leur inflammation. Paradoxalement, la vigilance doit être soutenue dans les systèmes de dépoussiérage qui collectent les poussières les plus fines et les recueillent souvent en dépôt. Le stockage de longue durée de poussières sous la forme de dépôts doit notamment être évité au maximum. Des actions peuvent également être menées sur le mélange

poussières/air, la prévention de l'explosion de poussières peut être obtenue en maintenant la concentration en solide du mélange en dehors des zones limites d'explosivité, en particulier vis-à-vis de la concentration minimale explosive. Il faut impérativement avoir en mémoire que la concentration moyenne en poussières dans le volume d'un appareil ou d'une installation n'est pas représentative des concentrations vraies locales temporelles en poussières régnant dans certains endroits en raison de ségrégations ou d'inhomogénéités de distribution. C'est pourquoi il est habituellement nécessaire de coupler cette action à d'autres possibilités de prévention pour estimer un risque acceptable. Une autre action de prévention est liée à la suppression de sources d'inflammation ; cette action s'attache à éliminer systématiquement les flammes, les feux nus, les étincelles d'origine mécanique, d'origine électrique, y compris les décharges d'électricité statique, les surfaces chaudes et/ou incandescentes et les divers échauffements. Certaines sources évidentes ne doivent pas être omises, comme le respect strict des zones d'interdiction de fumer, les interventions en soudure, l'utilisation d'outils de découpage et surtout les flammes nues (permis de feu). Mais ne devons pas oublier que nous ne pouvons pas nous limiter aux seules mesures préventives et qu'il est nécessaire d'appliquer des actions protectrices pour limiter les effets des explosions de poussières qui n'ont pu être prévenues. Enfin, les conséquences sur les personnes et l'environnement doivent être réduites par des dispositions prises au moment de l'implantation des unités, soit par l'éloignement, soit par la séparation par des murs et des écrans résistants.

VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

W. BARTKNECHT - Dust explosions - Course, prevention, protection - Ed. Springer Verlag - HEIDELBERG (1989).

S. CALLE, L. KLABA, D. THOMAS, L. PERRIN, O. DUFAUD, Influence of the size distribution and concentration on wood dust explosion: Experiments and reaction modeling, Powder Technology, 157 (1-3), 144-148 (2005).

CEI 1241-2-1 - Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles. 2ème partie : Méthodes d'essai. Section 1 : Méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière. Paris - La Défense, Union technique de l'électricité (UTE), (1994).

CEI 1241-2-3 - Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles. 2ème partie : Méthodes d'essai. Section 3 : Méthode de détermination de l'énergie minimale d'inflammation des mélanges air/poussières. Paris - La Défense, Union technique de l'électricité (UTE), (1994).

R.K. ECKHOFF - Dust explosions in the process industries - Bd. Butterworth Heinemann - 2nd Edition - OXFORD (2003).

R.K. ECKHOFF - Understanding dust explosions. The role of powder science and technology - Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2008).

M.E. FAYED and L. OTTEN - Handbook of powder science and technology –Second Edition - Chapter 19: Fire and explosion hazards in powder handling and processing - Bd. Chapman and Hall - NEW YORK (1997).

P. FIELD - Handbook of powder technology - Volume 4 - Dust explosions - Ed. Elsevier, Scientific Publishing Company - AMSTERDAM (1982).

FIKE France, Notice technique événements d'explosion - disques de rupture référence 8.3000.11.0 - FIKE FRANCE - CERGY PONTOISE (1991).

F.P. LEES - Loss Prevention in the Process Industry, 2nd edition, Butterworth Heinemann (1996).

A. LAURENT - Sécurité des Procédés Chimiques, connaissances de base et méthodes d'analyse de risques - LAVOISIER TEC&DOC PARIS (2003).

G. LUNN - Dust explosion prevention and protection: Part 1 - Venting - Bd. Institution of Chemical Engineers - RUGBY (1992).

NF EN 26184-1 - Systèmes de protection contre les explosions. Partie 1 : Détermination des indices d'explosion des poussières combustibles dans l'air. Paris - La Défense, AFNOR, (1991).

J.M. PETIT - Les mélanges explosifs, partie 2 : poussières combustibles - ED 944 INRS PARIS (2006).

J.P. PINEAU - Explosions de poussières : Mise au point sur les mécanismes de propagation des explosions de poussières en canalisations et en galeries - Définition des moyens de protection - INERIS - Bd. CPIC NANCY (1989).

J.P. PINEAU et Y. LEFIN - Explosions de poussières : comment empêcher ou minimiser les effets d'une explosion de poussières - INERIS - Bd. CPIC NANCY (1989).

M.J. RHODES - Principles of powder technology - chapter 11 - Explosion and fire hazards of powders - Ed. John Wiley and Sons Ltd - CHICHESTER (1990).

Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p (1999).

ANNEXE A : Mesures de TMI en couche

Le tableau A1 suivant consigne les résultats obtenus lors de la détermination de la température minimale d'inflammation en couche des divers échantillons de poussières de bois.

| Températures d'essai (°C) | Sapin | Epicéa | Peuplier |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 200°C | Non inflammation | Non inflammation | Non inflammation |
| 220°C | Non inflammation | Non inflammation | Non inflammation |
| 240°C | Non inflammation | Non inflammation | Non inflammation |
| 250°C | Inflammation | Non inflammation | Non inflammation |
| 260°C | - | Non inflammation | Inflammation |
| 270°C | - | Inflammation | - |
| TMI couche de 5 mm | 250°C | 270°C | 260°C |

Tableau A1 : Résultats des tests de TMI en couche pour les différentes poussières de bois

ANNEXE B : Mesure de températures d'auto-inflammation en stockage

Le tableau et les figures suivants consignent les résultats obtenus lors de la détermination de la température d'auto-inflammation en stockage des divers échantillons de poussières de bois.

| Sapin | T (°C) | Inflam. | Epicéa | T (°C) | Inflam. | Peuplier | T (°C) | Inflam. |
|-----------------------------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|
| 15,63 cm³ | 220 | Non | 15,63 cm³ | 230 | Non | 15,63 cm³ | 210 | Non |
| | 240 | Non | | | | | 220 | Non |
| | 250 | Oui | | 230 | Oui | | | |
| | 260 | Oui | | 250 | Oui | | | |
| 125 cm³ | 210 | Non | 125 cm³ | 200 | Non | 125 cm³ | 190 | Non |
| | 220 | Oui | | 210 | Oui | | 200 | Oui |
| | 230 | Oui | | | | | | |
| 1000 cm³ | 170 | Non | 1000 cm³ | 170 | Non | 1000 cm³ | 170 | Non |
| | 180 | Non | | 175 | Non | | 175 | Non |
| | 190 | Oui | | 180 | Oui | | 180 | Oui |

Tableau B1 : Résultats des tests d'auto-inflammation obtenus à l'aide du four isotherme à panier

Les figures suivantes représentent les résultats des tests d'auto-inflammation conduits sur les poussières de sapin.

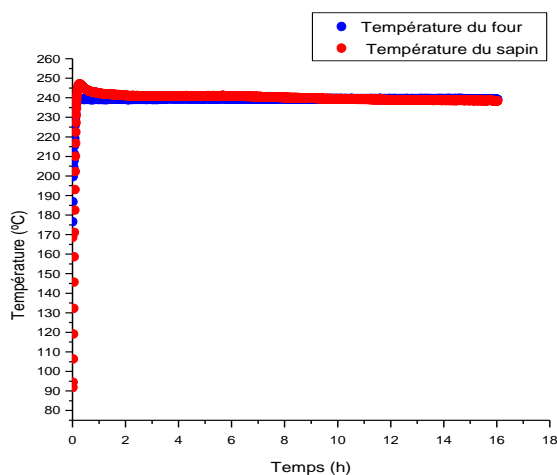


Figure B1 : Sapin - Essais en four à panier (15,63 cm³) à 240°C

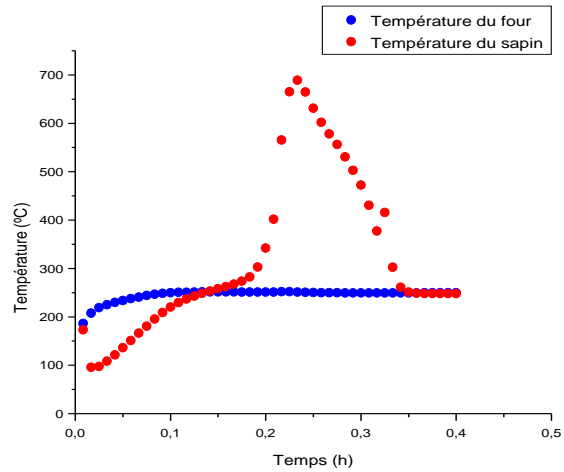


Figure B2 : Sapin - Essais en four à panier (15,63 cm³) à 250°C

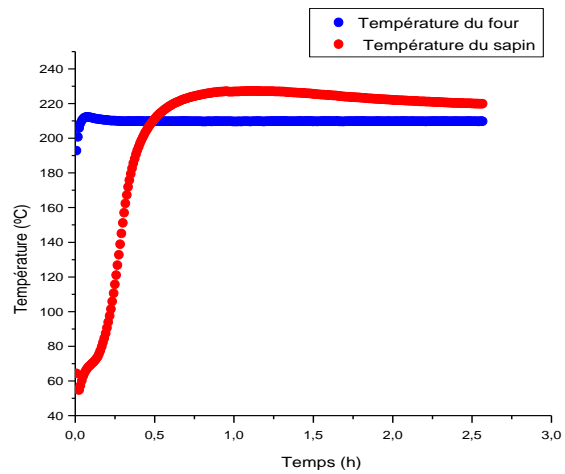


Figure B3 : Sapin - Essais en four à panier (125 cm³) à 210°C

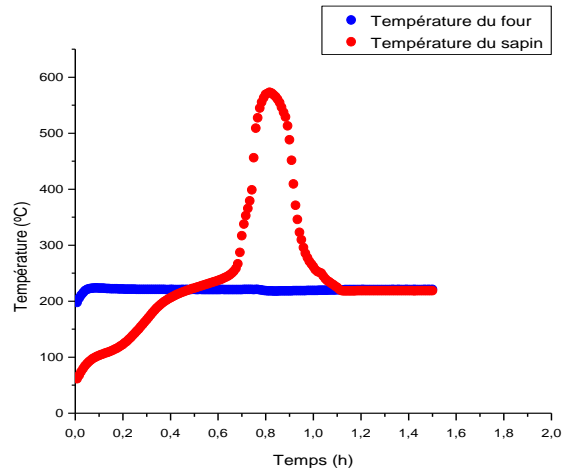


Figure B4 : Sapin - Essais en four à panier (125 cm³) à 220°C

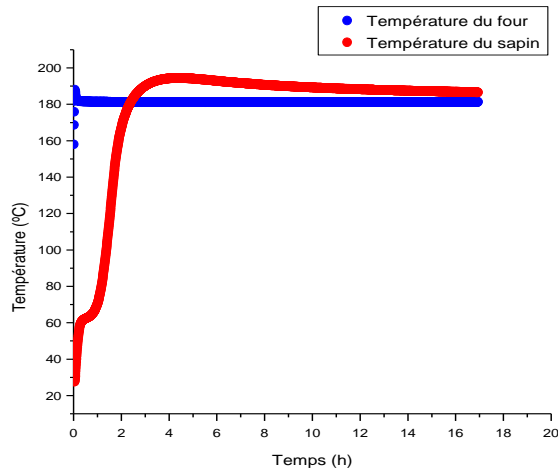


Figure B5 : Sapin - Essais en four à panier (1000 cm³) à 180°C

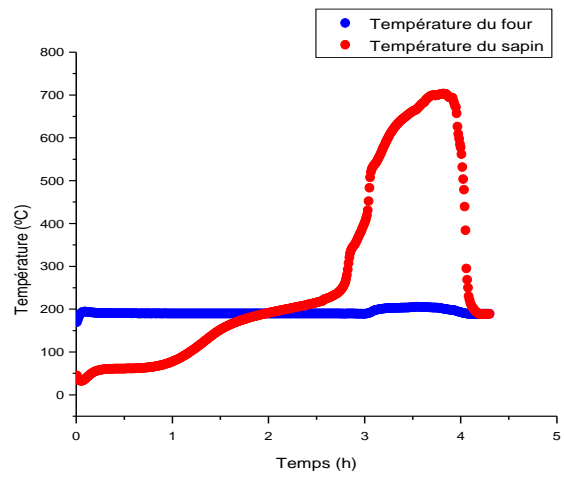


Figure B6 : Sapin - Essais en four à panier (1000 cm³) à 190°C

Les figures suivantes représentent les résultats des tests d'auto-inflammation conduits sur les poussières d'épicéa.

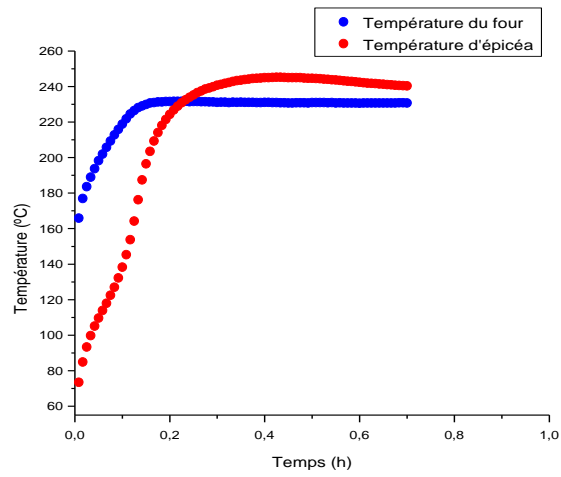


Figure B7 : Epicéa - Essais en four à panier (15,63 cm³) à 230°C

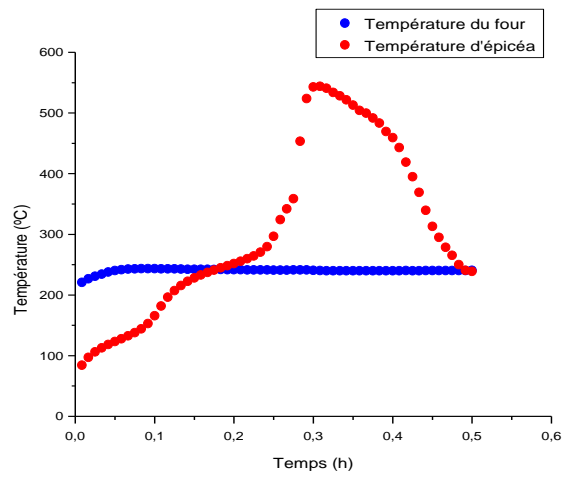


Figure B8 : Epicéa - Essais en four à panier (15,63 cm³) à 240°C

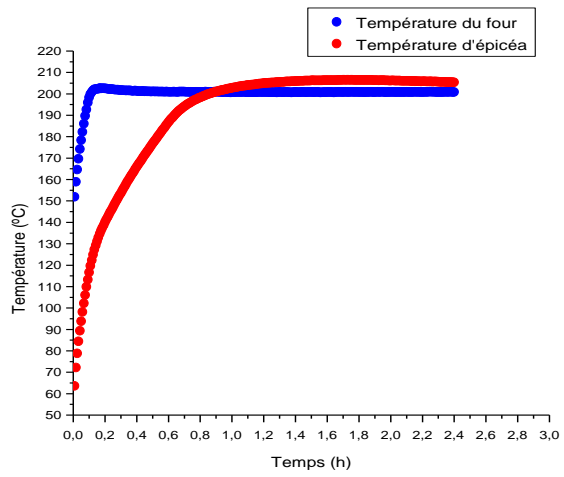


Figure B9 : Epicéa - Essais en four à panier (125 cm³) à 200°C

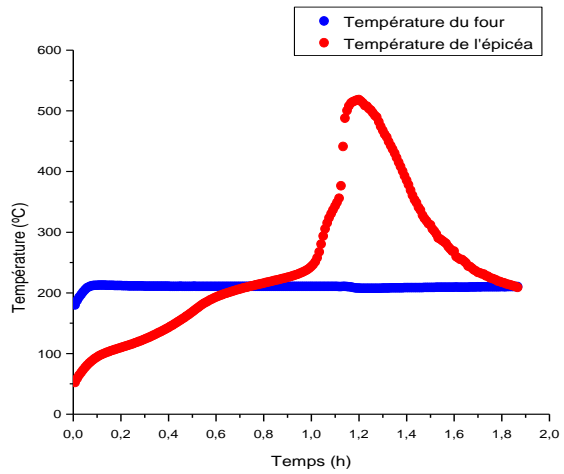


Figure B10 : Epicéa - Essais en four à panier (125 cm³) à 210°C

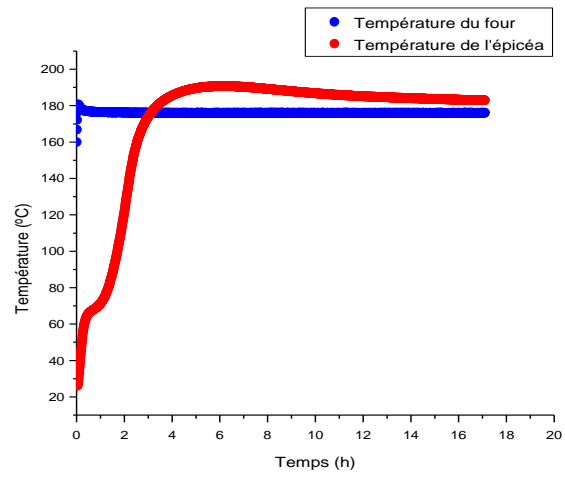


Figure B11 : Epicéa - Essais en four à panier (1000 cm³) à 175°C

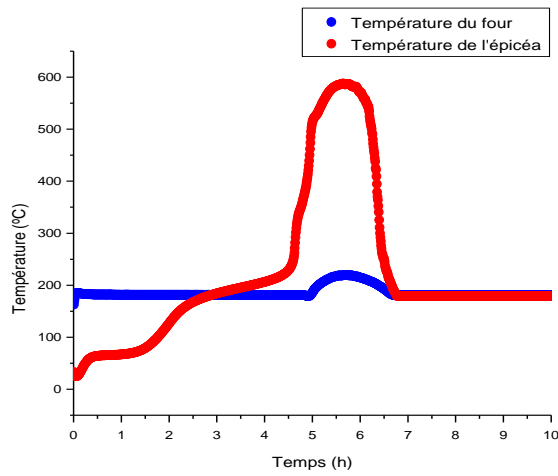


Figure B12 : Epicéa - Essais en four à panier (1000 cm³) à 180°C

Les figures suivantes représentent les résultats des tests d'auto-inflammation conduits sur les poussières de peuplier.

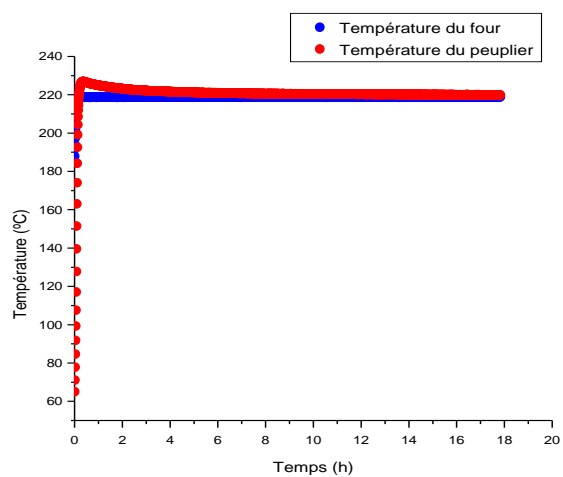


Figure B13 : Peuplier - Essais en four à panier (15,63 cm³) à 220°C

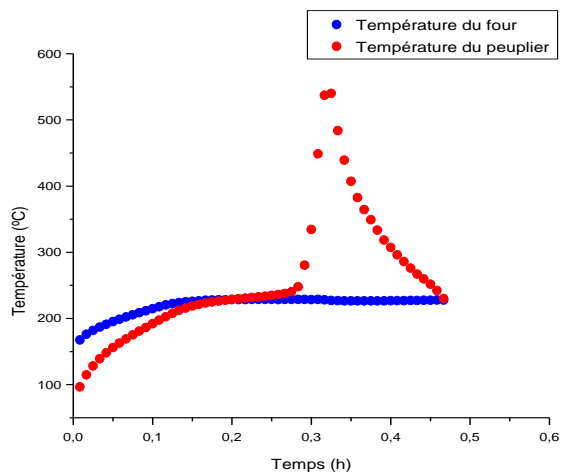


Figure B14 : Peuplier - Essais en four à panier (15,63 cm³) à 230°C

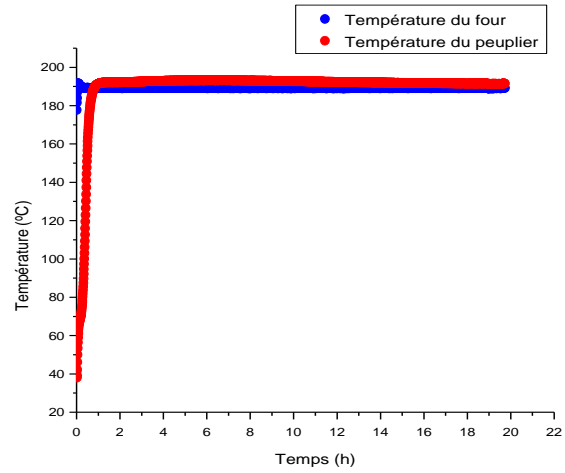


Figure B15 : Peuplier - Essais en four à panier (125 cm³) à 190°C

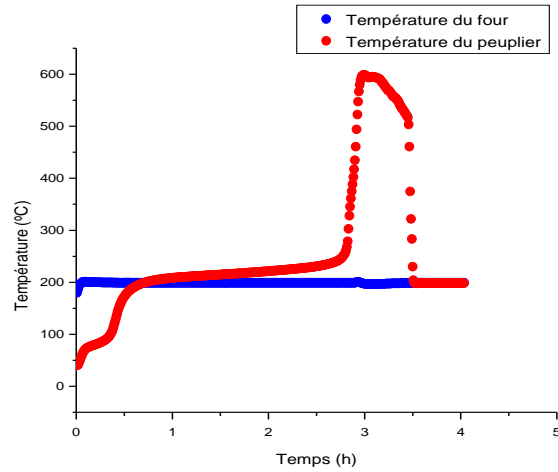


Figure B16 : Peuplier - Essais en four à panier (125 cm³) à 200°C

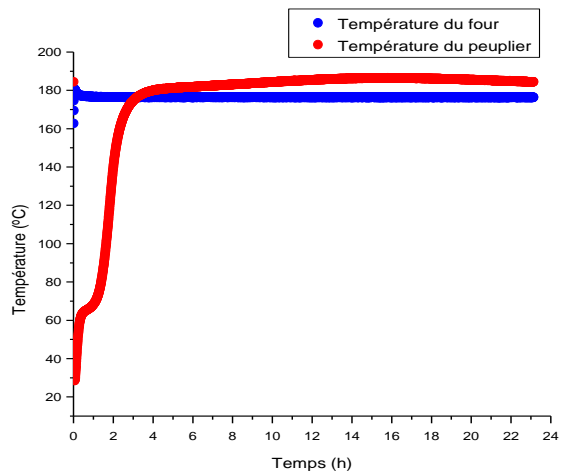


Figure B17 : Peuplier - Essais en four à panier (1000 cm³) à 175°C

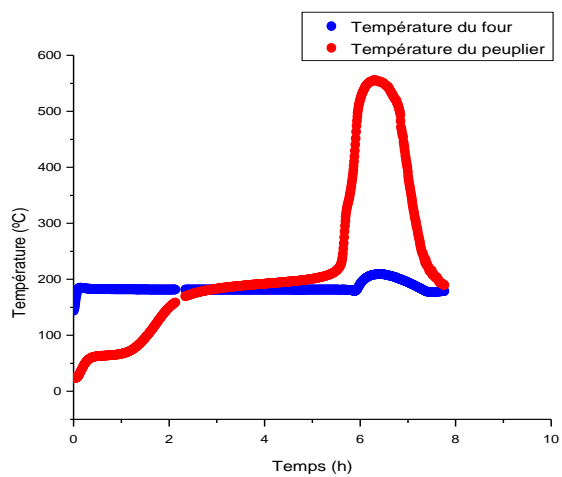


Figure B18 : Peuplier - Essais en four à panier (1000 cm³) à 180°C

ANNEXE C : Mesure d'énergies minimales d'inflammation

Les tableaux suivants reportent les résultats des tests effectués en vue de la détermination des énergies minimales d'inflammation des poussières de bois. Le nombre apparaissant entre parenthèse correspond au nombre d'essais avant d'obtenir une inflammation (après un « oui ») ou au nombre d'essais ne donnant pas d'inflammation (généralement 10 essais).

| Concentration (mg) | EI (mJ) | Inflammation |
|--------------------|---------|--------------|
| 900 | 100 | Oui (1) |
| 900 | 30 | Non (10) |
| 600 | 100 | Oui (1) |
| 300 | 100 | Non (10) |
| 600 | 30 | Non (10) |
| 1 200 | 100 | Oui (9) |
| 1 200 | 30 | Non (10) |
| 1 500 | 100 | Non (10) |

Tableau C1 : Résultats obtenus sur le Mike 3 pour le sapin, pour un t_v de 120 ms

Ensuite, une concentration de 900 g.cm^{-3} a été fixée et une variation de la valeur du temps de dispersion (t_v) a été effectuée.

| EI (mJ) | t_v (ms) | Inflammation |
|---------|------------|--------------|
| 100 | 60 | Non (10) |
| 300 | 60 | Oui (7) |
| 300 | 90 | Oui (1) |
| 100 | 90 | Non (10) |
| 300 | 120 | Oui (1) |
| 100 | 120 | Oui (3) |
| 300 | 150 | Oui (1) |
| 100 | 150 | Oui (7) |
| 30 | 150 | Non (10) |

Tableau C2 : Résultats obtenus sur le Mike 3 pour le sapin, pour une concentration de 900 g.m^{-3} .

Les expériences menées sur l'épicéa conduisent aux résultats suivants :

| Concentration (mg) | EI (mJ) | Inflammation |
|--------------------|---------|--------------|
| 900 | 100 | Oui (1) |
| 900 | 30 | Non (10) |

| | | |
|-------|-----|----------|
| 600 | 100 | Oui (1) |
| 1 200 | 100 | Oui (2) |
| 1 200 | 30 | Oui (2) |
| 1 200 | 10 | Non (10) |
| 1 500 | 100 | Oui (3) |
| 1 500 | 30 | Non (10) |
| 300 | 100 | Non (10) |
| 1 800 | 100 | Non (10) |

Tableau C3 : Résultats obtenus sur le Mike 3 pour l'épicéa, pour un t_v de 120 ms

Il faut prendre les valeurs de la concentration la plus explosive, dans ce cas, égale à 1200 g.cm^{-3} et comme fait pour l'échantillon précédent il faut faire varier la valeur du temps de dispersion (t_v).

| EI (mJ) | t_v (ms) | Inflammation |
|----------------|------------------------------|---------------------|
| 100 | 60 | Non (10) |
| 300 | 60 | Non (10) |
| 1 000 | 60 | Non (10) |
| 1 000 | 90 | Oui (1) |
| 300 | 90 | Oui (1) |
| 100 | 90 | Oui (5) |
| 30 | 90 | Non (10) |
| 100 | 150 | Oui (1) |
| 10 | 150 | Non (10) |

Tableau C4 : Résultats obtenus sur le Mike 3 pour l'épicéa, pour une concentration de 1200 g.m^{-3}

Les expériences menées sur le peuplier conduisent aux résultats suivants :

| Concentration (mg) | EI (mJ) | Inflammation |
|---------------------------|----------------|---------------------|
| 900 | 100 | Oui (1) |
| 900 | 10 | Non (10) |
| 600 | 100 | Oui (1) |
| 1 200 | 100 | Oui (2) |
| 1 500 | 100 | Oui (1) |
| 1 800 | 100 | Non (10) |
| 1 500 | 30 | Non (10) |
| 1 200 | 30 | Non (10) |

Tableau C5 : Résultats obtenus sur le Mike 3 pour le peuplier, pour un t_v de 120 ms

ANNEXE D : Mesure de TMI en nuage

Les tableaux suivants consignent les résultats obtenus lors de la détermination de la température minimale d'inflammation en nuage des divers échantillons de poussières de bois. L'indication « Non » correspond à une non-inflammation, le « Oui » correspond à une inflammation, ce dernier critère peut être lié à un « + » ou un « ++ » voire à un « - » en fonction de la vigueur de l'inflammation, il a également été parfois ajouté « en retard » lorsque la flamme met une à deux secondes pour apparaître à la base du four après dispersion de la poudre.

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus pour le sapin.

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 250 | Non |
| 150 | 300 | Non |
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Oui, en retard |
| 300 | 500 | Oui+, en retard |
| 600 | 500 | Oui, en retard |
| 300 | 480 | Oui, en retard |
| 300 | 480 | Non |
| 300 | 480 | Oui, en retard |
| 300 | 460 | Non |
| 300 | 480 | Oui, en retard |
| 300 | 460 | Non (x 10) |

Tableau D1 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse de sapin de 0,3 gramme

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 250 | Non |
| 150 | 300 | Non |
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Oui, en retard |
| 300 | 500 | Oui+, en retard |
| 600 | 500 | Oui++, en retard |
| 600 | 480 | Oui-, en retard |
| 600 | 460 | Non (x 10) |

Tableau D2 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse de sapin de 0,2 gramme

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Oui, en retard |
| 300 | 500 | Non |
| 300 | 500 | Non |
| 300 | 500 | Non |
| 300 | 500 | Non |
| 150 | 480 | Non |
| 150 | 480 | Non |
| 150 | 480 | Non |
| 150 | 480 | Non |
| 150 | 500 | Oui+, en retard |
| 600 | 500 | Oui+, en retard |
| 600 | 480 | Non (x 10) |

Tableau D3 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse du sapin de 0,1 gramme

Les températures minimales d'inflammation des poussières de sapin sont reportées de manière synthétique dans le Tableau D4 :

| Masse (g) | Surpression (hPa) | Température d'inflammation en nuage(°C) | Température diminuée (°C) (selon la CEI) : TMI (°C) |
|------------------|--------------------------|--|--|
| 0,3 | 300 | 480 | 460 |
| 0,2 | 600 | 480 | 460 |
| 0,1 | 600 | 500 | 480 |

Tableau D4 : Températures minimales d'inflammation en nuage pour le sapin

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus pour l'épicéa.

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 300 | Non |
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Non |

| | | |
|-----|-----|------------------|
| 150 | 550 | Oui |
| 150 | 530 | Oui, en retard |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 300 | 530 | Oui+, en retard |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 600 | 530 | Oui++, en retard |
| 600 | 510 | Oui-, en retard |
| 600 | 500 | Non (x 10) |

Tableau D5 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse d'épicéa égale à 0,1 gramme

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 550 | Oui, en retard |
| 150 | 530 | Oui-, en retard |
| 150 | 510 | Oui--, en retard |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Non |
| 300 | 530 | Oui+, en retard |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Non |
| 600 | 530 | Oui++, en retard |
| 600 | 510 | Oui-, en retard |
| 600 | 500 | Non (x 10) |

Tableau D6 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse d'épicéa égale à 0,2 gramme

Les températures minimales d'inflammation des poussières d'épicéa sont reportées de manière synthétique dans le Tableau D7 :

| Masse (g) | Surpression (hPa) | Température d'inflammation en nuage(°C) | Température diminuée (°C) (selon la CEI) : TMI (°C) |
|------------------|--------------------------|--|--|
| 0,2 | 600 | 510 | 490 |
| 0,1 | 600 | 510 | 490 |

Tableau D7 : Températures minimales d'inflammation pour l'épicéa

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus pour le peuplier

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 550 | Oui |
| 150 | 530 | Oui-, en retard |
| 150 | 510 | Oui--, en retard |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 300 | 530 | Oui, en retard |
| 300 | 510 | Non |
| 300 | 510 | Oui, en retard |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 530 | Oui, en retard |
| 600 | 510 | Oui, en retard |
| 600 | 490 | Non (x 10) |

Tableau D8 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse de peuplier égale à 0,1 gramme

| Surpression (hPa) | Température (°C) | Inflammation |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 150 | 350 | Non |
| 150 | 400 | Non |
| 150 | 450 | Non |
| 150 | 500 | Non |
| 150 | 550 | Oui |
| 150 | 530 | Oui-, en retard |
| 150 | 510 | Non |
| 150 | 510 | Oui--, en retard |
| 150 | 490 | Non |
| 150 | 490 | Non |
| 150 | 490 | Non |
| 150 | 490 | Non |
| 150 | 490 | Non |
| 300 | 510 | Oui+, en retard |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 510 | Oui, en retard |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 300 | 490 | Non |
| 600 | 510 | Oui++, en retard |
| 600 | 490 | Non |
| 600 | 490 | Non |
| 600 | 490 | Non |
| 600 | 490 | Oui-, en retard |
| 600 | 470 | Non (x 10) |

Tableau D9 : Résultats obtenus en TMI nuage avec une masse de peuplier égale à 0,2 gramme

Les températures minimales d'inflammation en nuage des poussières de peuplier sont notées dans le Tableau D10 :

| Masse (g) | Pression (hPa) | Température d'inflammation en nuage(°C) | Température diminuée (°C) (selon la CEI) : TMI (°C) |
|------------------|-----------------------|--|--|
| 0,2 | 600 | 490 | 470 |
| 0,1 | 600 | 510 | 490 |

Tableau D10 : Températures minimales d'inflammation en nuage pour le peuplier

ANNEXE E : Mesure d'explosivité

Les tableaux suivants comprennent les résultats de l'ensemble des tests d'explosivité effectués sur les échantillons de bois. t_1 est le temps de combustion défini comme sur la figure 8.

| Concentration (g.m^{-3}) | Pm (bar) | dP/dt (bar.s^{-1}) | t1 (ms) |
|-------------------------------------|----------|-------------------------------|---------|
| 30 | 0,0 | 0 | - |
| 45 | 0,0 | 0 | - |
| 60 | 0,0 | 0 | - |
| 125 | 2,2 | 51 | 133 |
| 250 | 5,9 | 243 | 71 |
| 500 | 7,5 | 325 | 64 |
| 750 | 7,8 | 507 | 42 |
| 1 000 | 7,5 | 570 | 33 |
| 1 250 | 7,4 | 471 | 36 |
| 1 500 | 7,2 | 507 | 33 |

Tableau E1 : Explosivité du sapin.

| Concentration (g.m^{-3}) | Pm (bar) | dP/dt (bar.s^{-1}) | t1 (ms) |
|-------------------------------------|----------|-------------------------------|---------|
| 60 | 0,0 | 0 | - |
| 60 | 3,6 | 94 | 78 |
| 125 | 4,6 | 107 | 79 |
| 250 | 6,2 | 254 | 80 |
| 500 | 8,2 | 501 | 47 |
| 750 | 7,9 | 456 | 39 |
| 1 000 | 7,5 | 517 | 34 |
| 1 250 | 7,3 | 491 | 37 |
| 1500 | 6,6 | 384 | 35 |

Tableau E2 : Explosivité de l'épicéa.

| Concentration (g.m^{-3}) | Pm (bar) | dP/dt (bar.s^{-1}) | t1 (ms) |
|-------------------------------------|----------|-------------------------------|---------|
| 0 | 0,0 | 0 | - |
| 60 | 6,2 | 256 | 86 |
| 125 | 4,6 | 165 | 93 |
| 250 | 6,7 | 287 | 72 |
| 500 | 8,1 | 525 | 40 |
| 750 | 8,0 | 569 | 34 |
| 1 000 | 7,7 | 585 | 32 |
| 1 250 | 7,4 | 547 | 35 |

Tableau E3 : Explosivité du peuplier