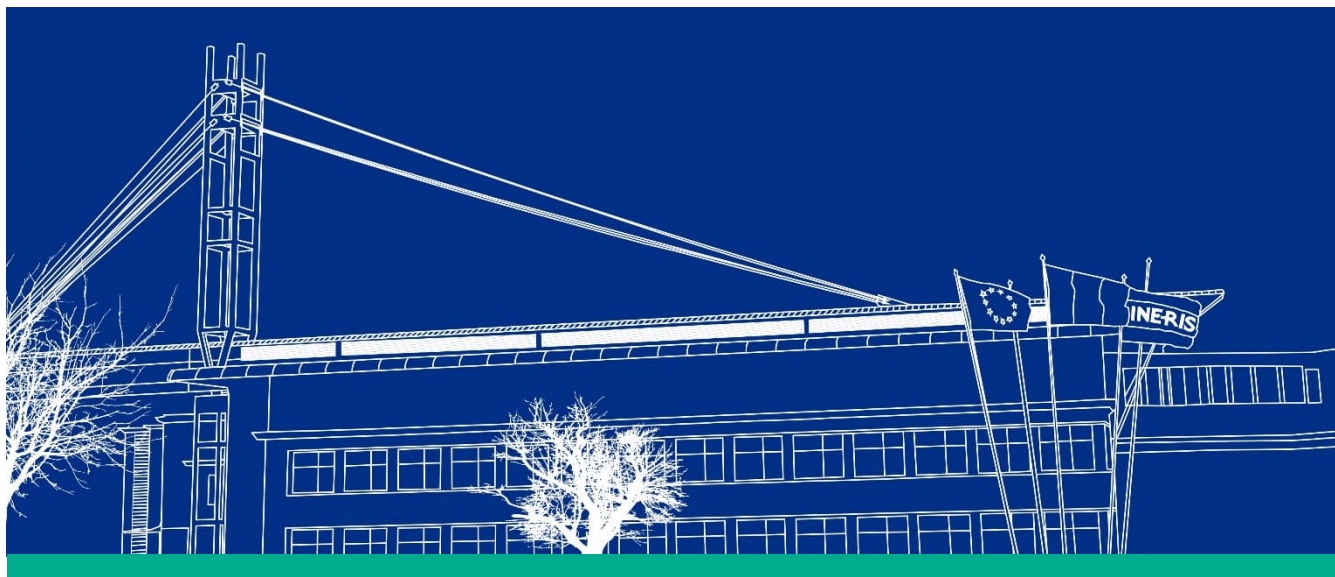




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 229722 - 2852925 - v1.0

12/05/2026

**Appui à l'enquête technique de l'incendie
survenu le 10 avril 2024 au sein de l'atelier
d'estérification de l'établissement exploité par
SAIPOL à Sète**

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 équivalent 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 INCENDIE, DISPERSION, EXPLOSION

Rédaction : PAILLERY Esteban, GOMES JULIEN; GOY BENJAMIN; PHILIPPE MARIE

Vérification : BINOTTO GHISLAIN; CHAUMETTE SYLVAIN; COTTIN OLIVIER; STOUVENEL MICKAEL; COLLET MARTIN; GENTILHOMME OLIVIER

Approbation : BOUET REMY - le 12/05/2026

Table des matières

Glossaire.....	5
1 Introduction.....	5
1.1 Déontologie	5
1.2 Contexte	5
2 Description de l'installation concernée et informations sur l'événement.....	6
3 Réponses aux questions posées par le BEA-RI	6
3.1 Caractéristiques générales associées à l'inflammabilité du mélange ester méthanol	6
3.2 Expertise des capteurs de niveaux	7
3.3 Capacité à l'auto-échauffement du produit contenu dans le filtre coalesceur	8
4 Conclusion	8
5 Annexes	9

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Appui à l'enquête technique de l'incendie survenu le 10 avril 2024 au sein de l'atelier d'estérification de l'établissement exploité par SAIPOL à Sète : Ineris - 229722 - 2852925 - v1.012/05/2026.

Glossaire

ATEX : Atmosphère explosive

EMAG : Esters méthyliques d'acide gras

EMI : Energie minimale d'inflammation

LIE : Limite inférieure d'explosivité

PIE : Point inférieur d'explosion

TAI : Température d'auto-inflammation

1 Introduction

1.1 Déontologie

En dehors de la participation des salariés de SAIPOL et plus généralement du groupe AVRIL dont fait partie SAIPOL, aux formations animées par l'Ineris, l'Ineris a réalisé quelques études pour le groupe AVRIL depuis 5 ans concernant la caractérisation d'inflammabilité et d'explosion de produits sans rapport avec le mélange mis en cause dans l'évènement objet de cette expertise.

1.2 Contexte

Le 10 avril 2024, une explosion suivie d'un incendie s'est déclarée au sein du site SAIPOL de Sète.

Le BEA-RI a ouvert une enquête et a sollicité l'appui de l'Ineris sur les 3 points suivants formulés dans la lettre de mission figurant en Annexe 1 :

- Concernant le mélange ester méthanol, de déterminer en se basant sur des expérimentations menées à des concentrations à préciser au regard du process de fabrication (3 concentrations permettant d'encadrer l'intervalle d'incertitude de la composition du mélange) :
 - o les points d'éclair,
 - o les points inférieurs d'explosion,
 - o les limites inférieures d'explosivité,
 - o les pressions de vapeur saturante,
 - o l'énergie minimale d'activation en fonction du mode d'activation.
- Concernant les capteurs :
 - o sur la base des documents transmis, d'examiner la sécurité intrinsèque des matériels et de leur installation en regard de leurs conditions d'utilisation,
 - o sur la base des matériels transmis, de rechercher d'éventuels défauts ou conditions d'utilisations susceptibles d'enflammer une ATEX telle que définie au point précédent.
- Concernant la possibilité d'auto-échauffement :
 - o Déterminer la capacité à l'auto-échauffement du produit contenu dans le filtre coalesceur.

Les réponses aux demandes du BEA-RI sont développées dans le §3 de ce rapport.

2 Description de l'installation concernée et informations sur l'événement

Le vendredi 10 avril 2024, vers 16h40, après que les opérateurs chargés des opérations de maintenance aient quitté le bâtiment d'estérification au sein de l'établissement SAIPOL à Sète, des bruits forts sont entendus par les personnels présents au sein de l'usine, en provenance de cette unité. Les premières flammes sont immédiatement visibles et le feu est circonscrit 3h plus tard.

L'unité d'estérification produit du biodiesel (ester méthylique) par réaction du méthanol sur l'huile de colza. L'unité en cause comprend en outre les réacteurs un ensemble d'élément de filtration / séparation destinée d'une part à la séparation entre diester et glycérine issue de la réaction et d'autre part à la récupération du méthanol non consommé dans la réaction. Cette partie comprend deux séparateurs et deux filtres coalesceurs permettant de parfaire la séparation glycérine diester.

Le BEA-RI a établi que les bruits entendus sont liés à une détonation dans un des deux séparateurs. Au moment de cette détonation le séparateur contient un mélange diester-méthanol. Le filtre coalesceur est relié à la phase vapeur du séparateur (retour des fractions légères ester méthylique). Au moment de l'évènement le filtre est vide, seule subsiste la masse filtrante imprégnée des produits circulants.

3 Réponses aux questions posées par le BEA-RI

Les réponses apportées aux questions posées par le BEA-RI concernant la caractérisation de l'inflammabilité de mélanges ester méthanol, la possibilité que les capteurs de niveaux soient à l'origine de l'inflammation ainsi que la possibilité d'auto-échauffement du produit en présence du filtre coalesceur sont développés dans les paragraphes suivants.

3.1 Caractéristiques générales associées à l'inflammabilité du mélange ester méthanol

Les essais réalisés dans le but de caractériser l'inflammabilité du mélange (annexe 2) ont permis de confirmer le caractère inflammable des différents mélanges testés notamment l'inflammabilité à des températures inférieures à la température ambiante au travers d'essais de point inférieur d'explosion. Pour assurer la sécurité de l'installation, il convient de retenir plutôt les températures de Point inférieur d'explosion (PIE) plutôt que de points d'éclair car celles-ci sont significativement inférieures. Les essais limite inférieure d'explosivité (LIE) ont démontré la capacité des mélanges à générer une atmosphère explosible (ATEX) à partir de faible concentration (inférieure à 2 %).

Le Tableau 1 récapitule les résultats obtenus aux cours des différents essais :

Essai/Mélange	2 %v MeOH	4 %v MeOH	6 %v MeOH
<i>Point d'éclair</i>	27,0°C	21,5°C	14°C
<i>PIE</i>	18,5°C	13,1°C	10,0°C
<i>LIE</i>	0,6 %	0,9 %	1,3 %
<i>Pression de vapeur</i>	50,4 mbar	80,2 mbar	102,0 mbar

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats obtenus

Ces essais montrent le caractère inflammable de ces mélanges et leur capacité à s'enflammer à des températures inférieures à la température ambiante, même pour des concentrations faibles en méthanol.

Afin de poursuivre les recherches sur les origines de l'explosion ayant engendré l'accident, le BEA-RI a souhaité que l'Ineris détermine l'énergie minimale d'inflammation (EMI) du mélange à 4 % de méthanol (Annexe 5). Cet essai, non standard, développé au 1er semestre 2025 dans les locaux de l'Ineris a été mis en suspens après échange avec le BEA-RI, à la suite de l'identification d'une nouvelle piste relative à un phénomène d'auto-échauffement, qui aurait pu être causé par un filtre (constitué d'une maille de fils métalliques et de matière polymérique) imbibé d'un mélange d'esters méthyliques d'acide gras (EMAG)/méthanol.

3.2 Expertise des capteurs de niveaux

L'Ineris a réalisé dans un premier temps un examen visuel et documentaires des capteurs de niveaux du coalesceur (niveau à flotteur et niveau à lames). Le détail de cet examen est développé dans l'annexe 3.

Lors de l'examen visuel des capteurs, aucun dommage, de casse ou rupture des éléments sensibles n'a été observé. Toutefois, il a révélé la présence de colorations bleues/violettes sur certaines parties des capteurs en acier inoxydable. Ces colorations sont généralement obtenues pour des échauffements allant de 270°C à 320°C environ. Ces températures ne sont pas compatibles avec le fonctionnement des équipements évalués, même en cas de dysfonctionnements prévisibles ou dysfonctionnements rares.

Le capteur de niveau du coalesceur est composé d'un flotteur et d'une chaîne de suspension, le risque de génération d'étincelles par charge électrostatique doit être maîtrisé sur ce type de matériel. En effet, la continuité de potentiel est dépendante du contact métal/métal de la chaîne induit par la gravité du flotteur. Toutefois, l'absence de liquide dans le coalesceur au moment de l'ignition semble indiquer que les conditions pour la création de charges électrostatiques et donc une décharge par étincelle soient peu probables.

L'ensemble des éléments mis à disposition ne nous permet pas d'infirmer ou d'affirmer que ces équipements seraient à l'origine de l'inflammation d'une ATEX sur le site de SAIPOL. Les colorations bleutées sur les deux appareils ne peuvent être dues à l'exposition rapide d'un front de flamme, et donc une expertise complémentaire sur l'installation électrique en amont des instruments ainsi qu'une série de tests électriques sur des équipements fonctionnels identiques sont nécessaires pour aller plus loin.

En considérant l'absence de liquide dans le coalesceur au moment de l'ignition, rendant peu probable les conditions de création de charges électrostatiques, des investigations complémentaires se sont focalisées sur le capteur de niveau à lames ; Ces investigations ont été menées sur un appareil équivalent, dans le but d'évaluer si ce type de capteur, en situation de fonctionnement dégradé, pouvait constituer une source potentielle d'inflammation. Le détail de ces investigations est développé dans l'annexe 4.

Trois hypothèses de défaillance ont été étudiées :

- Transmission d'une flamme interne à l'extérieur du capteur via le tube prolongateur ;
- Dépassement de la température d'auto-inflammation (TAI) du mélange gazeux suite à une alimentation directe sans limitation de courant ;
- Inflammation par étincelle électrostatique générée par une résine isolante sur le tube du capteur.

Les investigations menées sur le capteur de niveau à lames n'ont permis d'identifier aucun scénario d'inflammation certain parmi les trois hypothèses testées. Les 2 premiers scénarios ont été formellement écartés sur la base de résultats d'essais concrets. Le dernier scénario, bien que théoriquement plausible, reste non confirmé en l'absence d'information sur l'état du revêtement du capteur au moment de l'accident.

3.3 Capacité à l'auto-échauffement du produit contenu dans le filtre coalesceur

Le procédé utilisé par SAIPOL pour produire de l'EMAG fait intervenir une étape de filtration à travers un média poreux composé de deux mailles métalliques et une maille plastique.

Ce média, lors du fonctionnement normal de l'installation, est immergé dans un mélange d'EMAG et de méthanol. Lors de l'accident, le média n'était plus immergé et n'avait pas été lavé. Une couche fine de mélange était donc présente.

Les EMAG naturels étant insaturés, ils sont susceptibles de s'oxyder à température ambiante, quand ceux-ci sont répartis sur de très grande surface, typiquement un filtre, un chiffon, ... la surface d'échange avec l'oxygène, de l'air est démultipliée avec pour effet de possiblement accélérer significativement la vitesse de réaction.

A travers des essais (voir annexe 5) en étuve isotherme adaptés d'une norme pour évaluer l'auto-échauffement de poussières, nous avons pu déterminer par extrapolations (successives) une dimension critique, autrement dit la taille maximale du média poreux pour laquelle, à la température du filtre au moment de l'accident, le risque d'auto-inflammation était avéré.

Cette dimension, dépendant des paramètres d'extrapolation sélectionnés, est au final très proche ou en-dessous de celui du filtre de SAIPOL, ce qui signifie que le scénario de l'auto-inflammation suite à un phénomène d'auto-échauffement semble possible voire, fortement probable dans le cas de l'accident de SAIPOL.

4 Conclusion

Le vendredi 10 avril 2024, une explosion a lieu au sein de l'établissement SAIPOL à Sète. Suite à cet accident, l'Ineris a été sollicité par le BEA-RI afin de les appuyer dans les missions suivantes :

- Déterminer les caractéristiques générales associées à l'inflammabilité du mélange ester méthanol à des concentrations représentatives du process de fabrication ;
- Déterminer si les capteurs de niveau du coalesceur ont pu être à l'origine de l'inflammation ;
- Déterminer la capacité à l'auto-échauffement du produit contenu dans le filtre coalesceur.

Les essais réalisés montrent le caractère inflammable des mélanges ester méthanol et leur capacité à s'enflammer à des températures inférieures à la température ambiante, même pour des concentrations faibles en méthanol.

L'expertise des capteurs de niveaux du coalesceur n'identifie pas de scénario d'inflammation ayant pour origine le capteur à flotteur et pas de scénario d'inflammation avec certitude ayant pour origine le capteur à lames.

Enfin, le scénario de l'auto-inflammation suite à un phénomène d'auto-échauffement semble possible voire fortement probable dans les conditions de l'accident.

5 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Lettre de mission – 1 page
- Annexe 2 : Caractérisation des mélanges ester + méthanol – 10 pages
- Annexe 3 : Rapport d'investigation visuelle et documentaire des capteurs de niveau du coalesceur – 11 pages
- Annexe 4 : Rapport d'investigations complémentaires du capteur de niveau à lames – 7 pages
- Annexe 5 : Détermination de l'EMI de mélanges EMAG/méthanol et détermination de la capacité à l'auto échauffement du produit contenu dans le filtre coalesceur – 22 pages

ANNEXE 1

-

Lettre de saisine du BEA-RI

Mission conjointe BEA-RI - Ineris

Le BEA-RI a ouvert le 12 avril 2024 une enquête sur l'événement survenu le 10 avril au sein de la société Saipol située à Sète (34). Trois enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site. Selon les premiers éléments de l'enquête, l'incendie s'est développé à la suite d'une explosion survenue dans un séparateur ester/glycérine, qui contenait un intermédiaire de réaction dont la composition ne peut qu'être estimée.

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 :

- d'une part caractériser l'intermédiaire de réaction qui restait présent dans le séparateur et son énergie d'activation à diverses concentrations de méthanol ;
- d'autre part examiner les composants des capteurs retrouvés sur site et leurs documentations afin de rechercher d'éventuels dysfonctionnements.

En pratique, il est demandé à l'INERIS :

1/ concernant le mélange ester méthanol, de déterminer en se basant sur des expérimentations menées à des concentrations à préciser au regard du process de fabrication (3 concentrations permettant d'encadrer l'intervalle d'incertitude de la composition du mélange) :

- les points d'éclair,
- les points inférieurs d'explosion,
- les limites inférieures d'explosivité,
- les pressions de vapeur saturante,
- l'énergie minimale d'activation en fonction du mode d'activation

2/ concernant les capteurs :

- sur la base des documents transmis, d'examiner la sécurité intrinsèque des matériels et de leur installation en regard de leurs conditions d'utilisation,
- sur la base des matériels transmis, de rechercher d'éventuels défauts ou conditions d'utilisations susceptibles d'enflammer une ATEX telle que définie au 1/

3/ concernant la possibilité d'auto échauffement :

Déterminer la capacité à l'auto échauffement du produit contenu dans le filtre coalescent.

Nous souhaiterions pouvoir disposer de vos conclusions au travers d'une courte note (au format pdf), s'attachant à définir chacun des paramètres étudiés dans le contexte de l'enquête en cours, selon un calendrier qui sera défini entre vos équipes et les enquêteurs en charge de l'affaire.

Fait à la Défense, le 06/05/26



Henri KALTEMBACHER

ANNEXE 2

-

Caractérisation des mélanges ester + méthanol

Caractérisation des mélanges ester + méthanol

L'objectif des travaux est d'évaluer les propriétés intrinsèques (point d'éclair, point inférieur d'explosion, limite inférieure d'explosivité et pression de vapeur saturante) de mélanges de monoester d'huile naturel, également appelé EMAG (Ester Méthylique d'Acide Gras), et de méthanol. Les conditions de mélange sont considérées à la température de 20°C et pour trois concentrations : 2%, 4% et 6% volumique de méthanol.

Les essais réalisés sur 3 mélanges sont les suivants :

- Détermination du point d'éclair en coupelle fermée (Vase Abel, NF EN ISO 13736 :2021) ;
- Détermination du point inférieur d'explosion (NF EN 15794 :2009) ;
- Détermination de la limite inférieure d'explosivité (EN 1839 :2017) ;
- Détermination des pressions de vapeur saturante.

Les échantillons fournis par SAIPOL ont été réceptionnés dans nos laboratoires le 19/06/2024 et ont été identifiés de la façon suivante :

- Référence Saipol « Ester ES1 » - référence Ineris 24AN096 (Figure 1) ;
- Référence Saipol « Méthanol » - référence Ineris 24AN097 (Figure 2).



Figure 1 : Photo des contenants de l'échantillon « ESTER ES1 » - Référence Ineris 24AN096

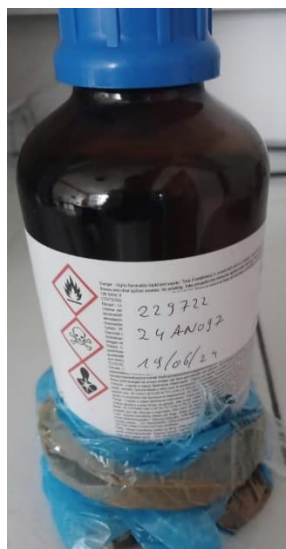


Figure 2 : Photo du conditionnement de l'échantillon « Méthanol » - Référence Ineris 24AN097

Préparation des échantillons

Les mélanges à tester d'EMAG et méthanol ont été préparés à l'Ineris. Les concentrations ont été choisies d'un commun accord entre le BEA-RI et l'Ineris, et sont de 2, 4 et 6 %v de MeOH (Méthanol). Chaque mélange a été préparé en une seule fois pour garantir que le même produit a été testé au cours des différents essais (volume total par mélange : 5 litres).

Tableau1 : Masse et volume des constituants du mélange à préparer.

% volumique MeOH	Volume de MeOH pour 5 l de mélange	Volume d'EMAG pour 5 l de mélange	Masse d'EMAG pour 5 l de mélange
2%	100 mL	4 900 mL	4 317 g
4%	200 mL	4 800 mL	4 229 g
6%	300 mL	4 700 mL	4 141 g

La masse d'EMAG à prélever est calculée à partir de la masse volumique (0,881 g/cm³) inscrite dans la fiche de données de sécurité (FDS) fournie avec les produits. La balance utilisée possède une précision de ± 10 g, l'éprouvette utilisée pour prélever le méthanol a une précision de ± 1 mL.

Les masses et volumes réellement mesurés sont répertoriés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Masse et volume mesurés pour la préparation des mélanges

%volumique MeOH	Volume de MeOH mesuré pour 5 L de mélange	Masse d'EMAG mesurée pour 5 L de mélange	%volumique MeOH mesurée
2 %	100 mL	4 320 g	1,99 %
4 %	200 mL	4 230 g	3,99 %
6 %	300 mL	4 160 g	5,98 %

Principe et résultats de détermination de points d'éclairs

Il existe beaucoup de définitions du point d'éclair, légèrement différentes, mais la définition suivante est couramment utilisée dans les méthodes d'essai normalisées. Le point d'éclair est défini comme étant la température minimale de la prise d'essai, ramenée à la pression barométrique de 101,3 kPa, à laquelle la mise en contact d'une source d'allumage provoque l'inflammation momentanée de la vapeur de cette prise d'essai et la propagation du feu sur toute la surface du liquide, dans les conditions d'essai spécifiées. Il est important d'avoir à l'esprit que la valeur de point d'éclair n'est pas une grandeur physique intrinsèque au produit étudié mais le résultat de l'essai de détermination du point d'éclair lequel dépend de l'appareillage utilisé et du mode opératoire appliqué.

Le tableau suivant présente les points d'éclair et pression de vapeur saturante des substances pures (Tableau 3). Ces valeurs sont tirées des FDS.

Tableau 3 : Points d'éclair et pression de vapeur saturante des substances, extraite des FDS respectives.

Substances	Résultats de point d'éclair	Pression de vapeur saturante (20°C)
<i>EMAG</i>	> 101°C	4,2 mbar
<i>Méthanol</i>	9,7°C	128 mbar

L'EMAG possède un point d'éclair très supérieur à celui du méthanol et est également nettement moins volatile. Une pression de vapeur saturante élevée signifie que la substance est volatile et, si inflammable, atteindra plus facilement une concentration suffisante pour permettre une inflammation.

L'Ineris a choisi, dans un premier temps, de réaliser un essai d'estimation à l'aide d'un appareil nommé « Setaflash » utilisant la norme NF EN ISO 3679 et plus précisément le « Mode Opératoire B – Détermination du point d'éclair ». Il s'agit d'une coupelle fermée remplie d'un volume faible d'échantillon (2 ml), l'essai est à un équilibre rapide et la prise d'essai est renouvelée à chaque tentative d'inflammation. Les points d'éclair estimés sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Point d'éclair estimé à l'aide du « Setaflash ».

Concentration du mélange	Résultats
2 %v MeOH	29,5°C
4 %v MeOH	25,5°C
6 %v MeOH	Non mesurable (limité par la température de l'appareil)

Ces premiers résultats indiquent que les mélanges ont des valeurs de points éclairs assez proches, voire, dans le cas du mélange à 6 % v MeOH, probablement inférieures à la température ambiante. On peut également conclure qu'il ne sera pas possible de réaliser des essais en coupelle ouverte car la température de point d'éclair estimée est très inférieure au domaine d'application de la norme (NF EN ISO 2592, 79°C à 400°C).

Il a cependant été possible de réaliser les essais en coupelle fermée en appliquant la méthode décrite par la norme NF EN ISO 13736 et en utilisant l'appareil dit « ABEL » présenté sur la figure 3.



Figure 3 : Photo illustrative de l'appareil automatique « ABEL »

La méthode décrite par la norme NF EN ISO 13736 est une méthode dite hors équilibre. Elle spécifie une méthode manuelle et automatisée de détermination du point d'éclair en vase clos des combustibles liquides dont les points d'éclair sont compris entre $-30,0^{\circ}\text{C}$ et $75,0^{\circ}\text{C}$. La prise d'essai est placée dans le vase d'un appareil Abel et chauffée avec une augmentation constante de la température et sous agitation permanente. À intervalles de température réguliers, une source d'inflammation est présentée devant une ouverture dans le couvercle du vase tout en interrompant simultanément l'agitation. Le point d'éclair à la pression ambiante est relevé comme étant la température la plus basse à laquelle la source d'inflammation provoque l'inflammation des vapeurs au-dessus de la prise d'essai et la propagation d'une flamme à la surface du liquide. La température est ajustée pour tenir compte des variations de la pression atmosphérique (la pression de référence étant de 101,325 kPa) par l'utilisation d'une formule de correction. Les résultats obtenus pour les 3 mélanges sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Points d'éclair mesurés à l'aide du « Vase Abel ».

Concentration du mélange	Résultats
2 %v MeOH	27,0°C
4 %v MeOH	21,5°C
6 %v MeOH	14,0°C

Cet essai a mis en évidence l'impact important du méthanol sur la température de point d'éclair. En effet, en augmentant la concentration en méthanol de 2 %v à 6 %v, la température de point d'éclair diminue de 27°C à 14°C . En comparant ces résultats avec ceux des points d'éclair des substances pures (voir tableau 3), on peut conclure que l'ajout de méthanol impacte grandement la valeur de point d'éclair du mélange EMAG/Méthanol malgré sa faible proportion. Cela s'explique par le fait que cette substance est nettement plus volatile que l'EMAG, autrement dit, sa pression de vapeur saturante est très supérieure. Les trois mélanges sont considérés inflammables au sens de la réglementation CLP.

Principe et résultats de détermination du Point Inférieur d'Explosion (PIE)

Le Point Inférieur d'Explosion est la température d'un liquide inflammable à laquelle la concentration de vapeur saturée en mélange dans l'air est égale à la limite inférieure d'explosivité.

Sur la figure 4 est représentée la courbe de pression d'un liquide pur et les différents paramètres de sécurité déterminés selon des méthodes standardisées.

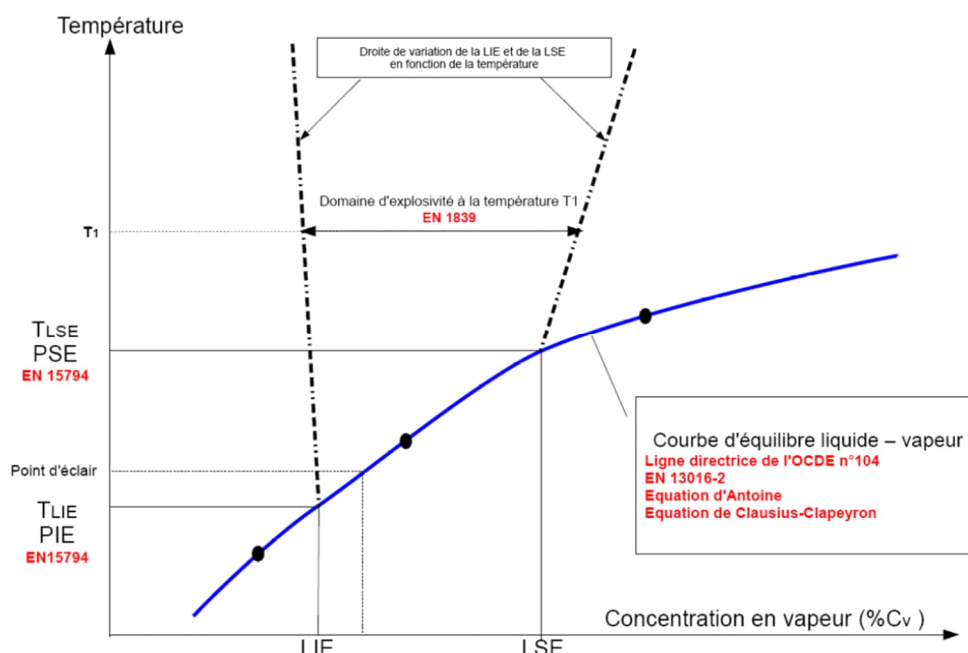


Figure 4 : Courbe de température en fonction de la concentration en vapeur incluant les positions des différents paramètres expérimentaux mesurés

Le PIE et PSE étaient autrefois nommés respectivement températures limites inférieure et supérieure d'explosivité (TLIE et TLSE).

La détermination du PIE est réalisée conformément à la norme française homologuée NF EN 15794 : 2009 : Détermination des points d'explosion des liquides inflammables. Ce document spécifie une méthode d'essai permettant de déterminer les points d'explosion des liquides inflammables dans l'air. Il s'applique aux liquides inflammables à la pression atmosphérique et à des températures comprises entre -50°C et 300°C.

Le principe de la mesure du point inférieur d'explosion (PIE) est le suivant :

L'échantillon d'essai est placé dans un récipient cylindrique (Figure 5), chauffé jusqu'à une température spécifiée. Lorsque les conditions d'équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse sont atteintes à la température fixée, l'inflammation est amorcée par une série d'étincelles d'induction. On observe alors s'il se produit un détachement de la flamme ou une augmentation de la température. La température de l'appareillage d'essai est augmentée ou diminuée par palier, jusqu'à ce que l'inflammation ne se produise plus.

Le schéma de principe de l'appareillage est reporté sur la figure 6, l'enceinte thermostatique permet de chauffer l'ensemble à la température spécifiée.

Le récipient d'essai est un cylindre en verre à fond plat de diamètre interne égal à 100 mm et de hauteur de 300 mm.

Il est équipé d'un couvercle en acier inoxydable muni :

- de deux électrodes ;
- de deux thermocouples de type K de 1 mm de diamètre, l'un plongé dans le liquide (destiné à la mesure du PIE) et l'autre dans la phase gazeuse ;
- d'un thermocouple de type K de 0,5 mm de diamètre placé à la verticale des électrodes, juste en dessous du couvercle de manière à mesurer une élévation de température ;
- d'une entrée et d'une sortie d'air nécessaire au renouvellement de l'air dans la phase gazeuse après une inflammation ;
- d'une soupape permettant de libérer la pression générée au cours d'une inflammation.



Figure 5 : Photo illustrative du récipient d'essai rempli à hauteur de 20 %

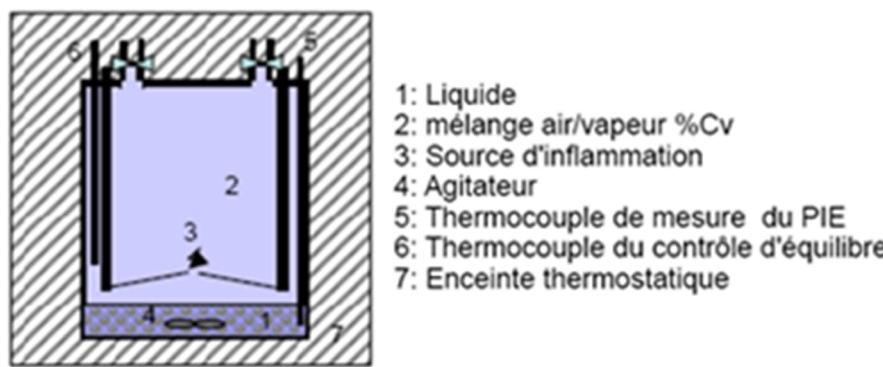


Figure 6 : Schéma de principe de l'appareillage

Le critère d'inflammation est l'observation d'un détachement de flamme (Figure 7) s'apparentant à une combustion auto-entretenue. Ce phénomène se traduit par un mouvement ascendant visible d'une flamme, d'au moins 100 mm par rapport à l'emplacement des électrodes.

Les mélanges vapeur/air ayant une teneur en vapeur légèrement en dehors du domaine d'explosivité peuvent présenter un phénomène, appelé « halo », au-dessus de la source d'inflammation mais sans qu'il y ait de détachement de flamme.

La formation d'un halo n'est pas en soi considéré comme une inflammation, sauf s'il atteint la partie supérieure du récipient d'essai (phénomène noté HALO +).

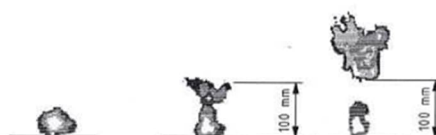


Figure C.1 — Détachement de la flamme



Figure C.2 — Halo (FLAMME NON DÉTACHÉE)

Figure 7 : Illustration du phénomène de détachement de flamme

Remarque : Le point inférieur d'explosion (PIE) d'un liquide est normalement inférieur à son point d'éclair. En ce qui concerne les substances pures, la différence peut atteindre 10 °C. Dans le cas de mélanges, la différence peut atteindre 25 °C.

Les résultats de points inférieurs d'explosion sont présentés dans le tableau 6, en complément sont également présents les points d'éclair mesurés et la différence entre les deux mesures. Les mesures de PIE sont inférieures aux mesures de points d'éclair pour les 3 mélanges. Dans des conditions de stockage, ce type de mélange présente donc des risques d'inflammation à partir de 10,0°C si la concentration en méthanol ne dépasse pas 6 %v dans la phase liquide.

L'intérêt de déterminer le PIE réside dans le fait que les conditions d'essais représentent mieux le cas d'un stockage ou un lieu où des vapeurs peuvent s'accumuler contrairement au point d'éclair. De plus, les mesures de point d'éclair dépendent de la norme utilisée, de la méthode, de l'opérateur et les volumes de substance sont plus faibles, facteurs qui jouent sur la fiabilité des mesures comparée à celle de PIE.

Tableau 6 : Résultats d'essais de détermination des points inférieures d'explosion et comparaison avec les résultats de points d'éclair

Concentration du mélange	Point inférieure d'explosion	Point d'éclair retenu (Abel)	Delta entre point d'éclair et PIE
2 %v MeOH	18,5°C	27,0°C	8,5°C
4 %v MeOH	13,1°C	21,5°C	8,4°C
6 %v MeOH	10,0°C	14,0°C	4,0°C

Principe et résultats de la détermination des limites inférieures d'explosivité

Les limites d'explosivité du liquide ont été déterminées suivant la méthode dite de la « bombe » (méthode B) décrite dans la norme NF EN 1839.

Les essais sont effectués dans une sphère close de 20 l en acier inoxydable (Figure 8). Elle est équipée d'une double enveloppe destinée à y faire circuler un fluide caloporteur de manière à régler la température d'essai souhaitée et/ou minimale pour évaporer intégralement le liquide injecté.



Figure 8 : Photographie de la sphère de 20 litres et des matériels associés

Le mélange d'essai est préparé dans la sphère par la méthode des pressions partielles. En considérant que les différents gaz du mélange suivent la loi des gaz parfaits, quelle que soit la température d'essai, on obtient la relation qui lie la fraction molaire du constituant y (x_y) dans le mélange (à ?) la pression partielle du constituant y (p_y) dans le mélange et la pression totale du mélange (P_T) :

$$x_y = (p_y / P_T)$$

La source d'inflammation utilisée est un train d'étincelles, d'origine inductive, généré entre deux électrodes positionnées au centre de la sphère.

Le critère d'inflammation est basé sur la mesure de la surpression d'explosion après l'application de la source d'inflammation. Le mélange d'essai est considéré comme inflammable si la surpression d'explosion obtenue est supérieure ou égale à 5 % de la pression initiale.

Par variation pas à pas de la teneur en vapeur de la substance à tester dans le mélange d'essai (air/vapeur), la LIE est déterminée.

Mode opératoire

Les étapes suivantes sont effectuées successivement :

- a) Chauffage de l'enceinte à la température d'essai ;
- b) Mise sous vide partielle de l'enceinte et mesure de pression d'air résiduelle ;
- c) Injection à l'aide d'une seringue d'une quantité de produit nécessaire pour atteindre la pression partielle souhaitée ;
- d) Introduction de l'air ambiant jusqu'à atteindre la pression ambiante ;
- e) Mise au repos du mélange d'essai ;
- f) Démarrage de la mesure de pression d'explosion et activation de la source d'inflammation ;
- g) Nettoyage de l'enceinte (absorption des gaz résiduels et purge à l'air propre) ;
- h) Répétition des étapes a) à g) tant que nécessaire avec des compositions du mélange différentes ou identiques.

Les résultats des essais de détermination des LIE sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Résultats d'essais de détermination des limites inférieures d'explosivité

Concentration du mélange	Limite inférieure d'explosivité
2 %v MeOH	0,6 %
4 %v MeOH	0,9 %
6 %v MeOH	1,3 %

Principe et résultats de la détermination de la pression de vapeur saturante

La mesure est réalisée à l'aide de l'appareil MINIVAP VPXpert-L de Grabner Instruments, dont la gamme de mesure est de 0-100 kPa.

La pression de vapeur absolue (P_{sat}) d'un liquide est définie comme la pression qui s'établit au-dessus d'un liquide dans le vide à une température donnée.

La mesure est réalisée selon la méthode « triple expansion » développée par Grabner Instruments dans leurs appareils type MINIVAP VPXpert. Cette méthode permet de déterminer précisément la pression de gaz totale (P_{tot}) ainsi que la pression de gaz dissous (P_{gaz}), même sans préparation de l'échantillon. La pression de vapeur absolue (P_{sat}) s'écrit :

$$P_{\text{sat}} = P_{\text{tot}} - P_{\text{gaz}}$$

La mesure de pression de vapeur est déterminée à partir d'un échantillon de 10 ml de liquide, 7,5 ml pour le rinçage et 1 ml pour la mesure. La taille de la cellule de mesure est de 5 ml.

La température de la cellule de mesure est contrôlée à $\pm 0,1^\circ\text{C}$ par un module thermo électrique et mesurée par une sonde à résistance de platine (Pt 100).

L'appareil de mesure de pression de vapeur MINIVAP VPXpert-L est vérifié avec de l'hexane de pureté égale à 99,2 % (VWR Chemicals lot 21B034015 – référence : 26608.296). Ce test de vérification est effectué avant et après les mesures réalisées avec le mélange à base de méthanol. Pour information, l'incertitude de mesure -L sur l'hexane est inférieure à $\pm 0,4$ kPa.

Les mesures sont réalisées sur trois échantillons composés d'un mélange d'ester et de méthanol, référencés 24AN096 et 24AN097. Les échantillons n'ont subi aucune préparation initiale avant de réaliser les mesures.

Pour chaque échantillon, trois mesures consécutives sont réalisées à une température de 20°C . La valeur moyenne des mesures de pression de vapeur est retenue.

Les résultats des mesures de pression de vapeur saturante pour les 3 échantillons sont reportés dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Résultats des mesures de pression de vapeur

Echantillon : 24AN096 + 24AN097				
Echantillon	Mesures de pression de vapeur (kPa)			Moyenne (mbar)
	1	2	3	
2 % v MeOH	4,9	5,17	5,06	50,4
4 % v MeOH	8,02	8,01	8,03	80,2
6 % v MeOH	10,21	10,17	10,21	102,0

Conclusion

Le tableau 9 récapitule les résultats obtenus aux cours des différents essais :

Tableau 9 : Récapitulatif des résultats obtenus

Essai/Mélange	2 %v MeOH	4 %v MeOH	6 %v MeOH
<i>Point d'éclair</i>	27,0°C	21,5°C	14°C
<i>PIE</i>	18,5°C	13,1°C	10,0°C
<i>LIE</i>	0,6 %	0,9 %	1,3 %
<i>Pression de vapeur</i>	50,4 mbar	80,2 mbar	102,0 mbar

ANNEXE 3

-

Rapport d'investigation visuelle et documentaire des capteurs de niveau du coalesceur

Capteur de niveau du coalesceur - Ref : 10LDT2104

Inspection visuelle du matériel :

Fabricant : FOXBORO ECKARDT

Marquages visibles :

- Marquage ATEX : Ex II2G EEx ib/ia IIB/IIC T4/T6
- Certificat ATEX : PTB 01 ATEX 2044
- Marquage sur bride : température / pression / force

Les marquages ATEX visibles sont ceux du capteur type AI 419.

Le marquage ATEX remis par SAIPOL est le suivant :

- Marquage ATEX : Ex II2G EEx ib/ia IIC T4
- Certificat ATEX : PTB 01 ATEX 2168

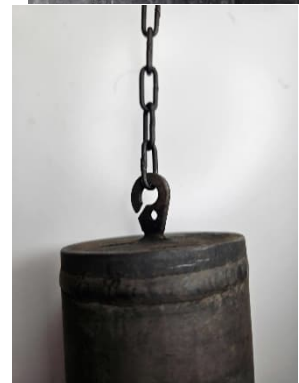
Marquage pour transmetteur 144LVD fonctionnant avec capteur type AI 419

Equipment composé d'un flotteur suspendu à une chaîne elle-même connectée à une cellule de mesure intégrée à la bride de connexion DN 80. L'équipement est ensuite équipé d'un système de connexion/déconnexion du capteur à l'amplificateur non présent durant notre expertise.

Sur la partie extérieure de l'équipement : pas de dommage apparent visibles

Sur la partie interne de capteur : coloration violette dans la cellule de mesure.

Nous notons aussi la présence d'un fil en sortie de la cellule de mesure correspond surement à la connexion électrique du capteur.



Etude des documents fournis

Nom du fichier	Type de document	Informations notables	Commentaires
144LVD_1PSS_A_001_en	Spécifications fabricant du produit / datasheet	Informations sur les conditions d'installation du capteur. Vue éclatée de l'équipement	Les données de ce document ont été complétées avec les données de l'Attestation d'examen UE de type PTB 01 ATEX 2044
Calcul de boucle 10LDT2104	Calcul de boucle pour le capteur type FOXBORO-ECKARDT 144LVD/144LD	Certificats utilisés listés 144LVD : PTB 01 ATEX 2168 Carte AI 2 Wire : KEMA 04ATEX 1244 Coffret inox : BSV 04ATEXE157 Longueur de câble : 150 m Certificat joint au fichier PTB 01 ATEX 2168	Données de calculs SI tirées du certificat PTB 01 ATEX 2168 en accord avec les caractéristiques SI de la sonde type AI 419 : $U_i = 30V$ $I_i = 150\text{ mA}$ $C_i = 4.8\text{ nF}$ L_i négligeable
Certificat EN 10LDT2104	Certificat d'inspection	Validation du type 144LVD du matériel et du test pression	-
Schéma de boucle 10LDT2104	Schéma de boucle SI pour le capteur 10LDT2104	Capteur câblé vers la station C51 Entrée analogique Câble de type 01IP09EGSF	-
Spécification 10LDT2104	Spécifications intégrateur site	Spécification du capteur et produit à mesurer	-
Type capteur 10LDT2104	Instrument list des capteurs 10L2102 à 10L2111	Sonde niveau par flotteur Mesure sur domaine 0-1800mm Alarme niveau haut et bas	Signal vers 10HS2101
01IP09EGSF_GRIS - 14482104 - 2025-01-27 03_05_02	Datasheet cable type 01IP09EGSF par SERMES	Information relative à l'inductance et la capacitance de ce type de câble	

Vérification du calcul de boucle 10LDT2104

Validation des valeurs utilisées

	Capteur		Cable (xx/km)		Barrière	
Fabricant	FOXBORO-ECKARDT		?		SIEMENS	
Type	144LVD		01IP09EGSF		6ES7 131-7TD00-0AB0	
Valeurs	Calcul	Certificat (*)	Calcul	Ref (**)	Calcul	Certificat (***)
U (V)	30	30	-	-	27.6	27.6
I (mA)	150	150	-	-	91	88,2
P (mW)	900	900	-	-	630	610
L (mH)	0.0048	0.0048	0.31	0.38	13	15.7
C (µF)	-	-	0.16	230	0.65	0.665

(*) certificat fournit avec le calcul de boucle

(**) choix de la valeur la plus contraignante trouvé sur le internet pour ce type de câble

(***) Valeurs extraites du dernier avenant au certificat, le certificat a date du calcul de boucle réalisé par SAIPOL n'étant pas disponible. Valeurs sélectionnées pour un circuit connecté individuellement pour le groupe de gaz IIB, avec les valeurs les plus contraignantes de L_o , C_o

Input circuit (terminals 1 and 2 on TM-EM):

in type of protection intrinsic safety Ex ia or Ex ic, with the following maximum values:

$U_o = 27,6 \text{ V}$; $I_o = 88,2 \text{ mA}$; $P_o = 610 \text{ mW}$.

For Ex ia IIC: $C_o = 83 \text{ nF}$; $L_o = 3 \text{ mH}$.

For Ex ia IIB and Ex ia IIIC: $C_o = 665 \text{ nF}$; $L_o = 15,7 \text{ mH}$.

For Ex ic IIC: $C_o = 282 \text{ nF}$; $L_o = 4,9 \text{ mH}$.

Validation de la longueur de câble

BARRIERE				CABLE				CAPTEUR					
Paramètres de sortie				Caractéristiques				Paramètres d'entrée					
Constructeur	SIEMENS			?				FOXBORO-ECKARDT					
Type	6ES7 134-7TD00-0AB0			01IP09EGSF				144LVD					
N° certificat	KEMA 04ATEX1244			N/A				PTB 01 ATEX 2168					
Marquage	Ex ib [ia] IIC T4			N/A				Ex II2G EEx ib/ia IIC T4					
Paramètres de sortie pour le groupe de gaz ciblé:				Caractéristiques du câble (câble de 2 à 3 conducteurs non spécifié: Lc = 1µH/m et Cc = 220pF/m (EN 60079- 14:2014, cl. 16.2.2.2)				Paramètres d'entrée pour le groupe de gaz ciblé:					
		Uo =	27,6	V		Lc =	0,38	µH/m		Ui =	30	V	
		Io =	88,2	mA		Cc =	230	pF/m		Ii =	150	mA	
		Po =	610	mW	Longueur de câble réellement installée					Pi =	900	mW	
					sur site =				m				
		Lo =	15700	µH	Longueur maximale autorisée:				2870,4	m	Li =	0	µH
		Co =	6,65E+05	pF							Ci =	4,80E+03	pF
LA BOUCLE DE SECURITE INTRINSEQUE EST VALIDEE													

Validation de la longueur de câble

Installation de 150 m → possibilité d'installer 2870 m selon calcul de boucle le plus contraignant.

Capteur de niveau à lames - Ref : 10LS2115



Inspection visuelle du matériel :

Absence de marquage correspondant à un matériel ATEX

Marquages visibles :

Extérieur bride : 1.4435 A837 003

Intérieur bride : 1894 Q51 1.4435 4021531 KS2

Bride : DIN EN 1092-1 05 DN 50 PN 40 1.4435/316L Ch 514563 GERMANY 0784

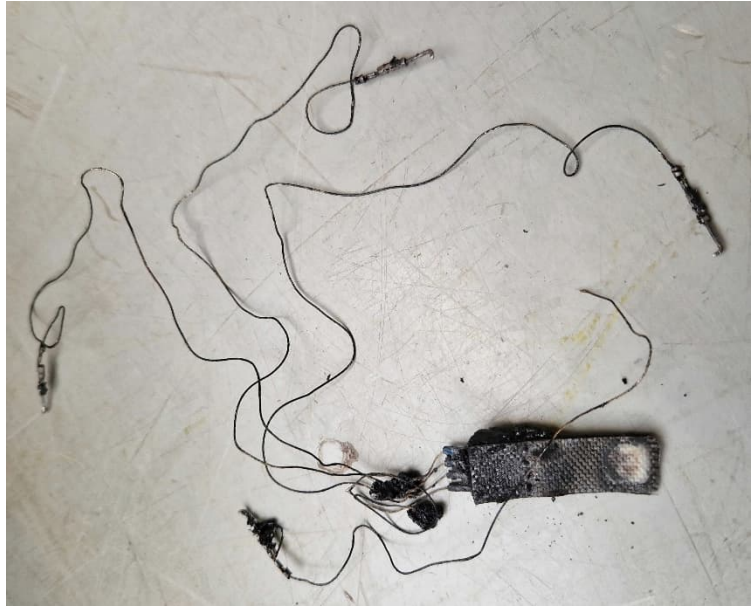
Lame : B1 22281

Sur la partie externe de la bride : Présence d'un manchon soudé et d'un circlip utilisé vraisemblablement pour fixer la tête du capteur. Une mèche est visible depuis cette extrémité.

Sur la partie interne de la bride : Présence du bilame sans dommage apparent hormis une coloration bleutée au niveau de sa base.



Lors du retrait de la mèche située l'intérieur du tube du bilame, on note la présence fils métalliques terminés par des connecteurs, dans un amas de matière calcinée.



Etude des documents fournis

Nom du fichier	Type de document	Informations notables	Commentaires
TI328FES	Documentation technique pour le détecteur de niveau par vibration liquiphant M FTL 50, 51, 50H, 51H		non utilisé car en espagnol
Type capteur 10LS2115	Instrumenlist des capteurs 10L2114 à 10L2123	Pour le capteur 10L_2115 LEVEL SWITCH VIBRATION TYPE fabricant Endress Hauser Via RIOS / Plan trip SHH OFF	Le capteur semble être utilisé pour détecter un très haut niveau et il entraîne une coupure
Calcul de boucle 10LS2115	Calcul de boucle pour le capteur type ENDRESS+HAUSER LIQUIPHANT M FTL51C	Certificats utilisés listés FTL51C : KEMA <u>04</u> ATEX1071X Carte 8DI Namur : KEMA 04ATEX 1248 Coffret inox : BSV 04ATEXE157 Longueur de câble : 150 m Certificat joint au fichier KEMA <u>00</u> ATEX1071X	Le capteur 10LS2115 n'est pas référencé dans la liste des capteurs inclus dans le calcul de boucle (cf extrait* ci-dessous). A confirmer avec SAIPOL que le capteur 10LS2115 est bien couvert par ce calcul de boucle Le matériel FTL51C est couvert par le certificat KEMA 00ATEX1071X et non par le certificat KEMA 04ATEX1071X (coquille dans le document SAIPOL)
Certificat Namur	KEMA 04ATEX 1248 – Issue 02	Certificat pour la carte 8DI Namur fabricant SIEMENS AG	-
Radar LevelFlex M KEMA 04 ATEX 1129 X	KEMA 04ATEX 1129X – Issue 00	Certificat pour le capteur Radar Levelflex M type FMP41C fabricant Endress+Hauser	Certificat en Allemand Le type (FMP41C) déclaré par SAIPOL ne correspond pas au type indiqué dans le calcul de boucle (FTL51C). L'ensemble de l'étude ci-après est basée sur les caractéristiques du type FTL51C.
Schéma de boucle 10LS2115	Schéma de boucle pour le capteur 10LS2115	Capteur (utilisation 2+ et 1-) câblé vers la station C52 (utilisation sur 7+ et 8-) avec un câble de type 01IP09EGSF	-

TI347FEN	Documentation technique pour le détecteur de niveau par vibration liquiphant M FTL 51C	Enveloppe FTL51C avec deux inserts électroniques possible pour une connexion NAMUR (FEL56 et FEL58)	
01IP09EGSF_GRIS - 14482104 - 2025-01-27 03_05_02	Datasheet cable type 01IP09EGSF par SERMES	Information relative à l'inductance et la capacitance de ce type de câble	

(*) Extrait du document Calcul de boucle 10LS2115

Capteurs	Station Déportée	Folio	Plan	Emplacement	Voie	T° fluide
10LS2401	C01	338	60655	10	2	
12LS2601	C01	353	60655	10	3	
10LS2302	C02	326	60655	12	2	
10LS2303	C02	327	60655	12	3	
11LS2502	C102	346	60655	12	2	
12LS2603	C102	356	60655	12	5	
12LS2606	C51	360	60655	11	2	
10LS2405	C52	344	60655	9	4	

Vérification du calcul de boucle 10LS2115

Validation des valeurs utilisées

	Capteur		Cable (xx/km)		Barrière	
Fabricant	Endress+Hauser		?		SIEMENS	
Type	FTL51C- Electronique FEL56/58		01IP09EGSF		6ES7 131-7RF00-0AB0	
Valeurs	Calcul	Certificat (*)	Calcul	Ref (**)	Calcul	Certificat (***)
U (V)	16	16	-	-	9.6	9.6
I (mA)	52	52	-	-	16	16
P (mW)	169	169	-	-	38	38
L (mH)	-	-	0.31	0.38	400	0.1
C (µF)	-	-	0.16	0.230	28	11.9

(*) certificat fournit avec le calcul de boucle

(**) choix de la valeur la plus contraignante trouvé sur internet pour ce type de câble

(***) Valeurs extraites du dernier avenant au certificat, le certificat a date du calcul de boucle réalisé par SAIPOL n'étant pas disponible. Valeurs sélectionnées pour un circuit connecté individuellement pour le groupe de gaz IIB, avec les valeurs les plus contraignantes de Lo, Co

Each circuit individually connected:

$U_o = 9,6 \text{ V}$
 $I_o = 16 \text{ mA}$
 $P_o = 38 \text{ mW}$

	IIC	IIB
C_o	3,6 µF	28 µF
L_o	110 mH	400 mH

In addition, the following values are allowed for circuit with concentrated capacitances and concentrated inductances in combination:

IIC		IIB	
C_o	L_o	C_o	L_o
0,38 µF	100 mH	2,46 µF	100 mH
0,68 µF	10 mH	3,76 µF	10 mH
1,06 µF	1 mH	6,16 µF	1 mH
1,96 µF	0,1 mH	11,9 µF	0,1 mH

Validation de la longueur de câble

BARRIERE					CABLE					CAPTEUR					
Paramètres de sortie					Caractéristiques					Paramètres d'entrée					
Constructeur	SIEMENS				?					Endress+Hauser					
Type	6ES7 131-7RF00-0AB0				01IP09EGSF					FTL51C					
N° certificat	KEMA 04ATEX1248				N/A					KEMA 00ATEX1071X					
Marquage	Ex ib [ia] IIC T4				N/A					Ex ia IIC T6					
Paramètres de sortie pour le groupe de gaz ciblé:					Caractéristiques du câble (câble de 2 à 3 conducteurs non spécifié: Lc = 1µH/m et Cc = 220pF/m (EN 60079-14:2014, cl.16.2.2.2)					Paramètres d'entrée pour le groupe de gaz ciblé:					
			Uo =	9,6	V			Lc =	0,38	µH/m			Ui =	16	V
			Io =	32	mA			Cc =	230	pF/m			Ii =	52	mA
			Po =	38	mW	Longueur de câble réellement installée							Pi =	169	mW
						sur site =									
			Lo =	100	µH								Li =	0	µH
			Co =	1,19E+07	pF	Longueur maximale autorisée:							Ci =	0,00E+00	pF
LA BOUCLE DE SECURITE INTRINSEQUE EST VALIDEE															

Installation de 150 m → possibilité d'installer 263 m selon calcul de boucle le plus contraignant.

Conclusion

Lors de l'examen visuel des capteurs, aucun dommage, de casse ou rupture des éléments sensibles n'a été observé. Toutefois, il a révélé la présence de colorations bleues/violettes sur certaines parties des capteurs en acier inoxydable. Ces colorations sont généralement obtenues pour des échauffements allant de 270°C à 320°C environ. Ces températures ne sont pas compatibles avec le fonctionnement des équipements évalués, même en cas de dysfonctionnements prévisibles ou dysfonctionnements rares.

Les deux capteurs sont protégés par sécurité intrinsèque c'est-à-dire que l'énergie transmise aux éléments sensibles est contrôlée, et ne peut pas créer des étincelles ou échauffement susceptibles d'enflammer une ATEX.

A partir des documents et informations mis à notre disposition, nous pouvons établir que les boucles de sécurité intrinsèques du capteur de niveau du coalesceur #10LDT2104 et du capteur de niveau lames #10LS2115 sont en adéquation avec les exigences des normes EN 60079-14 « Atmosphères explosives - Partie 14 : Conception, sélection et construction des installations » et EN 60079-25 « Atmosphères explosives - Partie 25 : systèmes électriques de sécurité intrinsèque » pour les calculs de boucle de Sécurité Intrinsèque ne contenant qu'une seule source de puissance.

La sécurité des appareils de sécurité intrinsèque dépend principalement de la barrière située en amont du capteur hors zone ATEX. Des investigations complémentaires sur l'installation permettraient d'approfondir l'évaluation de la génération potentielle d'autres sources d'inflammation par ces équipements :

- Evaluation des barrières de sécurité à la recherche d'un défaut électrique/électronique potentiel qui aurait pu inhiber les différents niveaux de sécurité intrinsèque et donc créer des étincelles de court-circuit avec une énergie suffisamment importante pour enflammer une ATEX.
- Evaluation de l'installation électrique directement sur le terrain :
 - o Vérification de la conformité de l'installation des barrières de sécurité intrinsèque dans les stations déportées C51 et C52. Des exigences normatives existent concernant l'installation des barrières de Sécurité Intrinsèque afin d'éviter toute perturbation électrique dans les circuits de SI (par exemple : distances minimum requises entre circuits de SI et de non SI).
 - o Vérification du cheminement des câbles de Sécurité Intrinsèque, les câbles de SI et de non SI devant être séparés afin d'éviter la génération de champ induit dans les circuits de SI.

Enfin, le capteur de niveau du coalesceur est composé d'un flotteur et d'une chaîne de suspension, le risque de génération d'étincelles par charge électrostatique doit être maîtrisé sur ce type de matériel. En effet, la continuité de potentiel est dépendante du contact métal/métal de la chaîne induit par la gravité du flotteur. Toutefois, l'absence de liquide dans le coalesceur au moment de l'ignition semble indiquer que les conditions pour la création de charges électrostatiques et donc une décharge par étincelle soient peu probables.

Pour information, l'Ineris en sa qualité d'organisme notifié au titre de la directive ATEX 2014/34/UE, est toujours vigilant lors de l'évaluation de conformité des capteurs par flotteur à la présence d'un système permettant un contact franc et permanent du flotteur avec le reste de l'équipement afin de garantir une continuité de potentiel (cf. retour d'expérience de l'explosion sur le site de Barton Solvents à Valley Center dans le Kansas en juillet 2007).

L'ensemble des éléments mis à notre disposition ne nous permettent donc pas d'infirmer ou d'affirmer que ces équipements seraient à l'origine de l'inflammation d'une ATEX sur le site de SAIPOL. Les colorations bleutées sur les deux appareils ne peuvent être dues à l'exposition rapide d'un front de flamme, et donc une expertise complémentaire sur l'installation électrique en amont des instruments ainsi qu'une série de tests électriques sur des équipements fonctionnels identiques seraient nécessaires.

ANNEXE 4

-

Rapport d'investigations complémentaires du capteur de niveau à lames

INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES CAPTEUR DE NIVEAU A LAMES

À la suite de la première expertise portant sur le capteur de niveau à lames, des investigations complémentaires ont été menées sur un appareil équivalent, dans le but d'évaluer si ce type de capteur, en situation de fonctionnement dégradé, pouvait constituer une source potentielle d'inflammation.

Le matériel fourni par la société SAIPOL pour la réalisation des essais est un capteur de niveau Endress+Hauser Liquiphant M FTL51C, certifié KEMA 99ATEX0523 avec le marquage Ex II 1/2 G EEx ia IIB T3...T6. Ce modèle présente un fonctionnement identique et des caractéristiques techniques comparables à celles du capteur installé sur le site SAIPOL au moment de l'incendie.



Photo 1 : Capteur de niveau fourni par SAIPOL pour tests complémentaires



Photo 2 : Capteur de niveau installé sur le site de SAIPOL au moment de l'explosion

Trois scénarios de défaillance ont été identifiés et évalués :

- **Scénario 1 :** apparition d'une flamme due à une inflammation interne au niveau de la tête de raccordement électrique (connecteur ou électronique du transmetteur), avec transmission possible de la flamme par le tube prolongateur contenant le bilame.
- **Scénario 2 :** élévation excessive de la température de surface au niveau du tube prolongateur et du bilame, pouvant dépasser la température d'auto-inflammation du mélange gazeux présent.

- **Scénario 3** : génération d'une étincelle d'origine électrostatique.

Le matériel étant conçu selon le mode de protection par sécurité intrinsèque, les scénarios 1 et 2 ne seraient envisageables qu'en cas de défaillance de la boucle de sécurité intrinsèque, et notamment de la barrière sécurité intrinsèque installée en amont du capteur.

Scénario 1 – Inflammation avec transmission d'une ignition interne vers l'extérieur

Le capteur étudié est certifié pour une utilisation en zone 1 au niveau de la tête de connexion, et en zone 0 pour le tube prolongateur et le bilame. En raison de sa conception en sécurité intrinsèque, un gaz inflammable présent dans l'environnement peut potentiellement se retrouver aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'équipement, rendant ainsi plausible l'existence d'une atmosphère explosive interne.

En cas de défaut de limitation du couple tension/courant, une étincelle générée à l'intérieur du capteur pourrait théoriquement atteindre une énergie supérieure à l'énergie minimale d'inflammation du gaz environnant. Une telle ignition pourrait alors se propager vers l'extérieur, à condition que deux critères soient réunis :

1. L'existence d'un passage entre l'intérieur du tube prolongateur et l'extérieur ;
2. Des dimensions suffisantes de ce passage pour permettre la transmission d'une flamme.

Pour vérifier cette hypothèse, un test d'étanchéité à l'air comprimé a été réalisé sur le tube prolongateur du capteur effectivement en place sur le site de SAIPOL au moment de l'incident. Ce test, consistant en une mise en pression suivie de l'application d'un aérosol détecteur de fuites, visait à identifier une éventuelle perforation.



Photo 3 : Test d'étanchéité à l'air comprimé sur le tube prolongateur du capteur à bilame

Conclusion Scénario 1

Aucune fuite n'a été détectée lors de cet essai. Il est donc raisonnable de conclure que le Scénario 1 ne s'est pas produit dans le contexte de l'incendie survenu sur le site SAIPOL.

Scénario 2 – Inflammation par élévation de la température de surface au-delà de la température d'auto-inflammation (TAI)

Le capteur de niveau installé sur le site de SAIPOL était certifié T6, ce qui correspond à une température de surface maximale de 85 °C, pour une température ambiante d'utilisation allant jusqu'à 55 °C.

Le mélange explosible (ATEX) présent dans la cuve, constitué de méthanol et d'EMAG, présentait une température d'auto-inflammation (TAI) de 250 °C.

Dans l'objectif de vérifier si une élévation anormale de la température de surface du capteur pouvait conduire à une inflammation de l'atmosphère explosive, un essai thermique a été mené en simulant une défaillance complète de la boucle de sécurité intrinsèque, notamment de la barrière SI.

Ainsi, le capteur a été alimenté directement par une source 24 VDC sans limitation de courant (tension fournie en amont de la barrière de sécurité sur le site de SAIPOL), condition représentative, bien que très majorant, d'un défaut de sécurité. Le raccordement a été effectué conformément aux préconisations de la notice d'utilisation du capteur Liquiphant M FTL51C, en prenant en compte une électronique de type NAMUR H-L FEL58.

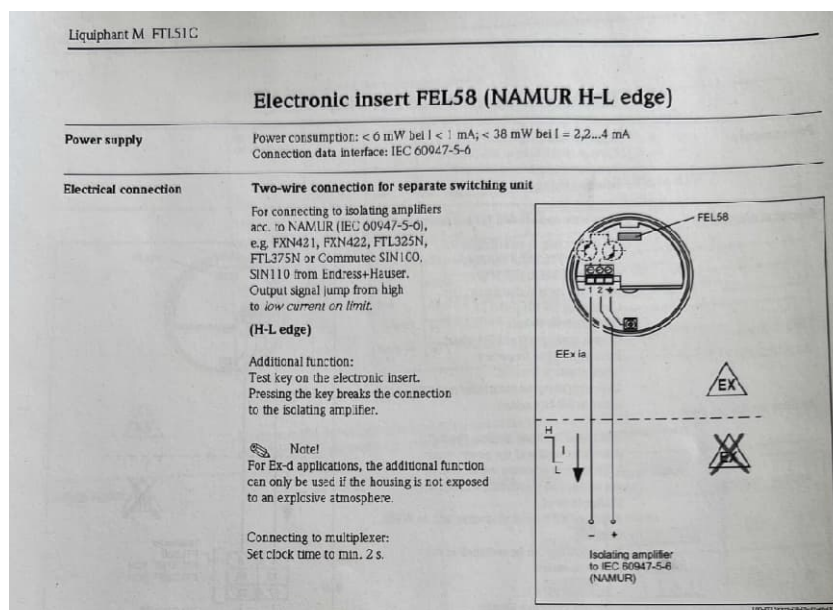


Figure 1 : Raccordement extrait de la notice du Liquiphant M FTL51C

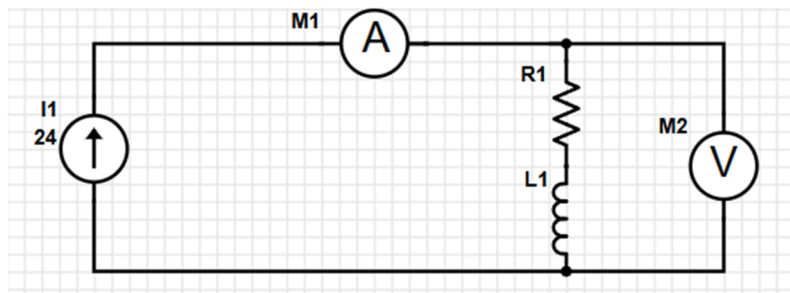


Figure 2 : Schéma électrique du montage d'essai thermique

Protocole de test

L'essai consistait à appliquer progressivement différents paliers de tension, sans limitation de courant, avec un temps de stabilisation thermique d'une minute entre chaque palier. Les valeurs de tension, courant et température ont été relevées à chaque étape. La température a été mesurée en quatre points, plus un point de référence pour la température ambiante (point 1).

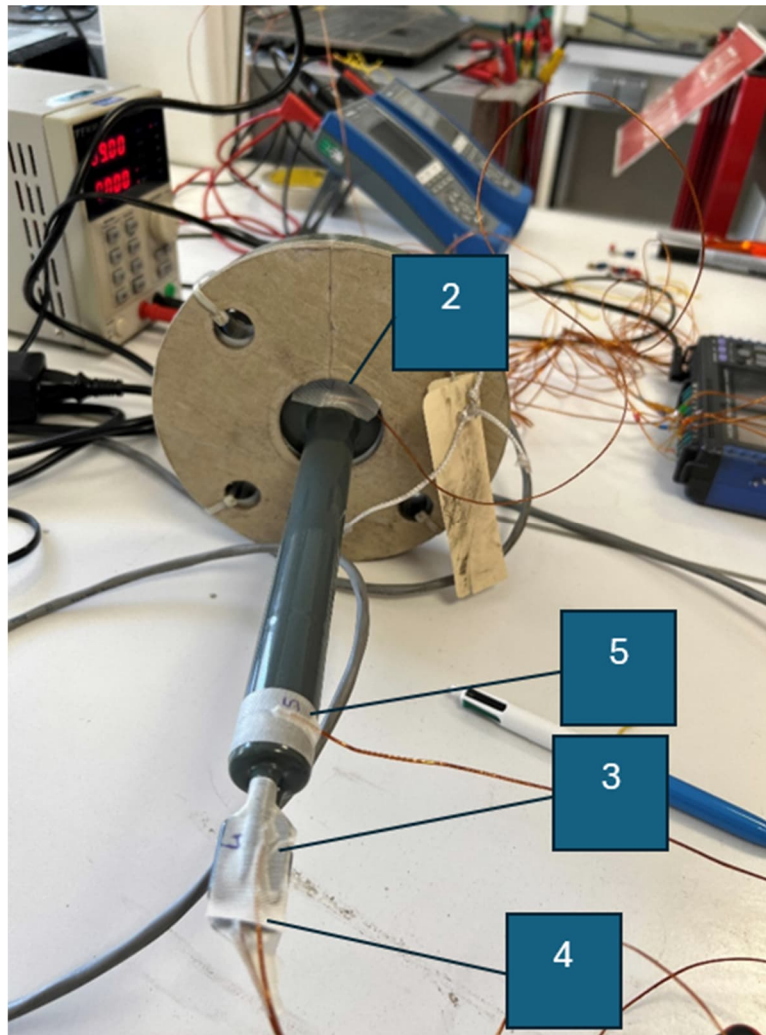


Photo 4 : Montage de l'essai thermique

Résultats

Palier	Tension (VDC)	Courant (mA)	Température ambiante (°C)	Température maximale mesurée (°C)
1	3,99	1,75	21,6	21,8
2	7,99	3,29	21,6	21,9
3	9,00	3,29	21,7	21,7
4	10,00	3,22	21,8	21,8
5	14,00	6,87	21,8	21,8
6	14,99	27,3	21,8	22,0
7	16,00	45,7	21,8	22,0
8	18,00	83,9	21,8	21,9
9	20,90	141,0	21,9	22,0
10	24,08	200,0	21,8	21,9

Tableau 1 : Températures mesurées en fonction des couples tension/courant appliqués

Conclusion Scénario 2

Malgré l'alimentation directe du capteur sous 24 VDC sans limitation de courant, il n'a pas été possible de dépasser un courant de 200 mA, l'électronique de type FEL58 limitant l'intensité entrante.

L'échauffement observé au cours de l'essai est resté largement inférieur au seuil critique de 85 °C, correspondant au classement T6, et très éloigné de la TAI de 250 °C du mélange méthanol/EMAG.

En conséquence, le Scénario 2, supposant une inflammation par élévation de la température de surface au-delà de la TAI, peut être écarté dans le contexte de l'incendie survenu sur le site de SAIPOL.

Scénario 3 – Inflammation par génération d'une étincelle d'origine électrostatique

Le capteur de niveau Endress+Hauser Liquiphant M FTL51C, fourni par la société SAIPOL pour les essais, est équipé d'un tube prolongateur recouvert d'une couche de résine.

Les revêtements isolants (résine, peinture, etc.) appliqués sur des parties métalliques peuvent, sous certaines conditions, constituer une source de décharges électrostatiques, notamment :

- des décharges glissantes de surface,
- ou des décharges en aigrette (corona), lorsque les matériaux mis en œuvre présentent une forte résistivité.

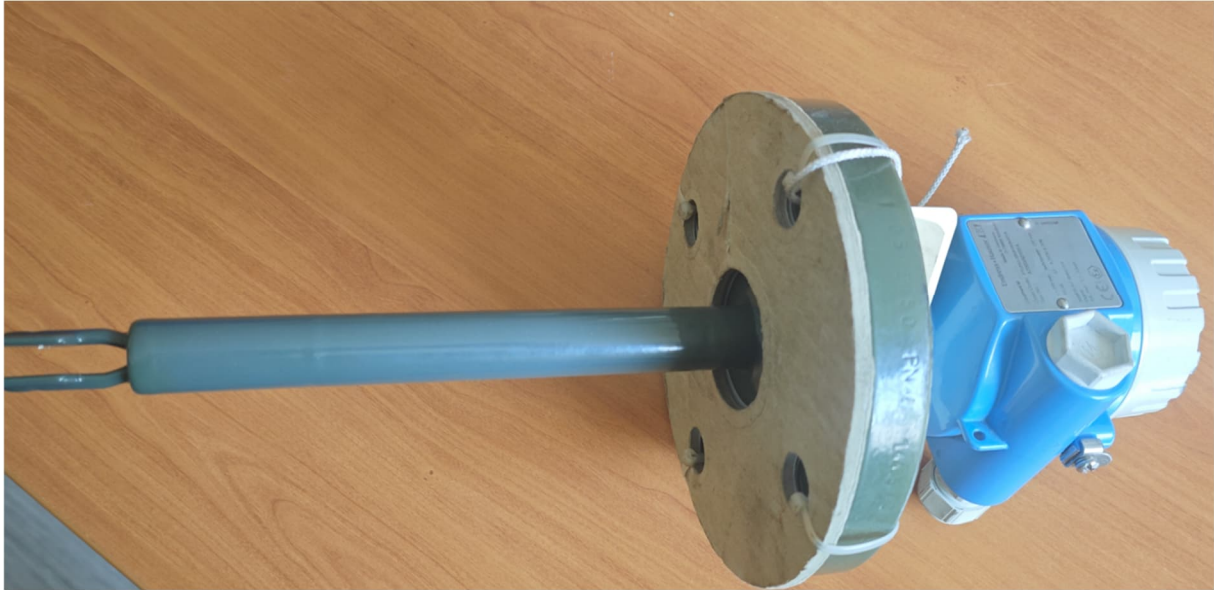


Photo 5 : Présence de résine sur le tube prolongateur du capteur à lames

Caractérisation de la résine

Des essais de caractérisation ont été réalisés en laboratoire afin de mesurer les propriétés électrostatiques de la résine recouvrant le tube :

- Épaisseur moyenne de la résine : 1,037 mm
- Résistance d'isolement : $6,8 \times 10^{13}$ ohms (très isolante)
- Tension de claquage : > 6 kV
- Charge maximale mesurée : 98 nC en extrémité de sonde

Ces résultats montrent que la résine possède des caractéristiques électriques typiques d'un isolant fort, susceptible de se charger électrostatiquement. La charge maximale mesurée (98 nC) dépasse la limite de 60 nC généralement admise pour une utilisation en atmosphère explosive de type gaz, bien qu'elle soit acceptable en zone ATEX poussière.

Conclusion sur le Scénario 3

Les essais effectués montrent que le capteur fourni pour tests par SAIPOL ne présente pas une compatibilité suffisante avec les exigences de sécurité des zones ATEX gaz, en raison :

- d'une résistance d'isolement très élevée,
- d'une épaisseur de résine > 1 mm,
- d'une charge électrostatique accumulée supérieure au seuil critique de 60 nC,
- et d'une tension de claquage > 6 kV, condition pouvant favoriser des décharges glissantes en cas de présence de fortes charges électrostatiques.

Cependant, il est important de préciser que le capteur effectivement installé sur le site SAIPOL au moment de l'explosion ne présentait pas de résine visible lors de l'expertise post-accident. Il n'a pas été possible de déterminer :

- si cet équipement était initialement dépourvu de résine,
- ou si la résine avait été présente mais éliminée ultérieurement, notamment du fait de l'élévation thermique causée par l'incendie ou par usure du temps.

Enfin, la présence effective d'une décharge électrostatique supposerait également la génération d'une charge préalable, par l'un des mécanismes suivants :

- frottement,
- influence,
- déplacement de fluide dans la cuve ...

Ces conditions, indispensables à la survenue d'une décharge, devront faire l'objet d'une analyse complémentaire sur le process pour conclure quant à la plausibilité réelle de ce scénario dans le contexte de l'incident.

Synthèse des scénarios étudiés

Scénario	Hypothèse étudiée	Résultats des essais	Conclusion
Scénario 1	Transmission d'une flamme depuis l'intérieur du capteur vers l'extérieur via le tube prolongateur	Aucun perçage détecté sur le tube lors du test d'étanchéité à l'air	Scénario écarté : aucune transmission d'explosion possible
Scénario 2	Échauffement excessif du tube prolongateur/bilame suite à défaillance de la barrière de sécurité, entraînant un dépassement de la température d'auto-inflammation (TAI)	Échauffement max mesurée < 1°C (pour une TAI de 250°C) malgré alimentation en 24Vdc directe	Scénario écarté : échauffement insuffisant, conformité au classement T6 confirmée
Scénario 3	Inflammation par décharge électrostatique due à une résine isolante sur le tube prolongateur	Résine isolante (>1 mm, >60 nC, >6 kV) présente sur le capteur testé, mais absente sur le capteur expertisé après incident	Scénario non avéré, mais non totalement exclu faute d'éléments confirmant la présence ou l'absence de résine au moment de l'explosion

Tableau 2 : Synthèse des scénarios étudiés

ANNEXE 5

**Détermination de l'EMI de mélanges EMAG/méthanol et détermination
de la capacité à l'auto échauffement du produit contenu dans le filtre coalesceur**

Introduction

Une première phase d'essais a permis de déterminer les caractéristiques principales liées à l'inflammabilité de trois mélanges (2, 4 et 6 % de méthanol), à travers des essais de détermination de la pression de vapeur saturante, du point d'éclair, du point inférieur d'explosion et de la limite inférieure d'explosivité. Ces essais ont montré le caractère inflammable de ces mélanges et leur capacité à s'enflammer à des températures inférieures à la température ambiante, même pour des concentrations faibles (2 % en méthanol).

Afin de poursuivre les recherches sur les origines de l'explosion ayant engendré l'accident, le BEA-RI a souhaité que l'Ineris détermine l'énergie minimale d'inflammation du mélange à 4 % de méthanol. Cet essai, non standard, développé au 1^{er} semestre 2025 dans les locaux de l'Ineris a été mis en suspens après échange avec le BEA-RI, à la suite de l'identification d'une nouvelle piste relative à un phénomène d'auto-échauffement, qui aurait pu être causé par un filtre (constitué d'une maille de fils métalliques et de matière polymérique) imbibé d'un mélange d'EMAG/méthanol évoqué ci-avant à une température comprise entre 60 et 70°C.

Les corps gras insaturés, typiquement les huiles d'origine naturelle, sont susceptibles de s'oxyder spontanément en présence d'oxygène (réaction intervenant dans la siccation - phénomène complexe et très lent d'oxydation). Ce phénomène connu est largement utilisé pour le traitement du bois avec l'huile de lin par exemple. Habituellement lente, la vitesse de ce phénomène peut être accélérée en augmentant la surface d'échange avec l'air et/ou en augmentant la température (il est également possible d'utiliser des catalyseurs). Les filtres, en tant que média poreux, peuvent donc être considérés comme étant des surfaces propices à l'accélération de l'oxydation des corps gras s'ils en sont imbibés. La surface d'échange (interface d'échange entre l'oxygène de l'air et l'huile) serait ainsi largement augmentée, ce qui permettrait une montée en température qui à son tour induirait un accroissement de la vitesse de réaction jusqu'à emballement thermique, et conduirait à une combustion spontanée. Cette dernière serait susceptible d'initier l'inflammation d'une ATEX. Le BEA-RI a confirmé la présence d'un mélange EMAG/Méthanol (2 à 6 %) dans l'installation au moment de l'accident, et nos essais laboratoires ont démontré que, même à température ambiante, ce mélange seul est susceptible de s'enflammer.

Echantillons

Les essais ont été réalisés sur les échantillons suivants :

- Substrat 1 : Média poreux, maille tressée en acier et plastique (polypropylène) référence Ineris 25AT009 (Figure 1) ;
- Substrat 2 : Média poreux, maille tressée en acier et plastique (polypropylène), envoi numéro 2 (Figure 2) ;
- EMAG seule : Ester Méthylique d'Acide Gras (EMAG, aussi appelé Biodiesel) référence Ineris 24AN096 (Figure 3) ;
- Méthanol : référence Ineris 24AN097 (Figure 4) ;
- Mélange EMAG/méthanol « Ineris » : mélange préparé par l'Ineris aux concentrations de 2, 4 et 6%v/v ;
- Mélange EMAG/méthanol « SAIPOL » : concentrations identiques à celle trouvées dans le coalesceur, référence 25AW749 (Figure 5).



Figure 1 : Photos du média poreux 1 référence 24AT009



Figure 2 : Photo du média poreux 2



Figure 3 : Photo de l'échantillon 24AN096

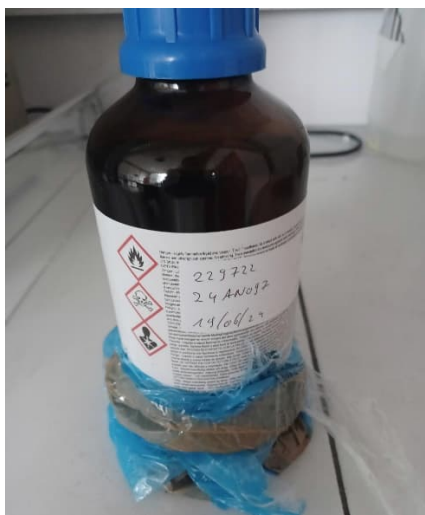


Figure 4 : Photo de l'échantillon 24AN097

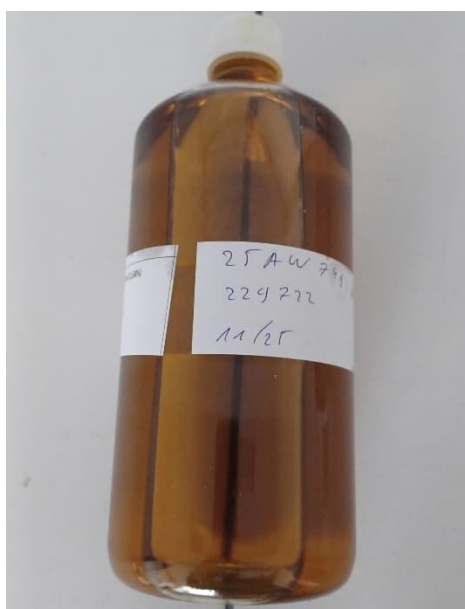


Figure 5 : Photo de l'échantillon de mélange EMAG/Méthanol fourni par SAIPOL
référence Ineris 25AW749

Résultats d'essais

Détermination de l'énergie d'inflammation

L'énergie d'inflammation correspond à la quantité d'énergie à apporter pour provoquer l'inflammation d'une substance à une concentration, température et pression donnée. Elle est mesurée en mJ, plus elle est faible, plus l'ignition de la substance est facile. Lorsque la substance à tester est un liquide, elle est versée dans un récipient placé en dessous du tube d'inflammation, cela a pour effet de créer un mélange avec l'air dans un récipient hermétique (Figure 6). Un arc est généré dans la phase gaz, l'inflammation est confirmée ou non et son énergie est modifiée. Des essais successifs permettent de déterminer l'énergie la plus haute pour laquelle aucune inflammation n'est pas observée et l'énergie la plus basse pour laquelle une inflammation est observée.



Figure 6 : Photo du dispositif d'essai de mesure d'EMI

L'appareil, habituellement conçu pour réaliser cette mesure sur les gaz, a été adapté pour les liquides. En 2024, nos travaux avaient identifié un risque d'inflammation à température ambiante pour le mélange EMAG/Méthanol à 4 % (Point inférieur d'explosion à 13,1°C). Toutes les tentatives d'inflammation à 21°C (jusque 2 J) se sont révélées négatives dans les conditions d'essais sur le mélange méthanol/ester à 4 %. Ces résultats pourraient résulter de la distance entre les électrodes et la surface du liquide qui serait trop importante comparée à d'autres essais réalisés sur des liquides dans des conditions similaires (point d'explosion, point éclair, point de feu, par exemple).

Le BEA-RI a fait le choix de mettre fin au développement du protocole d'essai pour se focaliser sur une autre piste, en l'occurrence l'auto-échauffement. Les autres concentrations n'ont donc pas été testées.

Dans le cadre de l'étude de l'auto-échauffement, un essai d'analyse thermique (ATD/ATG) est, par expérience, préalablement réalisé, afin de déterminer le comportement thermique de l'échantillon. La signature thermique ainsi obtenue est analysée afin d'identifier d'éventuels phénomènes de réactions exothermiques, qui pourraient corroborer la piste de l'auto-échauffement.

Essais ATD/ATG

- *Méthode*

L'Analyse Thermique Différentielle et l'Analyse Thermique Gravimétrique permettent l'étude simultanée des comportements thermodynamiques des matériaux. Le principe de l'Analyse Thermique Différentielle consiste à suivre l'évolution de la différence de température (ΔT) entre l'échantillon étudié et une référence inerte, c'est-à-dire dépourvue d'effets thermiques dans le domaine de température étudiée.

L'Analyse Thermique Gravimétrique permet de mesurer les variations de masse (Δm) d'un échantillon au cours de son chauffage.

Un échantillon du produit à examiner (Figure 7), placé dans un creuset en pyrex identique à celui du témoin, est introduit dans un four à température ambiante, dont on élève progressivement la température à la vitesse de 5°C/min (rampe de température variable de 0,5°C/min à 5°C/min, plage de température variable de l'ambiante à 800°C). La variation de masse de l'échantillon placé dans le four est suivie à l'aide d'un module de pesée électronique en fonction du temps.

Les températures de l'échantillon (T_E) et d'une substance inerte choisie comme référence (T_R) sont également enregistrées en fonction du temps. Les dispositions adoptées permettent de préchauffer le courant d'air de balayage (440 Nl/h) à la même température que le four (Figure 7).

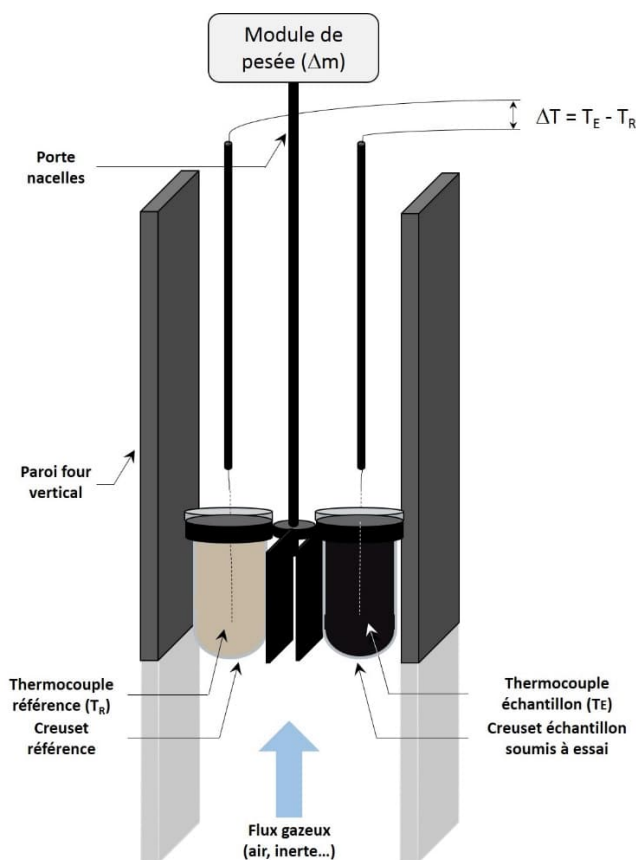


Figure 7 : Schéma général de l'ATD/ATG et en insert cliché photographique des creusets en pyrex avant essai contenant à gauche la substance de référence et à droite le mélange média poreux/EMAG

- *Essais ATD/ATG échantillon seul*

Pour explorer la piste de l'auto-échauffement, l'Ineris a proposé de réaliser, dans un premier temps, des analyses par ATD/ATG sur les différents constituants seuls. Cela permettra, dans un second temps, de comparer les résultats avec les mélanges (média poreux imbibé d'EMAG) et ainsi de détecter d'éventuelles synergies et/ou similitudes.

- *Média poreux (filtre) seul – 25AT009*

Le média poreux seul (maille constituée de fils métalliques et de polymère), présente une légère exothermie à partir de 200°C, très probablement causée par la combustion du polymère (Figure 8), phénomène également visible par la perte de masse sur la plage 200 – 500°C d'environ 33 %. Un léger pic endothermique autour de 160°C pourrait être le témoin de la température de fusion du polymère.

Le média seul ne présente pas de risque particulier d'auto-échauffement.

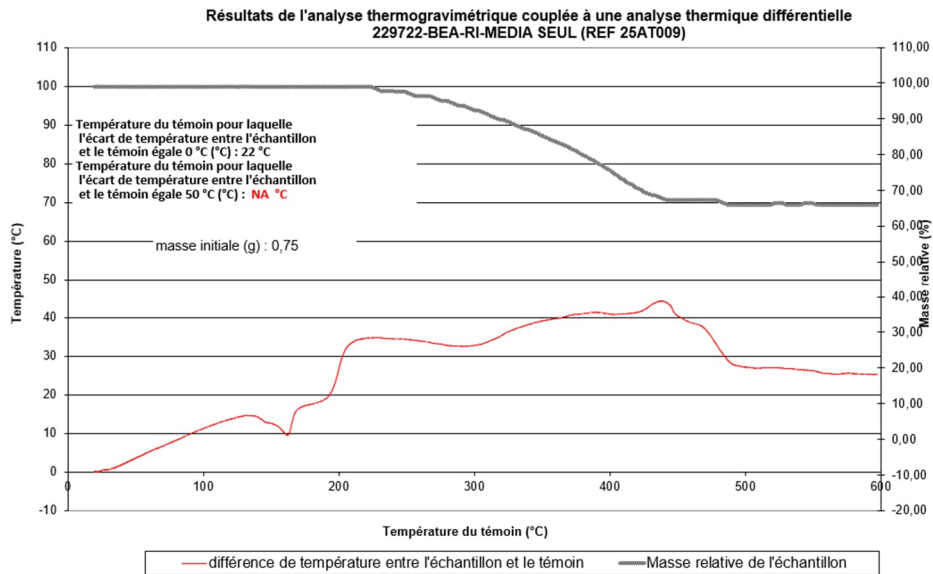


Figure 8 : Résultat de l'échantillon 25AT009 (creuset pyrex, rampe de 5°C/min, sous flux d'air, de l'ambiante à 600°C)

- « EMAG » seul - 24AN096

L'EMAG seul présente une légère exothermie entre 280 et 340°C suivie par un pic exothermique prononcé à une température de 380°C associé à une perte de masse très importante indiquant la combustion de l'EMAG (Figure 9). Avant environ 110°C, une légère endothermie témoigne probablement de l'évaporation d'humidité et de composés volatiles (COV) qui ne semblent pas présents en grande quantité au vu de l'absence de perte de masse sur cette plage de température.

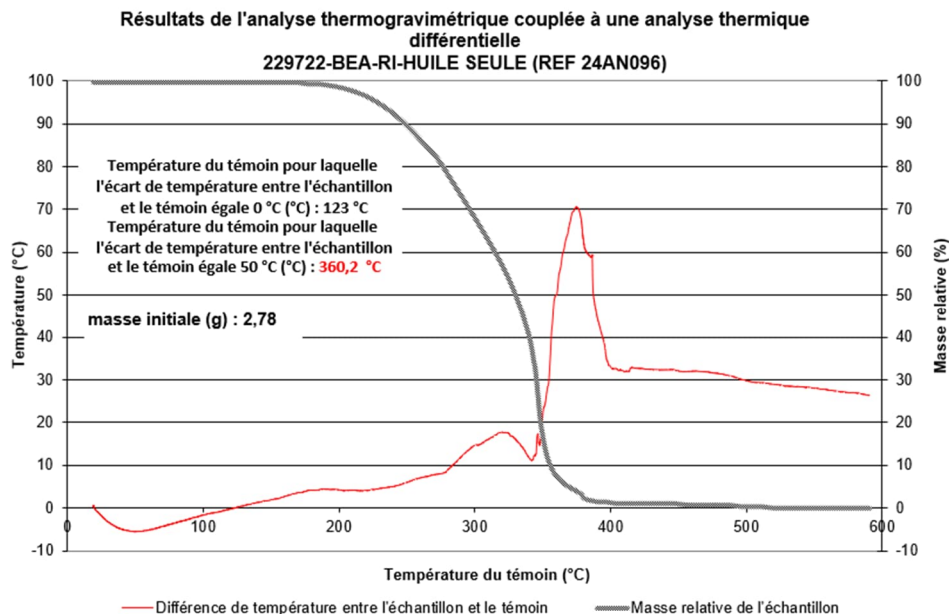


Figure 9: Résultat pour l'échantillon 24AN096 (creuset pyrex, rampe de 5°C/min, sous flux d'air, de l'ambiante à 600°C)

- *Essai sur le méthanol – référence Ineris 24AN097*

Le méthanol présente une endothermie dès les conditions ambiantes, endothermie qui s'accroît de manière significative à partir de 90°C, accompagnée d'une perte de masse totale, indiquant le dépassement du point d'ébullition et l'évaporation de la substance (Figure 10). Dans les conditions initiales de l'accident (60-70°C selon SAIPOL), le méthanol s'évapore et ne reste pas sous forme liquide.

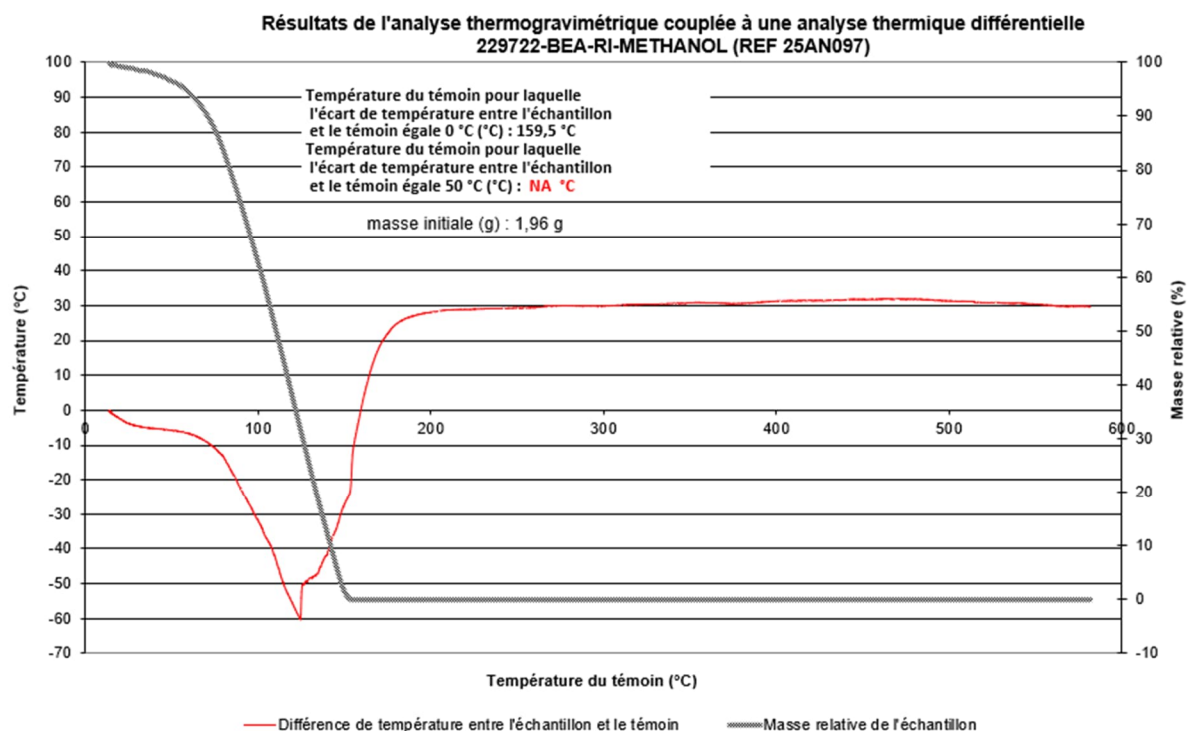


Figure 10 : Résultat sur l'échantillon 24AN097 (creuset pyrex, rampe de 5°C/min, sous flux d'air, de l'ambiante à 600°C)

- *Mélange EMAG et Méthanol à 6 %v/v*

Nous avons ensuite souhaité tester un mélange méthanol/EMAG en ATD/ATG, notre choix s'est porté sur le mélange à 6 % en raison de sa dangerosité accrue du point de vue inflammabilité (point éclair inférieur à l'ambiante).

L'ATD/ATG du mélange EMAG/Méthanol à 6%v/v (Figure 11) présente une légère endothermie et perte de masse avant 100°C, semblable à celle observée sur la courbe de l'EMAG seul (Figure 9). Le pic exothermique est légèrement plus faible que pour l'EMAG seul, la réactivité de l'EMAG semble être légèrement plus faible en présence de méthanol. La perte de masse du mélange est affectée à partir de la température ambiante puis est d'avantage prononcée à partir de 80°C jusqu'à environ 250°C. Cette perte de masse diminue de nouveau avec le pic exothermique autour de 380°C jusqu'à la perte totale.

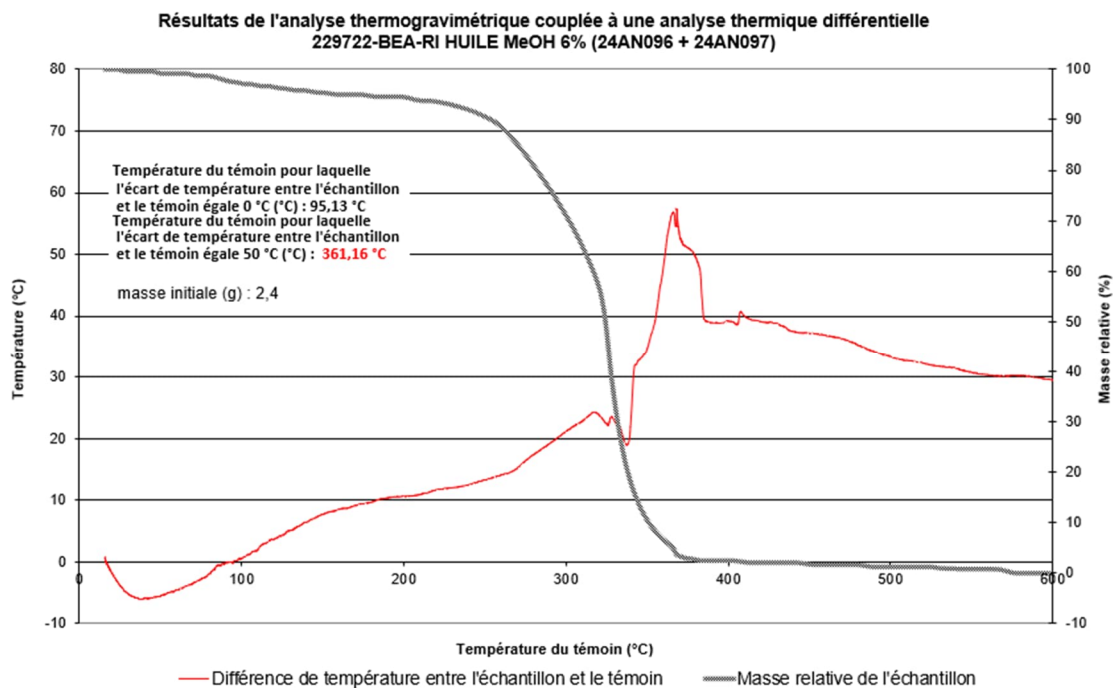


Figure 11 : Résultat de l'échantillon mélange EMAG et méthanol à 6%v/v (24AN096 + 24AN097) (creuset pyrex, rampe de 5°C/min, sous flux d'air, de l'ambiante à 600°C)

- *Essais ATD/ATG sur échantillon imbibé*

Enfin, nous avons réalisé des essais sur le média poreux imbibé de mélange d'EMAG avec ou sans méthanol à 6 %.

Le filtre est imbibé de la manière suivante :

- un morceau de substrat est découpé et pesé ;
- il est immergé dans le mélange choisi pour l'essai ;
- il est égoutté pendant 20 min ;
- l'essai est ensuite initié.

- *Essai sur le média poreux imbibé d'EMAG (sans méthanol)*

La masse initiale de l'échantillon est de 1,05 g dont 0,67 g de média et 0,38 g d'EMAG. La perte de masse est initiée à environ 150°C (Figure 12), ce qui est inférieur à la température de décomposition pour les constituants seuls (au-delà de 200°C pour le média poreux seul et 180°C pour l'EMAG seul). Il semble donc que la réactivité soit accrue lorsque l'EMAG est imprégné sur le média poreux. Le pic endothermique visible sur le média seul est toujours présent autour de 150°C, tout comme la légère exothermie autour de 300°C pour l'EMAG seul (très atténuée). Un nouveau pic exothermique est visible vers 450°C, pic qui était observable sur le média seul mais est plus nettement marqué ici, probablement causé par l'imprégnation du média poreux.

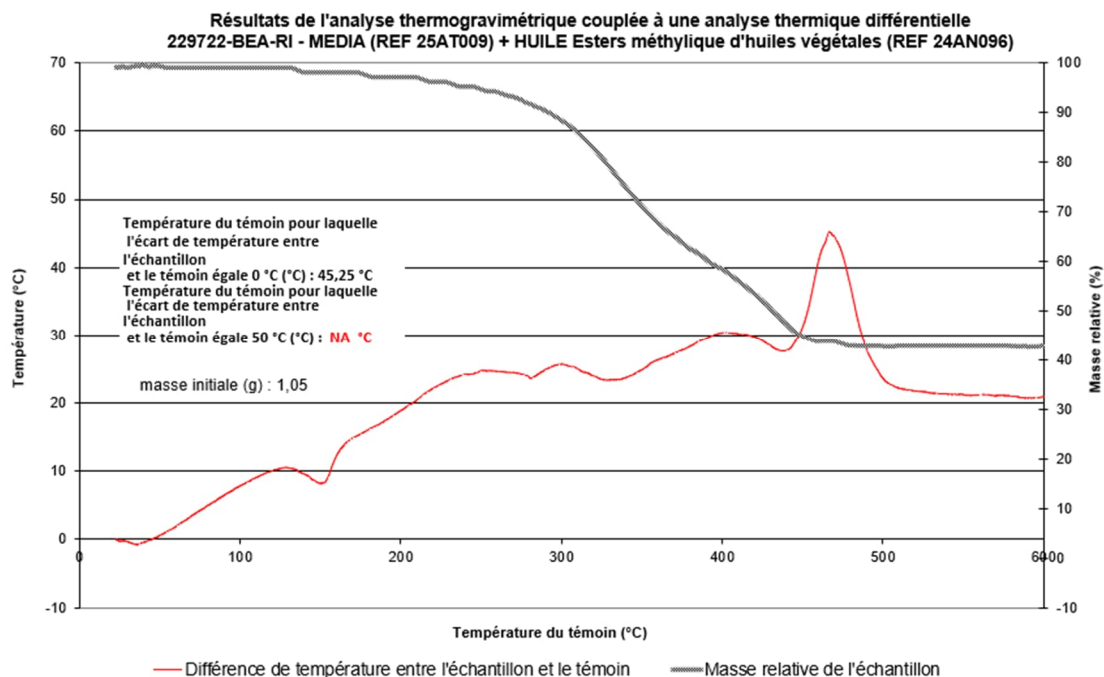


Figure 12 : Résultat du média (25AT009) imbibé d'EMAG (24AN096) (creuset pyrex, rampe de 5°C/min, sous flux d'air, de l'ambiante à 600°C)

- Essais de média poreux imbibé d'EMAG à 6 %v/v de méthanol

La masse initiale de l'échantillon est de 1,22 g dont 0,88 g de média et 0,34 g d'EMAG + méthanol à 6 %. L'ajout de méthanol modifie le comportement lors de cet essai (Figure 13), cela semble activer la réactivité de manière significative. Deux exothermies prononcées à 320 et 420°C sont visibles, la température à laquelle l'écart de température entre la référence et l'échantillon dépasse 50°C est faible, autour de 267°C, là où précédemment, pour le mélange EMAG/Méthanol seul (Figure 11), elle était d'environ 360°C.

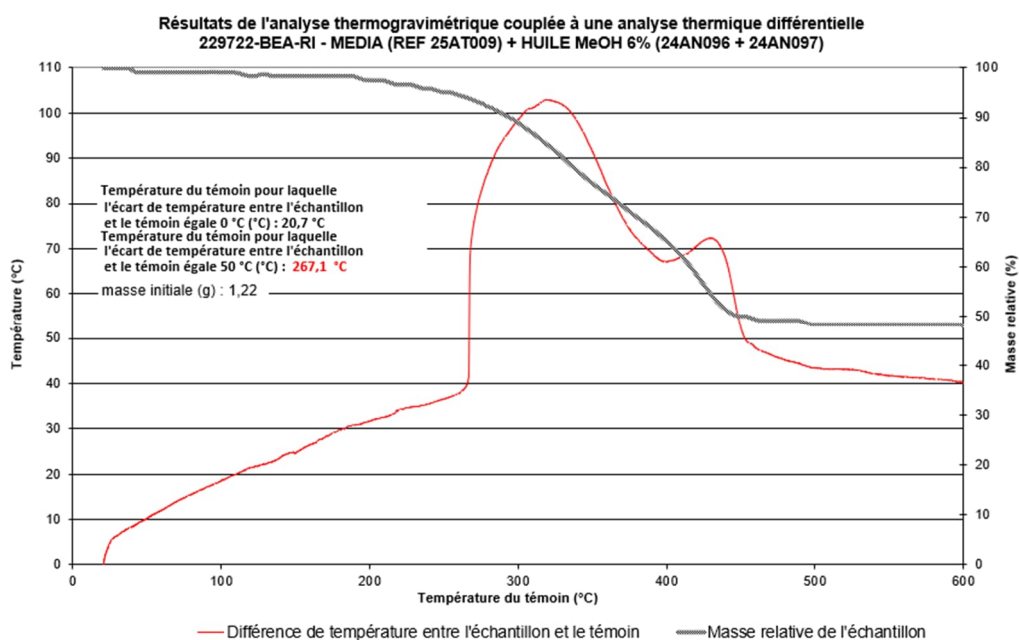


Figure 13 : Résultat du média (25AT009) imbibé du mélange EMAG/méthanol à 6%v/v (24AN096 + 24AN097) (creuset pyrex, rampe de 5°C/min, sous flux d'air, de l'ambiante à 600°C)

- *Conclusion des essais ATD/ATG*

Les essais ATD/ATG suggèrent que la combinaison du média, de l'EMAG et du méthanol provoquerait une certaine synergie exothermique. Lorsque le média, qui dispose d'une surface très importante et qui est un matériau potentiellement catalyseur (métal + plastique), est couvert d'une fine pellicule d'EMAG, elle-même au contact de l'oxygène de l'air, une réaction exothermique se produit. Il s'agit vraisemblablement d'une décomposition, plus ou moins rapide, de l'EMAG à des températures bien plus faibles que sa température d'auto-inflammation.

Pour explorer ce phénomène, il a été proposé d'étudier, à une échelle plus importante, le comportement du système composé du média imbibé d'un mélange d'EMAG et de méthanol à 6 %. Ces essais sont habituellement réalisés en étuves isothermes (essais ETI), suivant la norme NF EN ISO 15188. Pour faciliter l'exploration expérimentale du comportement d'auto-échauffement, nous avons procédé à la détermination de la température d'auto-inflammation du mélange EMAG/Méthanol fourni par SAIPOL (concentration identique à celle rencontrée lors de l'accident). Dans l'hypothèse où les essais en étuve isotherme indiqueraient une température proche ou supérieure à la TAI du mélange, alors il ne s'agirait pas d'un auto-échauffement mais d'un phénomène d'auto-inflammation.

Mesure des températures d'auto-inflammation

- *Méthode*

La température d'auto-inflammation (TAI) est déterminée en suivant la norme EN ISO/IEC 80079-20-1. Différentes quantités du liquide à tester sont versées, goutte à goutte, dans un erlenmeyer de 200 ml, préalablement chauffé (Figure 14). L'observation visuelle permet de constater si une inflammation a lieu ou non après un délai de cinq minutes. Le nombre de gouttes et la température sont modifiés jusqu'à atteindre la température la plus basse à laquelle une inflammation est observée. Après chaque essai, l'erlenmeyer est purgé avec de l'air propre et, si nécessaire, entièrement nettoyé ou remplacé.

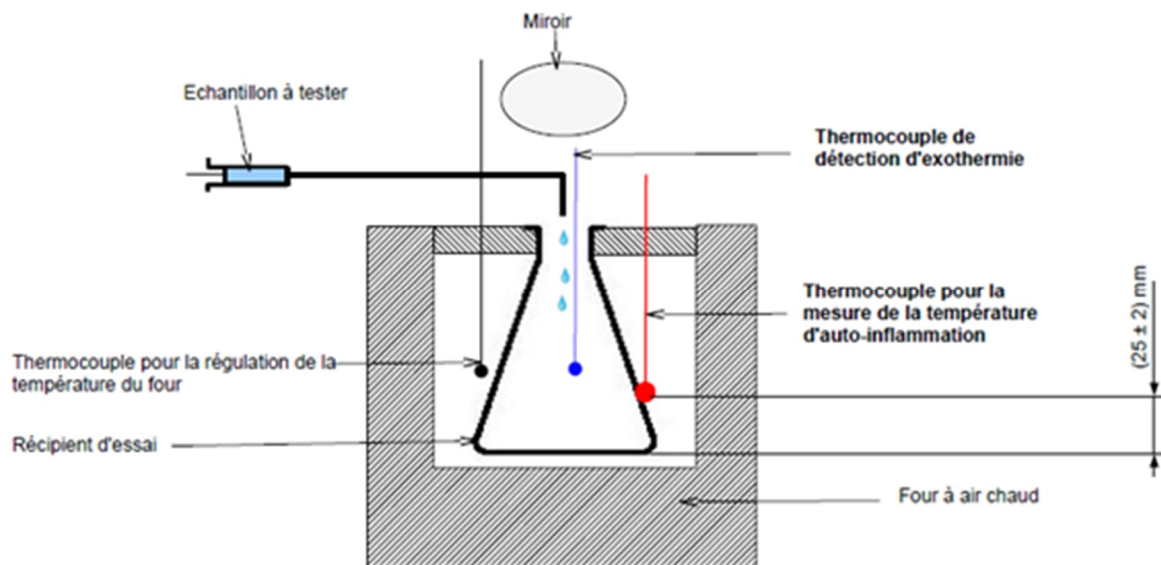


Figure 14 : Schéma de principe du dispositif d'essai de détermination de la TAI.

- *Résultats*

La température d'auto-inflammation a été déterminée à $\pm 5^\circ\text{C}$ avec 3 répétitions. Pour le mélange EMAG/Méthanol fourni par SAIPOL, la TAI a été estimée à $256^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. Cette température est similaire à la température de début de pic exothermique sur la Figure 13.

Essais d'auto-échauffement en étuves isothermes

- *Méthode*

Principe :

L'essai consiste à déterminer la température critique d'auto-inflammation de volumes cubiques croissants d'un combustible solide. Lorsque le volume des récipients cubiques augmente, la température minimale d'auto-inflammation diminue et il est possible d'extrapoler jusqu'à un volume de stockage plus important.

Mode opératoire :

Les échantillons sont placés à température ambiante dans des récipients de forme cubique dont les parois sont formées par une toile métallique à mailles (Figure 15) suffisamment fines pour éviter le tamisage, mais qui ne freinent pas la diffusion d'oxygène. Le récipient est ensuite introduit à pression atmosphérique dans une étuve isotherme ventilée à l'air chaud et réglée à une température donnée. A l'aide d'un thermocouple placé au centre de l'échantillon, on observe si la température de l'échantillon se stabilise à la température de l'étuve, ou si elle s'élève rapidement.



Figure 15 : Exemple d'un cube dans une étuve

Un nouvel essai est ensuite effectué à une température plus élevée ou plus basse suivant le résultat de l'essai précédent, de façon à encadrer à 5°C près la température de l'étuve qui conduit à un auto-échauffement de l'échantillon. Cette température est appelée température critique d'auto-échauffement.

En réalisant des essais sur différents volumes, il est possible de corréliser la température d'auto-échauffement à la dimension du stockage. En effet, les résultats des essais de stockage en étuve isotherme peuvent être corrélés par une loi mathématique pour des dimensions plus importantes que celles étudiées expérimentalement et/ou pour des formes différentes. Ce calcul d'extrapolation fait appel, notamment, à l'hypothèse d'une libre diffusion de l'oxygène de l'air dans le dépôt et à l'échange thermique par conduction dans le matériau. La dimension critique est déterminée pour un stockage de forme cubique cylindrique ou plan. En effet, le calcul intègre un facteur dépendant de la forme du stockage.

Adaptation :

Dans le cas des essais sur le média filtrant imbibé d'EMAG et méthanol, la procédure a dû être adaptée. Les cubes habituellement utilisés sont constitués de mailles incompatibles avec la présence d'échantillon liquide. Nous avons donc utilisé des cubes à parois pleines (Figure 16), cela modifie la capacité de l'oxygène de se diffuser au sein de l'échantillon.

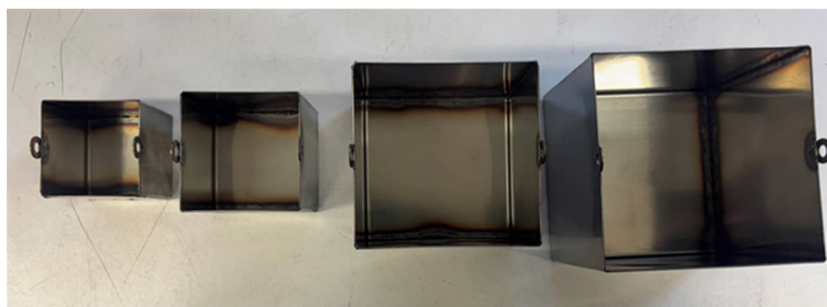


Figure 16 : Cubes utilisés pour les essais

Les essais ETI sur des substrats imbibés de liquide ne sont pas encadrés par des normes et standards. En effet cette norme s'adresse uniquement aux poussières combustibles ou matériaux granulaires et impose des cubes maillés. La méthodologie développée est donc propre à l'Ineris, bien qu'inspirée de cette norme, cette méthode n'a jamais été validée au travers d'essais inter-laboratoires. Les circonstances de la réalisation de ces essais, liées à un accident industriel, requièrent de limiter la durée de développement. Autrement dit, elles ne permettent pas la mise au point via l'expérimental d'un protocole totalement fiable qui pourrait nécessiter plusieurs années de développement.

- **Résultats d'essais préliminaires**

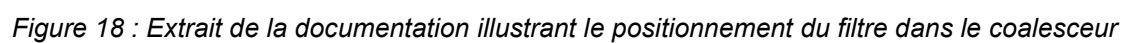
Les premiers essais ETI ont été réalisés sur le média poreux imbibé de mélange EMAG/méthanol à 6 %, réalisé par l'Ineris, sans chercher à atteindre un taux de compaction précis du média. Un cube de 125 cm³ a été soumis à essais à une température de 270°C (supérieure à la TAI de l'EMAG située à 256°C). Cet essai s'est montré négatif selon les critères de la norme NF EN 15188. Un essai dans un cube de 216 cm³, à une température de 270°C, s'est montré positif avec une augmentation de température de 69,3°C (Tableau 1), mais cela ne prouverait pas l'occurrence d'un phénomène d'auto-échauffement car la température est supérieure à la TAI de l'EMAG.

Tableau 1 : Résultats des essais préliminaires en étuve

VOLUME DU CUBE (CM ³)	TEMPERATURE DE CONSIGNE (°C)	ΔT (°C)	CONCLUSION
125	270	35,3	RAS
216	270	69,3	Inflammation

Ces premiers essais n'ont pas permis de conclure sur le risque d'auto-échauffement car l'élévation anormale de température a été remarquée au-delà de la température d'auto-inflammation du mélange EMAG et méthanol à 6 %. Des échanges avec le BEA-RI et SAIPOL ont abouti à l'obtention d'informations précises sur le fonctionnement du coalesceur et notamment le taux de compaction/densité de la maille du filtre (média poreux).

Les documentations (Figures 17 et 18) transmises par le fournisseur de média poreux de SAIPOL présentent des détails importants sur la densité du média au moment de l'accident et aussi sur sa composition. Il s'agit de deux fils d'acier (D=0,14mm) et un fil de polypropylène (D=0,4mm) cousus sous forme de maille. Le filtre est un cylindre de 984 mm de diamètre et 600 mm d'épaisseur (Volume = en deux parties (deux demi-cylindres) avec une densité de média de 350 kg/m³).



- *Résultats d'essais d'auto-échauffement*

Suites aux résultats précédents, il a donc été décidé de poursuivre ces tests en adaptant la méthode pour convenir aux conditions lors de la survenue de l'accident de SAIPOL. Une procédure spécifique (Figure 19) permettant de compacter la maille à une densité de 350 kg/m^3 , identique à celle présente sur le site de SAIPOL via les informations transmises par le fournisseur, a été développée.

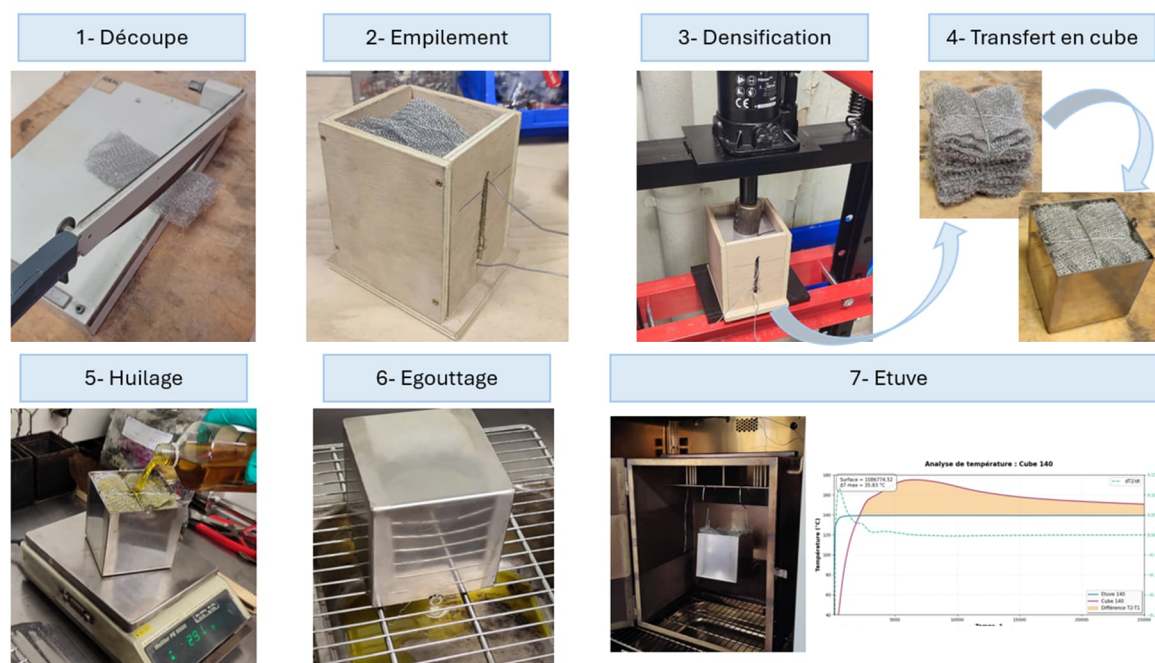


Figure 19 : Procédure simplifiée de fabrication des cubes de média pour les essais en étuve

Afin de confirmer que le risque d'auto-échauffement résulte de la configuration particulière d'association média, EMAG et méthanol, les 3 échantillons suivants ont été soumis, dans une phase préliminaire, à un essai en étuve en cube de 125 cc :

- Média filtrant non imbibé d'EMAG ;
- Mélange EMAG et méthanol à 6 % sans média filtrant ;
- Média filtrant imbibé d'un mélange EMAG et méthanol à 6 %.

D'après les courbes d'évolution thermique en fonction du temps (Figure 20), l'association média et mélange EMAG avec méthanol à 6% semble être la cause d'une augmentation de température. En effet, le média poreux seul ou l'EMAG seul ne témoigne d'aucune augmentation de température au cours de l'essai, alors qu'une fois combiné, nous remarquons la présence d'une exothermie franche. Des clichés photographiques (Figure 21) permettent une inspection visuelle de l'effet de la température sur l'EMAG avant et après 3 jours. Celle-ci a changé d'aspect visuel et est devenu plutôt orangée. Les photos des deux cubes confirment qu'une réaction de combustion a lieu lorsque le média poreux est imbibé du mélange EMAG/Méthanol avec des traces très visibles de combustion à des températures largement inférieures à la TAI du mélange EMAG/Méthanol (256°C).

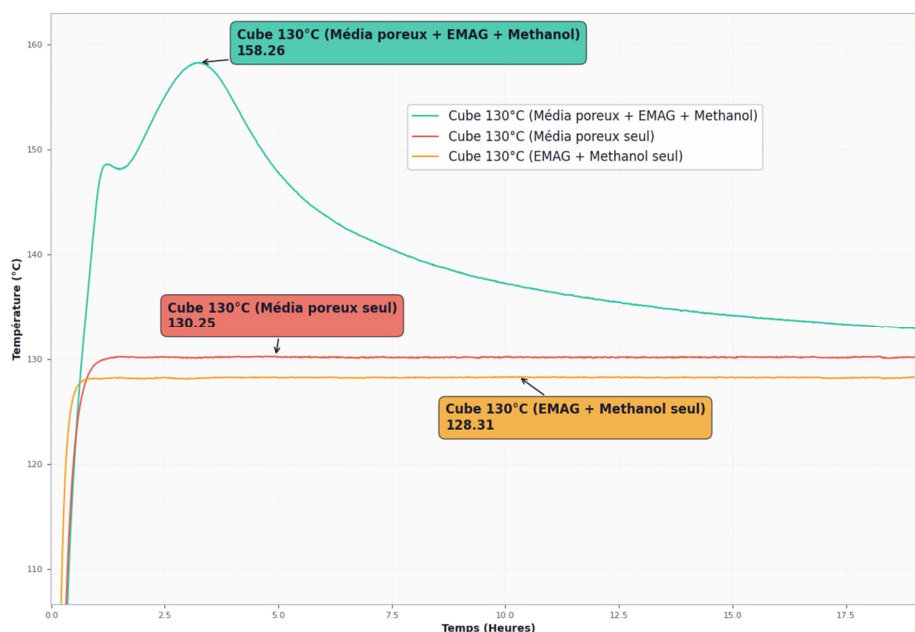


Figure 20 : Courbes d'évolution thermique en fonction du temps des échantillons média imbibés du mélange EMAG et méthanol, du média poreux seul et du mélange EMAG et méthanol (sans média poreux) ; 3 cubes de 125cc à 130°C

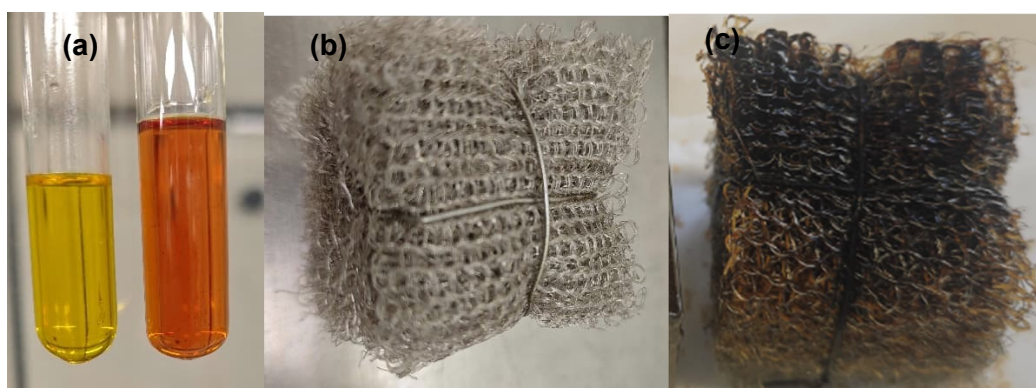


Figure 21 : Photos de l'EMAG avant et après 3 jours en étuve à 130°C (a), du cube non imbibé après essais à 130°C pendant 3 jours (b) et du cube imbibé d'un mélange EMAG et méthanol après essai à 130°C pendant 3 jours (c)

Des essais ont aussi été réalisés en cube de 1000cc, un volume bien plus conséquent que ceux en cube de 125cc, ce qui a tendance à accroître la réactivité. L'aspect visuel des cubes après essais est un indicateur d'une réaction, comme le témoignent les photos des figures 22 et 23 prises sur un cube de 1000 cc avant et après un essai à 160°C. Nous remarquons la présence de suie, carbonisation et la fusion et combustion partielle du fil de polypropylène, dont la température de fusion avait été mesurée aux environs de 160°C.

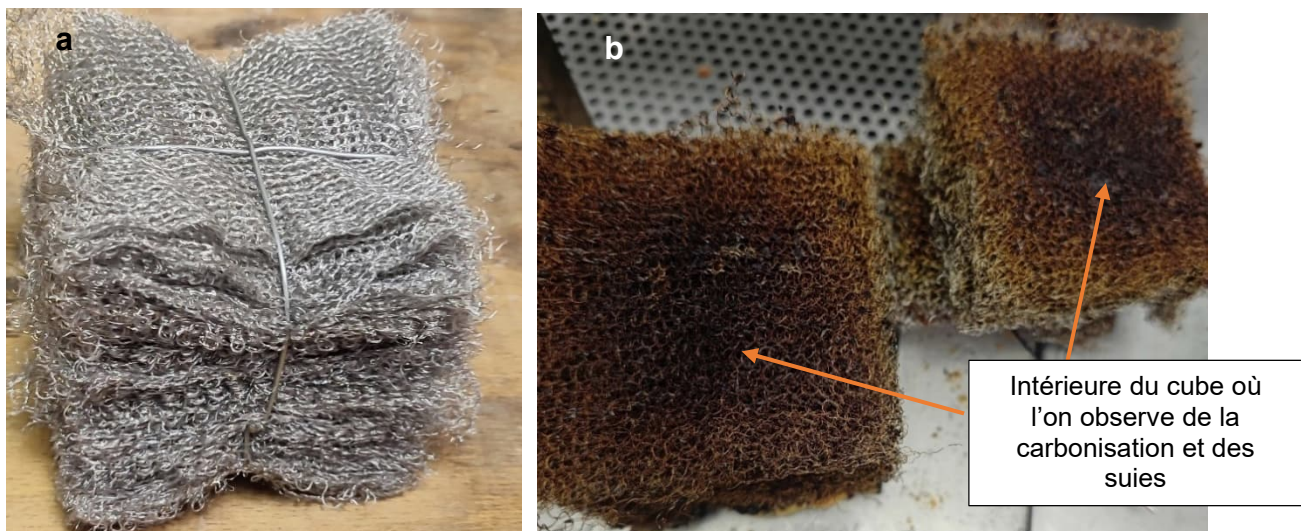


Figure 22 : Photos du média poreux compacté avant imprégnation/essai (a) et intérieur du média poreux/EMAG/méthanol après 3 jours en étuve à 160°C (b)



Figure 23 : Photos du média poreux/EMAG/méthanol après 3 jours en étuve à 160°C

- *Etude de l'effet de la température et du volume sur l'auto-échauffement*

Nous avons continué à analyser le comportement du média imbibé d'EMAG en faisant varier la température (60 à 240°C) et la taille du cube (125 et 1000 cm³).

Les résultats sont reportés dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Résultats des essais en cube de 1000 cm³ à différentes températures

VOLUME DU CUBE (CM ³)	TEMPERATURE DE CONSIGNE (°C)	ΔT (°C)	CONCLUSION
1 000	240	76	Inflammation – Critère ΔT > 60°C
1 000	200	127	Inflammation – Critère ΔT > 60°C
1 000	160	89	Inflammation – Critère ΔT > 60°C
1 000	120	45	Non inflammation
1 000	80	4	Non inflammation
1 000	60	1	Non inflammation

Tableau 3 : Résultats des essais en cube de 125 cm³ à différentes températures

VOLUME DU CUBE (CM ³)	TEMPERATURE DE CONSIGNE (°C)	ΔT (°C)	CONCLUSION
125	160	40	Non inflammation
125	140	36	Non inflammation
125	130	28	Non inflammation
125	120	25	Non inflammation
125	100	6	Non inflammation

Les cubes de 1000cc ont confirmé le risque d'auto-échauffement via l'application du critère de la norme EN 15188 concernant l'augmentation de température (+60°C) à partir d'une température d'essai de 160°C. Aucun des essais en cube de 125cc n'a atteint ce critère.

Le critère d'inflammation joue un rôle prépondérant sur la détermination des dimensions critiques de stockage ou de la température critique de stockage via extrapolation.

- **Extrapolation aux conditions réelles**
 - **Problématique de critère d'inflammation**

La possibilité d'auto-échauffement étant désormais confirmée, nous nous sommes concentrés sur la seconde partie de l'analyse des courbes, celle relative à l'extrapolation à la dimension des filtres de SAIPOL pour évaluer la possibilité qu'un auto-échauffement ait dégénéré en auto-inflammation dans les conditions de l'accident.

Pour rappel, la norme NF EN 15188 est initialement utilisée pour caractériser le risque d'auto-échauffement des poussières et prévoir les conditions qui pourraient permettre une auto-inflammation à grande échelle (via une extrapolation) à partir d'essais à petite échelle. Dans le cas présent, adaptée de cette norme, la pertinence de la valeur du critère d'inflammation ($\Delta T > 60^\circ\text{C}$) a donc été estimée en s'appuyant également sur les observations faites sur les échantillons post essais thermiques. Ainsi, la norme considère une inflammation lorsque la température au cœur du cube est supérieure de 60°C à celle de l'étuve, ou, si un point d'inflexion est visible sur la courbe une fois que l'échantillon a dépasser la température de l'étuve. Ce dernier est plus difficile à mettre en évidence lorsque l'inflammation n'est pas nettement marquée, comme cela peut être le cas lors de l'analyse des résultats de l'échantillon (Média poreux + EMAG + Méthanol) en cube de 1000 cm^3 à 120°C (voir Figure 24).

Le point d'inflexion sur l'essai en étuve isotherme à 160°C est facilement observable sur la courbe de température mais également sur la courbe dérivée. Celui à 120°C est plus délicat à repérer et il est difficile de confirmer l'inflammation via ce critère. Nous avons donc, dans ce cas, considéré que le critère de température n'était pas validé pour une température de 120°C , selon la norme.

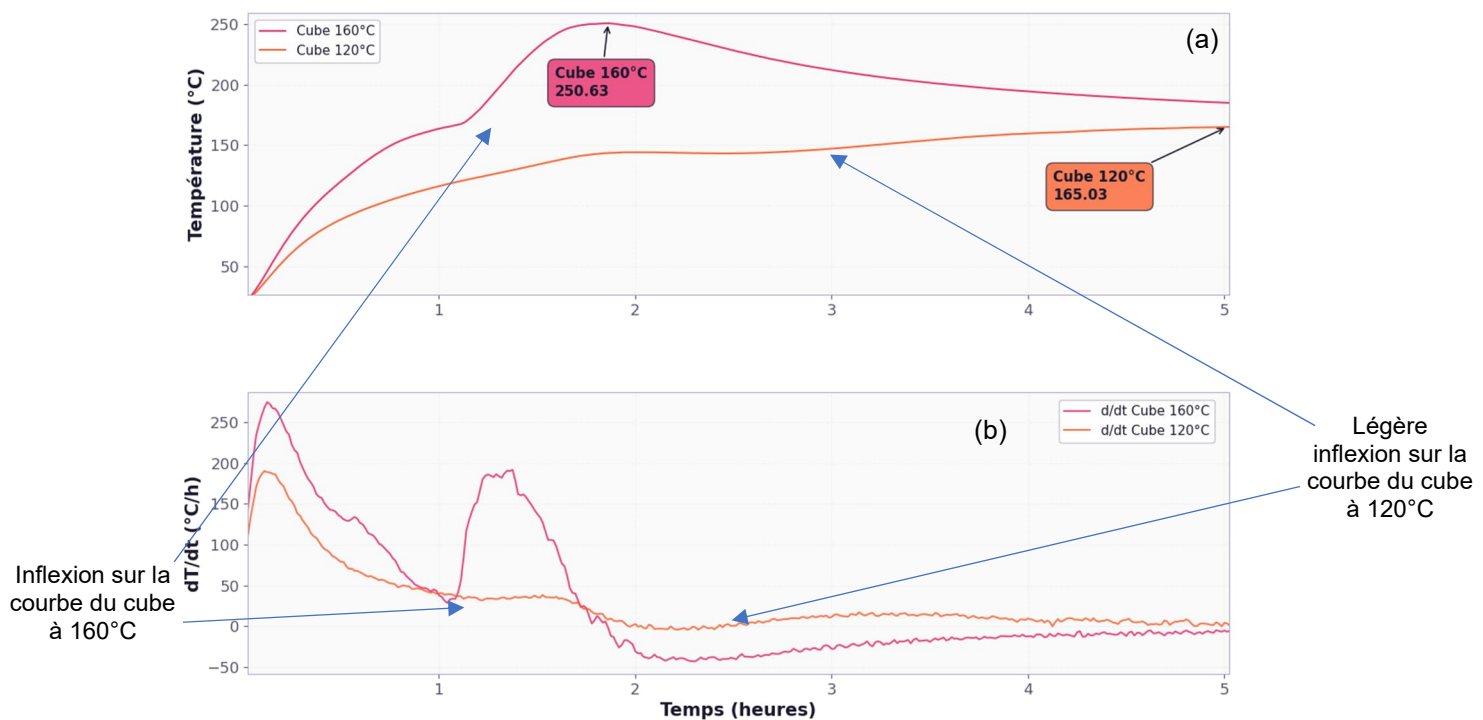


Figure 24 : Courbes d'évolution thermique en fonction du temps (a) et courbes de dérivées de la température en fonction du temps des échantillons (Média poreux + EMAG + Méthanol) placés dans des cubes de 1000 cm^3 en étuves à 120°C et 160°C (b)

Le critère de différence maximale de température entre étuve et échantillon (de 60°C) ne semble pas non plus adapté à toutes les dimensions de cubes testées. Dans le cas du cube de 125 cm^3 , au travers de ces essais, nous n'avons pas obtenu un écart de température supérieur à 40°C (Tableau 3) entre l'échantillon et l'étuve. Il serait nécessaire de réaliser d'autres essais pour confirmer ou non ce fait.

- *Extrapolation*

A partir des résultats d'essais en cube de 125 cm³ et 1000 cm³, nous avons tracé les courbes de la température maximale atteinte de l'échantillon en fonction de la température de l'étuve (Figure 25).

Les cubes de 1000 cm³ sont représentés par des points jaunes et oranges, ceux de 125 cm³, en bleus et bleus foncés. La droite rouge représente le critère d'inflammation (une augmentation de température de + 60°C) et divise le graphique en deux parties, essais théoriquement considérés comme positifs (au-dessus) et essais théoriquement considérés comme négatifs (au-dessous) selon la norme EN 15188.

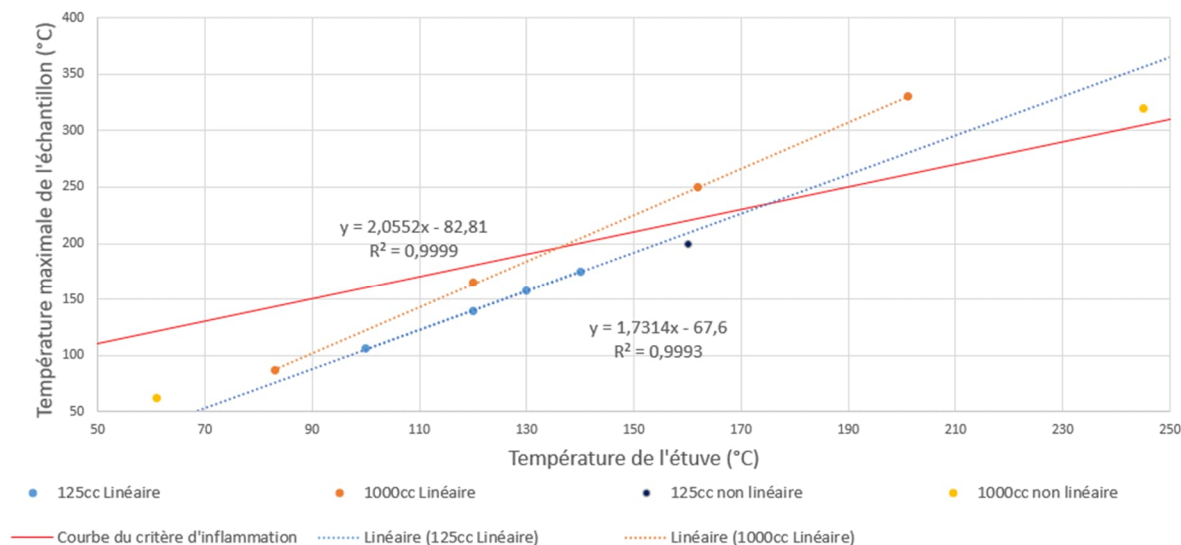


Figure 25 : Courbe de la température maximale de l'échantillon en fonction de la température de l'étuve

Pour les deux tailles de cube étudiées, nous avons identifié une plage de linéarité assez prononcée ($R^2 > 0,999$) si nous faisons abstraction des points aux extrémités (i.e. les températures d'étuves testées les plus extrêmes). L'extrémité basse représente la plage où aucune réaction n'a lieu, la température maximale de l'échantillon est égale à la température de l'étuve, l'extrémité haute représente un plateau où la réaction produirait un maximum de chaleur et atteint un équilibre thermique d'échange entre le cube et l'étuve. Entre deux, il semble que la température maximale soit directement proportionnelle à la température de l'étuve.

Remarque : Les essais ETI sont assez sensibles aux changements de paramètres tels que le positionnement du thermocouple, les approximations apportées par le protocole expérimental mis au point.

Dans ces conditions, obtenir une linéarité extrapolée aussi précise sur un total de huit cubes (4 de 1000 cm³ et 4 de 125 cm³) est remarquable.

En outre, cette linéarité nous permet, par extrapolation, de déterminer la température d'étuve pour laquelle les deux cubes auraient une température maximale de 60°C à cœur (i.e. critère d'inflammation de la norme). Ces deux températures sont matérialisées par l'intersection des droites de chaque cube, représentées en pointillées, et sont de 135°C (1000 cm³) et 175°C (125 cm³). Pour le cube de 1000 cm³, la valeur extrapolée se situe entre deux points expérimentaux et serait en bon accord avec les résultats et les observations puisque qu'il s'agit d'un point situé entre l'inflammation (critère +60°C de l'essai à 160°C) et la non-inflammation (120°C). Pour le cube de 125 cm³, le point d'intersection est au-delà de la plage expérimentale (essais réalisés jusque 160°C), ce qui ne permet pas de conclure. Sans compter que nous n'avons pas mesuré de différence de température supérieure à 60°C pour les essais en cube de 125 cm³.

Se baser sur le critère de 60°C pour les cubes de 125 cm³ sans investigations expérimentales complémentaires ne semble pas suffisant, notamment, lorsque les courbes de température en fonction du temps des essais à 120°C, 130°C et 140°C sont mises en perspective (Figure 26). En effet, pour cette taille de cube, les essais à 130°C et 140°C présentent un point d'inflexion aisément identifiable et seraient donc validés au regard du second critère de la norme NF EN 15188. Pour la courbe de l'essai à 120°C, quant à elle, aucun point d'inflexion n'est notable. Sur la base de ces constatations, la température la plus basse au cours de laquelle un phénomène d'auto-échauffement pourrait être mesuré pour un cube de 125 cm³ semblerait se situer entre 120°C et 130°C.

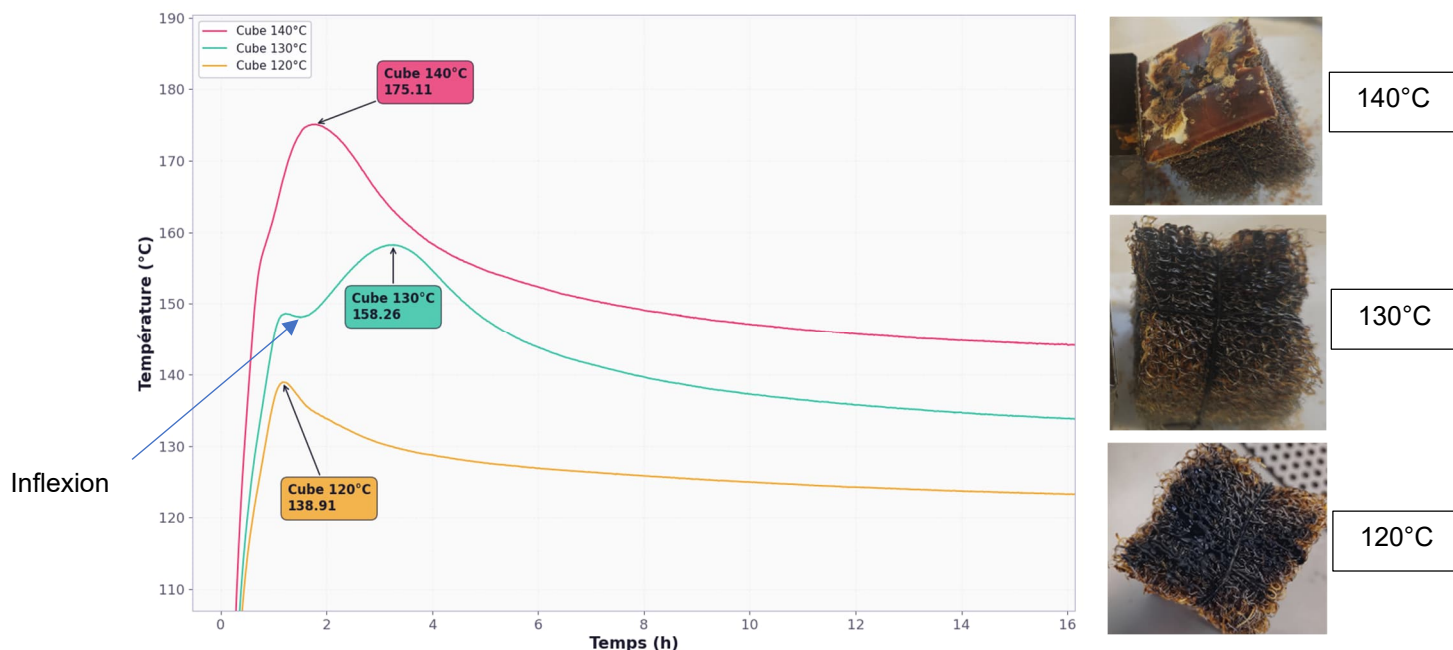


Figure 26 : Courbes d'évolution thermique en fonction du temps d'un échantillon média poreux + EMAG + méthanol pour des essais en étuves à 120°C, 130°C et 140°C dans un cube de 125 cm³

L'augmentation maximale de température lors des essais à 120°C et 130°C est de respectivement 19°C et 28°C. Par rapport aux explications précédentes sur le point d'inflexion, nous pourrions prendre comme critère d'inflammation, la valeur seuil de 25°C et comparer l'impact de la modification du critère sur l'extrapolation finale. Avec ces conditions, les températures critiques seraient de 102°C (1000 cm³) et 126°C (125 cm³).

Nous avons ensuite tracé les courbes de dimensions critiques en fonction de la température de stockage, selon le modèle de FRANCK-KAMENETSKII, pour un critère de + 60°C et pour un critère de +25°C

(Figure 27). La demi-arrête équivalente à la dimension du média poreux de SAIPOL a été reportée par une droite noire, l'intersection de cette droite avec nos deux courbes permet de déduire la température critique de stockage à partir de laquelle une auto-inflammation est possible.

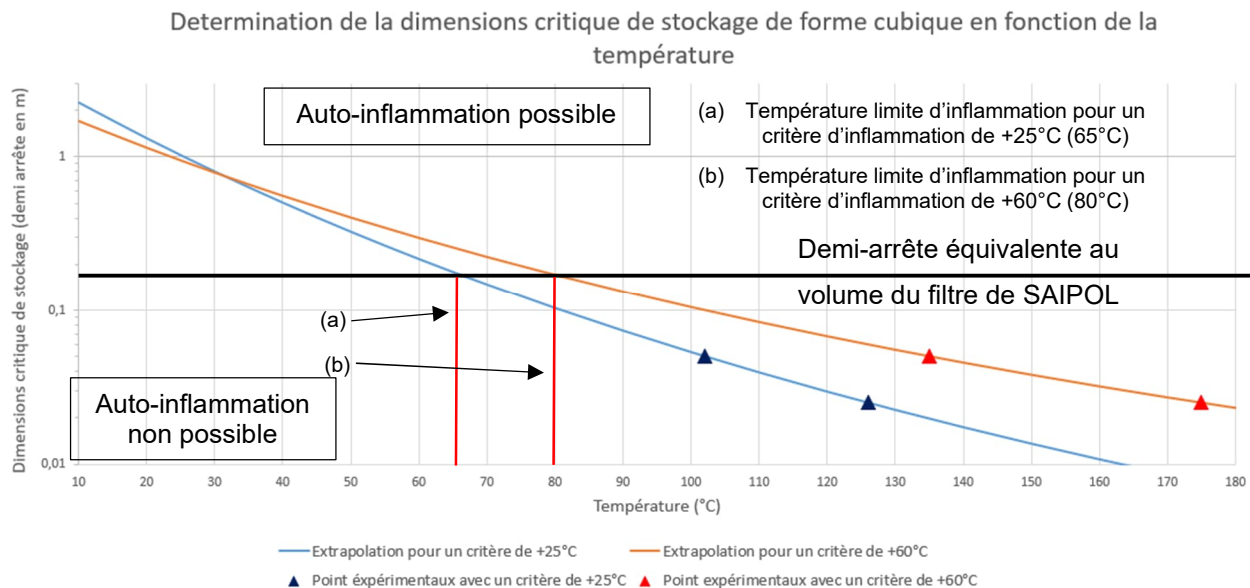


Figure 27 : Courbe de la température critique en fonction de la demi-arrêt critique de stockage pour des critères d'inflammation de +25°C et +60°C

Une synthèse des valeurs importantes issues de l'extrapolation est reportée dans le tableau ci-après (Tableau 4). En résumé :

- Si un critère d'inflammation de +60°C est appliqué, la dimension critique de stockage pour une température de stockage de 60 à 70°C (cas de SAIPOL) se situe entre 22 et 30 cm de demi arrêt, ce qui équivaut à un cube d'un volume de 85 à 216 litres.
- Si un critère d'inflammation de +25°C est appliqué, la dimension critique de stockage pour une température de stockage de 60 à 70°C se situe entre 15 et 23 cm de demi arrêt, ce qui équivaut à un cube d'un volume de 27 à 97 litres.
- Le filtre de SAIPOL est un cylindre, une forme géométrique différente de celle utilisée lors des essais (cube), ce paramètre peut impacter la qualité de l'extrapolation. Il possède un rayon de 49,2 cm et une hauteur de 60 cm, soit un volume de 46 litres.

Tableau 4 : Récapitulatif des valeurs importantes obtenues via l'extrapolation

Critère d'inflammation	Température critique	Demi-arrêt critique	Volume critique d'un cube
+60°C	60°C	30 cm	216 litres
	70°C	22 cm	85 litres
+25°C	60°C	23 cm	97 litres
	70°C	15 cm	27 litres
Cylindre de média filtrant de SAIPOL (r=49,2 cm et h= 60 cm)	-	30 cm (demi-arrêt la plus petite = h/2)	46 litres
		49,2 cm (demi-arrêt la plus grande = r)	(équivalent à un cube de demi arrêt de 18 cm)

De nombreuses incertitudes expérimentales sont à prendre en compte lors de la lecture de ces résultats. La forme géométrique du filtre, l'extrapolation réalisée avec seulement 2 points, la méthode d'essai non standard, le critère d'inflammation qui nécessite d'être investigué davantage, le manque de données expérimentales, etc, qui peuvent impacter très largement l'extrapolation.

Il semble que le filtre mis en cause, dans les conditions accidentelles de température, puisse être sujet à l'auto-échauffement au point de dégénérer une auto-inflammation. Son volume est, selon le critère choisi, très proche ou au-delà de la courbe d'extrapolation dans la zone où l'auto-inflammation est très probable.

Au vu des incertitudes expérimentales précédemment évoquées, des mesures expérimentales et des observations des échantillons post traitements thermiques, il paraît plus que raisonnable de retenir le phénomène d'auto-échauffement comme cause fortement probable du scénario accidentel.

Conclusion

L'étude expérimentale des matériaux et substances présents au moment de l'accident survenu sur le site de SAIPOL a permis de mieux comprendre les risques liés à leur inflammabilité et explosivité.

Une première étude avait permis en 2024 de caractériser l'inflammabilité du mélange EMAG/méthanol, cette étude avait confirmé le risque d'inflammation et/ou explosion à température ambiante ou proche de l'ambiant. En 2025, les travaux se sont concentrés sur la source d'inflammation. En première approche, un travail a été réalisé sur les aspects de détermination de l'énergie d'inflammation à l'aide d'essais expérimentaux qui n'ont pas pu aboutir. En seconde approche, un scénario plus consistant basé sur le phénomène d'auto-échauffement a été étudié à travers des essais en laboratoire.

Le procédé utilisé par SAIPOL pour produire de l'EMAG fait intervenir une étape de filtration à travers un média poreux composé de deux mailles métalliques et une maille plastique. Ce média, lors du fonctionnement normal de l'installation, est immergé dans un mélange d'EMAG et de méthanol. Lors de l'accident, le média n'était plus immergé et n'avait pas été lavé. Une couche fine de mélange était donc présente. Les EMAG naturels étant insaturés, ils sont susceptibles de s'oxyder à température ambiante, quand ceux-ci sont répartis sur de très grande surface, typiquement un filtre, un chiffon, ... la surface d'échange avec l'oxygène, de l'air est démultipliée avec pour effet de possiblement accélérer significativement la vitesse de réaction. A travers des essais en étuve isotherme adaptés d'une norme pour évaluer l'auto-échauffement de poussières, nous avons pu déterminer par extrapolations (successives) une dimension critique, autrement dit la taille maximale du média poreux pour laquelle, à la température du filtre au moment de l'accident, le risque d'auto-inflammation était avéré. Cette dimension, dépendant des paramètres d'extrapolation sélectionnés, est au final très proche ou en-dessous de celui du filtre de SAIPOL, ce qui signifie que le scénario de l'auto-inflammation suite à un phénomène d'auto-échauffement semble possible voire, fortement probable dans le cas de l'accident de SAIPOL.

