



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 224374 228931 - 2825739 - v2.0

**Appui à l'expertise de l'incendie survenu le 17  
février 2024 au niveau de l'entrepôt de  
stockage de batteries usagées du site  
SOPAVE de VIVIEZ**

## **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION GENERALE

Rédaction : LESAGE Jerome

Vérification : DELBAERE THIERRY; CHAUMETTE SYLVAIN; BORDES ARNAUD; LEROY  
GUILLAUME

Approbation : BOUET REMY - le 21/05/2025

## Table des matières

Glossaire .....	5
1 Introduction .....	6
1.1 Déontologie.....	6
1.2 Contexte .....	6
1.3 Visites et réunions d'échanges .....	6
2 Réponses aux questions posées par le BEA-RI.....	7
2.1 Description de la campagne expérimentale .....	7
2.1.1 Type de contenant.....	7
2.1.2 Type de batteries testées .....	7
2.1.3 Type de déclencheur .....	8
2.1.4 Instrumentations .....	10
2.2 Essai 1 : contenant de type palox plastique .....	13
2.2.1 Configuration d'essai .....	13
2.2.2 Résultats.....	15
2.3 Essai 2 : contenant de type fût métallique .....	31
2.3.1 Configuration d'essai .....	31
2.3.2 Résultats.....	33
2.4 Essai 3 : contenant de type fût métallique avec sprinklage .....	45
2.4.1 Configuration d'essai .....	45
2.4.2 Résultats.....	47
2.5 Enseignements sur l'influence du mode de stockage des batteries et du système d'extinction 59	
3 Conclusion.....	64
4 Annexes.....	65

**Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :**

Institut national de l'environnement industriel et des risques, **Appui à l'expertise de l'incendie survenu le 17 février 2024 au niveau de l'entrepôt de stockage de batteries usagées du site SOPAVE de VIVIEZ**, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 224374 228931 - 2825739 - v2.021/05/2025.

## Glossaire

SDIS : Service Départemental d'Incendie et de Secours

HRR : Heat Release Rate, puissance thermique dégagée par les réactions de combustion

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

OC : Oxygen Consumption, méthode permettant l'estimation de la puissance thermique dégagée par les réactions de combustion à partir de la consommation d'oxygène

CDG : Carbon Dioxide Generation, méthode permettant l'estimation de la puissance thermique dégagée par les réactions de combustion à partir de la consommation d'oxygène

NMC : Nickel Manganèse Cobalt, utilisé dans la cathode de certain type de cellule Li-ion

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène, type de plastique très couramment utilisé

# 1 Introduction

## 1.1 Déontologie

L'INERIS n'a jamais réalisé d'études pour le compte de la SOPAVE, entreprise dans laquelle l'incendie s'est produit.

L'INERIS a déjà réalisé pour le compte de la SNAM (qui détient la société SOPAVE) des mesures de l'air extérieur. L'INERIS n'a pas collaboré dans les cinq dernières années avec la SNAM ou la SOPAVE sur la problématique de gestion des risques accidentels liés à leur activité de recyclage des batteries.

## 1.2 Contexte

Le 17 février 2024, un incendie s'est déclaré au sein de l'entrepôt de stockage de batteries usagées de la société SOPAVE, située à Viviez dans l'Aveyron. Cet entrepôt contenait environ 1200 tonnes de batteries destinées à être recyclées par la SNAM, dont 1100 tonnes de batteries Li-ion.

Le feu s'est propagé à l'ensemble de l'entrepôt, nécessitant l'intervention de près de 60 pompiers pour le maîtriser. L'incendie a duré 5 jours.

Le BEA-RI a ouvert une enquête sur cet accident et a sollicité l'appui de l'Ineris. Dans sa lettre de mission adressée (annexe 1), le BEA-RI demande à l'Ineris de réaliser des essais sur des batteries de même type récupérées auprès de la SNAM en vue :

- D'étudier l'influence du mode de stockage des batteries et du système d'extinction automatique sur les mécanismes de propagation d'un incendie lié à l'emballement thermique d'une batterie de type petite mobilité stockée en vrac avec des batteries de même type, et de conclure sur leur influence ;
- De transmettre les données brutes relatives aux substances émises lors des essais.

Les réponses aux demandes du BEA-RI sont développées dans la section 2 de ce rapport.

## 1.3 Visites et réunions d'échanges

L'INERIS a effectué une visite des installations impactées par l'incendie le 27 février 2024, soit 10 jours après le début de l'incendie, en présence des enquêteurs du BEA-RI, des représentants de la société SNAM, du SDIS12, et de la DREAL. Cette visite a permis de prendre connaissance de la chronologie de l'accident et d'effectuer les premières constatations, ainsi que de connaître la façon dont les batteries étaient stockées et les mesures de sécurité mises en œuvre.

L'INERIS a également participé à plusieurs réunions avec la SNAM et le BEA-RI, notamment dans le but de mettre en œuvre la campagne expérimentale réalisée dans le cadre de cette enquête.

## 2 Réponses aux questions posées par le BEA-RI

Afin de répondre aux missions de la saisine, et en concertation avec la SNAM et le BEA-RI, l'INERIS a réalisé une campagne expérimentale afin d'évaluer l'impact du type de contenant et du système d'extinction par sprinklage sur la propagation de l'incendie lors d'un départ en emballage thermique d'une batterie isolée au sein d'un contenant.

Cette campagne d'essai et les résultats expérimentaux obtenus sont décrits dans les sections 2.1 à 2.4.

La section 2.5 établit ensuite les enseignements tirés de cette campagne d'essai sur l'influence du mode de stockage des batteries et du système d'extinction automatique sur les mécanismes de propagation d'un incendie

### 2.1 Description de la campagne expérimentale

#### 2.1.1 Type de contenant

Deux types de contenant ont été évalués :

- Palox plastique (polyéthylène haute-densité) de dimensions 1 x 1,2 x 0,8 m et pesant environ 30 kg. Ils sont fermés par un couvercle plastique posé au-dessus du palox. Ces contenants sont ceux qui étaient utilisés dans l'entrepôt qui a subi l'incendie ;
- Fût métallique (tôle fine d'acier) de 88 cm de hauteur et de diamètre 60 cm et pesant environ 16 kg. Ils sont fermés par un couvercle métallique maintenu par un collier de serrage à levier.

Nota : ces contenants ne sont pas équipés d'évent de surpression.



Figure 1: illustration d'un fût métallique (gauche) et d'un palox (droite)

#### 2.1.2 Type de batteries testées

Les batteries utilisées sont toutes de technologie Li-ion. Elles ont été fournies par la SNAM issues de la filière de recyclage dénommée « consumer market ». Au sein de cette filière, seules les batteries de mobilité légère (trottinettes, vélos électriques, ...) ont été sélectionnées. Tous les types de batteries de mobilité légère arbitrairement (avec boîtier plastique, métal, ou sans boîtier) ont été conservées et mélangées. Elles ont été déposées une à une au sein du contenant.

Nota : pour éviter les courts-circuits lors du remplissage des contenants, les batteries avec des pièces nues sous tension ont été préalablement enveloppées d'un film plastique fin.

L'ensemble des essais ont été réalisés sans vermiculite entre les batteries.



Figure 2: illustration de l'empilement des batteries dans leur fût métallique (gauche) ou leur palox (droite)

### 2.1.3 Type de déclencheur

L'emballage thermique de la 1<sup>re</sup> batterie au sein du contenant a été initié par surchauffe. A cet effet, une batterie a été spécialement préparée pour permettre de reproduire le même déclencheur d'essai en essai.

Cette batterie spécialement préparée est constituée d'un empilement de 6 cellules Li-ion pouch NMC de 32 Ah<sup>1</sup>, préalablement chargées à 100 %. L'énergie électrique contenue dans cette batterie est de l'ordre de 700 Wh, soit l'équivalent d'une batterie de vélo électrique.

Au centre de cet empilement, un pad thermique de 500 W a été positionné. L'ensemble ainsi formé est maintenu en compression à l'aide de scotch thermique, puis placé dans un boîtier plastique ABS de dimensions approximatives 30 x 23 x 9 cm, d'étanchéité IP65.

Trois thermocouples sont positionnés au sein de cette batterie pour monitorer son emballage thermique.

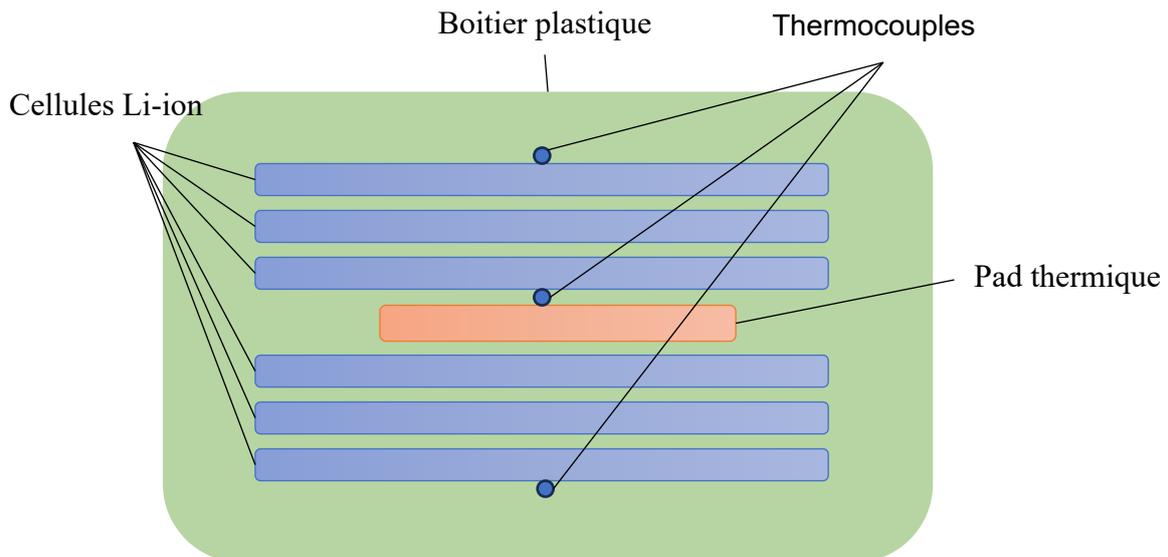


Figure 3: schéma de la batterie utilisée pour le déclenchement de l'emballage thermique

<sup>1</sup> Cellules Li-ion restante d'une campagne d'essai, et mise à disposition gracieusement par Total Energies

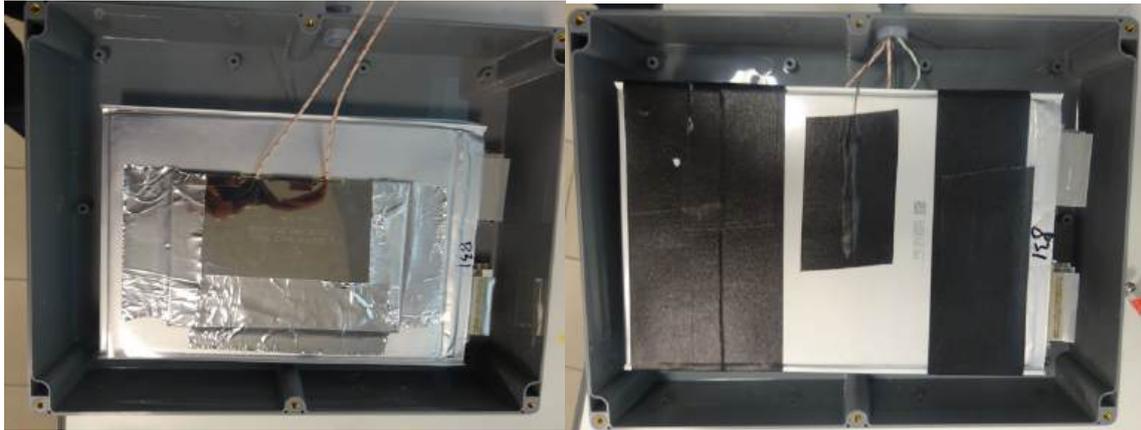


Figure 4: photographies de l'intérieur d'une batterie utilisée pour le déclenchement de l'emballement thermique (gauche : 3 cellules et pad thermique maintenu avec du scotch aluminium, droite : empilement complet maintenu avec du scotch thermique)

Lors de chaque essai, deux batteries instrumentées sont placées dans le contenant dans lequel l'incendie est déclenché, ceci dans le but de permettre un deuxième départ en emballement thermique si le premier ne se propageait pas ou peu aux autres batteries du contenant.

La position de la batterie principale et de la batterie redondante dépend du type de contenant :

- dans un palox plastique, la batterie principale se trouve à 1/3 de la hauteur et 1/3 de la diagonale, alors que la batterie redondante se trouve à 2/3 de la hauteur et à 2/3 de la même diagonale (Figure 5),
- dans un fût métallique, la batterie principale se trouve à 1/3 de la hauteur et la batterie redondante se trouve à 2/3 de la hauteur. Les deux batteries sont sur l'axe central du fût (Figure 6).

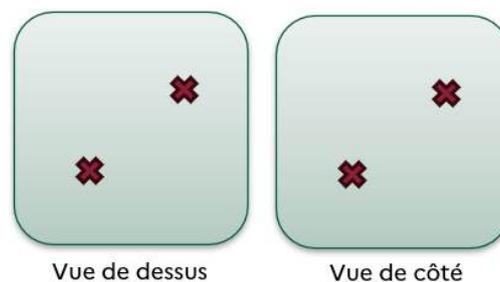


Figure 5: position des batteries instrumentées dans un contenant de type palox

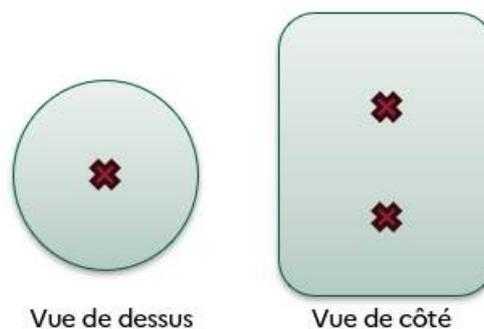


Figure 6: position des batteries instrumentées dans un contenant de type fût métallique

## 2.1.4 Instrumentations

### 2.1.4.1 Mesure de températures dans les batteries instrumentées

Comme précisé avant, chaque batterie instrumentée contient trois thermocouples, un contre le pad thermique, un sur la cellule du bas et un autre sur la cellule du haut (voir Figure 3).

Dans la suite de ce rapport, ces thermocouples sont dénommés BATx-l-y, avec :

- x = numéro de la batterie (1 = principale et 2 = redondante),
- l = Intérieur de la batterie,
- y position du TC (H = haut, M = milieu, B = bas).

### 2.1.4.2 Mesure de températures dans les contenants

Des thermocouples sont placés à l'intérieur de chaque contenant, collés sur les batteries usagées.

Ils ont été positionnés approximativement selon 4 colonnes A, B, C et D et à 3 ou 4 niveaux différents (voir Figure 7 et Figure 8).

La batterie instrumentée principale se trouve donc au niveau 1, et la redondante au niveau 3. Dans un palox plastique, la batterie instrumentée principale se trouve en colonne A, et la redondante en colonne C.

L'ensemble de ces thermocouples intérieurs collés sur les batteries sont désignés dans la suite de ce rapport « Ti-j », avec :

- i = numéro du niveau,
- j = lettre associée à la colonne.

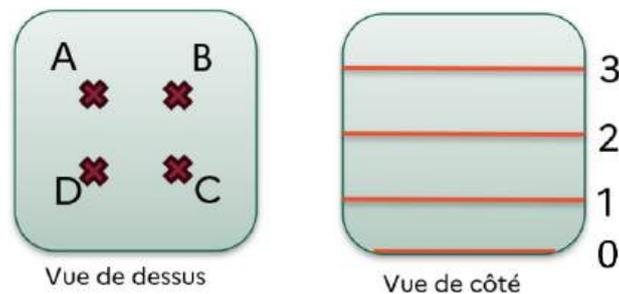


Figure 7: position des thermocouples à l'intérieur d'un contenant de type palox

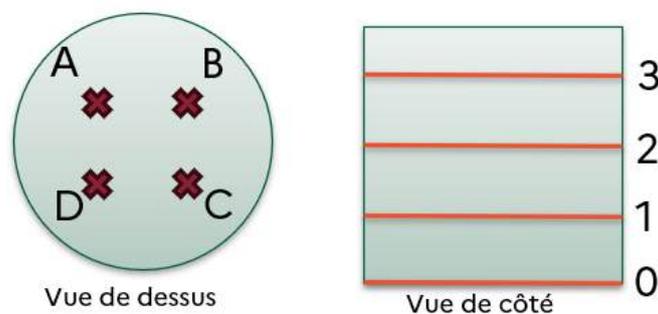


Figure 8: position des thermocouples à l'intérieur d'un contenant de type fût métallique

En plus de ce maillage, sur le premier essai, quelques thermocouples ont été ajoutés pour surveiller la propagation de l'emballement thermique des batteries instrumentées vers les batteries à proximité immédiates. Ils sont dénommés BATx-E-y, avec :

- x = numéro de la batterie instrumentée (1 ou 2),
- E = Extérieur à la batterie instrumentée,
- y = lettre de la colonne pointée par le vecteur [batterie instrumentée => thermocouple].

#### 2.1.4.3 Mesure de températures dans le ciel gazeux

Dans chaque contenant rempli de batterie, un thermocouple mesure la température de l'air interne à environ 5 cm sous le couvercle. Ce thermocouple est appelé T-PALOX-AIR-H dans le cas d'un palox et T-FUT1-AIR dans le cas d'un fût métallique.

#### 2.1.4.4 Mesure de flux thermiques radiatifs

Lors de chaque essai, 5 fluxmètres radiatifs sont placés autour de l'échantillon.

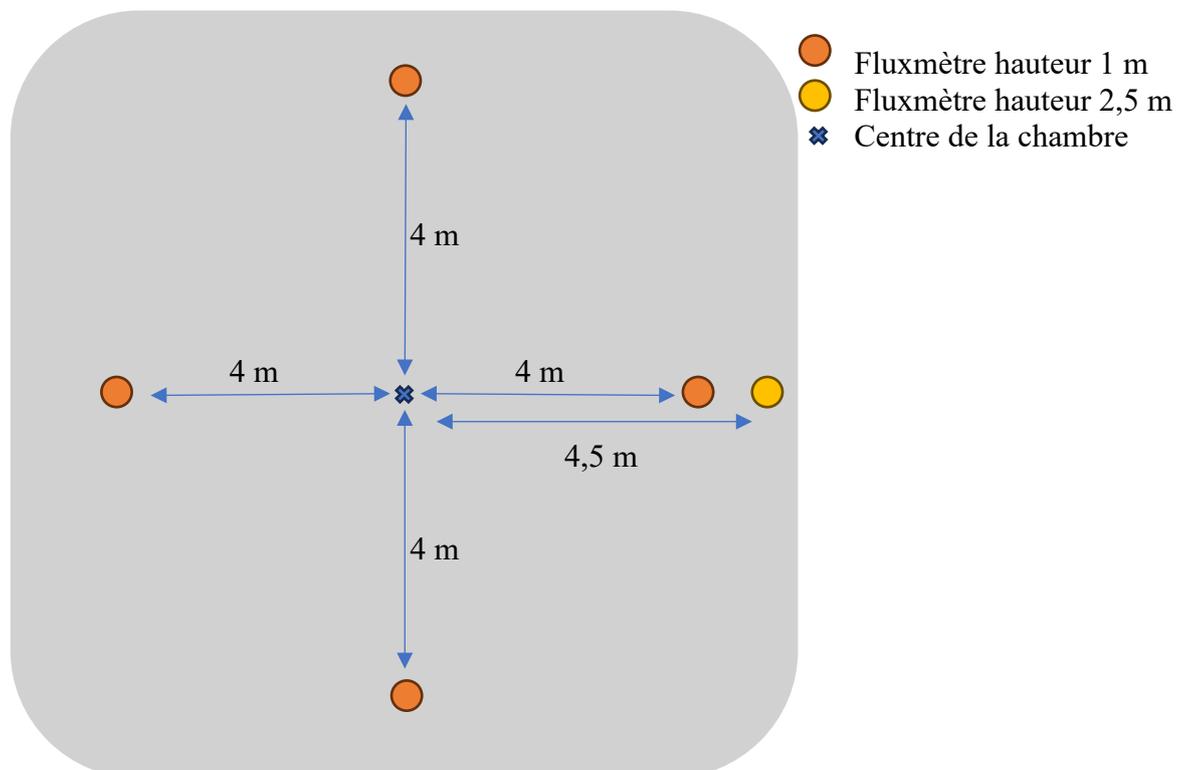


Figure 9: position des fluxmètres

#### 2.1.4.5 Mesure de gaz

Durant chaque essai, les gaz sont aspirés puis retraités par notre système de traitement des fumées.

Un prélèvement des gaz est effectué sur la gaine d'aspiration et permet une analyse en continu de la concentration des gaz suivants :

CO <sub>2</sub>	Formaldéhyde	HCN	HCl
CO	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	HBr
HF	NO	DMC	SiF <sub>4</sub>
CH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	EMC	POF <sub>3</sub>
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	EC	H <sub>2</sub> O
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>		

Tableau 1 : liste des gaz analysés

#### 2.1.4.6 Débit calorifique et chaleur de combustion

Il est d'usage depuis le début des années 80 de mesurer le débit calorifique des incendies (ou puissance thermique dégagée, ou HRR en anglais pour Heat Release Rate) par des méthodes dites de calorimétrie incendie, basées sur les bilans matières effectués sur les gaz émis en s'appuyant sur les lois de la thermochimie qui permettent de relier le débit calorifique du feu (HRR pour Heat Release Rate) et la consommation ou productions d'espèces chimiques associées à une combustion :

- calorimétrie basée sur la consommation d'oxygène, méthode dite OC (Oxygen consumption): il a été démontré (principe de Thornton) que pour la plupart des matières combustibles carbonées, la consommation d'1 kg d'O<sub>2</sub> correspond à la production de 13,1 MJ d'énergie : ce facteur calorimétrique est un coefficient moyen, et en pratique on tient compte des pertes liées aux émissions de composés imbrûlés (CO notamment) et d'autres facteurs de correction,
- le principe CDG (Carbon dioxide generation) permet de relier cette même grandeur (HRR) aux débits de production d'oxydes de carbone (CO + CO<sub>2</sub>).

Ces méthodes permettent de s'affranchir des contraintes liées à l'établissement d'un bilan thermique conventionnel (mesures des différentes pertes par convection, conduction et rayonnement), quasiment impossible en pratique à appliquer dans un essai feu à moyenne échelle.

Les études publiées sur le niveau de précision de ces méthodes alternatives font valoir des précisions variables allant de +/-5 % pour des feux "simples" (ex. feu de nappe de solvant) menés sur appareillages de laboratoire (calorimètre de Tewarson, échelle 10 à 100 g) à des précisions de l'ordre de 15/18 % sur des feux complexes, tridimensionnels (cas présents) ou des expérimentations à grande échelle (échelle de 100 kg à 1000 kg).

La détermination du débit calorifique (HRR) ne préjuge donc pas du mode de transfert thermique de la chaleur dégagée par unité de temps (il est courant de considérer que le rayonnement représente environ 30 à 33 % de l'énergie totale dissipée) ; les pertes par diffusion sont généralement négligeables dans les scénarios pris en compte en ingénierie du feu.

Dans le cadre des essais réalisés, le HRR a été calculé en utilisant la méthode b), suivant le principe CDG selon l'équation suivante :

$$\dot{q}_{CDG} = E_{CO_2} (\dot{m}_{CO_2} - \dot{m}_{CO_2}^0) + E_{CO} \dot{m}_{CO}$$

Avec :

$\dot{q}_{CDG}$  : débit calorifique ou heat release rate (kW ou kW/m<sup>2</sup>),

$\dot{m}_{CO_2}^0$  : débit massique de CO<sub>2</sub> initial (g/s),

$\dot{m}_{CO_2}$  : débit massique de CO<sub>2</sub> au cours de la combustion (g/s),

$\dot{m}_{CO}$  : débit massique de production de CO au cours de la combustion (g/s),

$E_{CO_2}$  : quantité d'énergie libérée par unité de masse de CO<sub>2</sub> générée = 13,3±11 % kJ/g de CO<sub>2</sub><sup>2</sup>.

$E_{CO}$  : quantité d'énergie libérée par unité de masse de CO générée = 11,1±18 % kJ/g de CO.

La chaleur de combustion généralement exprimée en MJ/kg ou kJ/g est la quantité de chaleur produite durant la phase de combustion. Elle est calculée par l'intégration de l'aire sous la courbe HRR ; la chaleur de combustion totale dissipée est alors déterminée.

Nota : une limitation de la technique utilisée est le fait que l'énergie électrique libérée par la surcharge générée pendant l'essai n'est pas directement accessible par la calorimétrie incendie, car non liée à des réactions thermochimiques (effet Joule).

#### 2.1.4.7 Perte de masse

La masse est enregistrée en continue pendant les essais, ce qui permet d'observer la diminution de masse au fur et à mesure de la combustion et ainsi estimer la vitesse de combustion associée au produit testé.

## 2.2 Essai 1 : contenant de type palox plastique

### 2.2.1 Configuration d'essai

La configuration de l'essai se rapproche des conditions de stockage des batteries usagées dans l'entrepôt SOPAVE incendié, dans lequel les batteries étaient stockées dans des palox plastiques.

Les objectifs de ce premier essai sont :

- de valider que, lors de l'emballage thermique d'une batterie au sein d'un palox plastique, celui-ci peut mener à un incendie de l'ensemble des batteries du palox, se propager aux palox environnants,
- d'observer la dynamique de cette propagation,
- de quantifier les effets thermiques et les émissions gazeuses associées.

A cet effet, 3 palox ont été disposés au centre de la chambre, comme illustré sur la Figure 10.

---

<sup>2</sup> Biteau H. *et al*, « Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition », Fire Safety Science, 2008. 9: p. 1165-1176

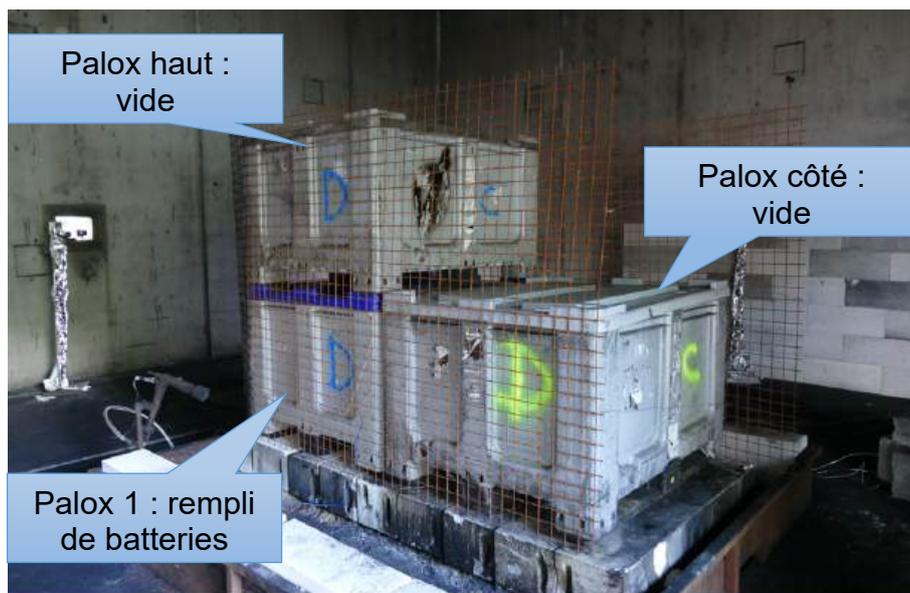


Figure 10: configuration de l'essai 1 : 3 palox plastiques

Le palox en bas à gauche (palox 1) est rempli de batteries usagées (voir § 2.1.2), alors que celui juste au-dessus (palox haut) et celui de droite (palox côté) sont laissés vides.

Les faces latérales des palox sont identifiées à l'aide des lettres A à D, dans le sens horaire vue du dessus (les faces C et D sont marquées à la bombe de peinture et visibles sur la Figure 10).

Pour surveiller les températures au sein des palox vides haut et côté, les thermocouples suivants ont été ajoutés :

- 5 thermocouples à l'intérieur du palox haut placés au centre de chacune des 4 faces latérales et de la face inférieure.  
Identification : palox-haut-x, avec x = lettre de la face latérale ou « fond »,
- 3 thermocouples à l'intérieur du palox côté, placés sur la face se trouvant contre le palox 1.  
Identification : palox-cote-x, avec x = haut, bas ou M (milieu).



Figure 11: position des 3 thermocouples « palox-cote-x » au sein du palox 3

L'ensemble des 3 palox ont été enfin entourés d'un treillis métallique afin d'éviter leur éventuelle chute pendant l'essai.

Nota : le brûleur visible sur la Figure 10, a été placé en préventif mais n'a pas été utilisé pendant l'essai (aurait permis de forcer une combustion complète pour faciliter le nettoyage des résidus).

## 2.2.2 Résultats

### 2.2.2.1 *Déroulement de l'essai*

Le départ en emballement thermique d'une seule batterie a suffi à initier un feu généralisé et à engendrer la combustion complète de l'ensemble des palox et batteries usagées. L'emballement thermique de cette 1<sup>e</sup> batterie s'est propagée progressivement, avec des premières flammes visibles après 10 min, puis un pic de puissance thermique après environ 16 min, suivie d'une lente décroissance durant les 20 minutes suivantes amenant à un feu résiduel qui s'est maintenu environ 2 heures.

Les principales étapes de l'essai sont décrites dans le tableau ci-dessous.

#	t =	Description
1	0s	Lancement des enregistrements
2	40s	Début de l'agression thermique appliquée à la batterie instrumentée principale
3	4min 25s	Début de l'emballement thermique de la batterie instrumentée principale (visible sur la Figure 12), suivie de fumées sortant du fût quelques secondes plus tard et pendant environ 1 min. 
4	6min 30s et 6min 44s	Dégazage ponctuel
5	6min 47s et 6min 54s	Brefs flashes lumineux sous le palox 
6	6min 59s	Inflammation sous le palox rempli de batteries donnant naissance à des flammes ponctuelles 

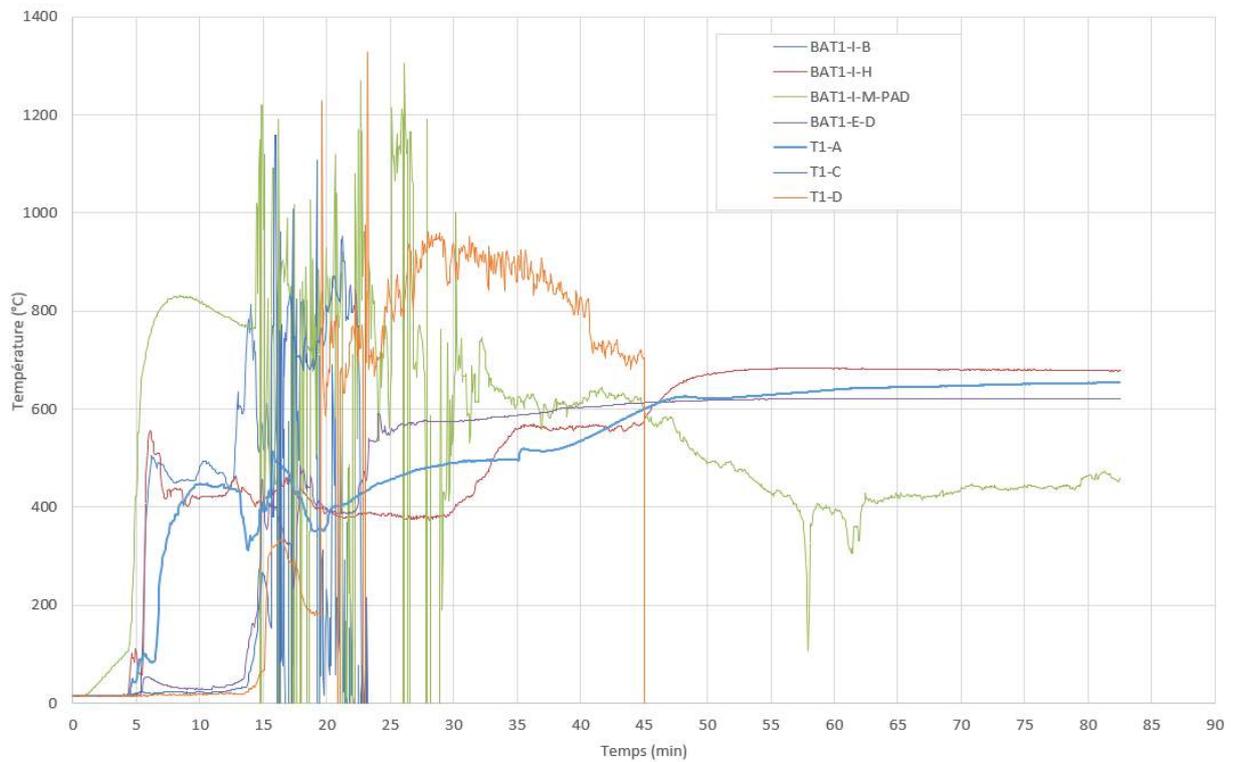
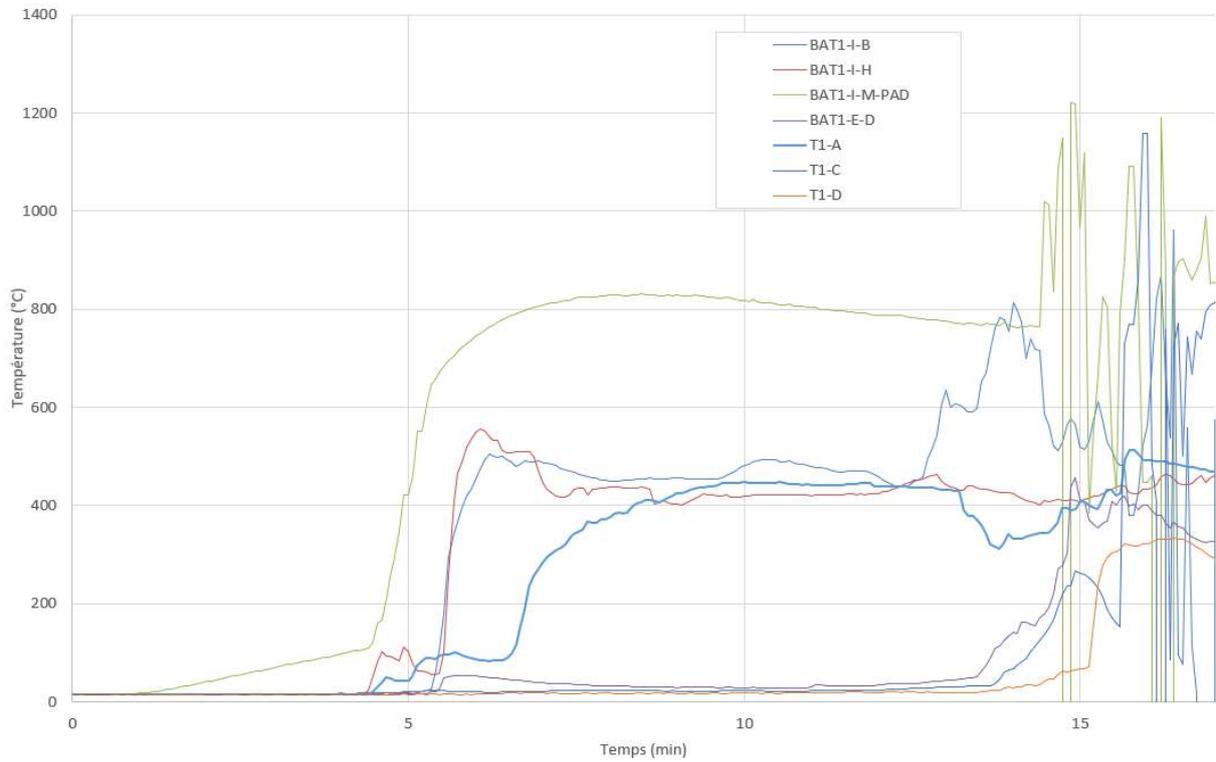
7	10min 30s	<p>Début d'inflammation du flanc du palox supérieur et inflammation plus marquée du palox 1. Crépitement/explosions/projections fréquentes.</p> 
8	13min 30s	<p>Inflammation plus marquée du palox 1, qui se propage rapidement à l'ensemble du palox supérieur, puis au palox d'à côté.</p> 

9	14min 30s	<p>Augmentation rapide de l'intensité du feu et des explosions/projections. Affaissement du palox 1.</p>  <p>00:14:33:09</p> <p>00:14:37:14</p> <p>INERIS</p>
10	16min	<p>L'intensité du feu semble être maximale.</p>  <p>00:16:00:03</p> <p>INERIS</p>

		
11	23min 35s	Perte d'une caméra
12	26min	Décroissance du feu déjà marquée, qui continue de diminuer en intensité 

## 2.2.2.2 Evolution des températures

### 2.2.2.2.1 Palox 1 niveau 1



Nota :

- le thermocouple T1-B présente des valeurs aberrantes dès la 5<sup>e</sup> minute et a été retiré des graphiques pour une meilleure lisibilité ;
- les thermocouples dans la batterie instrumentée principale BAT1-I-B et BAT1-I-M présentent des variations aberrantes non physiques à partir d'environ t = 13 min, non prises en compte dans l'analyse des évènements.

La chauffe puis le démarrage en emballement thermique de la batterie instrumentée principale à 4min40s sont facilement identifiables sur la Figure 12.

La montée en température suivante arrive vers 14 min, simultanément sur les colonnes A et C, puis moins d'une minute plus tard sur la colonne D. Ces montées en températures sont synchrones de la propagation du feu aux parois du palox (§ 2.2.2.1, étapes 8 et 9) : elles pourraient avoir été provoquées aussi bien par la combustion de ces parois plastiques, que par le départ en emballement thermique de batteries se trouvant à proximité de ces thermocouples.

Les températures de ce 1<sup>er</sup> niveau atteignent un maximum d'environ 900 °C avant de se stabiliser durablement autour de 650 °C.

#### 2.2.2.2.2 Palox 1 niveau 2

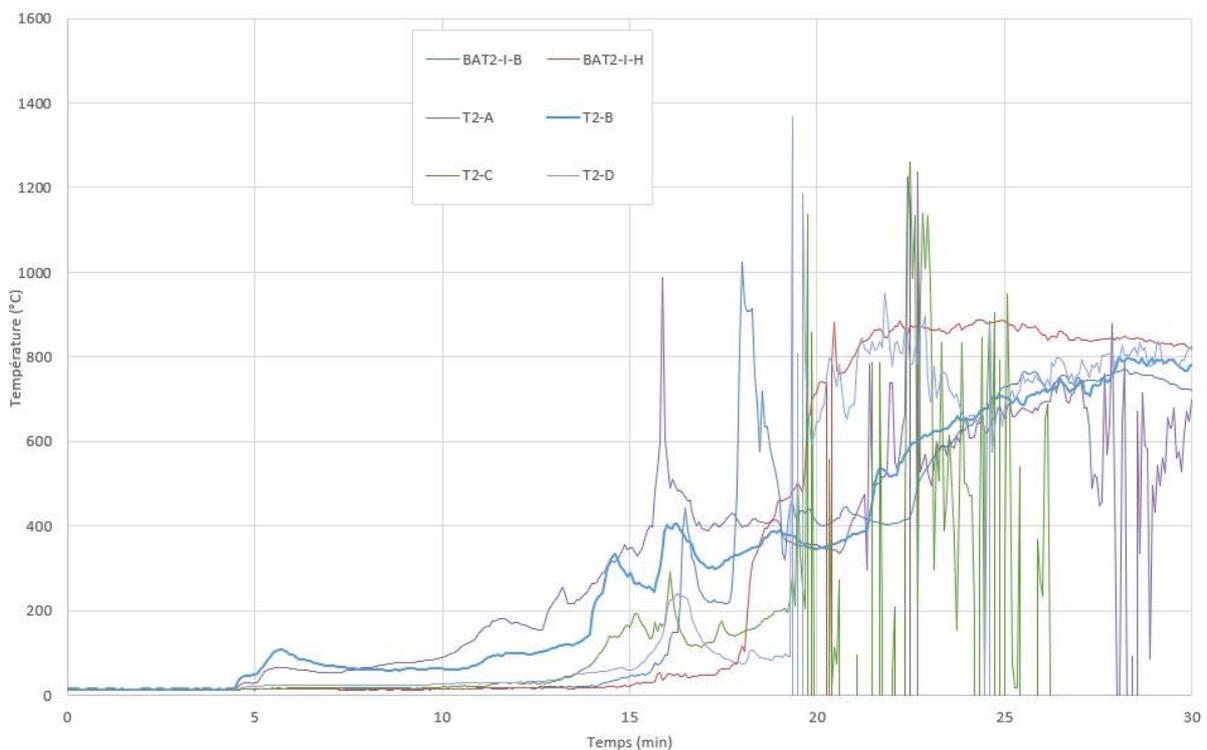


Figure 14: évolution des températures sur le niveau 2 du palox 1 en début d'essai

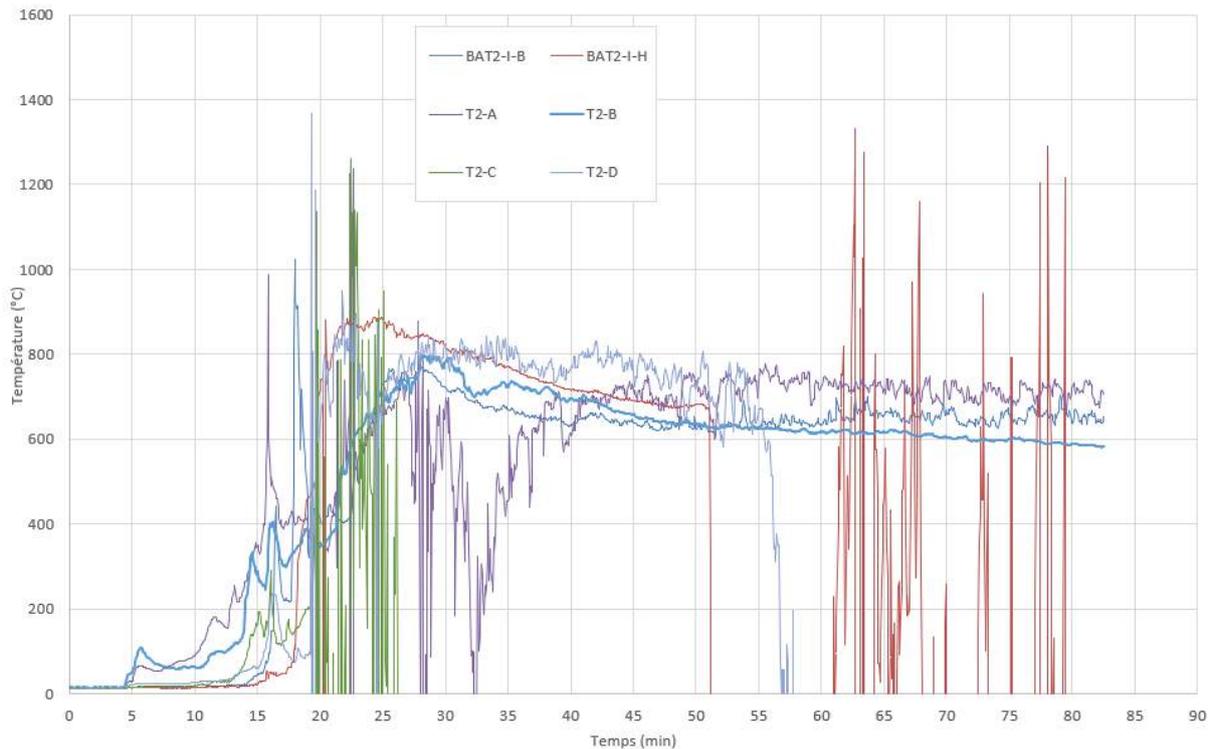


Figure 15: évolution des températures sur le niveau 2 du palox 1 tout au long de l'essai

Nota :

- le thermocouple dans la batterie instrumentée redondante BAT2-I-M présente des valeurs aberrantes à partir de  $t = 15$  min. N'apportant que peu d'information supplémentaire par rapport à BAT2-I-B et BAT2-I-H, il a été retiré du graphique pour une meilleure lisibilité ;
- T2-C, T2-D et BAT2-I-B présentent des valeurs aberrantes à partir de la 20<sup>e</sup> minute, non prises en compte dans l'analyse des événements ;
- T2-A et BAT2-I-H présentent des valeurs aberrantes respectivement à partir de la 28<sup>e</sup> et 51<sup>e</sup> minute, non prises en compte dans l'analyse des événements.

Avant la propagation du feu au paroi du palox vers 14 min (§ 2.2.2.1, étapes 8 et 9), l'évolution des températures mesurées sur ce second niveau ne présente pas de variation rapide laissant penser à un emballement thermique de batteries sur lesquelles ces thermocouples sont apposés. Les rebonds sur T2-A observés à 11 min puis 12 min40s peuvent malgré tout laisser penser à un emballement thermique d'une cellule Li-ion dans le voisinage de ce thermocouple.

### 2.2.2.2.3 Palox 1 niveau 3

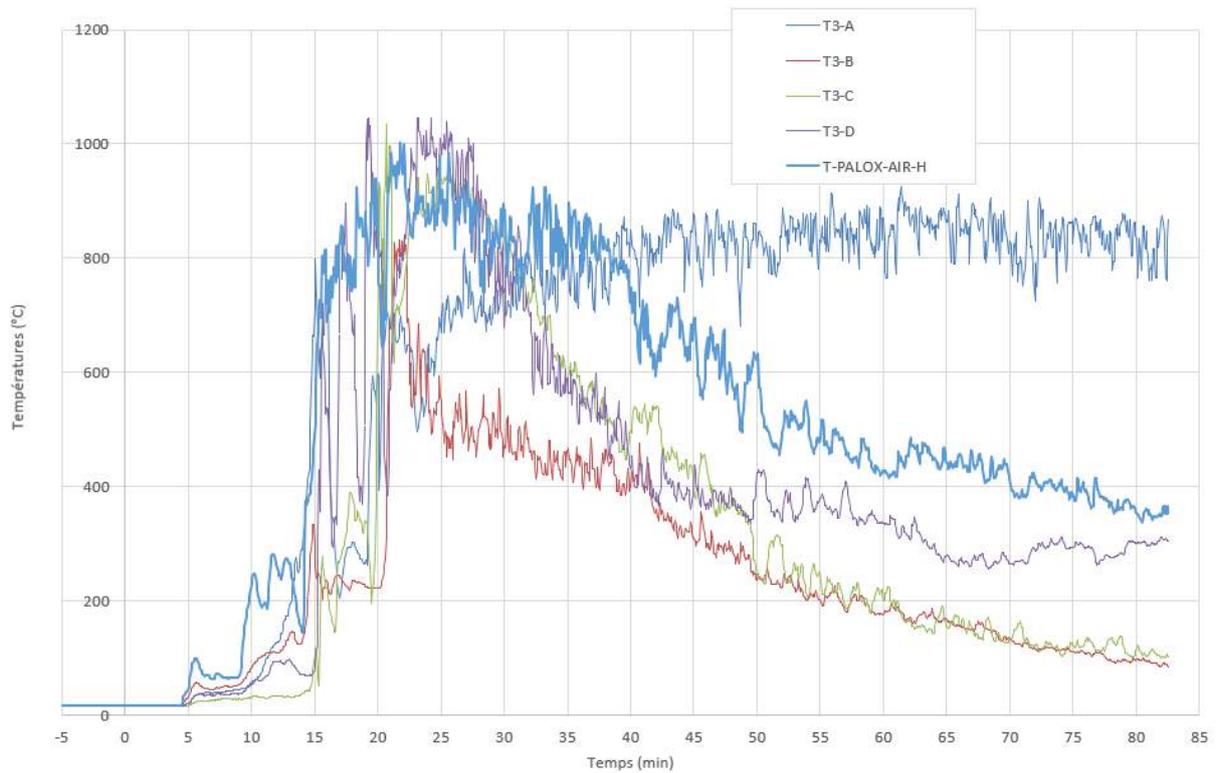


Figure 16: évolution des températures sur le niveau 3 du palox 1 et de son ciel gazeux tout au long de l'essai

Les températures relevées à ce 3<sup>e</sup> niveau restent sous 200°C jusqu'à t=10min. Elles connaissent ensuite une augmentation brutale à partir de t=14min, instant à partir duquel le feu englobe le palox 1 (§ 2.2.2.1, étape 9). Les températures maximales atteignent environ 1000°C entre t=20min et t=25min.

#### 2.2.2.2.4 Palox haut

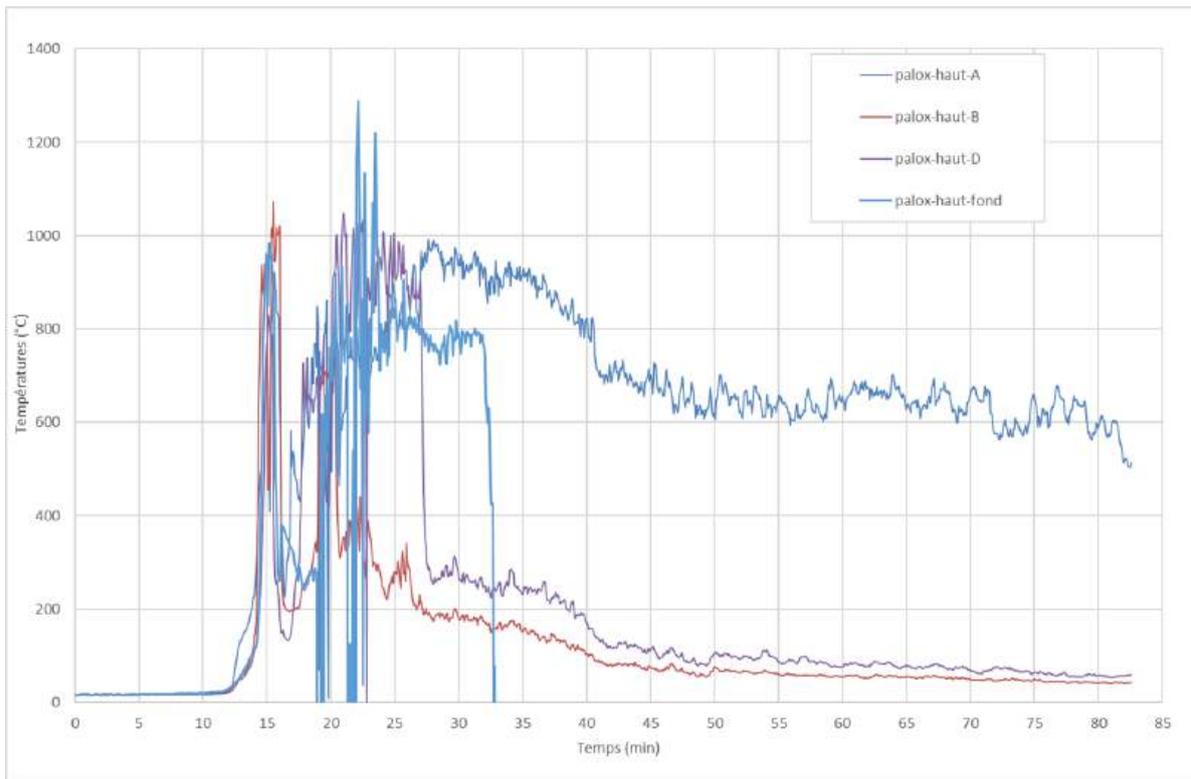


Figure 17: évolution des températures dans le palox du dessus tout au long de l'essai

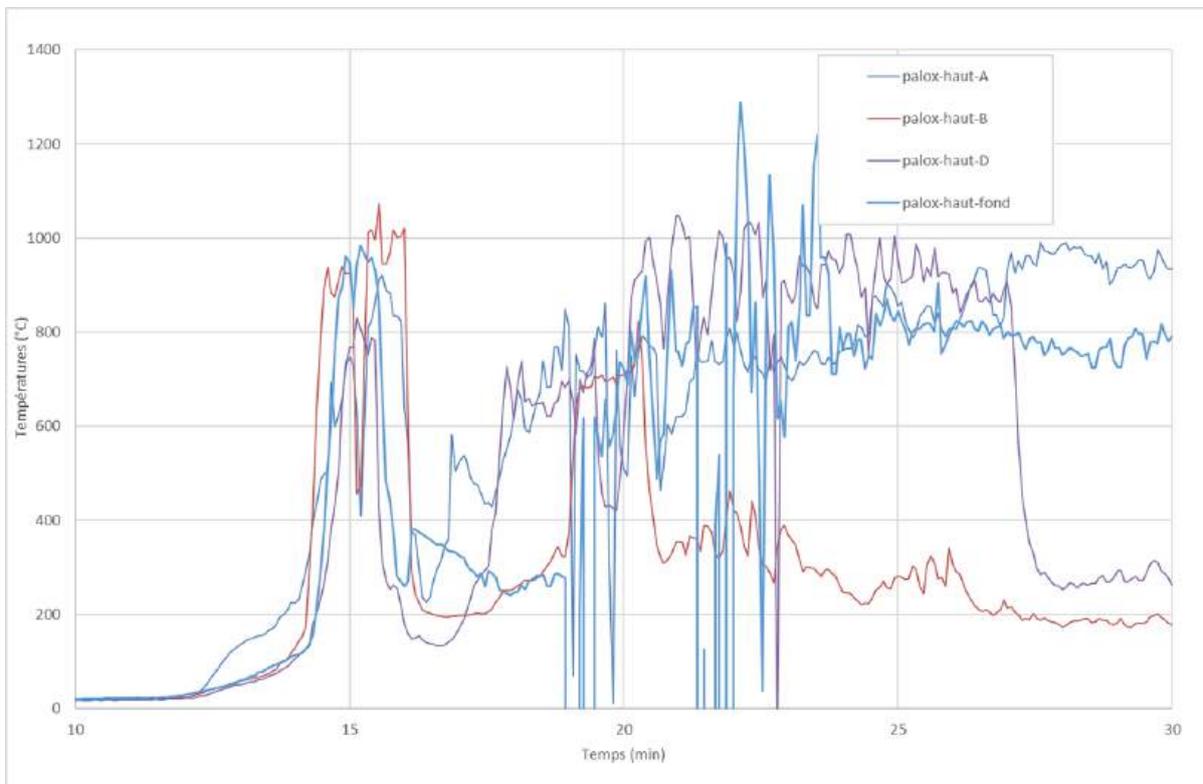


Figure 18: évolution des températures dans le palox du dessus – zoom sur l'intervalle de temps [10min ; 30min]

Nota :

- le thermocouple palox-haut-C présente des valeurs aberrantes à partir de  $t = 16$  min. N'apportant que peu d'information supplémentaire, il a été retiré du graphique pour une meilleure lisibilité ;
- Palox-haut-fond et palox-haut-A présentent des valeurs aberrantes à partir de la 19<sup>e</sup> minute, non prises en compte dans l'analyse des évènements.

Les températures à l'intérieur de ce palox du haut commencent à monter vers 12 min. Cette montée s'accélère soudainement vers 14min30s, passant très rapidement de 200 °C à plus de 800°C. Ceci est synchrone de l'augmentation rapide de l'intensité du feu observée sur la vidéo (§ 2.2.2.1, étape 9).

Entre les minutes 16 et 19, les températures décroissent pour remonter ensuite au-dessus de 800 °C. Cette observation peut s'expliquer par la combustion quasi complète du palox supérieur (diminution des températures) puis l'affaissement des palox : les thermocouples « palox-haut » se retrouvent à nouveau dans le cœur du foyer inférieur. On peut supposer que palox-haut-A et palox-haut-D, non maintenus, quittent ce foyer vers la 25<sup>e</sup> et 27<sup>e</sup> minutes.

#### 2.2.2.2.5 Palox côté

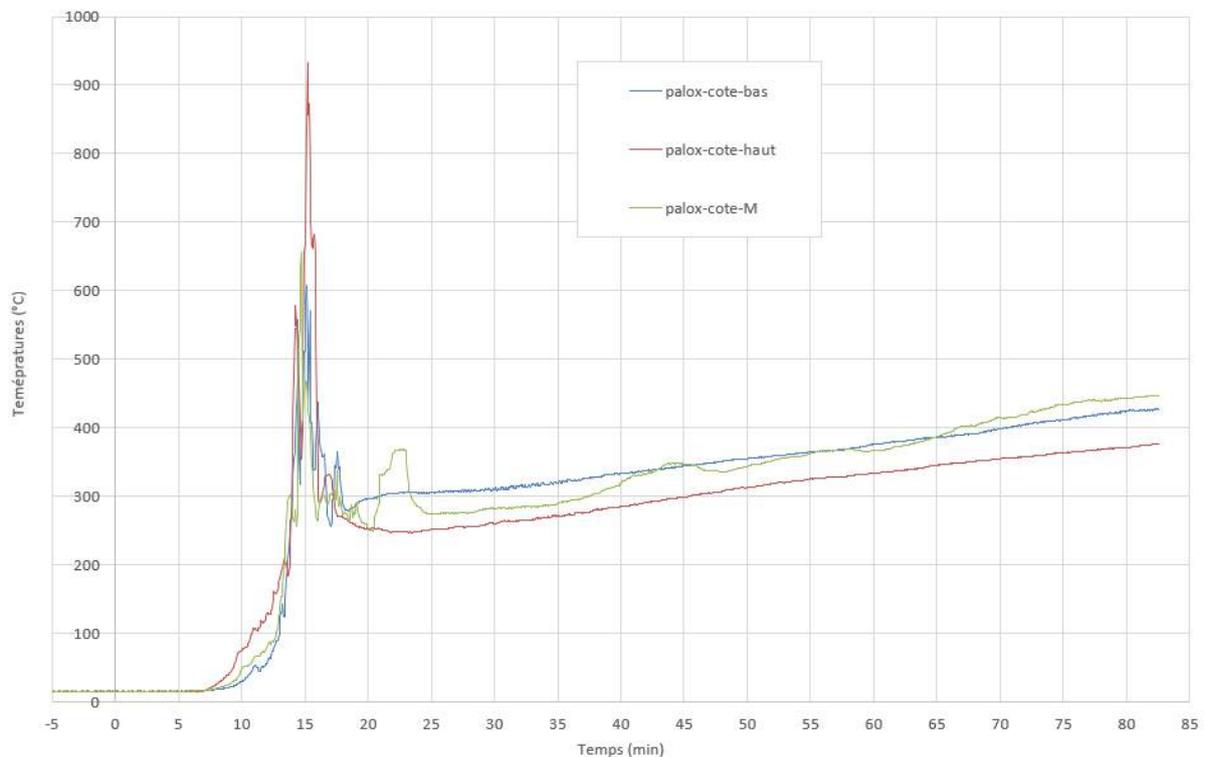


Figure 19: évolution des températures dans le palox du côté tout au long de l'essai

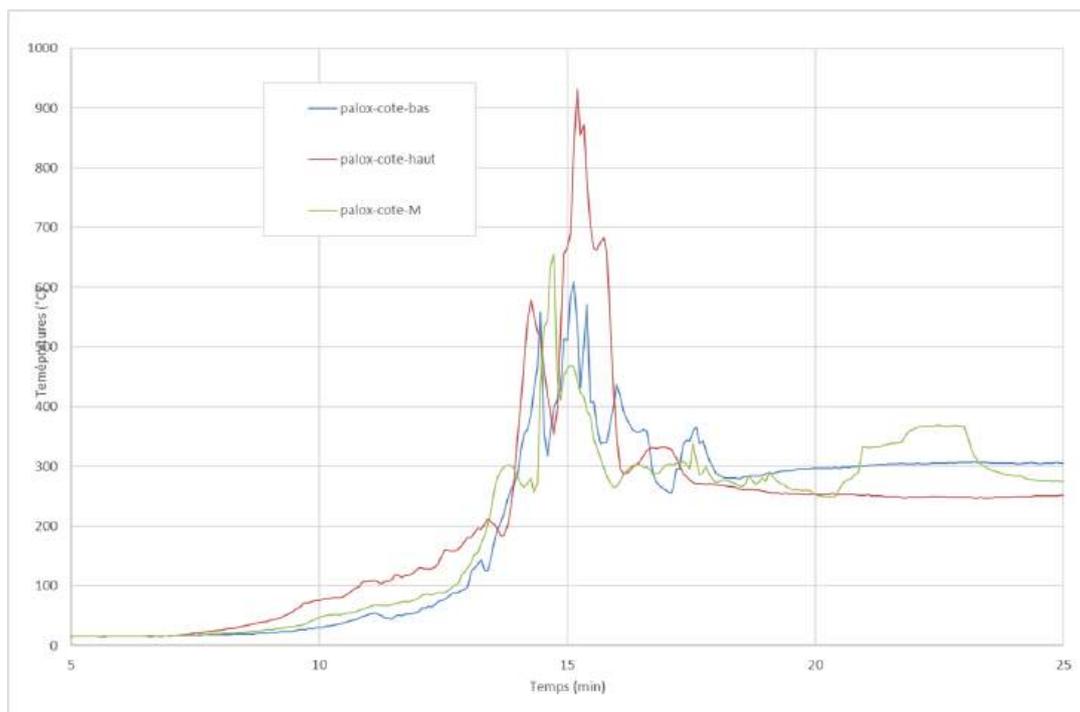


Figure 20: évolution des températures dans le palox de côté – zoom sur l'intervalle de temps [5min ; 25min]

Le palox de côté est plus proche du foyer initial de l'incendie : sa montée en température démarre plus tôt (7min30s), mais de façon plus lente que le palox supérieur. Vers la 14<sup>e</sup> minute, la montée en température s'accélère, ce qui correspond à l'intensification du feu telle qu'observée sur la vidéo (§ 2.2.2.1, étape 9).

### 2.2.2.3 Evolution des flux radiatifs

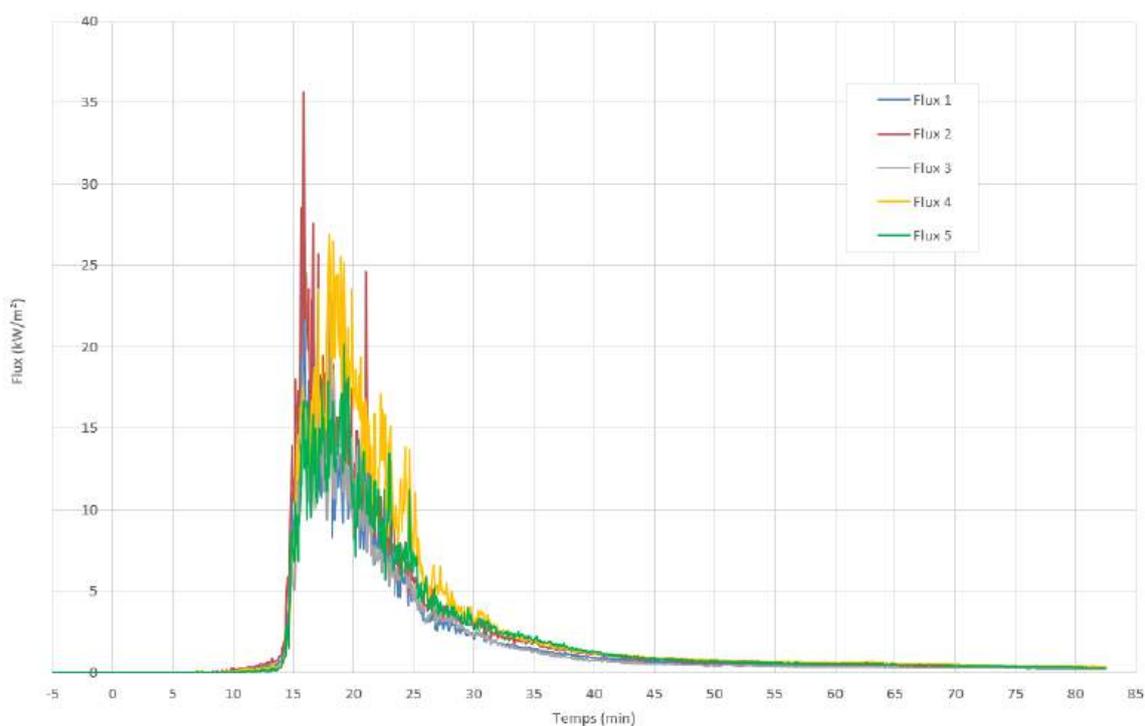


Figure 21 : flux radiatifs mesurés pendant le 1er essai (palox plastique)

Les flux radiatifs mesurés dépassent les 10 kW/m<sup>2</sup> pendant environ 8 min, et fleurissent avec les 25 kW/m<sup>2</sup> pendant 5 min, avec un pic ponctuel à 35,6 kW/m<sup>2</sup>. Le seuil des effets dominos (Seuil réglementaire à partir duquel les effets dominos doivent être étudiés) de 8 kW/m<sup>2</sup> est donc largement dépassé au niveau de ces fluxmètres, situé à 4 m du centre de la chambre d'essai.

#### 2.2.2.4 Emissions gazeuses

L'analyse des gaz réalisée en continu durant l'essai a permis d'établir le bilan présenté dans le Tableau 2 :

	masse mesurée (kg)	Facteur d'émission (g/kg)	volume de gaz (NL)
CO <sub>2</sub>	552.3	2370.4	281176
CO	7.3	31.2	5809
CH <sub>4</sub>	0.2	0.8	258
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2	0.7	135
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.2	1.0	196
Formaldéhyde	0.0	0.0	0
H <sub>2</sub>	0.1	0.3	750
NO	0.5	2.3	405
NO <sub>2</sub>	0.0	0.0	0
N <sub>2</sub> O	0.0	0.0	0
NH <sub>3</sub>	0.0	0.0	0
HCN	0.0	0.2	36
SO <sub>2</sub>	0.0	0.0	0
DMC	0.1	0.4	24
EMC	0.0	0.2	10
EC	0.1	0.3	15
HF	0.5	2.0	525
HCl	0.6	2.5	353
HBr	0.0	0.0	0
SiF <sub>4</sub>	0.0	0.0	2
POF <sub>3</sub>	0.0	0.0	1
Eau	260.4	1117.7	324 085
<b>TOTAL</b> (eau non comprise)			<b>289 695</b>

Tableau 2 : bilan des gaz libérés lors du 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

Les débits des différents gaz mesurés sont calculés à partir de leur concentration et du débit d'aspiration des fumées, et présentées dans les figures suivantes.

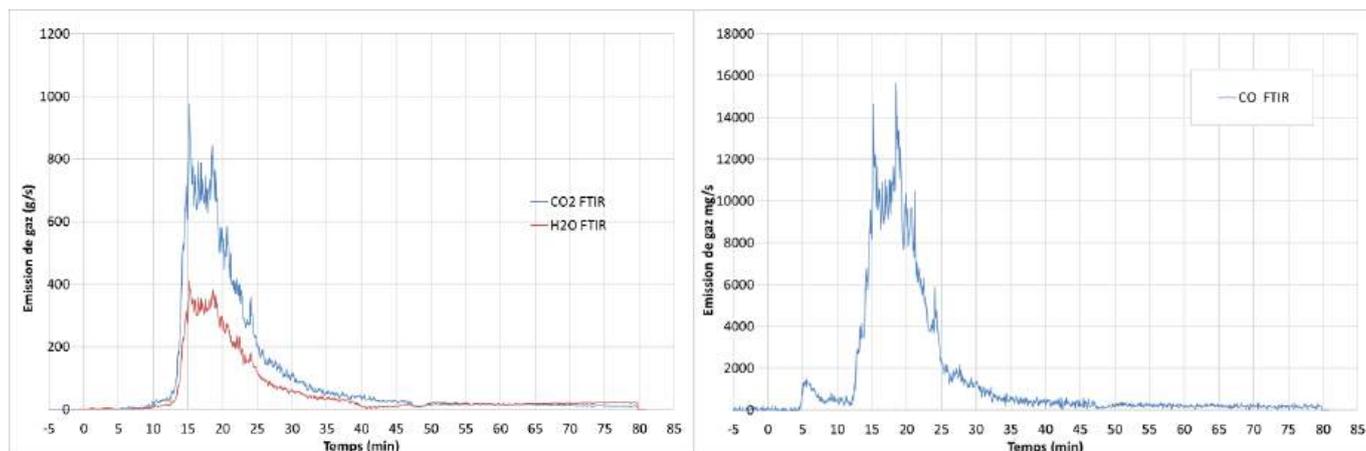


Figure 22 : débit massique du CO<sub>2</sub>, de l'H<sub>2</sub>O et du CO mesuré pendant le 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

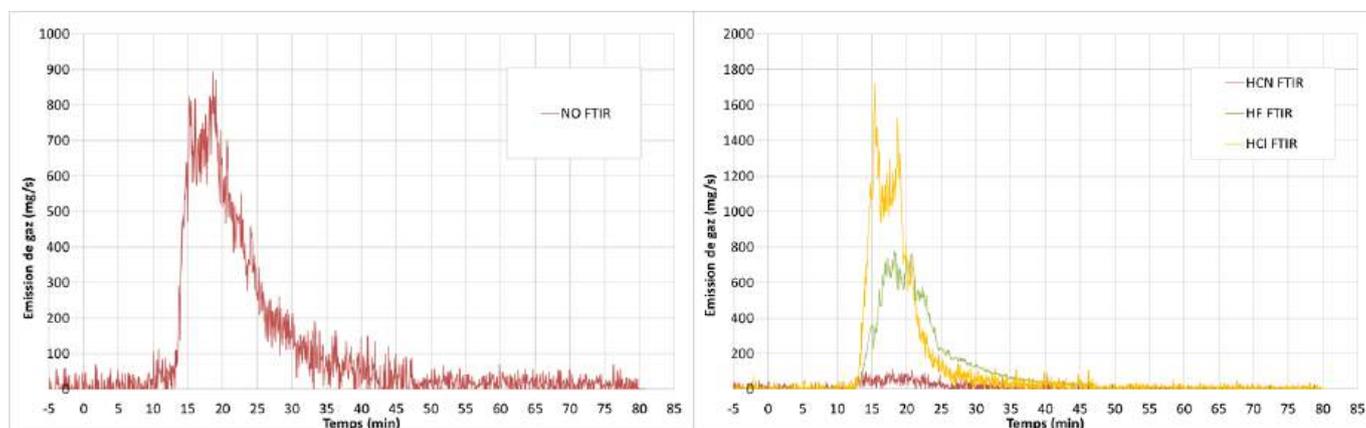


Figure 23 : débit massique du NO, et des acides (HCN, HF, HCl) pendant le 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

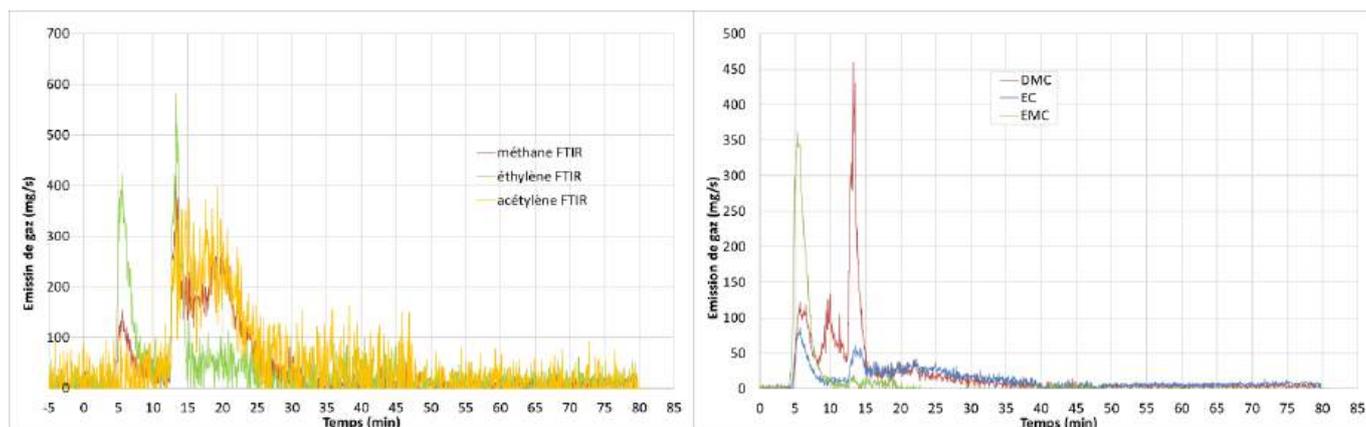


Figure 24 : débit massique des hydrocarbures (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) et des carbonates (DMC, EC et EMC) pendant le 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

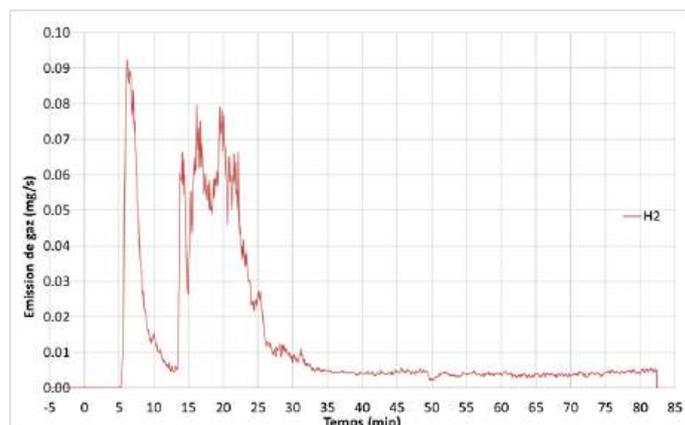


Figure 25 : débit massique de l'H<sub>2</sub> pendant le 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

Les émissions de carbonates (DMC, EC et EMC), produits typiquement libérés par les cellules Li-ion pendant leur dégazage, sont concentrées en début d'essai, lors de l'emballage thermique des premières batteries. Une fois les flammes apparues, les carbonates sont consommés au fur et à mesure de leurs émissions par combustion, et ne sont donc plus détectés dans le produit gazeux final.

Les hydrocarbures (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) et le dihydrogène apparaissent également dès le début de l'essai durant la phase fumigène. Ces gaz sont également typiquement libérés par les cellules Li-ion lors de leur dégazage. On retrouve également ces gaz lors de la phase de feu intense, mais leur débit n'augmente pas comparativement au début d'essai. Pourtant, le nombre de cellules Li-ion en emballage thermique est bien plus important durant cette phase : tout comme les carbonates, les hydrocarbures et le dihydrogène libérés lors de la phase intense du feu sont très majoritairement oxydés lié certainement aux températures élevées et sont donc transformés en produit de combustion.

Le feu ayant été intense et la combustion quasi complète, il est normal d'obtenir une grande quantité de CO<sub>2</sub> et d'eau, dont la génération augmente de façon concomitante à l'intensification du feu vers 14min30s, puis diminue ensuite progressivement avec la décroissance du feu.

Les émissions de NO, et de gaz acides (HCN, HCl, HF), produits finaux de combustions, sont également synchrones de la phase intense du feu. Le HCl n'est généralement pas présent lors de la combustion de cellule Li-ion seule : sa présence en quantité significative lors de cet essai peut s'expliquer non pas par la présence de cellules Li-ion, mais par la combustion des pièces entourant la batterie (plastique, électronique, ...). La présence de HF en quantité relativement importante ne peut être attribuée exclusivement à la présence de cellules Li-ion, même si elles y contribuent. Les différents constituants des batteries (enveloppes plastiques, cartes électroniques, ...) sont également susceptibles de libérer du HF en quantité non négligeable.

#### 2.2.2.5 Débit calorifique et énergie

Le débit calorifique (couramment appelé HRR pour « Heat Release Rate »), calculé selon la méthode CDG décrite au §2.1.4.6, est présenté sur le graphique de la Figure 26, accompagné de son intégral temporel renseignant sur l'énergie totale libérée depuis le début de l'essai.

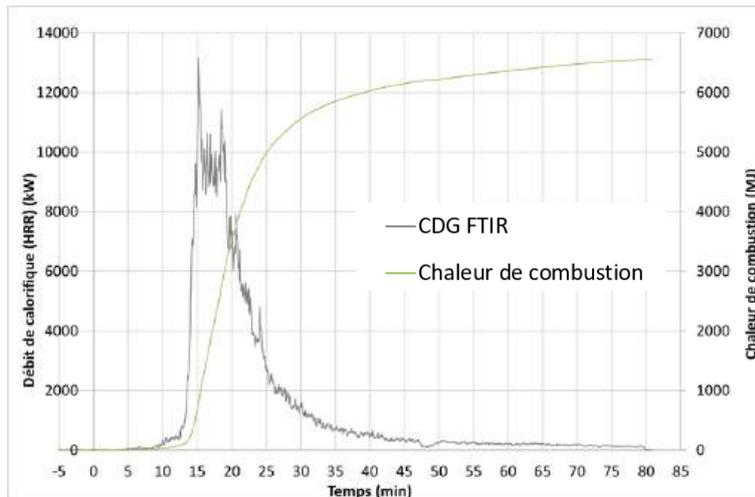


Figure 26 : débit calorifique et énergie libérés pendant le 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

Le débit calorifique reste d'abord très bas pendant la phase fumigène pour monter très rapidement à 13 MW pic lors de l'intensification du feu, puis se stabilise à environ 10 MW pendant 5 min.

La quantité totale de chaleur de combustion libérée pendant cet essai est de l'ordre de 6000 MJ.

#### 2.2.2.6 Perte de masse et chaleur de combustion

La perte de masse des combustibles durant l'essai est présentée dans la Figure 27.

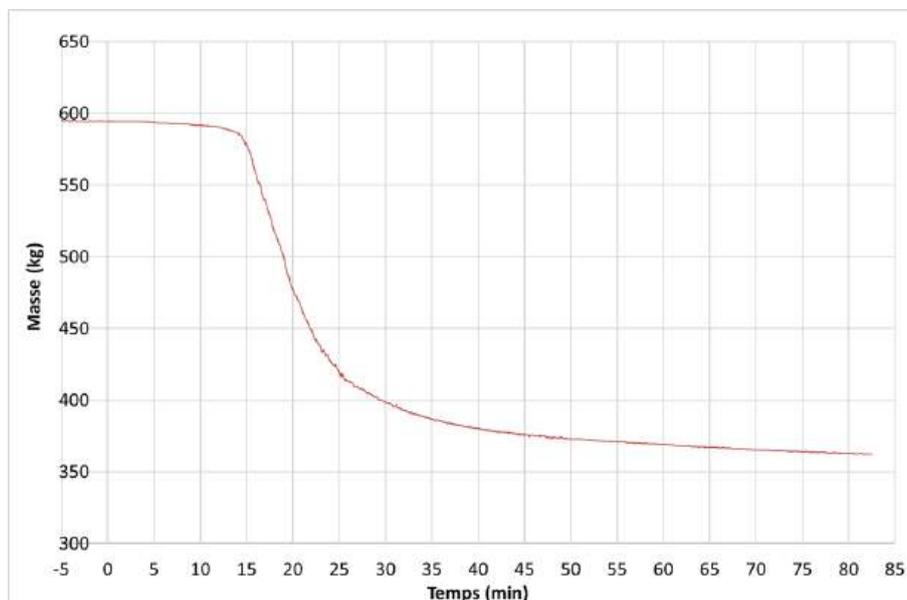


Figure 27 : perte de masse mesurée pendant le 1<sup>er</sup> essai (palox plastique)

L'ensemble des éléments (batteries usagées et palox plastique) sont ici combustibles. Leur masse initiale est de 595 kg. Cette masse diminue légèrement pendant la phase fumigène et le début de l'incendie, puis chute plus rapidement à partir de la 15<sup>e</sup> minute, lors de l'intensification du feu, pour arriver en fin d'essai à 362 kg. La perte de masse est de 233 kg, soit 39,2 % de la masse de combustible.

La chaleur de combustion se déduit du ratio énergie libérée sur la perte de masse. Elle atteint donc environ 26 MJ/kg perdu, caractéristique de la chaleur de combustion moyenne des principaux polymères (PVC, PE, PP, PUR)

La masse initiale de batteries usagées est d'environ 500 kg.

#### 2.2.2.7 Photo après essai

L'état des palox et de leur contenu après essai peut être observé sur la figure ci-dessous.



Figure 28 : photo des palox après essai

L'état de dégradation est très avancé, la combustion des palox et des batteries semble complète.

## 2.3 Essai 2 : contenant de type fût métallique

### 2.3.1 Configuration d'essai

L'objectif de ce second essai est d'observer si, lors de l'emballement thermique d'une batterie au sein d'un fût métallique, celui-ci peut mener à un incendie de l'ensemble des batteries du fût métallique, se propager aux batteries des fûts métalliques voisins, et de mesurer la dynamique de cette propagation, ainsi que les effets thermiques et les émissions gazeuses associées.

En complément des résultats du premier essai, ces données permettront une analyse comparative de la dynamique de propagation en fonction du type de contenant utilisé pour stocker les batteries usagées.

La configuration expérimentale mise en œuvre pour cet essai est illustrée sur la Figure 29. Afin de reproduire les conditions de stockage réelles, huit fûts métalliques, disposés en quatre palettes de deux fûts et formant un ensemble de deux étages de quatre fûts, sont disposés au centre de la chambre d'essai.

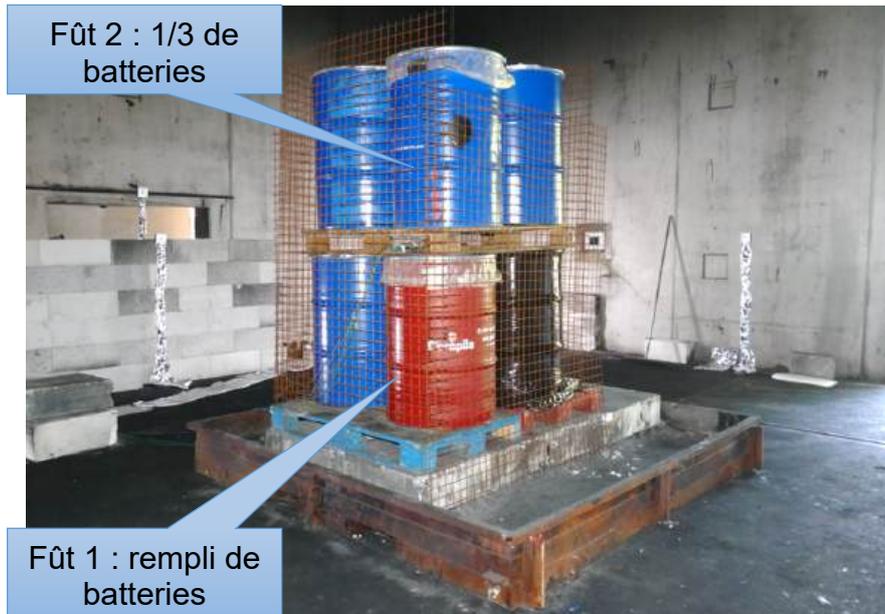


Figure 29: configuration de l'essai 2 : 4 palettes de deux fûts, réparties sur deux étages

Le fût rouge (fût 1) est rempli de batteries usagées (voir § 2.1.2), alors que celui juste au-dessus (fût 2) contient des batteries dans le 1/3 inférieur de son volume. Tous les autres fûts sont laissés vides.

Le fût 2 contient 3 thermocouples permettant de monitorer la température et le possible emballement thermique de ses batteries. La dénomination de ces thermocouples reprend celle établie au § 2.1.4.2, mais en ajoutant FUT2 :

- FUT2-0 : mesure de température au fond du fût 2,
- FUT2-1A et FUT2-1B : mesures de la température au 1<sup>er</sup> niveau, respectivement colonnes A et B (voir Figure 8).

Afin de ne pas impacter l'étanchéité des fûts, l'ensemble des câbles et thermocouples sortent par un tube métallique soudé au centre du couvercle, puis bouché avec une résine bi-composant supportant les hautes températures.



Figure 30: sortie des câbles et thermocouples étanches

L'ensemble des 8 fûts métalliques ont ensuite été entourés d'un treillis métallique afin d'éviter leur éventuelle chute pendant l'essai.

## 2.3.2 Résultats

### 2.3.2.1 Déroulement de l'essai

Le départ en emballement thermique d'une seule batterie a suffi à initier un feu généralisé. La propagation a ensuite été très lente, comme le montrent les principales étapes décrites dans le tableau ci-dessous. Elle a tout de même mené à la combustion complète de l'ensemble des batteries des deux fûts, avec un pic de puissance thermique au bout d'environ 40 min, suivie d'une lente décroissance durant les 20 minutes suivantes amenant à un feu résiduel qui s'est maintenu plus d'une heure.

#	t =	Description
1	0s	Lancement des enregistrements
2	40s	Début de l'agression thermique appliquée à la batterie instrumentée principale
3	4min	Début de l'emballement thermique de la batterie instrumentée principale (voir Figure 31), suivie d'une fumée sortant du fût 1 pendant 1min14s. 
4	20min 59s	Dégazages ponctuels limités, pendant 2min30s. Pas ou très peu de fumée visible.

5	22min 24s	<p>Le dégazage de fumée en dehors du fût s'intensifie (avec quelques phases de décroissance), accompagné de bruits sourds laissant penser à de petites explosions dans le fût.</p> 
6	28min 03s	<p>Soulèvement du couvercle du fût rempli de batterie par surpression interne. La fumée continue de sortir, plus épaisse.</p> 
7	32min 50s	<p>Intensification soudaine du dégazage</p> 

8	32min 52s	<p>Inflammation de la fumée présente dans la pièce.</p>  <p>Début de combustion des gaz sortant du fût.</p> 
9	35min 13s	<p>Percement du fût rempli de batteries sous l'effet de la chaleur. Réaction probable du fût 2</p> 

10	39min 35s	<p>L'intensité du feu semble être maximale.</p> 
11	65min	<p>Décroissance du feu déjà marquée, qui continue de diminuer en intensité.</p> 

## 2.3.2.2 Evolution des températures

### 2.3.2.2.1 Fût 1 niveau 1

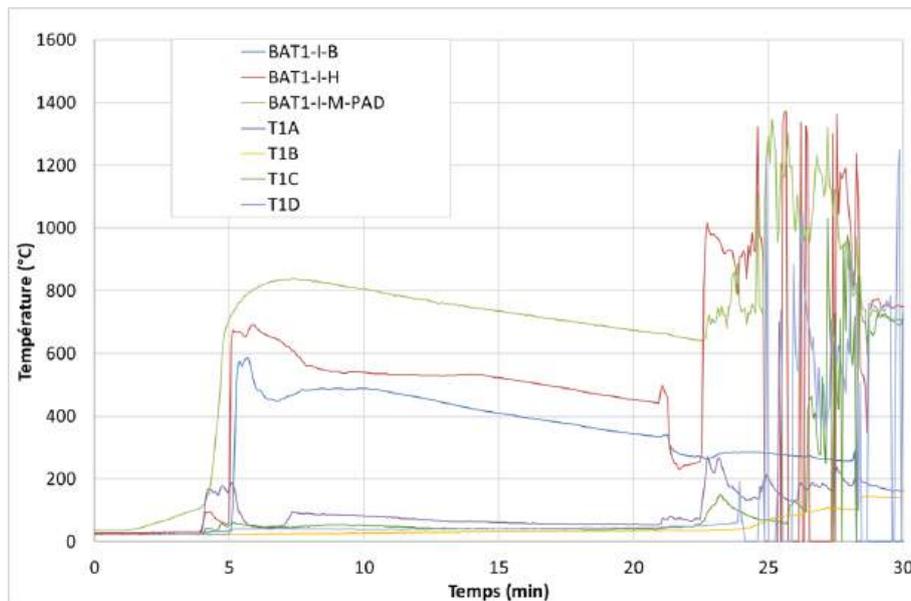


Figure 31: évolution des températures sur le niveau 1 du fût 1 en début d'essai

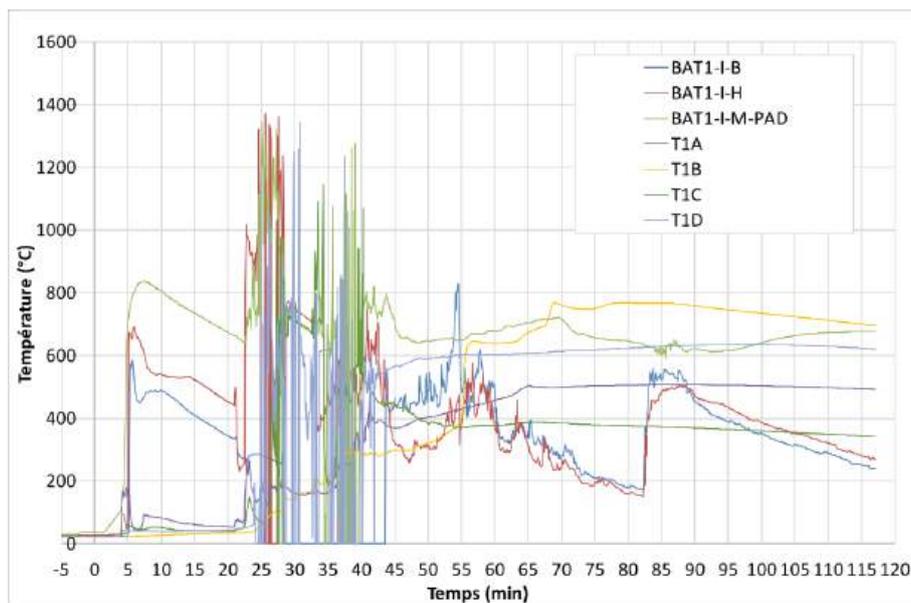


Figure 32: évolution des températures sur le niveau 1 du fût 1 tout au long de l'essai

Nota : plusieurs thermocouples présentent des variations aberrantes (non physiques) à partir d'environ  $t=24$  min, non prises en compte dans l'analyse des événements.

La chauffe puis le démarrage en emballement thermique de la batterie instrumentée principale à 4min35s sont facilement identifiables sur la Figure 31. La montée en température suivante arrive vers 23 min au niveau de la colonne A (et de la batterie instrumentée principale), puis deux minutes plus tard sur la colonne D. La colonne C monte en température 1 min après, vers  $t=25$  min. Ces montées en températures coïncident avec les dégazages successifs observés sur la vidéo (§ 2.3.2.1, étapes 4 et 5).

Les températures de ce 1<sup>er</sup> niveau atteignent un maximum d'environ 800 °C avant de se stabiliser durablement autour de 650 °C.

### 2.3.2.2.2 Fût 1 niveau 2

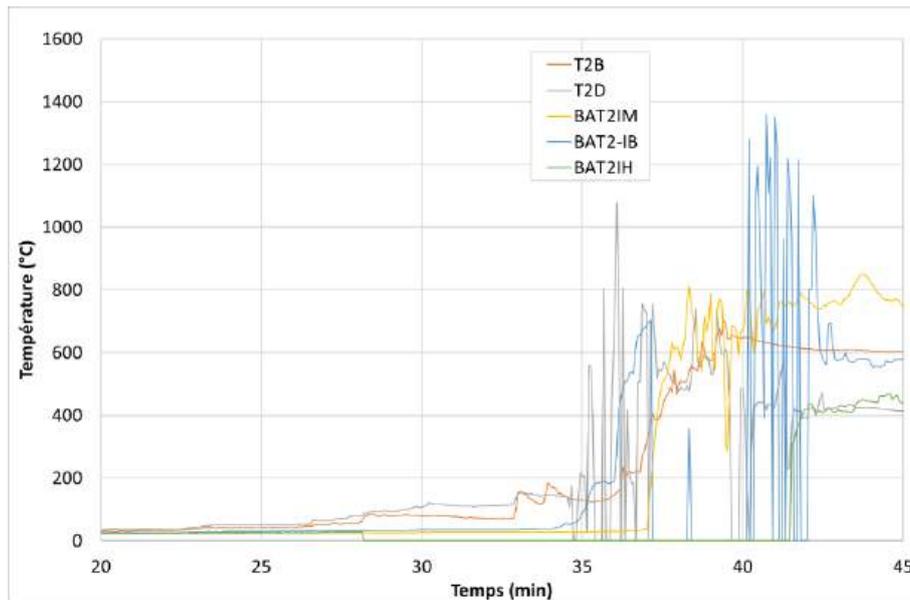


Figure 33: évolution des températures sur le niveau 2 du Fût 1 en début d'essai (intervalle de temps [20min ; 45min])

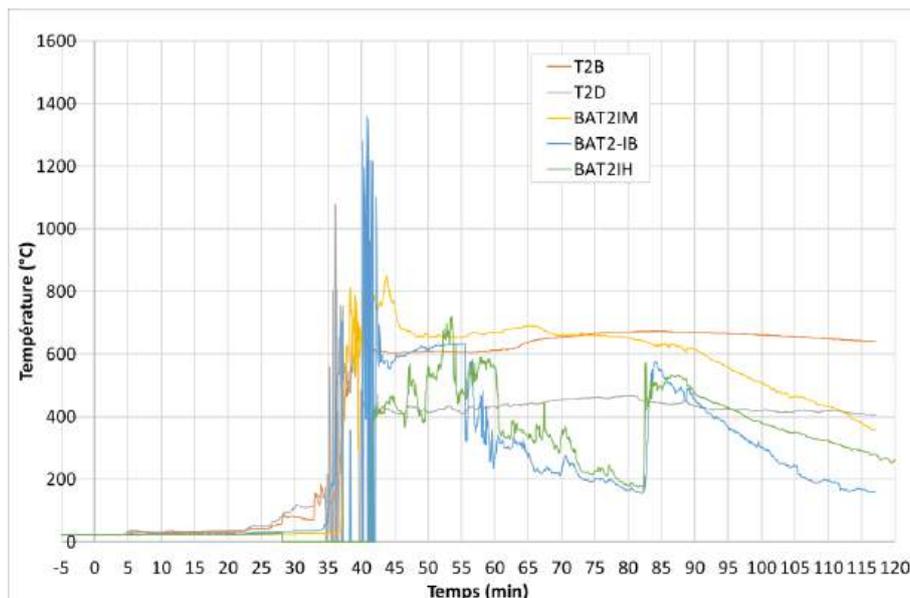


Figure 34: évolution des températures sur le niveau 2 du Fût 1 tout au long de l'essai

Nota : les thermocouples BAT2IH, T2D et BAT2-IB présentent des variations aberrantes (non physiques) à partir de  $t=28$  min,  $t=34$  min et  $t=37$  min respectivement, non prises en compte dans l'analyse des événements.

Les températures mesurées sur ce 2<sup>nd</sup> niveau augmentent progressivement et restent sous 200°C jusqu'à  $t=36$  min, instant auquel BAT2-IB passe très rapidement à plus de 600°C, suivie par BAT2IM et T2B dans les deux minutes suivantes. Ces instants correspondent à l'apparition des flammes autour des fûts (§ 2.3.2.1, étapes 9 et 10), faisant monter les températures et provoquant le départ en emballement thermique d'autres batteries.

### 2.3.2.2.3 Fût 1 niveau 3

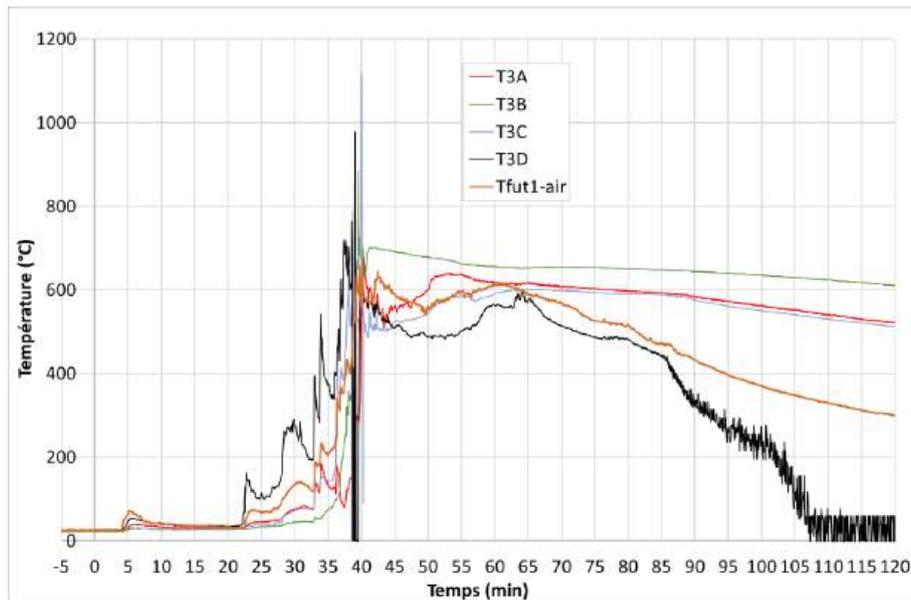


Figure 35: évolution des températures sur le niveau 3 du Fût 1 et de son ciel gazeux tout au long de l'essai

Les températures relevées à ce 3<sup>e</sup> niveau restent sous 200°C jusqu'à  $t=28$  min, coïncidant avec le soulèvement du couvercle du fût par surpression (§2.3.2.1, étape 6). Elles connaissent ensuite une augmentation rapide à partir de  $t=33$  min, d'abord sur T3D puis sur toutes les autres mesures dans les 5 minutes suivantes. Comme pour le niveau 2, ces instants correspondent à l'apparition des flammes autour des fûts (§ 2.3.2.1, étapes 9 et 10), faisant monter les températures et provoquant le départ en emballement thermique d'autres batteries.

Les températures maximales atteignent environ 700 °C vers  $t=40$  min pour décroître progressivement ensuite.

### 2.3.2.2.4 Fût 2 (haut)

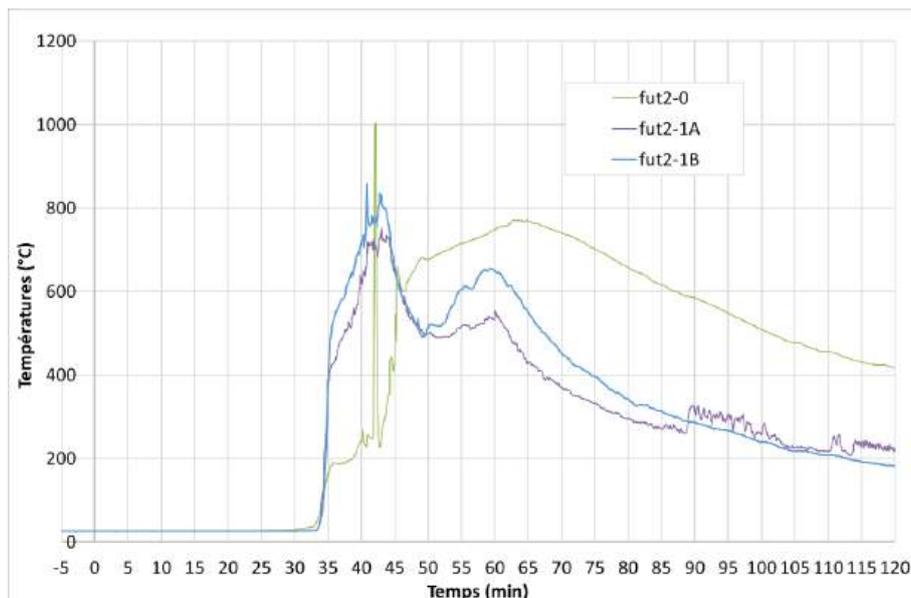


Figure 36: évolution des températures dans le Fût 2 (fût du dessus) tout au long de l'essai

Les températures à l'intérieur de ce fût supérieur commencent à monter sensiblement vers t=33 min, c'est-à-dire au moment de l'apparition des premières flammes (§ 2.3.2.1, étape 8). A partir de cet instant, certaines batteries de ce fût semblent être parties rapidement en emballement thermique, car les températures augmentent de 200 °C à 500 °C en moins d'une minute.

Les températures de ce fût 2 atteignent un maximum d'environ 800 °C vers t=40 min, instant auquel le feu semble atteindre son maximum d'intensité (§2.3.2.1, étape 10).

### 2.3.2.3 Evolution des flux radiatifs

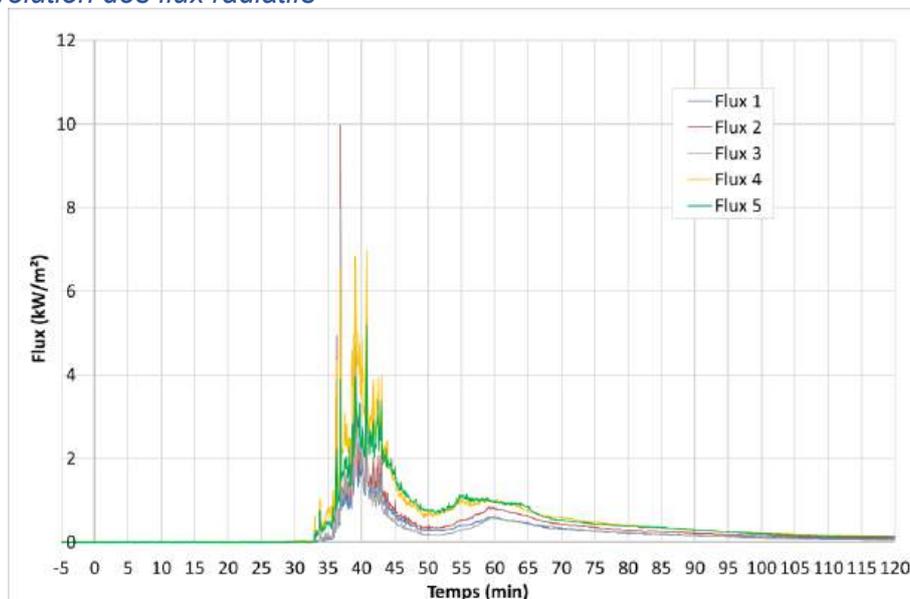


Figure 37 : flux radiatifs mesurés pendant le 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

Les flux radiatifs mesurés restent modérés et dépassent les 2 kW/m<sup>2</sup> pendant environ 7 min, s'approchent des 5 kW/m<sup>2</sup> pendant 4 min, avec un pic ponctuel à 10 kW/m<sup>2</sup>. Bien que supérieur au seuil des effets domino de 8 kW/m<sup>2</sup>, ce pic est toutefois extrêmement bref (< 1s), ce qui n'est généralement pas suffisant pour propager l'incendie aux corps combustibles environnants situés à une distance similaire de celle des fluxmètres.

### 2.3.2.4 Emissions gazeuses

L'analyse des gaz réalisée en continu durant l'essai a permis d'établir le bilan présenté dans le Tableau 3 :

	masse mesurée (kg)	Facteur d'émission (g/kg perdu)	volume de gaz (NL)
CO <sub>2</sub>	186.4	1566.4	94897
CO	5.9	49.3	4697
CH <sub>4</sub>	0.4	3.4	559
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2	1.5	143
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.1	0.5	56
Formaldéhyde	0.0	0.0	0
H <sub>2</sub>	0.1	1.2	1599
NO	0.2	1.7	148

	masse mesurée (kg)	Facteur d'émission (g/kg perdu)	volume de gaz (NL)
NO <sub>2</sub>	0.0	0.0	0
N <sub>2</sub> O	0.0	0.0	0
NH <sub>3</sub>	0.0	0.0	0
HCN	0.0	0.2	24
SO <sub>2</sub>	0.0	0.0	0
DMC	0.6	5.4	159
EMC	0.2	1.9	48
EC	0.0	0.3	10
HF	0.0	0.4	49
HCl	0.2	1.8	133
HBr	0.0	0.0	0
SiF <sub>4</sub>	0.0	0.3	7
POF <sub>3</sub>	0.0	0.0	0
Eau	76.6	643.6	95 304
<b>TOTAL</b> (eau non comprise)			<b>102 528</b>

Tableau 3 : bilan des gaz libérés lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

Les débits des différents gaz mesurés sont calculés à partir de leur concentration et du débit d'aspiration des fumées, et présentées dans les figures suivantes.

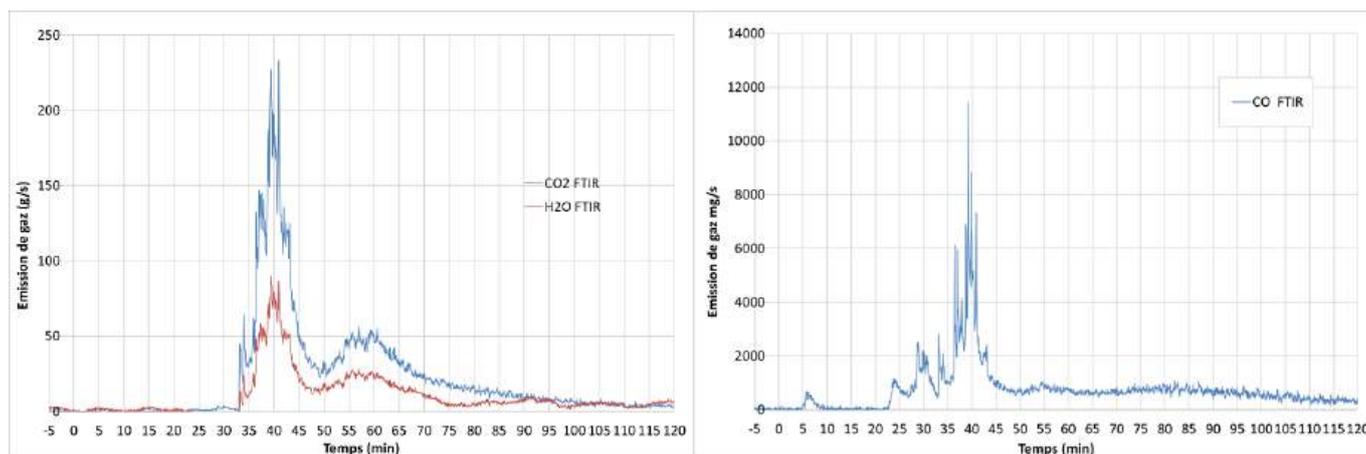


Figure 38 : débit massique du CO<sub>2</sub>, de l'H<sub>2</sub>O et du CO mesuré lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

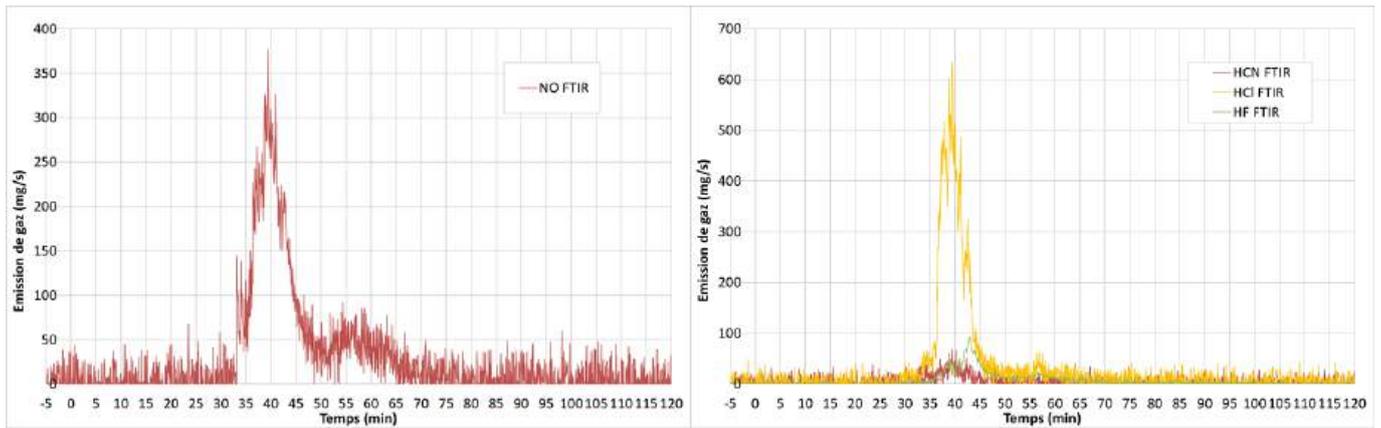


Figure 39 : débit massique du NO, et des acides (HCN, HF, HCl) lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

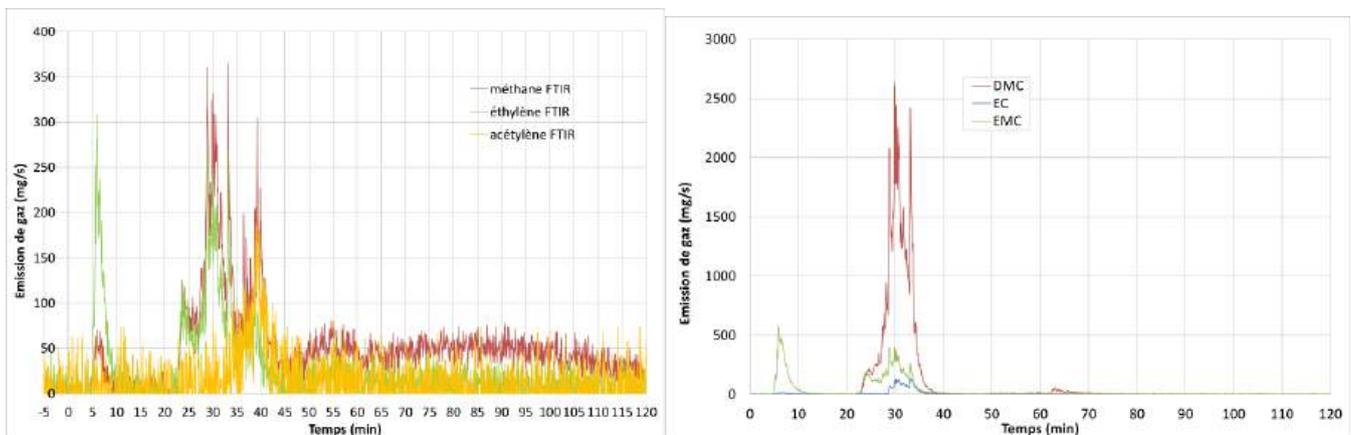


Figure 40 : débit massique des hydrocarbures ( $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ) et des carbonates (DMC, EC et EMC) lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

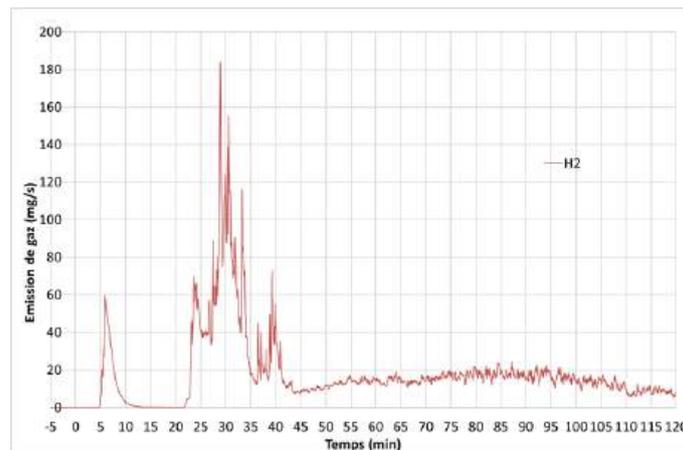


Figure 41 : débit massique de l' $H_2$  lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

Les émissions de carbonates (DMC, EC et EMC), produits typiquement libérés par les cellules Li-ion pendant leur dégazage, sont concentrées durant les phases fumigènes : en début d'essai, lors de l'emballage thermique de la première batterie et les premières fumées visibles (§ 2.3.2.1, étape 3), puis lors de la reprise des dégazages et avant inflammation des fumées (§ 2.3.2.1, étapes 4 à 7). Une fois les flammes apparues, les carbonates réagissent sous l'effets de la chaleur au fur et à mesure de leurs émissions par combustion, et ne sont donc plus visibles dans le produit gazeux final.

Les hydrocarbures ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ) et le dihydrogène apparaissent également durant les deux phases fumigènes de cet essai. Ces gaz sont également typiquement libérés par les cellules Li-ion lors de leur dégazage. On retrouve également ces gaz lors de la phase de feu, mais leur débit est plus réduit que lors de la phase fumigène (minutes 23 à 33). Pourtant, le nombre de cellules Li-ion en emballage thermique est bien plus important durant cette phase : tout comme les carbonates, les hydrocarbures et le dihydrogène libérés lors de la phase du feu sont très majoritairement oxydés et sont donc transformés en produit de combustion.

Le feu gagnant ensuite en intensité, la combustion devient alors quasi complète, il est normal d'obtenir une grande quantité de  $\text{CO}_2$  et d'eau, dont la génération augmente de façon concomitante à l'intensification du feu vers 33 min, puis diminue ensuite progressivement avec la décroissance du feu.

Les émissions de NO, et de gaz acides (HCN, HCl, HF) sont également synchrones de la phase intense du feu, de la 35<sup>e</sup> à la 45<sup>e</sup> minute. Le HCl n'est généralement pas présent lors de la combustion de cellule Li-ion seule : sa présence en quantité significative lors de cet essai s'explique non pas par la présence de cellules Li-ion, mais par la combustion des pièces entourant la batterie (plastique, électronique, ...). La présence de HF ne peut être attribuée exclusivement à la présence de cellules Li-ion, même si elles y contribuent. Les différents constituants des batteries (enveloppes plastiques, cartes électroniques, ...) sont également susceptibles de libérer du HF.

Le profil des émissions gazeuses est donc très similaire à celui du 1<sup>er</sup> essai. La principale différence réside dans une phase fumigène plus longue, suivie d'une phase de feu moins intense et moins longue.

### 2.3.2.5 Débit calorifique et énergie

Le débit calorifique (couramment appelé HRR pour « Heat Release Rate »), calculé selon la méthode CDG décrite au § 2.1.4.6, est présenté sur le graphique de la Figure 42, accompagné de son intégral temporel renseignant sur l'énergie totale libérée depuis le début de l'essai.

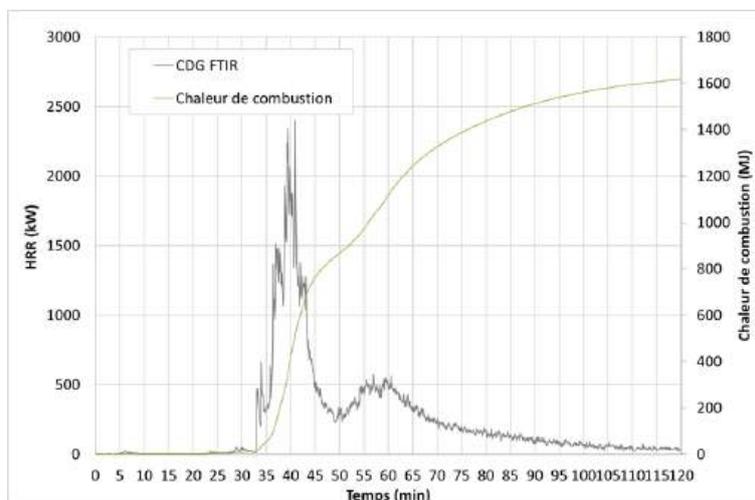


Figure 42 : débit calorifique et énergie libérés lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

Le débit calorifique reste d'abord très bas pendant la phase fumigène pour monter par palier à 0,5 kW, puis 1,3 kW, puis 2 kW. Ces 3 niveaux correspondent respectivement à l'apparition des flammes, le percement du fût 1 et l'intensification du feu.

La quantité totale d'énergie libérée pendant cet essai est de l'ordre de 1500 MJ.

### 2.3.2.6 Perte de masse et chaleur de combustion

La perte de masse des combustibles (palettes et batteries) durant l'essai est présentée dans la Figure 43.

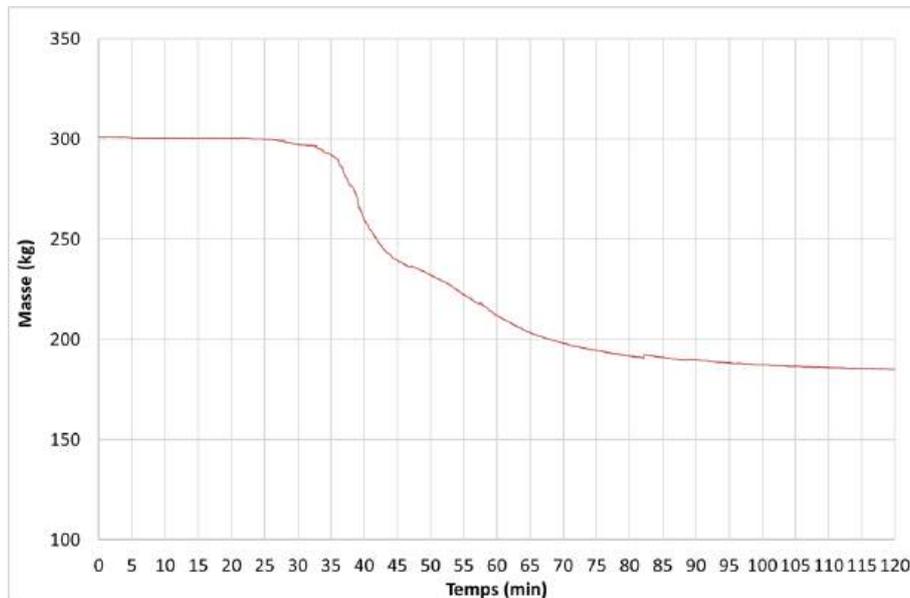


Figure 43 : perte de masse mesurée lors du 2<sup>e</sup> essai (fûts métalliques)

La masse initiale totale de combustibles (302 kg) ne diminue que très légèrement pendant la phase fumigène, puis chute plus rapidement à partir de la 36<sup>e</sup> minute, lors de l'intensification du feu, pour arriver en fin d'essai à 183 kg. La perte de masse est de 119 kg, soit 39,4 % de la masse de combustible.

On en déduit une chaleur de combustion de 12,7 MJ/kg perdu ce qui est relativement faible, comparé par exemples à celle des produits cellulosiques qui est de 18 MJ/kg.

La masse initiale de batteries usagées (hors fûts et palettes) est d'environ 220 kg.

### 2.3.2.7 Photo après essai

L'état des fûts et de leur contenu après essai peut être observé sur la figure ci-dessous.



Figure 44 : photo des fûts après essai (gauche : vue globale, centre : fût initialement rempli de batteries, droite : fût vide)

La combustion des palettes est complète. Le couvercle du fût vide est bombé, provoqué par la montée en pression interne consécutive à son échauffement. Un autre fût vide avait son couvercle partiellement ouvert (le collier de serrage ayant lâché). Le fût initialement rempli de batterie, bien que percé sur son flanc, garde globalement son intégrité mécanique.

## 2.4 Essai 3 : contenant de type fût métallique avec sprinklage

### 2.4.1 Configuration d'essai

L'objectif de ce 3<sup>e</sup> essai est d'estimer l'impact du sprinklage sur la dynamique de propagation de l'incendie, ainsi que sur les effets thermiques et les émissions gazeuses associées.

La configuration expérimentale mise en œuvre pour cet essai est illustrée sur la Figure 45. Afin de reproduire les conditions de stockage réelles, 32 fûts métalliques, disposés en huit palettes de quatre fûts et formant un ensemble de deux étages de seize fûts, sont disposés au centre de la chambre d'essai. Ceci permet de reproduire l'aspect confiné du fût rempli de batterie à partir duquel l'incendie démarre, en limitant le passage de l'eau de sprinklage jusqu'à ce fût.



Figure 45: configuration de l'essai 3 : 8 palettes de quatre fûts, réparties sur deux étages

Sur l'étage inférieur, un fût (appelé « fût bas » ci-après) est rempli de batteries usagées (voir § 2.1.2), alors que celui juste au-dessus (dénommé « fût haut » dans la suite) contient des batteries dans le 1/3 inférieur de son volume. Tous les autres fûts sont laissés vides.

La position des fûts contenant des batteries (Figure 46) a été choisie pour reproduire les conditions les moins favorables pour l'extinction par sprinklage (le fût bas est entouré dans toutes les directions par d'autres fûts).

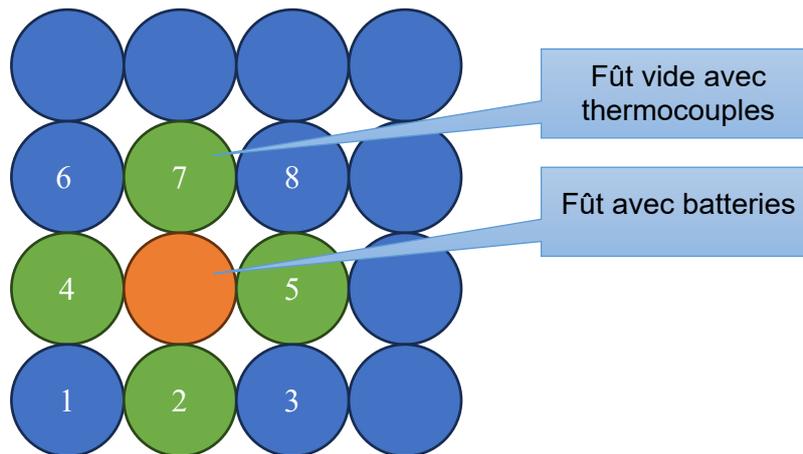


Figure 46: configuration de l'essai 3 : position des fûts avec batterie (vue de dessus)

Le fût haut contient 5 thermocouples permettant de monitorer la température et le possible emballement thermique de ses batteries. La dénomination de ces thermocouples reprend celle établie au § 2.1.4.2 (colonne/niveau), mais en ajoutant FUThaut :

- FUThaut\_T0A et FUTbas\_T0C : mesure de température au fond du fût haut, respectivement colonnes A et C (voir Figure 8),
- FUThaut-1B et FUThaut-1D : mesures de la température au 1<sup>er</sup> niveau, respectivement colonnes B et D (voir Figure 8),
- FUThaut\_air : température du ciel gazeux dans ce fût haut.

Deux thermocouples additionnels ont également été positionnés dans chacun des fûts vides les plus proches des fûts avec batteries, sur les deux étages de fûts (Figure 46, fûts vert n°2, 3, 4 et 7). Ils sont désignés par vide\_E\_Tpf\_pTC}, avec :

- E : étage du fût, prenant les valeurs « haut » ou « bas »,
- pf : position du fût, identifié par le numéro du fût tel que représenté en Figure 46, prenant les valeurs 2, 3, 4 ou 7,
- pTC : position du thermocouple dans le fût, soit contre la paroi au plus proche du fût avec batterie (suffixe « par »), soit dans l'air au centre du fût (suffixe « air »).

Afin de ne pas impacter l'étanchéité des fûts, l'ensemble des câbles et thermocouples sortent par un tube métallique soudé au centre du couvercle, puis bouché avec une résine bi-composant supportant les hautes températures.

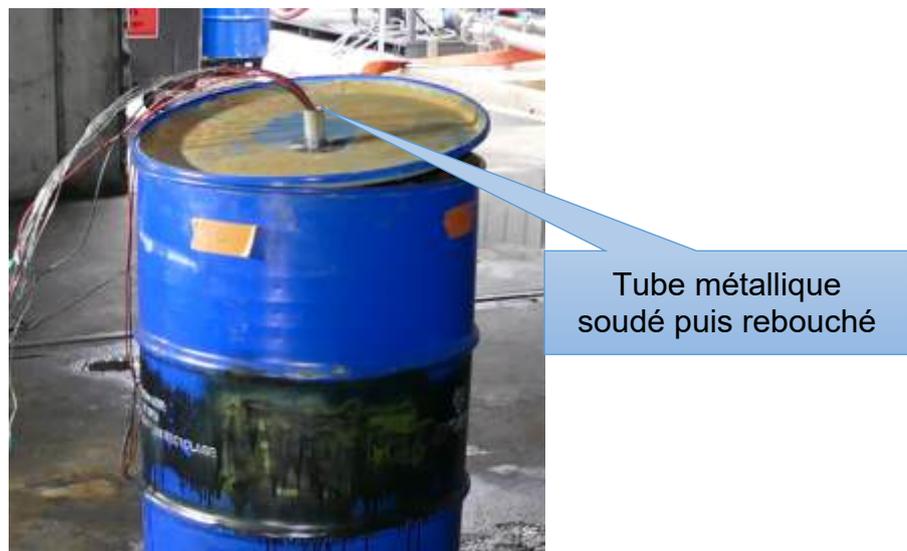


Figure 47: sortie des câbles et thermocouples étanches

L'ensemble des 8 fûts métalliques de l'étage supérieur a ensuite été entouré d'une chaîne afin d'éviter l'éventuelle chute des fûts pendant l'essai.

Lors de cet essai, un système de sprinklage a été ajouté dans la chambre d'essai. Ce système a été dimensionné pour obtenir un taux d'application<sup>3</sup> de 12,5 l/m<sup>2</sup>/min. Il est composé de quatre têtes de sprinklage formant un carré de 3 m de côté, placé à une hauteur au sol de 6 m Figure 48.

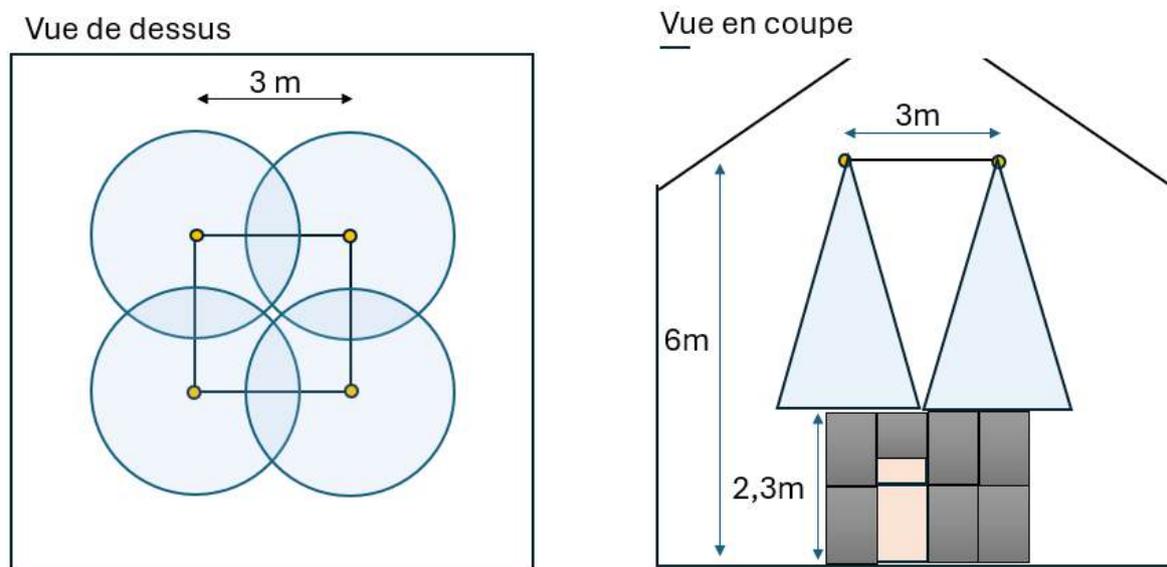


Figure 48: schématisation du système de sprinklage installé lors du 3<sup>e</sup> essai

## 2.4.2 Résultats

### 2.4.2.1 Déroulement de l'essai

Le départ en emballement thermique de la batterie instrumentée n'a pas suffi à initier un feu généralisé. Au bout de 46 minutes, la seconde batterie instrumentée a été chauffée puis est partie en emballement thermique. Malgré ceci, l'emballement thermique ne s'est pas propagé à l'ensemble des batteries de ce fût, ni à celles du fût de l'étage supérieur. Une partie de la palette se trouvant entre les deux fûts contenant des batteries s'est enflammée au bout d'1h50min, entraînant des flammes visibles pendant environ 25 min.

Le sprinklage n'a donc malheureusement pas pu être testé (il n'a pas été déclenché).

#	t =	Description
1	0s	Lancement des enregistrements
2	1s	Début de l'agression thermique appliquée à la batterie instrumentée principale
3	4min 10s	Début de l'emballement thermique de la batterie instrumentée principale (voir Figure 49), suivie d'un bruit de dégazage pendant près de 2 minutes.
4	40min	Quelques bruits sourds entendus pendant 3 minutes, laissant penser à un éclatement de cellules Li-ion par surpression interne
5	46min 10s	Début de l'agression thermique appliquée à la 2 <sup>e</sup> batterie instrumentée.
6	50min 21s	Début de l'emballement thermique de la 2 <sup>e</sup> batterie instrumentée (voir Figure 49), suivie d'une légère fumée grise sortant du fût et d'un bruit de souffle pendant 50s : le fût bas monte en pression interne et la libère progressivement.

<sup>3</sup> Conformément aux exigences de l'APSAD R1, Risque Très Dangereux de type B4, pour une hauteur de stockage de 2,3 m

7	51min 05s	<p>Libération soudaine de la pression interne du fût bas, et apparition ponctuelle de fumée grise plus importante, qui s'estompe rapidement.</p>  <p>On peut supposer que le couvercle du fût s'est ouvert à cause d'une pression interne trop importante. A partir de cet instant, une légère fumée peut être devinée sur la vidéo, s'échappant au-dessus des fûts.</p>
8	65min 50s	<p>Bruits sourds accompagnés de l'apparition de fumée plus dense sur le dessus des fûts : de nouvelles cellules Li-ion sont parties en emballement thermique.</p> 
9	68min 53s	<p>Nouvelle série de bruits sourds accompagnés d'une légère intensification des fumées : de nouvelles cellules Li-ion sont parties en emballement thermique.</p>
10	80min 59s	<p>Bruits sourds accompagnés d'une intensification des fumées pendant une 30<sup>aine</sup> de secondes : de nouvelles cellules Li-ion sont parties en emballement thermique.</p> 

11	91min à 98min	<p>Poursuite des explosions associées à des dégazages ponctuels, phénomènes de plus en plus rapprochés, laissant penser à une propagation plus marquée de l'emballement thermique au sein du fût bas.</p> 
12	109min 12s	<p>Inflammation des gaz, puis maintien des flammes par combustion de la palette en bois. Les dégazages des batteries suivant s'enflamment à leur sortie du fût bas, laissant apparaître ponctuellement des flammes au-dessus des fûts.</p> 
13	122min 10s puis 125min 42s puis 129min 11s	<p>Bruit de souffle pendant environ 1 à 2 min, associé à une très légère intensification des flammes, laissant penser à des dégazages successifs de cellules Li-ion (inflammation des fumées sortant du fût sous pression).</p>
14	134min 50s	<p>Fin de la combustion de la palette. Une légère fumée continue à être visible au-dessus des fûts.</p>
15	229min Puis 236min	<p>Nouvelle intensification des fumées libérées et bruits sourds : des cellules Li-ion entrent en emballement thermique plus d'une heure après les derniers événements constatés.</p>

## 2.4.2.2 Evolution des températures

### 2.4.2.2.1 Fût bas niveau 1

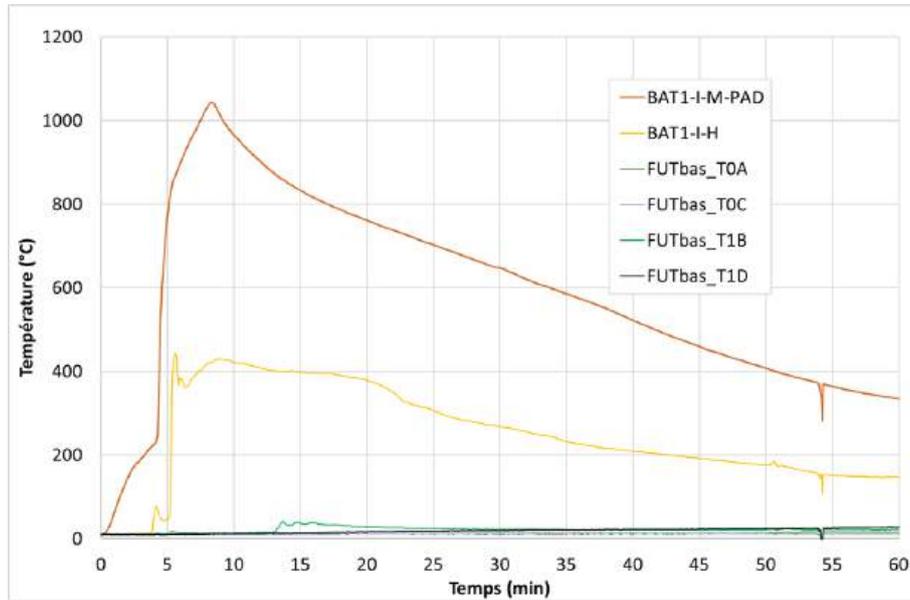


Figure 49: évolution des températures sur le niveau 1 du fût bas en début d'essai

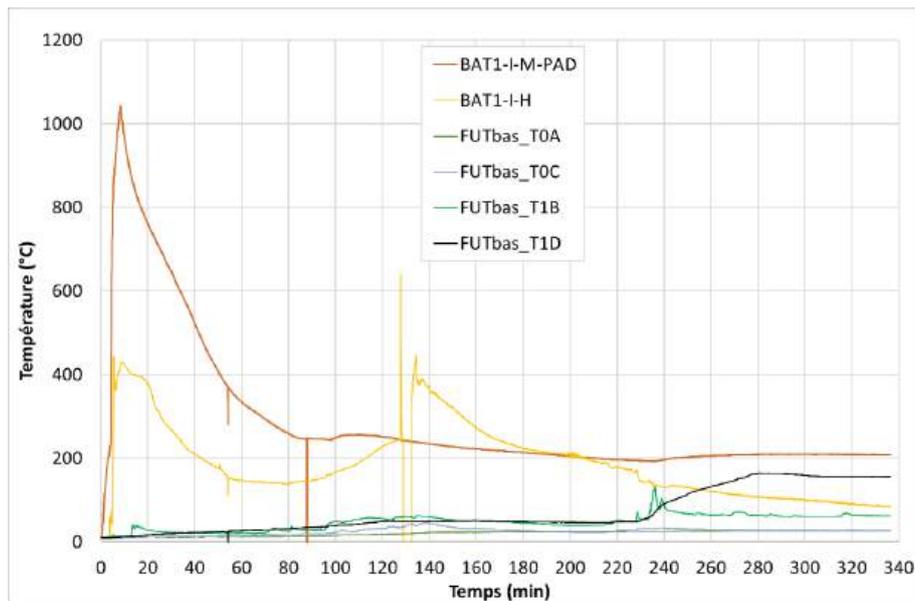


Figure 50: évolution des températures sur le niveau 1 du fût bas tout au long de l'essai

La chauffe puis le démarrage en emballement thermique de la batterie instrumentée principale à 4min10s sont facilement identifiables sur la Figure 49. Jusqu'à la 50<sup>e</sup> minute, aucun autre évènement notable n'est apparu au niveau 0 et 1 du fût bas.

La montée en température suivante arrive vers 128 min, c'est-à-dire durant les phases de légère intensification des flammes (§ 2.4.2.1, étape 13) : BAT1-I-H est la seule température à augmenter durant cette phase.

#### 2.4.2.2.2 Fût bas niveau 2 et 3

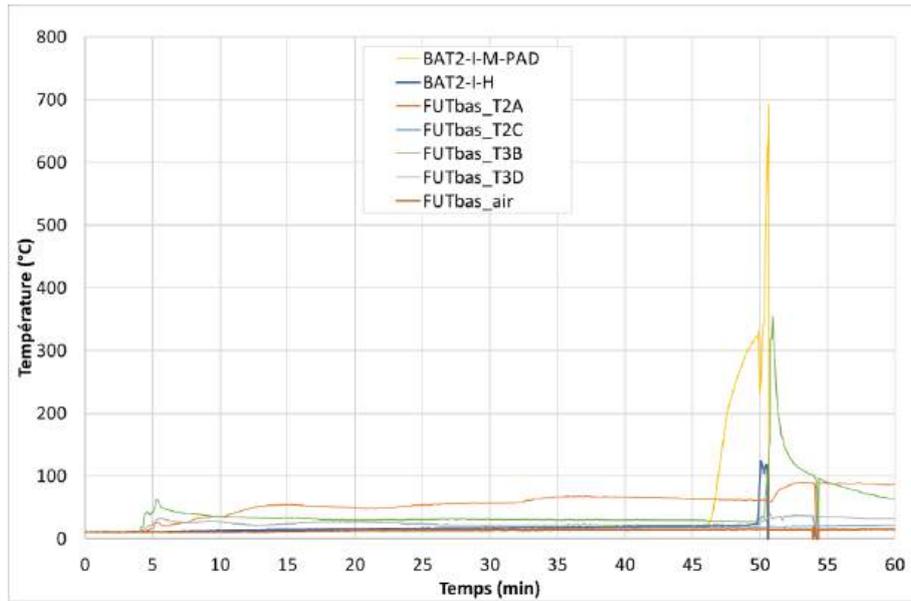


Figure 51: évolution des températures sur les niveaux 2 et 3 du Fût bas en début d'essai

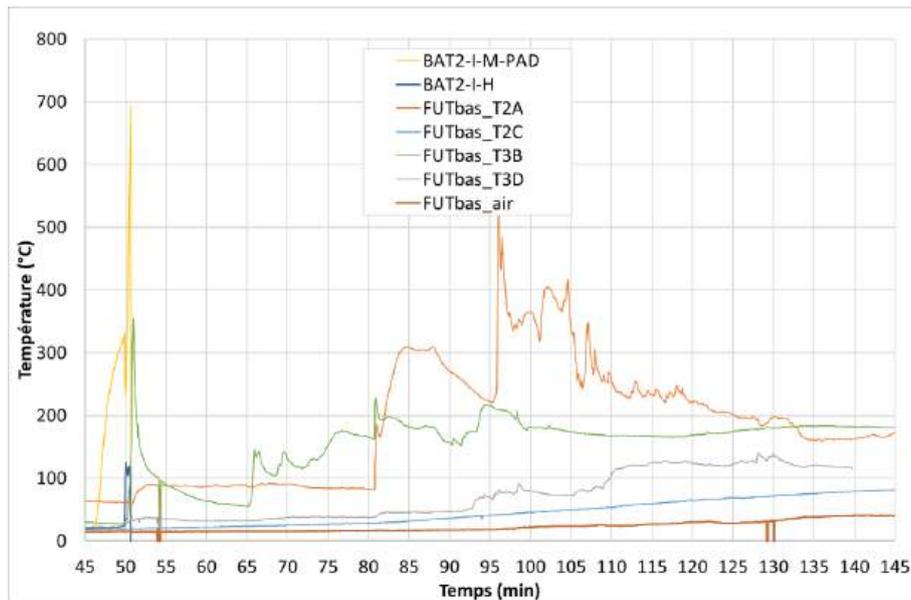


Figure 52: évolution des températures sur les niveaux 2 et 3 du Fût bas après le départ de la 2<sup>e</sup> batterie instrumentée en emballage thermique

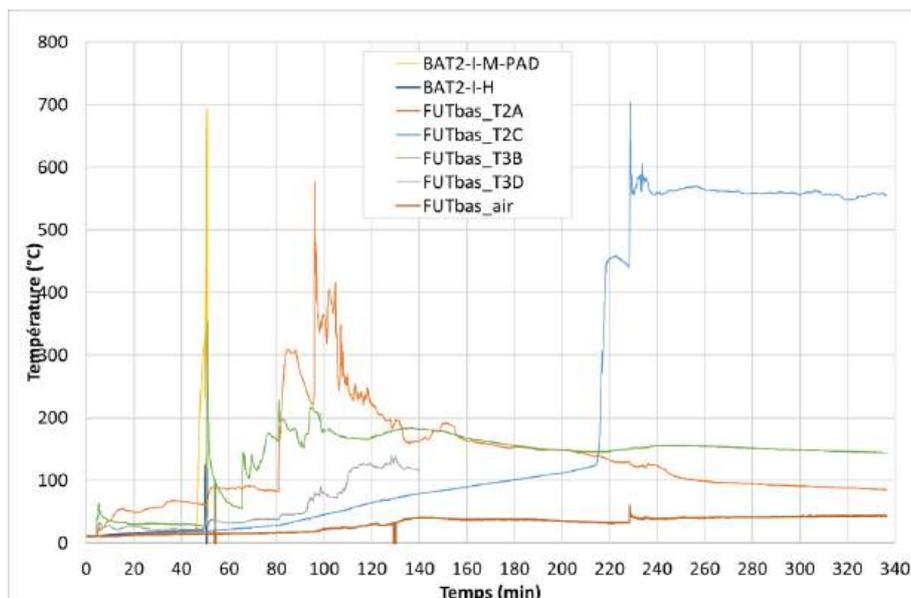


Figure 53: évolution des températures sur les niveaux 2 et 3 du Fût bas tout au long de l'essai

Les températures mesurées sur le 2<sup>nd</sup> niveau restent très modérées (inférieures à 80 °C) pendant les 45 premières minutes : le départ en emballement thermique de la batterie instrumentée principale n'a pas permis la propagation à d'autres batteries de ce niveau 2.

La 2<sup>e</sup> batterie instrumentée (se trouvant au niveau 2) a été chauffée puis est partie en emballement thermique à 50min21s (thermocouple BAT2-I-M). Ce nouveau stimulus a provoqué l'emballement thermique d'autres batteries à proximité, comme le montrent les montées en températures successives observées sur T3B à 51min et 65min50s, et sur T2A à 80min50s et 96min (§2.4.2.1, étapes 8 à 11).

Les températures diminuent ensuite progressivement, à l'exception de T2C qui augmente progressivement et détecte l'emballement thermique d'une batterie bien plus tardivement, vers la 220<sup>e</sup> minute : il est très probable que l'intensification des fumées constatées à l'étape 15 du § 2.4.2.1 trouve son origine au niveau de ce 2<sup>e</sup> niveau du fût bas.

#### 2.4.2.2.3 Fût haut

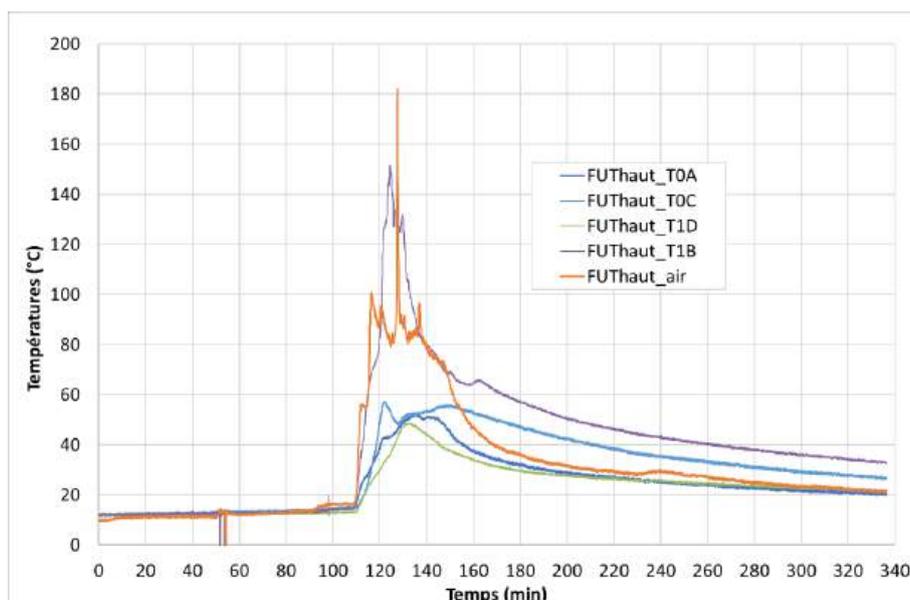


Figure 54: évolution des températures dans le Fût 2 (fût du dessus) tout au long de l'essai

Les températures mesurées dans le fût du haut commencent à augmenter vers  $t = 110\text{min}$ , pendant l'inflammation de la palette (§ 2.4.2.1, étapes 12 à 14). Elles restent inférieures à  $180\text{ °C}$ .

#### 2.4.2.2.4 Fûts vides de l'étage inférieur

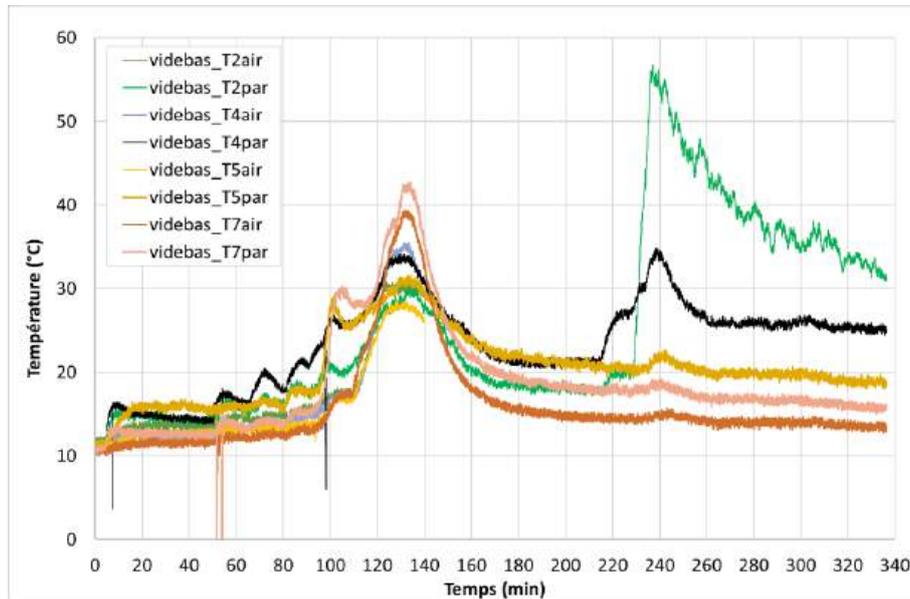


Figure 55: évolution des températures dans les fûts vides de l'étage inférieur tout au long de l'essai

Les températures mesurées dans les fûts vides de l'étage inférieur les plus proches du fût rempli de batterie n'ont pas dépassé  $60\text{ °C}$ , température trop faible pour une propagation de l'emballement thermique à des batteries qui se seraient trouvées dans ces fûts.

On note également vers la 220<sup>e</sup> minute, l'impact de l'intensification des fumées constatées à l'étape 15 du § 2.4.2.1 sur la paroi du fût 2.

#### 2.4.2.2.5 Fûts vides de l'étage supérieur

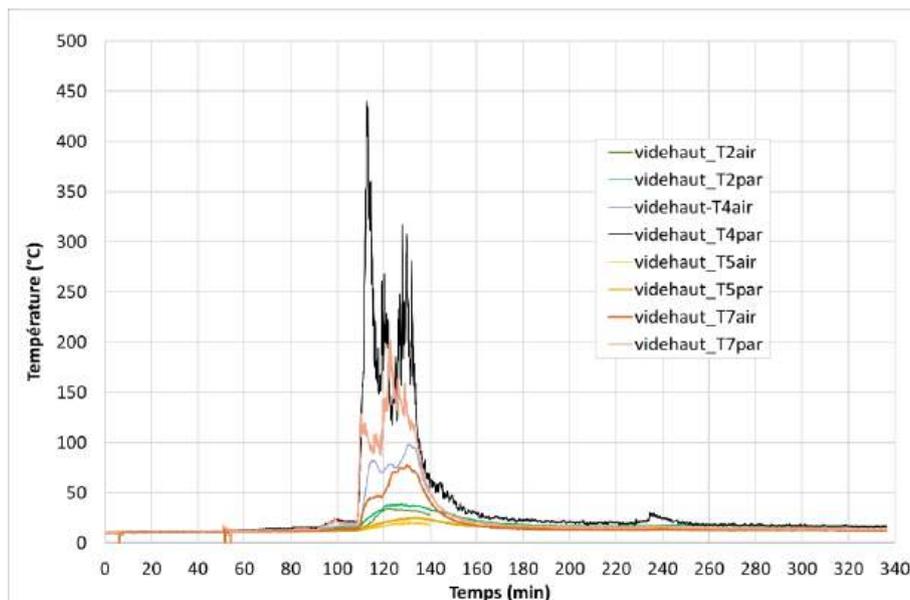


Figure 56: évolution des températures dans les fûts vides de l'étage supérieur tout au long de l'essai

Les températures mesurées dans les fûts vides de l'étage supérieur les plus proches du fût rempli de batterie ont augmenté pendant la phase de l'essai avec inflammation, de la 109<sup>e</sup> à la 135<sup>e</sup> minute (§ 2.4.2.1, étapes 12 à 14).

Durant cette période, les fûts 4 et 7 (voir Figure 48) ont vu leur paroi atteindre respectivement environ 200 °C et 150 °C pendant une vingtaine de minutes. La température de l'air interne de ces fûts n'a pas dépassé 100 °C. Compte tenu de la durée des températures élevées de la paroi des deux fûts 4 et 7, il ne peut pas être exclu qu'une batterie qui se serait trouvée en contact avec cette paroi soit partie en emballage thermique, avec un risque de propagation aux autres batteries du fût.

#### 2.4.2.3 Evolution des flux radiatifs

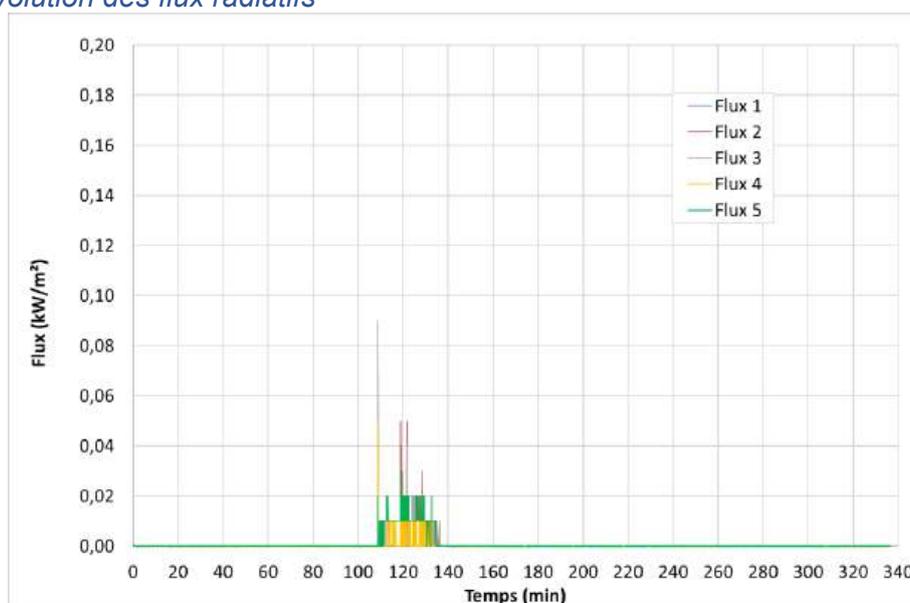


Figure 57 : flux radiatifs mesurés pendant le 3<sup>e</sup> essai

La phase de combustion ayant été courte et très peu intense, les flux radiatifs mesurés lors de cet essai sont extrêmement faibles, à la limite de la sensibilité des fluxmètres. Nous sommes donc ici très loin du seuil des effets domino (8 kW/m<sup>2</sup>).

#### 2.4.2.4 Emissions gazeuses

L'analyse des gaz, réalisée en continu durant l'essai, a permis d'établir le bilan présenté dans le Tableau 4 :

	masse mesurée (kg)	facteur d'émission (g/kg perdu)	volume de gaz (NL)
CO <sub>2</sub>	11	402.2	5631
CO	1,4	50.9	1120
CH <sub>4</sub>	0,17	6.2	238
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,17	6.2	137
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,01	0.3	8
Formaldéhyde	0	0.0	0

	masse mesurée (kg)	facteur d'émission (g/kg perdu)	volume de gaz (NL)
H <sub>2</sub>	0,112	4.1	1254
NO	0,002	0.1	1
NO <sub>2</sub>	0	0.0	0
N <sub>2</sub> O	0	0.0	0
NH <sub>3</sub>	0	0.0	0
HCN	0	0.0	0
SO <sub>2</sub>	0	0.0	0
DMC	1,0	36.9	253
EMC	0,76	27.7	164
EC	0,08	3.0	21
HF	0,13	4.6	141 <sup>(1)</sup>
HCl	0,03	1.0	17
HBr	0	0.0	0
SiF <sub>4</sub>	0,03	0.9	6
POF <sub>3</sub>	0	0.0	0
Eau	<b>2,2</b>	66.4	2750
<b>TOTAL</b> (eau non comprise)			<b>8991</b>

(1) Le débit massique du HF, présenté en Figure 60, laisse penser à un artefact de mesure.

Tableau 4 : bilan des gaz libérés lors du 3<sup>e</sup> essai

Les débits des différents gaz mesurés sont calculés à partir de leur concentration et du débit d'aspiration des fumées, et présentés dans les figures suivantes.

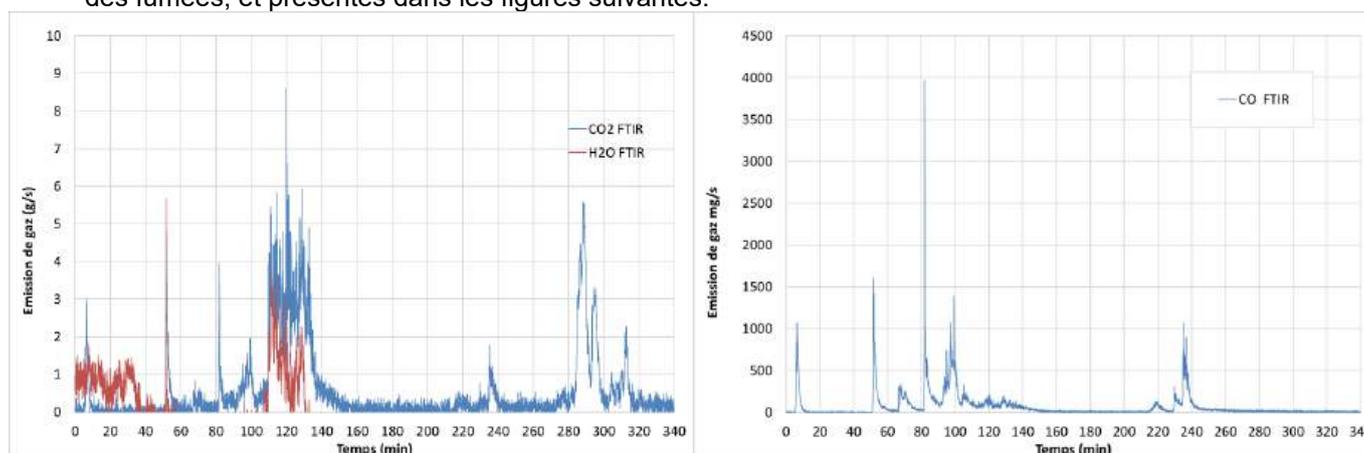


Figure 58 : débit massique du CO<sub>2</sub>, de l'H<sub>2</sub>O et du CO lors du 3<sup>e</sup> essai

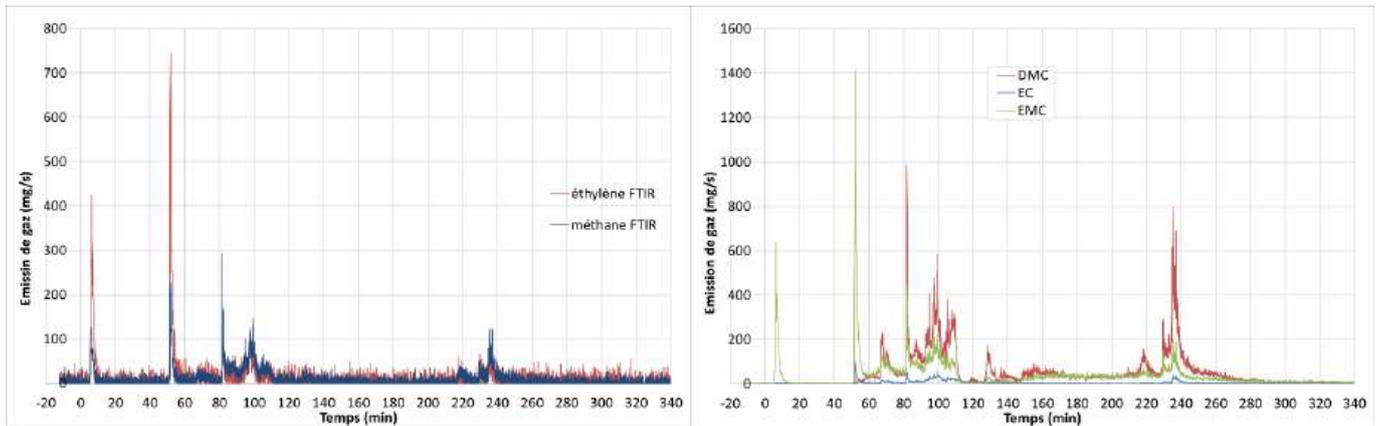


Figure 59 : débit massique des hydrocarbures ( $CH_4$ , et  $C_2H_4$ ) et des carbonates (EC, EMC et DMC) lors du 3<sup>e</sup> essai

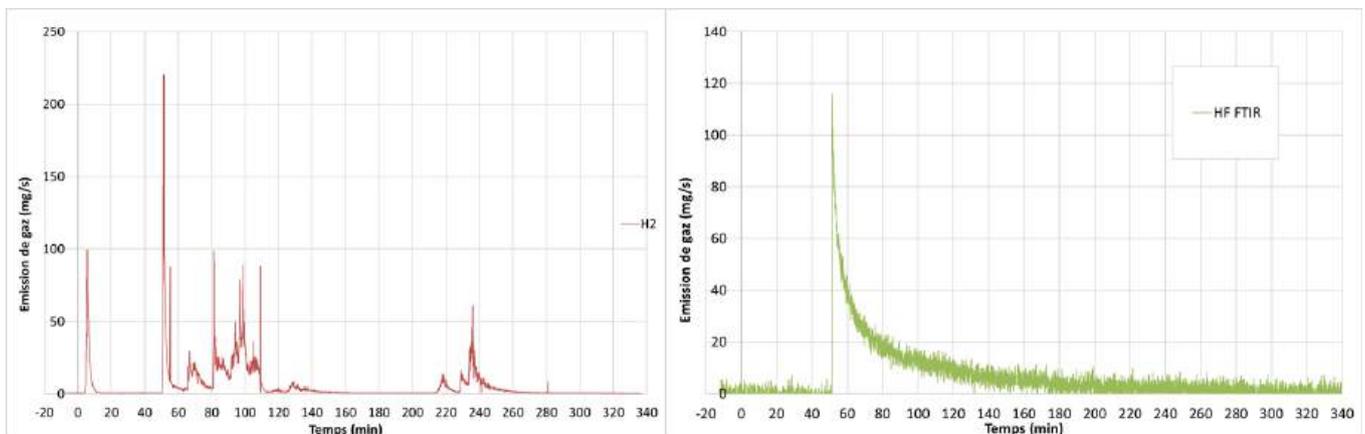


Figure 60 : débit massique de l' $H_2$  et du HF lors du 3<sup>e</sup> essai

Les gaz sont libérés par à-coups, à chaque nouvel évènement rencontré.

Durant la phase avec présence de flamme (de la 110<sup>e</sup> à la 140<sup>e</sup> minute), les gaz inflammables ne sont plus détectés (hydrocarbures, carbonates, dihydrogène) : ils sont oxydés au fur et à mesure de leur émission. On retrouve donc logiquement durant cette phase une émission de  $CO_2$  plus importante, produit des réactions de combustion des gaz libérés et de la palette en bois.

Le pic de HF à la 51<sup>e</sup> minute peut paraître surprenant. Ce pic est synchrone de l'emballement thermique de la 2<sup>e</sup> batterie instrumentée, et reste inexplicé (la 1<sup>e</sup> batterie instrumentée n'ayant pas généré un tel pic). Même si ce pic arrive au moment auquel une importante fumée sort du fût (§2.4.2.1, étape 7), il semble anormal de ne pas avoir détecté de HF auparavant (le fût n'est pas étanche, d'autres gaz ayant été détectés) ni d'observer une décroissance aussi lente, s'étalant sur plus d'une heure. Ce pic et/ou sa lente décroissance seraient donc probablement un artefact de mesure.

### Débit calorifique et énergie

Le débit calorifique (couramment appelé HRR pour « Heat Release Rate »), calculé selon la méthode CDG décrite au § 2.1.4.6, est présenté sur le graphique de la Figure 61, accompagné de son intégral temporel renseignant sur l'énergie totale libérée depuis le début de l'essai.

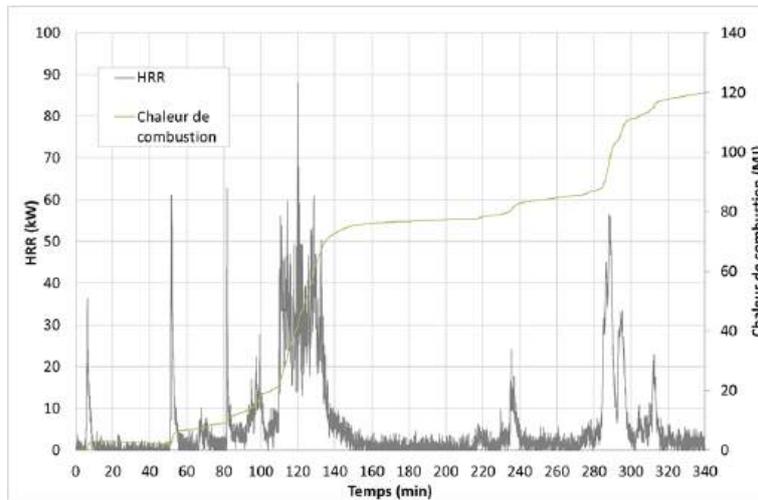


Figure 61 : débit calorifique et énergie libérés lors du 3<sup>e</sup> essai

Le débit calorifique reste très bas pendant tout l'essai (inférieur à 90 kW), car il n'y a pas eu de phase feu importante. La quantité totale d'énergie libérée pendant cet essai est de l'ordre de 120 MJ.

#### 2.4.2.5 Perte de masse et chaleur de combustion

La perte de masse durant l'essai est présentée dans la Figure 62.

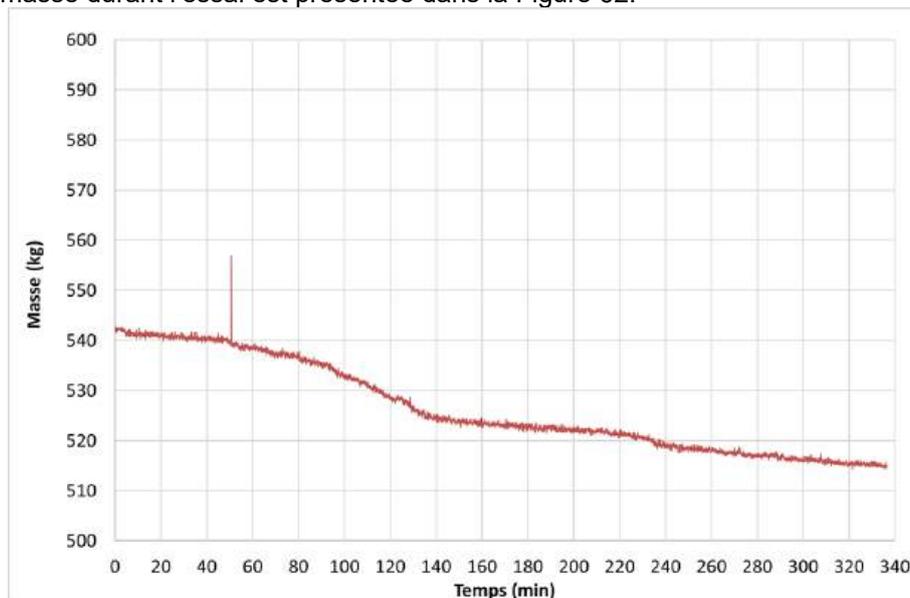


Figure 62 : perte de masse mesurée lors du 3<sup>e</sup> essai

La masse initiale totale de combustibles (542 kg) ne diminue que très progressivement, pour atteindre 514,5 kg en fin d'essai, soit une perte de masse très limitée de 27,5 kg, soit 5,1 % de la masse de combustible initiale.

On obtient ici une chaleur de combustion de 4,3 MJ/kg, ce qui est très faible.

La masse initiale de batteries usagées (hors fûts et palettes) est d'environ 220 kg.

#### 2.4.2.6 Photo après essai

L'état des fûts et de leur contenu après essai peut être observé sur la figure ci-dessous.



*Figure 63 : photos des fûts après essais (dessus : vue globale après avoir dégagé la vue vers le fût rempli de batteries, gauche : couvercle bombé du fût initialement rempli de batteries, droite : intérieur du fût rempli de batteries)*

La combustion des palettes est localisée uniquement au droit du fût initialement rempli de batterie. Le couvercle de ce fût est bombé et s'est ouvert pendant l'essai à cause de la montée en pression interne. Le niveau de remplissage de ce fût a légèrement diminué, par perte de matière et affaissement.

## 2.5 Enseignements sur l'influence du mode de stockage des batteries et du système d'extinction

Pour un même déclencheur initial, le tableau suivant récapitule les principales tendances observées lors des trois essais de la campagne expérimentale précédemment décrite.

Nota : ces valeurs sont basées sur un seul essai. Or, comme le montre l'essai de sprinklage, une part d'aléas créé par l'incertitude sur les types et l'état de charge des batteries présentes dans le fût doit être prise en compte.

	<b>Essai 1: Palox plastiques</b>	<b>Essai 2: Fûts métalliques</b>	<b>Essai 3: Fûts métalliques avec sprinklage (inactif)</b>
<b>Délai entre 1<sup>er</sup> emballage thermique et 1<sup>ère</sup> flamme</b>	2min34s	28min52s	105min02s (1)
<b>Délai entre 1<sup>er</sup> emballage thermique et intensité maximale</b>	11min35s	35min35s	~121min (2)
<b>Températures maximales dans le contenant rempli de batteries (hors températures batteries déclenchées)</b>	>1000 °C	>1000 °C	600 °C
<b>Température maximale dans les contenants voisins à celui rempli de batterie</b>	>1000 °C	800 °C	450 °C
<b>Propagation de l'emballage thermique aux batteries du contenant supérieur</b>	Oui (3)	Oui	Non
<b>Flux radiatif à 4 m lors de l'intensité maximale</b>	~25 kW/m <sup>2</sup> (pic à 36 kW/m <sup>2</sup> )	~5 kW/m <sup>2</sup> (pic à 10 kW/m <sup>2</sup> )	<0,1 kW/m <sup>2</sup> (2)
<b>Flux radiatif à 4 m lors de l'intensité maximale rapportée à la masse initiale de combustible (W/m<sup>2</sup>/kg)</b>	42,0	16,6	0,2
<b>Masse initiale de combustibles (batteries usagées, palette bois, palox plastique - hors fût métallique) (kg)</b>	595	302	542
<b>Perte de masse</b>	39,2 %	39,4 %	5,1 %
<b>Puissance thermique (HRR) maximum (MW)</b>	13,0	2,4	0,1
<b>Puissance thermique (HRR) maximum rapportée à la masse initiale de combustible (kW/kg)</b>	21,8	7,9	0,2
<b>Energie totale libérée (MJ)</b>	6000	1500	120
<b>Chaleur totale libérée rapportée à la masse initiale de combustible (MJ/kg)</b>	10,1	5,0	0,2
<b>Chaleur de combustion (MJ/kg perdu)</b>	25,9	12,7	4,3
<b>Volume total de gaz libérés (hors H<sub>2</sub>O) (Nm<sup>3</sup>)</b>	289,7	102,5	9,0
<b>Volume de gaz rapporté à la masse perdue (hors H<sub>2</sub>O) (NL/kg perdu)</b>	1243	862	326,9

- (1) Emballlement thermique de la 2e batterie instrumentée, déclenchée à 50min21s
- (2) La puissance thermique mesurée ne présente pas de pic sur cet essai
- (3) Contenant supérieur sans batterie, mais l'intensité du feu aurait induit la propagation de façon certaine

*Tableau 5: récapitulatif des principales grandeurs caractérisant les essais*

### Dynamique de la propagation

Le développement du feu a été bien plus rapide dans le cas du premier essai : les premières flammes sont apparues respectivement 27 et 103 minutes plus rapidement lors de l'essai avec palox plastiques que lors des essais 2 et 3 en fûts métalliques.

Une fois les flammes apparues, le délai avant d'atteindre le pic de puissance du feu est assez similaire entre les essais 1 (palox plastique) et 2 (fûts métalliques) (respectivement 9 min et 7 min). L'essai 3 n'a quant à lui pas présenté de réelle montée en puissance, l'inflammation de la palette ne s'étant pas propagée aux batteries usagées ou à d'autres palettes.

La tendance observée lors de ces essais sur l'influence du type de contenant est donc marquée : l'utilisation de contenants de type fûts métalliques a permis de ralentir le développement du feu. Le palox plastique étant lui-même combustible, il s'enflamme rapidement. Dans le cas de fût métallique, le contenant ne peut pas s'enflammer et empêche durablement<sup>4</sup> l'oxygène de l'air de rentrer en contact avec les batteries, limitant ainsi les réactions de combustion<sup>5</sup>.

### Intensité de l'incendie

Le 3<sup>e</sup> essai (fût métallique) a été sensiblement moins puissant que les deux autres, car la propagation de l'emballlement thermique entre batteries n'a été que très partielle.

Les 1<sup>er</sup> et 2<sup>eme</sup> essais ont tous les deux mené à une combustion très avancée, avec une perte de masse de 39 % des combustibles initialement présents. Bien que cette perte de masse soit similaire, l'intensité du feu a été différente : une fois rapporté à la masse de combustible présent dans chaque essai, le flux radiatif à 4 m et la puissance thermique libérée par les réactions de combustion (HRR) sont 2,7 fois plus importants sur l'essai 1 (palox plastique) que sur l'essai 2 (fût métallique). La chaleur de combustion est également deux fois supérieure sur le premier essai.

La composition des palox en plastique (polyéthylène haute densité) peut expliquer cette différence : le contenant est lui-même combustible et son pouvoir calorifique est environ deux fois supérieur à celui du bois composant les palettes.

### Emissions gazeuses

Tout comme pour la comparaison de l'intensité du feu, le volume total de gaz libéré lors du 3<sup>e</sup> essai est bien plus faible, car la propagation de l'emballlement thermique entre batteries n'a été que très partielle.

Concernant les essais 1 et 2, le volume de gaz total libéré rapporté à la masse perdue est supérieur d'un facteur 1,4 pour l'essai avec palox plastique par rapport à celui avec fût métallique.

Ceci peut s'expliquer au moins en partie par une phase fumigène plus courte lors de l'essai avec palox, et une phase de feu plus générant donc plus de gaz et notamment plus de CO<sub>2</sub>.

La concentration des gaz libérés est également légèrement différente, comme le montre le Tableau 6 :

---

<sup>4</sup> Percement du fût métallique observé plus de 30 minutes après l'emballlement thermique de la première batterie, après l'apparition des flammes, sous l'effet de la chaleur.

<sup>5</sup> Certaines chimies de batteries Li-ion peuvent libérer du dioxygène lors de leur emballlement thermique, et ainsi permettre l'apparition de réaction de combustion même dans une atmosphère anaérobie.

Concentration volumique des principaux gaz libérés (>0,1%v/v)	Essai 1: Palox plastiques	Essai 2: Fûts métalliques	Essai 3: Fûts métalliques avec sprinklage (inactif)
CO <sub>2</sub>	97,06%	92,56%	62,64%
CO	2,01%	4,58%	12,46%
CH <sub>4</sub>	0,09%	0,55%	2,65%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,05%	0,14%	1,52%
H <sub>2</sub>	0,26%	1,56%	13,95%
NO	0,14%	0,14%	0,01%
DMC	0,01%	0,16%	2,81%
EMC	0,00%	0,05%	1,82%
EC	0,01%	0,01%	0,23%
HF	0,18%	0,05%	1,57% (1)
HCl	0,12%	0,13%	0,19%

(1) Le débit massique du HF, présenté en Figure 66, laisse penser à un artefact de mesure.

Tableau 6: récapitulatif des concentrations volumiques des principaux gaz mesurés lors des essais

La concentration volumique en CO<sub>2</sub> est nettement majoritaire sur chacun des essais. Sa concentration est la plus importante lors du 1<sup>er</sup> essai. Ceci s'explique à nouveau par la durée plus courte de la phase fumigène lors de cet essai, phase libérant très peu de CO<sub>2</sub>. La très grande majorité des gaz inflammables libérés ont donc été oxydés durant cet essai, dont les concentrations diminuent au profit de celle du CO<sub>2</sub>.

A contrario, la phase fumigène ayant été plus longue sur les essais 2 et 3 avec fûts métalliques, les réactions de combustion ont été moins nombreuses : la concentration en CO<sub>2</sub> est moins importante. Les gaz inflammables (CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, DMC, EMC, EC) n'étant pas oxydés durant cette phase fumigène, on les retrouve en concentration plus importante dans le bilan final présenté au Tableau 6.

Il peut être relevé que l'absence de combustion des gaz inflammables lors de leur libération diminue certes les effets thermiques, mais engendrent leur possible accumulation dans un environnement clos, avec le risque de formation d'une atmosphère explosive. Ce risque dépend de nombreux facteurs, comme le volume libre du local, la ventilation, ou la quantité de batteries en emballage thermique.

Facteur d'émission des principaux gaz libérés (>1 g/kg)	Essai 1: Palox plastiques	Essai 2: Fûts métalliques	Essai 3: Fûts métalliques avec sprinklage (inactif)
CO <sub>2</sub>	2370.4	1566.4	402.2
CO	31.2	49.3	50.9
CH <sub>4</sub>	0.8	3.4	6.2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.7	1.5	6.2
H <sub>2</sub>	0.3	1.2	4.1
NO	2.3	1.7	0.1
DMC	0.4	5.4	36.9
EMC	0.2	1.9	27.7
EC	0.3	0.3	3.0
HF	2.0	0.4	4.6 (1)
HCl	2.5	1.8	1.0

(1) Le débit massique du HF, présenté en Figure 66, laisse penser à un artefact de mesure.

*Tableau 7: récapitulatif du facteur d'émission des principaux gaz mesurés lors des essais*

Les facteurs d'émission des principaux gaz libérés lors des essais sont récapitulés dans le Tableau 7.

On retrouve dans ce tableau les tendances entre essais déjà constatées lors de l'analyse des concentrations (essai 1 présentant la meilleure combustion, l'essai 3 libérant quant à lui le plus de gaz inflammables).

On peut également noter une différence significative sur l'émission de HF entre l'essai 1 (palox plastique) et l'essai 2 (fût métallique). Durant ces deux essais, le facteur d'émission du HF est respectivement de 2 et 0,4 g/kg. Les batteries usagées étant globalement du même type, le type de contenant est probablement à l'origine de cette différence. La re-condensation du HF sur les parois métalliques des fûts pourrait être une hypothèse expliquant cette influence. Une autre hypothèse concomitante à la 1<sup>e</sup> pourrait être liée à l'efficacité de combustion, moindre dans le 2<sup>e</sup> essai, corroboré par un facteur d'émission de CO plus élevé.

### Enseignements tirés du 3<sup>e</sup> essai

L'essai 3, initialement prévu pour mesurer l'impact du sprinklage sur la dynamique de développement du feu, n'a malheureusement pas mené à un feu d'une intensité suffisante pour déclencher le système d'extinction par sprinklage.

Même si ce 3<sup>e</sup> essai n'a donc pas permis d'évaluer l'efficacité d'un système de sprinklage sur ce type de feu, il a malgré tout enrichi les données disponibles sur la dynamique de propagation avec des contenants de type fûts métalliques, et en particulier, sur la variabilité de cette propagation.

En effet, malgré la reproduction des mêmes conditions expérimentales (déclencheur et contenant identique, batteries usagées de même type et issues de la même filière, agencement des batteries lors du remplissage très similaire, ...), le 2<sup>e</sup> essai a mené à un feu généralisé intense, alors que, lors du 3<sup>e</sup> essai, le feu ne s'est que très peu propagé.

Ce constat attire l'attention sur l'importance d'autres paramètres difficilement maîtrisables durant ces essais, comme le niveau de charge des batteries usagées, la nature du matériau de leur enveloppe (plastique combustible ou métallique dissipateur thermique), ou l'influence des batteries les plus proches de la première batterie partant en emballement thermique.

D'autres facteurs non évalués dans cette campagne expérimentale pourraient au contraire accélérer la montée en puissance du feu. Par exemple, la possible éjection du couvercle par montée en pression interne du fût (couvercle qui a été maintenu à sa position par le poids des fûts et palettes de l'étage supérieur durant cette campagne expérimentale) permettrait à l'oxygène de l'air d'alimenter les réactions de combustion des batteries au sein du fût, et donc d'amplifier les effets thermiques et d'accélérer la propagation de l'emballement thermique entre batteries.

### 3 Conclusion

Suite à l'incendie de l'entrepôt de stockage de batteries usagées de la société SOPAVE le 17 février 2024, le BEA-RI a ouvert une enquête et a sollicité l'Ineris en appui technique. Cette demande d'appui porte sur l'étude de l'influence du mode de stockage des batteries et du système d'extinction automatique sur les mécanismes de propagation d'un incendie lié à l'emballement thermique d'une batterie de type petite mobilité stockée en vrac avec des batteries de même type.

Pour répondre à cette sollicitation, l'Ineris a mis en œuvre une campagne expérimentale, qui a permis d'évaluer l'impact du choix du type de contenant sur le développement et l'intensité du feu.

Malheureusement, cette campagne n'a pas permis de tirer de conclusion sur l'efficacité du système de sprinklage, l'essai dédié à cet objectif n'ayant pas abouti à un feu généralisé.

Il ressort de cette étude les principales conclusions présentées ci-après.

Le contenant de type palox plastique a un impact négatif sur la vitesse de développement du feu. Il est en effet lui-même composé de matière combustible, prenant feu relativement rapidement. Il apporte ainsi lors de la phase de naissance du feu :

- de la chaleur supplémentaire, participant à la propagation de l'emballement thermique de batteries en batteries,
- un passage d'air vers l'intérieur du conteneur, permettant un apport d'oxygène vers les batteries, alimentant ainsi les réactions de combustion à l'intérieur du contenant.

Le contenant de type palox plastique a également un impact négatif sur l'intensité du feu. Le pouvoir calorifique du polyéthylène qui le compose est en effet très élevé (de l'ordre de 40 MJ/kg). Il a de plus tendance à fondre et s'étaler sur le sol, favorisant l'apparition d'un feu de nappe sur une surface supérieure à celle du palox d'origine, et donc des puissances thermiques libérées qui s'en trouvent augmentées.

Le contenant de type fût métallique a permis, lors des essais réalisés, de ralentir sensiblement voire de stopper la propagation de l'emballement thermique des batteries, et de diminuer l'intensité des effets thermiques mesurés. Une diminution du facteur d'émission de HF libéré a également été observée avec ce type de contenant. On peut toutefois noter une plus forte concentration de gaz inflammables dans les gaz libérés, et donc un risque de formation d'une atmosphère explosive. Ce risque semble certes limité compte tenu du volume des entrepôts de stockage, mais il convient malgré tout de le prendre en considération. On relève également une combustion moins complète (facteur d'émission du CO plus élevé), propice à l'émission en plus grande quantité de produits de décomposition tels que des HAP, des dioxines ou des COV.

## 4 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : lettre de saisine – 1 page.  
Saisine signée à intégrer dans cette annexe

### **Mission conjointe BEA-RI - INERIS**

Le BEA-RI a ouvert le 21/02/2024 une enquête sur l'évènement survenu le 17/02/2024 au sein de la société SOPAVE située à Viviez (12).

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site. Selon les premiers éléments de l'enquête, l'incendie qui s'est produit semble avoir mis en cause des batteries Li-Ion usagées.

Dans la continuité des constats dressés lors de cette visite, nous souhaiterions mobiliser l'expertise de l'INERIS, dans le cadre de sa coopération avec le BEA-RI, pour évaluer le rôle qu'aurait joué ces batteries dans l'occurrence et le développement de l'incendie.

En pratique, il est demandé à l'INERIS de réaliser des essais sur des batteries de même type en vue:

- D'étudier l'influence du mode de stockage des batteries et du système d'extinction automatique sur les mécanismes de propagation d'un incendie lié à l'emballement thermique d'une batterie de type petite mobilité stockée en vrac avec des batteries de même type, et de conclure sur leur influence.
- Transmission des données brutes relatives aux substances émises lors des essais ;

Ces essais seront réalisés à partir de batteries qui auront été récupérées auprès de l'industriel.

Nous souhaiterions pouvoir disposer de vos conclusions au travers d'un rapport (au format pdf) selon un calendrier qui sera défini entre vos équipes et les enquêteurs en charge de l'affaire.

Fait à la Défense, le 11/12/2024



**Henri Kaltembacher**

