



**HAL**  
open science

## Contribution à la caractérisation a priori de la criticité et de la cinétique d'un emballage thermique en vue de l'amélioration de la sécurité du stockage de solides thermiquement instables

Henda Zoghlami-Mosrati, André Laurent, Jean-Pierre Corriou

### ► To cite this version:

Henda Zoghlami-Mosrati, André Laurent, Jean-Pierre Corriou. Contribution à la caractérisation a priori de la criticité et de la cinétique d'un emballage thermique en vue de l'amélioration de la sécurité du stockage de solides thermiquement instables. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 2007, 96 (158), pp.??-??. hal-01925949

**HAL Id: hal-01925949**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01925949>**

Submitted on 18 Nov 2018

**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.

## **Contribution à la caractérisation a priori de la criticité et de la cinétique d'un emballage thermique en vue de l'amélioration de la sécurité du stockage de solides thermiquement instables.**

ZOGLAMI MOSRATI Henda <sup>a</sup>, LAURENT André <sup>b</sup> et CORRIOU Jean-Pierre <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Equipe de Recherche en Physico chimie et Biotechnologie (ERPCB) EA 3914 IUT –

UFR Sciences Boulevard Maréchal Juin 14032 CAEN Cedex

<sup>b</sup> Laboratoire des Sciences du Génie Chimique CNRS ENSIC INPL

Adresse BP 20451 1 Rue Grandville F 54001 Nancy Cedex

### **Résumé**

Directement inspirée des retours d'expérience qui ont suivi les catastrophes technologiques et naturelles récentes, la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003, dite « Loi Risques », associée à plusieurs décrets, arrêtés et circulaires, a entre autres introduit un complément à la réglementation existante sur les études des dangers en insistant sur les notions de « probabilité » et de « cinétique » pour caractériser les accidents majeurs susceptibles de se produire, en plus de la classique gravité de leurs conséquences potentielles. Concernant la cinétique, il faut que l'étude de dangers présente :

- l'adéquation de la cinétique de mise en oeuvre des barrières de sécurité et de la cinétique des scénarios conduisant aux accidents majeurs potentiels ;
- des éléments de cinétique de déroulement des accidents (incluant la cinétique d'apparition et d'évolution du phénomène dangereux ainsi que celle de l'atteinte des intérêts et de la durée de leur exposition et la propagation de leurs effets) pour juger de la possibilité de protection des enjeux dans le cadre d'un plan d'urgence externe.

Ces nouvelles dispositions présentent en réalité certaines difficultés d'application pour qualifier et quantifier la nouvelle notion de cinétique. Le présent travail propose d'apporter sous cet angle des éléments d'amélioration à la connaissance du phénomène dangereux que constitue l'emballage thermique généré potentiellement lors du stockage de substances thermiquement instables.

De nombreux modèles stationnaires de prévision d'emballage thermique (Semenov, Frank-Kamenetski, Thomas...) sont proposés dans la littérature. En raison de leurs hypothèses simplificatrices, ces modèles, pourtant très utilisés, ne fournissent aucun renseignement sur l'historique de l'auto-échauffement du système permettant de prévoir le temps nécessaire pour répondre en urgence à une dérive. Par ailleurs l'absence de la prise en compte de l'influence de la température sur les paramètres d'évaluation des échanges thermiques entre la frontière du stockage et le milieu ambiant engendre une incertitude sur les limites des zones d'instabilité et de criticité du système.

L'analyse du comportement thermique en régime transitoire s'avère indispensable pour compléter les résultats classiques précédents, estimer le profil de la montée adiabatique en température et le temps d'induction de l'approche de la température adiabatique maximale et ainsi mieux caractériser l'aptitude du système à l'emballage, dont la fiabilité de prédiction doit être actuellement améliorée pour répondre aux nouvelles exigences de l'étude de danger.

Cette étude montre que la prise en compte de l'influence de la température sur les paramètres de transfert thermique et de conditions aux limites plus réalistes lors de la résolution des différentes équations des bilans impliqués dans le comportement du stockage permet de mieux préciser la criticité et la cinétique d'apparition et de déroulement de l'emballage sur l'exemple d'un stockage de liège.

**Mots-clés : Sécurité – Emballage thermique – Stockage – Solide instable – Cinétique.**

## 1. Introduction

L'industrie d'exploitation, de traitement, de conditionnement et de recyclage du liège essentiellement située sur le bassin méditerranéen (Portugal, Espagne, France, Afrique du Nord...) est l'objet d'importants problèmes de sécurité et d'accidents fréquents. Deux types de situations dangereuses courantes, représentées d'une part par les explosions de nuages de poussières de liège et d'autre part par l'auto-échauffement et/ou l'ignition des stockages de granulés de liège, sont rencontrés et coexistent souvent. Le recyclage du liège par broyage et l'élimination des déchets et rebuts de liège par combustion et revalorisation en constituent deux exemples. Alors que la caractérisation des explosions des nuages de poussières de liège est bien appréhendée (Pilão et al., 2006), l'emballement thermique des stockages de granulés de liège a été peu étudiée en terme de sécurité (Liang and Tanaka, 1988).

L'objectif de cette étude consiste à apporter a priori des éléments nécessaires à l'étude de danger relative à un stockage de liège en insistant sur la prise en compte de la cinétique d'apparition et d'évolution du phénomène dangereux qu'est l'emballement thermique de stockage. Cette connaissance est nécessaire pour valider des tests expérimentaux standards effectués à l'échelle du laboratoire. Elle est également indispensable pour concevoir les scénarii d'emballement à l'échelle industrielle.

## 2. Exemple étudié

L'exemple considéré concerne un stockage cylindrique de laboratoire, constitué d'un réservoir en acier inoxydable de diamètre  $D = 0,34\text{m}$  et de hauteur  $H = 0,34\text{m}$  contenant des particules de liège de diamètre maximal  $d = 0,001\text{m}$ . Le liège, stocké à la température  $T_i = 293\text{K}$ , est exposé à un milieu ambiant de température  $T_a$  plus élevée.

Le liège est un matériau naturel de structure complexe. Sa composition moyenne est constituée par 45% en masse de subérine, 27% de lignine, 10% de polysaccharides, 5% de cires, 6% de tanins et 5% de minéraux, d'eau et glycérine (Pilão et al., 2006). Sa dégradation thermique débute à 373K et sa pyrolyse est totale à 723K ; la perte maximale de masse de 50% attribuée essentiellement à la décomposition de la subérine se produit vers 573K (Pereira, 2004). Le tableau 1 présente quelques propriétés physiques et thermodynamiques du liège étudié.

Table 1. Propriétés physiques et thermodynamiques du liège.

Propriété	Valeur	Unité
Masse volumique apparente	400	kg / m <sup>3</sup>
Capacité calorifique massique	1,88 x 10 <sup>3</sup>	J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
Conductivité thermique	1,79 x 10 <sup>-4</sup> T (K) + 0,044	W. m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
Enthalpie de combustion	21,488 x 10 <sup>6</sup>	J / kg
Energie d'activation	97100	J / mole
Facteur de fréquence	5,96 x 10 <sup>7</sup>	kg. m <sup>-3</sup> . s <sup>-1</sup>

## 3. Utilisation d'un modèle thermique stationnaire

L'hypothèse commune à tous les modèles thermiques stationnaires consiste à considérer une cinétique chimique de dégradation du solide d'ordre nul. Les modèles diffèrent ensuite essentiellement par le choix de l'étape limitante de transfert de chaleur. Le modèle simple le plus utilisé est le modèle de Semenov. Le solide est considéré à une température uniforme  $T$ , le milieu environnant est à une température constante  $T_a$ . Le solide, de concentration initiale  $C_i$ , est consommé suivant une réaction exothermique d'enthalpie réactionnelle  $\Delta H_R$ , de facteur de fréquence  $A_0$  et d'énergie d'activation  $E_A$ . Le bilan thermique en régime permanent dans le volume  $V$  de stockage s'écrit :

$$V(-\Delta H_R)A_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)C_i = hS(T - T_a) \quad (1)$$

où  $h$  est le coefficient de transfert thermique entre la paroi  $S$  du stockage et le milieu environnant.

### 3. 1 Température critique d'ignition

Semenov a montré que la compétition entre les vitesses de génération et d'évacuation de la chaleur en fonction de la température du système conduisait à une multiplicité des états stationnaires, dont l'analyse de la stabilité est nécessaire. Un état stationnaire est considéré comme stable si et seulement si la variation de la vitesse de génération de chaleur par rapport à la température est inférieure à la vitesse d'évacuation par rapport à la température. Il est ainsi possible d'estimer une température critique  $T_{crit} = E_A / 2R$ , point de transition au dessous duquel existe une branche d'ignition définie par l'expression :

$$T_{crit} = \frac{E_A}{2R} \left[ 1 - \sqrt{\frac{4RT_a}{E_A}} \right] \quad (2)$$

Il est donc possible de prédire la température à partir de laquelle le système peut diverger thermiquement en fonction de  $T_a$  et  $E_A$ . La figure 1 présente pour le liège le lieu des états critiques de la branche d'ignition dans le plan  $(T_a, T_{crit})$ .

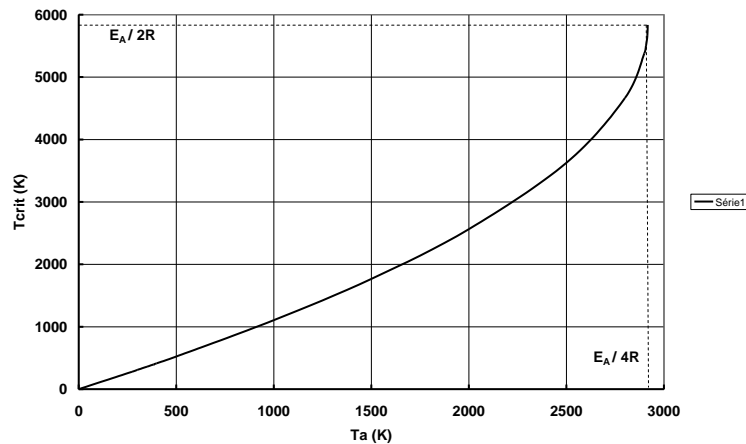


Figure 1. Lieu des états critiques de la branche d'ignition du liège.

### 3. 2 Etats critiques d'ignition en fonction des échanges thermiques à la paroi

Le modèle de Semenov suppose que le coefficient de transfert thermique  $h$  entre la frontière du solide et le milieu ambiant ne dépend pas de la température. Examinons maintenant l'influence de la dépendance éventuelle de  $h$  vis-à-vis de la température du système. Considérons successivement les modes de transfert thermique par convection naturelle laminaire, par convection naturelle turbulente et par rayonnement. En introduisant la température adimensionnelle  $\eta = RT / E_A$  et les corrélations respectives du mode de transfert choisi (Incropera and De Witt, 1996) dans l'équation (1), il est possible de calculer le lieu des états critiques de la branche d'ignition dans le plan  $(\eta_a, \eta_{crit})$  (Zoghلامي-Mosrati, 1999). La figure 2 illustre dans le cas général le lieu des états critiques de la branche d'ignition en fonction du mode de transfert thermique à la paroi.

Le tableau 2 récapitule les valeurs des températures adimensionnelles ambiante et critique du système à la transition vers l'extinction en fonction du mode de transfert thermique à la paroi.

L'examen de la figure 2 et du tableau 2 montre en général pour les trois cas étudiés que la prise en compte de la dépendance du coefficient de transfert de chaleur en fonction de la température du système réduit la plage de criticité de la branche d'ignition dans le plan  $(\eta_a, \eta_{crit})$ . La diminution la plus importante observée de la branche d'ignition correspond au mode de transfert par rayonnement. L'application de cette constatation au cas du liège montre par contre que l'incidence de la température dans le domaine  $[300K < T_a < 700K]$  est sans influence sur la portion correspondante du lieu d'ignition en raison de l'importante valeur de l'énergie d'activation de la réaction.

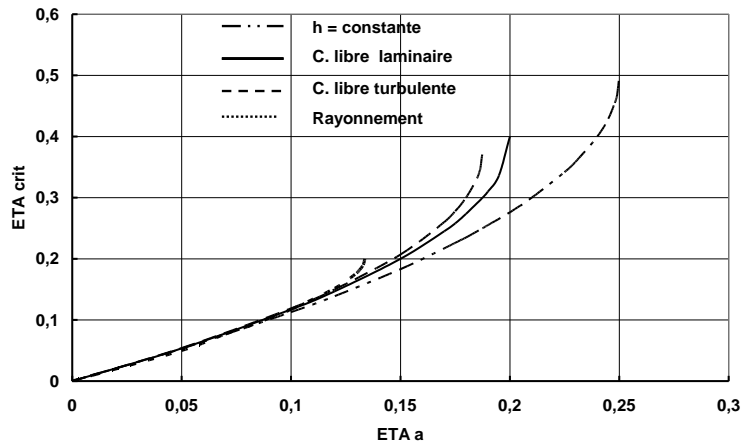


Figure 2. Lieu des états critiques d'ignition en fonction du mode de transfert thermique à la paroi.

Table 2. Valeurs des températures adimensionnelles ambiante et critique du système à la transition pour les modes de transfert thermique à la paroi.

Mode de transfert	$\eta_{a, tr}$	$\eta_{crit, tr}$
h = constante	0,25	0,50
Convection naturelle laminaire	0,20	0,40
Convection naturelle turbulente	0,1875	0,375
Rayonnement	0,1337	0,20

#### 4. Application d'un modèle thermique transitoire

Un modèle thermique stationnaire permet entre autre de prévoir l'existence ou non des états d'ignition d'un système susceptible de s'autoéchauffer, mais ne fournit pas de renseignement sur l'historique prévisionnel de l'échauffement du stockage, comme la montée adiabatique en température et le temps nécessaire pour atteindre la vitesse réactionnelle maximale en régime adiabatique. L'analyse du comportement thermique d'un système en régime transitoire doit donc apporter des éléments complémentaires sur la sécurité.

##### 4.1 Bilan thermique sur le solide

En considérant le transfert thermique suivant les directions respectives radiale ( $r$ ) et axiale ( $z$ ) du réservoir cylindrique, le bilan thermique sur le solide, de masse volumique  $\rho_s$ , de capacité calorifique massique  $C_p^s$ , de conductivité thermique  $\lambda_s$ , s'écrit :

$$\rho_s C_p^s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + (-\Delta H_R) A_0 C_i \exp \left( -\frac{E_A}{RT_s} \right) \quad (3)$$

où  $T_s$  est la température du solide de concentration initiale  $C_i$ .

##### 4.2 Comportement en régime adiabatique

L'étude du comportement en régime adiabatique est très utilisée dans les évaluations de sécurité pour définir un cas limite d'enveloppe majorante permettant de caractériser le système. Les deux paramètres que sont d'une part la montée adiabatique en température ( $\Delta T_{ad}$ ) et d'autre part le temps nécessaire pour atteindre la vitesse maximale de réaction en régime adiabatique ( $TMR$ ) sont en général calculés par les relations respectives suivantes :

$$\Delta T_{ad} = \frac{(-\Delta H_R)C_i}{\rho_S C_P^S}; \quad TMR = \frac{RT_i^2}{E_A} \frac{\rho_S C_P^S}{(-\Delta H_R)A_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT_i}\right)C_i^n} \quad (4) \quad (5)$$

Les expressions (4) et (5) sont souvent utilisées systématiquement sans s'assurer de la validité de leur application au système étudié. Il est admis qu'elles conduisent à des résultats très imprécis dans le cas d'échauffement résultant d'une réaction de décomposition. Par contre si l'échauffement est dû à une oxydation par l'air, il est préférable d'avoir recours au test expérimental de stockage à température constante en panier dit test de BAM déterminant la température d'auto-ignition et la période d'induction de l'auto-inflammation (Gustin, 2004). Il faut préciser dans le cas du stockage de liège étudié que le facteur d'adiabaticité du système est de 1,96, ce qui exclut a priori de fait un comportement adiabatique.

#### 4.3 Comportement en régime non adiabatique

Les différents critères analytiques formulés ne rendent pas correctement compte de la réalité du comportement du stockage. En effet la simultanéité des phénomènes liés à la cinétique de la réaction, aux transferts de chaleur et de matière et à la capacité du système à évacuer la chaleur nécessite de résoudre numériquement les différentes équations des bilans impliqués dans le comportement du stockage de solide.

##### 4.3.1 Bilans thermiques

L'équation (3) exprime toujours le bilan thermique sur le solide alors que le bilan de chaleur sur la paroi métallique du réservoir, de température  $T_p$ , de masse volumique  $\rho_p$ , de capacité calorifique massique  $C_p^p$  et de conductivité thermique  $\lambda_p$  est donné par l'équation (6) :

$$\rho_p C_p^p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (6)$$

##### 4.3.2 Conditions aux limites

En supposant que le contact thermique est parfait entre le solide et la paroi métallique, il est possible d'écrire les conditions aux limites suivantes :

$$T_s = T_p; \quad -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \quad \text{à } r=R_l \text{ et } e_p \leq z \leq H + e_p; \quad \text{à } z = e_p \text{ et } 0 \leq r \leq R_l; \quad (7)$$

$$\text{à } z = H \text{ et } 0 \leq r \leq R_l$$

La symétrie axiale du système fournit les conditions aux limites suivantes :

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} = 0 \quad \text{à } r = 0 \quad \text{et } e_p \leq z \leq H + e_p \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \quad \text{à } r = 0 \quad \text{et } 0 \leq z \leq e_p; \quad H + e_p \leq z \leq H + 2e_p \quad (9)$$

Le flux thermique échangé entre les parois et l'environnement ambiant permet d'écrire les conditions :

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} = h_{lat} (T_p - T_a) \quad \text{à } r = R_e \quad \text{et } 0 \leq z \leq H + 2e_p \quad (10)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} = h_{inf} (T_p - T_a) \quad \text{à } z = 0 \quad \text{et } 0 \leq r \leq R_e \quad (11)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} = h_{sup} (T_p - T_a) \quad \text{à } z = H + 2e_p \quad \text{et } 0 \leq r \leq R_e \quad (12)$$

où  $h_{lat}$ ,  $h_{inf}$  et  $h_{sup}$  sont respectivement les coefficients globaux de transfert thermique relatifs aux parois latérales, à la face inférieure du réservoir et à la face supérieure du réservoir.

##### 4.3.3 Conditions initiales

Enfin à l'instant initial le solide stocké au sein du réservoir et les parois du réservoir sont à la température uniforme  $T_i$  soit  $T = T_i$  à  $t = 0$ ;  $0 \leq r \leq R_e$  et  $0 \leq z \leq H + 2e_p$  (13)

Les équations des bilans thermiques couplées aux conditions aux limites et initiales ont été résolues par la méthode des volumes finis.

## 5. Résultats des simulations par modèle thermique transitoire

Les simulations ont été effectuées pour le liège stocké à une température initiale  $T_i = 293K$  dans un réservoir cylindrique en acier inoxydable de 0,34m de diamètre extérieur, de 0,34m de hauteur  $H$  et 2,5mm d'épaisseur  $e_p$  de paroi. Le stockage est exposé à un milieu ambiant de température  $T_a$  supérieure à la température initiale de stockage du liège.

L'objectif consiste à comparer le comportement thermique du solide dans les trois situations suivantes :

- Cas a : le transfert thermique est imposé par la condition aux limites de Newton, la conduction dans les parois du réservoir et leur capacité thermique sont supposées négligeables.
- Cas b : la conduction dans les parois du réservoir est négligeable, mais la capacité thermique des parois est prise en compte.
- Cas c : la conduction dans le plan des parois du réservoir et leur capacité thermique sont considérées simultanément.

La figure 3 montre un exemple de l'évolution de la température en fonction du temps pour une température ambiante de 384,5K. Le système de stockage entre en emballement dans les cas (a) et (b) pour un temps de montée en température de l'ordre de 250 h, alors que le système tend vers un état stationnaire à une température de 405K dans le cas (c).

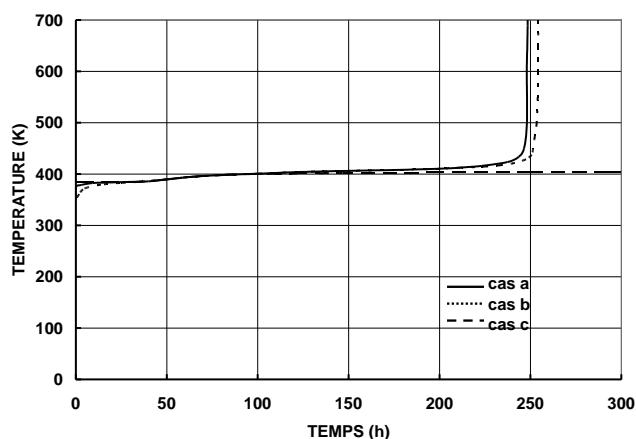


Figure 3. Evolution de la température du stockage en fonction du temps.

Le tableau 3 récapitule dans les trois cas pour différentes températures du milieu environnant la situation du stockage, la température atteinte à l'état stationnaire et le temps de montée en température en cas d'emballement thermique.

Table 3. Récapitulatif de l'état du stockage de liège en fonction de la température du milieu ambiant.

$T_a$ (K)	Situation			Température (K)			Temps de montée (h)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Cas 382	ES	ES	ES	393	394	393	-	-	-
384	ES	ES	ES	405	405	400	-	-	-
384,5	Emb	Emb	ES	-	-	405	245	250	-
385	Emb	Emb	Emb	-	-	-	170	175	270

ES = Etat stationnaire      Emb = Emballement thermique

L'examen du tableau 3 montre, pour une température ambiante de 382K, que le système tend vers un état stationnaire dans les trois cas et que les températures maximales stationnaires sont quasi-identiques. A 384K le stockage tend également dans les trois cas vers un état stationnaire, mais cette fois la température

maximale atteinte dans le cas (c) est inférieure à celles obtenues dans les cas (a) et (b). Enfin pour une température environnante de 385K le système entre en emballement dans les trois cas. La comparaison du comportement thermique du point de vue de la température critique ambiante permet de conclure que ces dernières sont identiques à 0,5K près. Par contre le temps mis par le système pour atteindre la montée maximale en température dans le cas (c) est supérieure d'environ 100 heures.

Comme en général la prise en compte de la dépendance du coefficient de transfert thermique en fonction de la température réduit l'étendue de la branche d'ignition en régime stationnaire, nous avons testé la validité de ce constat en régime transitoire en comparant les trois cas suivants :

- Cas A : l'échange de chaleur par rayonnement n'est pas pris en compte, mais le coefficient de transfert thermique par convection entre la paroi latérale et le milieu ambiant est pris égal au coefficient d'échange moyen calculé avec la différence initiale de température entre la paroi et la température ambiante.
- Cas B : le rayonnement n'est pas pris en compte, mais le coefficient de transfert thermique par convection entre la paroi latérale et le milieu ambiant est pris égal au coefficient d'échange moyen calculé avec la différence instantanée entre la température moyenne de la paroi et la température ambiante.
- Cas C : le rayonnement est pris en compte et le coefficient d'échange par convection naturelle entre la paroi et le milieu ambiant est pris égal au coefficient d'échange moyen calculé avec la différence entre la température moyenne de la paroi et la température ambiante.

La figure 4 présente pour le cas A l'influence des situations définies précédemment par les cas (a), (b) et (c). Nous constatons que les températures ambiantes critiques obtenues sont comprises entre 387K et 387,5K. De même que précédemment, le temps d'induction de l'ignition présente aussi un décalage de l'ordre de 100 heures dans le cas (c) par rapport aux deux autres situations.

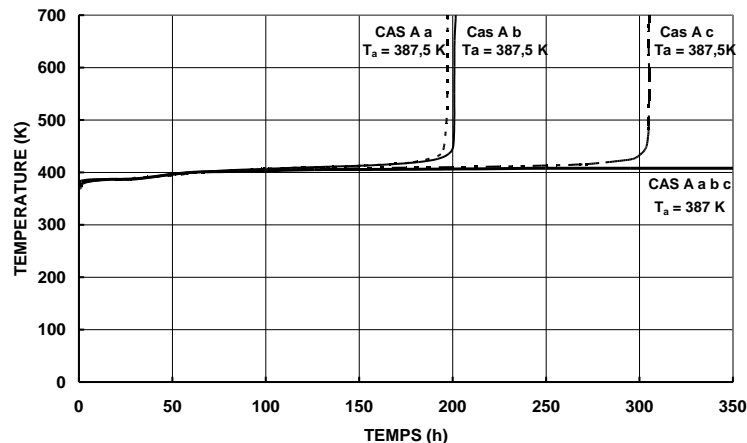


Figure 4. Evolution de la température du stockage en fonction du temps dans le cas A pour trois situations

La figure 5, qui compare les profils des cas (A) et (C) avec une condition aux limites de Newton, montre que la prise en compte du rayonnement conduit à une ignition plus difficile du stockage, la durée de montée maximale en température étant de 225 heures.

*En résumé*, dans le cas du liège pour les températures du milieu environnant de l'intervalle  $[382\text{K} \leq T_a \leq 388,5\text{K}]$ , la température critique d'ignition s'inscrit dans le domaine  $[395,4\text{K} \leq T_{\text{crit}} \leq 402,4\text{K}]$  quelle que soit la méthode d'évaluation examinée. Par contre la cinétique d'apparition et d'évolution du phénomène d'ignition traduite par le temps d'induction de l'approche de l'emballement dépend fortement (ici de l'ordre de 100 heures) des conditions relatives au transfert thermique, en particulier dans le cas du rayonnement. Cette approche a priori a été étendue pour étudier l'emballement d'un silo de  $100\text{ m}^3$  de charbon en présence de convection naturelle induite par la réaction chimique au sein du stockage (Zoghلامي et al., 1997) et en présence de ventilation forcée à l'intérieur du lit (Zoghلامي et al., 1998).



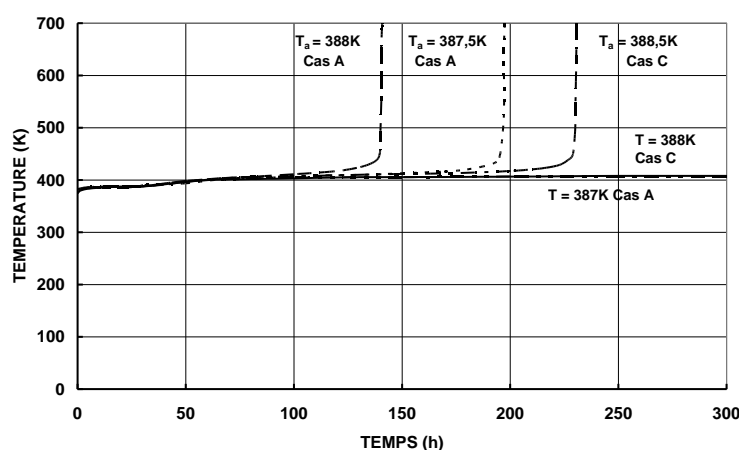


Figure 5. Evolution de la température du stockage en fonction du temps en présence de rayonnement.

## 6. Conclusions

Cette étude apporte une contribution importante à l'amélioration de certains éléments relatifs à la sécurité d'un stockage de solide susceptible de subir une décomposition ou une oxydation. L'exigence réglementaire complémentaire récente demande maintenant par exemple pour les études de dangers des éléments de cinétique de déroulement des accidents incluant la cinétique d'apparition et de déroulement du phénomène dangereux d'une part ainsi que celle de l'atteinte des intérêts et de la durée de leur exposition et de la propagation de leurs effets d'autre part. Son application actuelle se limite souvent à une qualification par tout ou rien. Par exemple la cinétique d'apparition et d'évolution de l'explosion d'un camion d'explosif sera qualifiée d'« instantanée », alors que l'évolution en température du processus de feu couvant dans un stockage de fourrage sera dite « lente ». Dans ce second cas la marge disponible pour prévenir l'ignition et l'incendie demeure non précisée. L'ordre de grandeur du délai potentiel d'intervention reste cependant en général primordial, tant pour un opérateur durant son poste de travail que pour le responsable de la gestion de crise en cas de risque majeur. La méthode proposée dans ce travail permet surtout d'apporter dans le cas d'un stockage de solide des valeurs sur les temps d'ignition et ainsi d'affiner les importantes marges de sécurité proposées dans les scénarii enveloppes. En ce qui concerne le cas particulier du liège, l'étude a montré que la température d'ignition théorique dépendait relativement peu des hypothèses relatives aux échanges thermiques. Par contre, leur influence sur l'évolution des temps d'ignition s'avère notoire. Ce résultat apporte donc de façon précise une réponse quantitative à l'évaluation de la criticité et de la cinétique d'apparition et d'évolution de l'emballage thermique d'un stockage de solide.

## Références

- Gustin, J.L., 2004, Risques d'explosion de poussières – Caractérisation, Techniques de l'Ingénieur, Paris, SE 5030, 1-22.
- Incropera, F.P. and De Witt, D.P., 1996, Fundamentals of heat transfer, John Wiley & Sons, New York.
- Liang, H. and Tanaka, T., 1988, Simulation of the spontaneous heating for the evaluation of ignition temperature and induction time of a combustible dust, International Chemical Engineering, 28 (4), 652-660.
- Pereira, H., 1992, The thermochemical degradation of cork, Wood Science and Technology, 26 (4), 259-269.
- Pilão, R., Ramalho, E. and Pinho, C., 2006, Overall characterization of cork dust explosion, Journal of Hazardous Materials, B133, 183-195.
- Zoghliami, H., Adrian, J.C., Papp, R., Laurent, A. and Corriou, J.P., 1998, Simulation de réservoirs de solides thermiquement instables, Entropie, 211, 39-45.
- Zoghliami, H., Laurent, A. and Corriou, J.P., 1997, Safe design of a thermally unstable solid storage container : natural convection effects on thermal ignition, Process Safety Progress, 16 (4), 231-236.
- Zoghliami-Mosrati, H., 1999, Etude des transferts et écoulements réactifs en milieu poreux : application à un stockage de solides thermiquement instables, INPL Ph.D. thesis Nancy, 28 octobre 1999.