

# Caractérisation des matériaux explosifs par analyse thermique

Jérôme Saillard, Élodie Jacques, Joffrey Urvois, Charlotte Barré, Éric Lalière, Bernard Monserrat et Lionel Hairault

- Résumé** La caractérisation par analyse thermique fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement, notamment lors de l'étude des matériaux explosifs. En effet, elle permet de déterminer les propriétés d'un tel matériau et de mettre ainsi en place les mesures de sécurité nécessaires lors de sa fabrication, de son transport et de son utilisation. La caractérisation par analyse thermique consiste à étudier la variation d'une propriété physico-chimique en fonction de la température. Seront ainsi présentées dans cet article l'analyse thermogravimétrique (ATG) qui suit les variations de la masse d'un échantillon, et l'analyse enthalpique différentielle (DSC) qui permet de suivre les échanges de chaleur entre un échantillon et une référence. Il est possible d'optimiser ces techniques, en couplant par exemple la DSC à un microscope comme cela a été réalisé au CEA Le Ripault.
- Mots-clés** **Analyse thermique, analyse enthalpique différentielle, microscopie, analyse thermogravimétrique, explosifs.**
- Abstract** **Characterization of explosive materials by thermal analysis**  
Working on explosive materials, the LPC laboratory of the CEA Le Ripault develops new techniques in the domain of thermal analysis to determine more efficiently physico-chemical characteristics and to give more information about the behaviour of the sample with the temperature. This paper presents two of those techniques very used: the thermogravimetric analysis (TGA) and the differential scanning calorimetry (DSC). In order to optimise this last technique, a coupling of DSC with microscopy was performed at CEA Le Ripault.
- Keywords** **Thermal analysis, differential scanning calorimetry, microscopy, thermogravimetric analysis, explosive materials.**

## L'analyse thermique

### Définition

Dès qu'un matériau doit être étudié, l'un des tests les plus simples à réaliser est de le chauffer. En effet, chaque matériau, quel que soit sa nature, son état ou sa forme, subit des réactions physico-chimiques au cours d'un processus de sollicitation en température. Observer son comportement en fonction de la température et réaliser des mesures quantitatives lors de ces évolutions apportent donc de très nombreuses informations permettant d'identifier et de caractériser le matériau [1]. Ainsi, on définit l'analyse thermique comme un ensemble de techniques qui consiste à mesurer l'évolution d'une grandeur physique ou chimique d'un échantillon soumis à un programme de température contrôlée (tableau I). Les grandeurs physico-chimiques mesurées peuvent être la masse, le dégagement ou l'absorption de chaleur, la longueur ou le volume, ou bien encore une propriété optique, mécanique, électrique, structurale, etc. On parle alors d'événements thermiques lorsque l'échantillon, qui est soumis à un programme de température, subit une modification substantielle de la valeur d'un paramètre mesurable, dans un intervalle de temps bref à l'échelle de l'expérience.

### L'analyse thermique associée à l'étude des matériaux énergétiques

Les travaux de recherche et développement réalisés sur les matériaux énergétiques ont pour objectif d'améliorer les performances de ces matériaux tout en garantissant un très haut niveau de sécurité au cours de leur fabrication, de leur transport et de leur utilisation. L'analyse thermique [2] s'inscrit donc obligatoirement dans le processus d'étude des explosifs. En effet, de la modélisation d'une nouvelle molécule énergétique à la production en masse d'un explosif, des tests en analyse thermique sont effectués sur ces matériaux afin de déterminer :

- la température de décomposition, notamment pour des besoins de sécurité de mise en œuvre (figure 1a) ;

Tableau I - Exemples de techniques d'analyse thermique.

Technique	Abréviation courante	Propriété mesurée
Analyse thermogravimétrique	TGA	Variation de masse
Analyse thermique différentielle	DTA	Différence de température
Analyse calorimétrique différentielle	DSC	Différence de flux thermique
Analyse thermomécanique	TMA	Dimensions ou propriétés mécaniques
Analyse mécanique dynamique	DMA	Propriétés mécaniques
Analyse thermoélectrique	DEA ou TEA	Propriétés électriques
Analyse de gaz de décomposition	EGA	Identification des espèces gazeuses

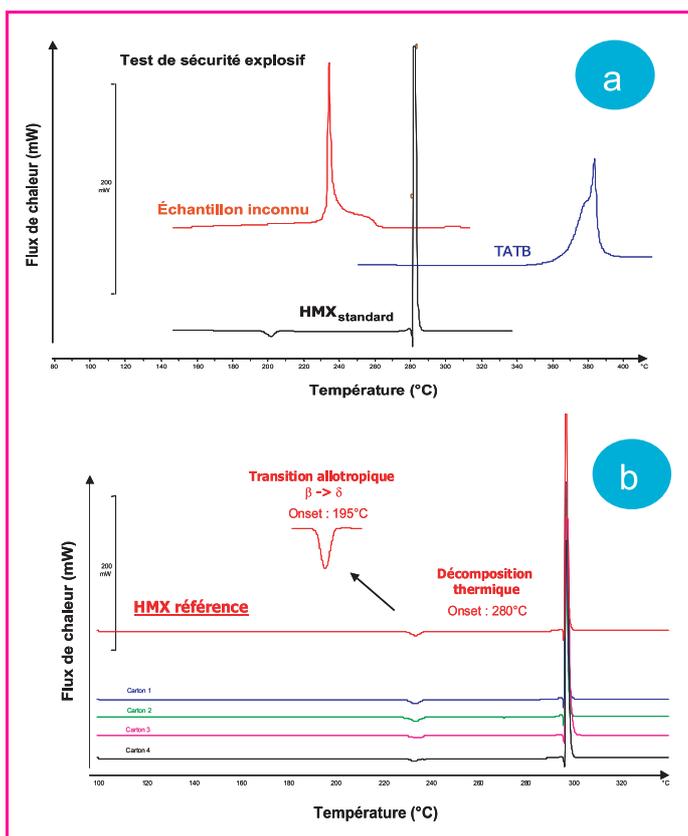


Figure 1 - Diverses applications de l'analyse thermique pour l'étude des explosifs.

a) Essai de sécurité de différents explosifs ; b) recette HMX réalisée par analyse DSC.

- l'identification d'un explosif comme l'HMX (ou octogène, voir p. 13 la description de cet explosif) et son contrôle qualité associé (figure 1b) ;
- leur comportement à plus ou moins long terme.

Dans la suite de cet article, différentes méthodes de caractérisation thermique seront détaillées et le développement d'une nouvelle technique, la microscopie DSC, mené au CEA Le Ripault, sera présenté.

### L'analyse enthalpique différentielle

L'analyse enthalpique différentielle [3] (« differential scanning calorimetry » ou DSC en anglais) est une méthode de caractérisation des matériaux basée sur l'étude des échanges de chaleur entre un échantillon et une référence, lorsqu'il est soumis à une rampe, c'est-à-dire un gradient, de température. Cette technique permet de déterminer des valeurs caractéristiques de chaque matériau comme la transition vitreuse, la température de fusion ou encore les enthalpies de réaction.

Les usages industriels de la DSC sont nombreux : analyse, dosage, étude des transitions et des diagrammes de phases, teneur en eau, stabilité thermique, état de pureté, réactivité ou encore calcul des constantes thermochimiques. Elle est indispensable dans le cadre du développement de matériaux et de compositions énergétiques car elle permet de valider la qualité des explosifs produits et apporte la garantie de leur fiabilité en termes de température de mise en œuvre.

### Principe

Il existe deux types de DSC, différant de par leur appareillage, mais le principe de mesure reste sensiblement le même (figure 2). Pour la DSC à compensation de puissance, l'échantillon et la référence sont placés dans deux fours différents, mais dans la même enceinte calorifique. Dans le cas d'une DSC à flux de chaleur, l'échantillon et la référence sont placés dans le même four. Une sonde de platine permet de contrôler et d'enregistrer l'évolution de la température de l'appareil. Cette technique mesure les différences de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence pendant un cycle de température.

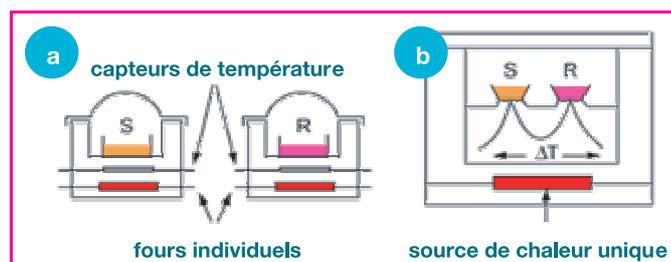


Figure 2 - DSC à compensation de puissance (a) et à flux de chaleur (b).

Les analyses sont réalisées dans un four soumis au balayage d'un gaz (par exemple l'azote) : ce sont donc des expériences réalisées sous atmosphère contrôlée (figure 3). Lorsque l'on chauffe ou que l'on refroidit l'échantillon, toute transformation de ce dernier s'accompagne d'une variation du flux thermique : la DSC permet de déterminer la température de cette transformation et de quantifier la chaleur échangée.

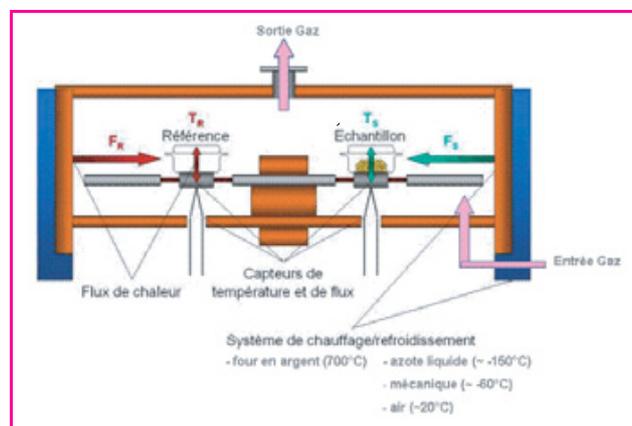


Figure 3 - Appareillage d'une DSC à flux de chaleur.

Le résultat s'exprime sous forme d'un thermogramme avec la température de l'échantillon en abscisse et le flux de chaleur en ordonnée (par convention, les pics exothermiques sont vers le haut). Lors d'une transition, l'échantillon va absorber (pic endothermique) ou dégager (pic exothermique) de l'énergie. La figure 4 présente un exemple de thermogramme obtenu à l'issue d'une expérience de DSC. On observe sur cette courbe [1] :

- une ligne de base qui traduit l'absence de réaction,
- un pic exothermique ( $\Delta H > 0$ ) correspondant par exemple à une décomposition ou à une cristallisation,
- un pic endothermique ( $\Delta H < 0$ ) correspondant par exemple à une fusion ou à une vaporisation.

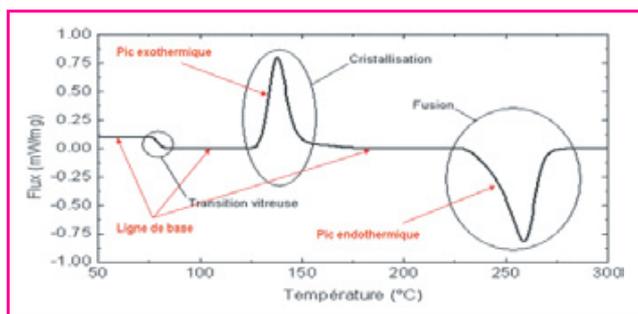


Figure 4 - Exemple de thermogramme obtenu à l'issue d'une expérience de DSC.

L'analyse calorimétrique différentielle ne permet pas d'effectuer une mesure absolue. Il est donc nécessaire de réaliser une calibration régulière de l'appareil afin de mener des mesures avec la meilleure précision possible. La technique DSC requiert deux calibrations différentes : l'une en température et l'autre en énergie.

### Intérêts de la DSC

L'analyse par DSC permet avant tout de caractériser rapidement un matériau inconnu ou un matériau dont on cherche à vérifier les caractéristiques physico-chimiques. La lecture immédiate d'un thermogramme indique les températures des pics caractéristiques et l'intégration de ces pics fournit des informations sur les énergies mises en jeu. L'allure du pic permet de savoir s'il s'agit d'un phénomène endo- ou exothermique, mais l'attribution de ces pics à une transition de phase spécifique (fusion, évaporation...) est plus délicate. L'étude par DSC à diverses rampes de température permet d'étudier la cinétique de réaction de l'échantillon.

Cette technique permet de vérifier ainsi la stabilité des explosifs synthétisés, la présence de solvant, de sous-produits ou d'impuretés, la compatibilité des explosifs avec d'autres matériaux tels que leur liant ou leur contenant.

### Avantages et inconvénients

Les avantages de la DSC sont nombreux mais elle présente néanmoins des inconvénients dont le plus important reste l'interprétation parfois délicate de certains thermogrammes. Avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau II.

### Exemples d'analyse DSC

Le choix de ces exemples n'est pas anodin ; il s'agit de caractériser l'octogène et le TATB qui sont assez représentatifs des différents types d'explosifs existants [4].

Les thermogrammes sont représentés pour chacun de ces explosifs, traduisant leur différence de comportement.

#### L'octogène

L'HMX (« high melting point explosive »), aussi appelé cyclotétraméthylène-tétranitramine ou octogène, est un solide blanc de formule brute  $C_4H_8N_8O_8$  (figure 5). De ses quatre formes cristallines ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), seule la forme  $\beta$  est utilisée car elle est stable au plan thermodynamique. Actuellement, il est principalement utilisé comme explosif militaire dans les missiles ou les bombes, ainsi que dans les propulseurs solides pour fusées.

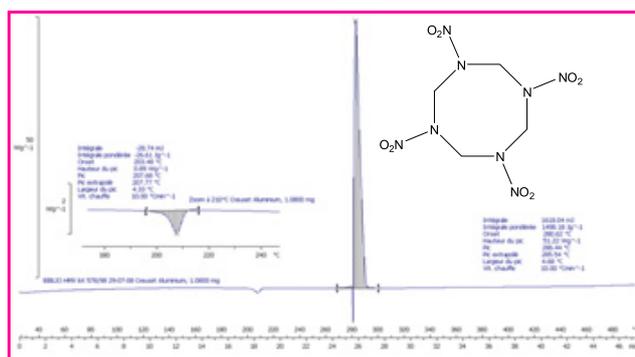


Figure 5 - Thermogramme DSC de l'octogène.

Sur la figure 5, le thermogramme de l'HMX indique un pic de transition allotropique  $\beta \rightarrow \delta$  (onset : 203 °C) et un pic de fusion (pic : 280 °C) précédant la décomposition instantanée du matériau (pic : 286 °C).

#### Le TATB

Le TATB (triaminotrinitrobenzène) est un explosif ayant une structure aromatique. Il s'agit d'un solide jaune de formule brute  $C_6(NO_2)_3(NH_2)_3$  (figure 6). Parce qu'il est difficile de l'amorcer par accident, même sous un

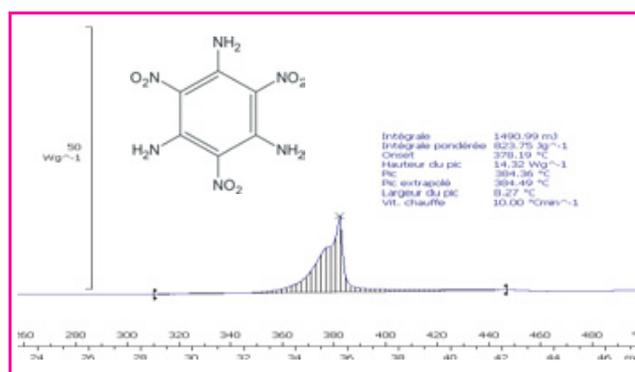


Figure 6 - Thermogramme DSC du TATB.

Tableau II - Avantages et inconvénients de la DSC.	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- étude de tous les types de matériaux et de tous les états de la matière,</li> <li>- très faible masse d'échantillon nécessaire (0,1 à 50 mg),</li> <li>- grande plage de température (- 150 à + 700 °C),</li> <li>- étude de nombreuses caractéristiques physico-chimiques (température de transition vitreuse, capacité calorifique, enthalpie de formation et de décomposition, température de Curie...),</li> <li>- analyse relativement rapide.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- analyse destructive : l'échantillon n'est pas récupéré,</li> <li>- ne permet pas d'effectuer une mesure absolue. Il est donc nécessaire de réaliser une calibration régulière en température et une calibration en énergie,</li> <li>- l'interprétation des thermogrammes peut être délicate.</li> </ul>

environnement hostile, cet explosif est très utilisé pour des applications demandant une sécurité importante.

Sur la *figure 6*, le thermogramme du TATB ne permet d'observer qu'un pic de décomposition (pic : 384 °C). Ce pic présente un épaulement qui est représentatif de la granulométrie du TATB.

## Couplage de techniques : la microscopie-DSC

La compréhension d'un explosif est complexe car de nombreux facteurs entrent en considération pour sa caractérisation. Il est donc nécessaire de développer des techniques apportant de nouvelles informations : le développement de la microscopie-DSC (ou  $\mu$ DSC) [5] répond à cette exigence, notamment pour l'étude de la décomposition d'un explosif.

Cet appareil, développé initialement par Mettler Toledo, est totalement novateur et permet de mesurer le thermogramme du matériau étudié et de visualiser son évolution morphologique au cours du programme de température.

### Principe

Le couplage d'une DSC et d'un microscope équipé d'une caméra CCD permet d'observer visuellement l'échantillon soumis à un programme de température. Cette information visuelle peut être utile pour préciser l'interprétation des phénomènes observables sur le thermogramme. La  $\mu$ DSC permet également l'étude de phénomènes inobservables sur un thermogramme tels qu'un changement de couleur.

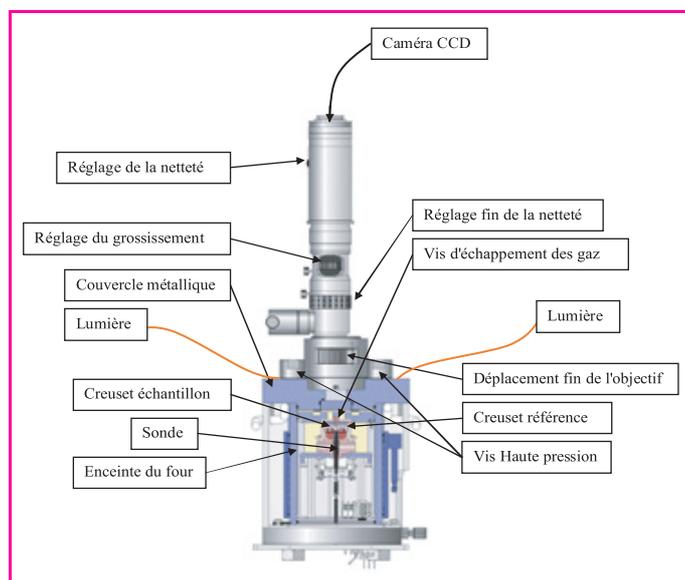


Figure 7 - Schéma de la  $\mu$ DSC Mettler Toledo.

Ce dispositif microscopique se compose d'une partie comportant l'optique nécessaire au grossissement (objectif et lentilles) et de la caméra CCD qui permet l'enregistrement de la vidéo grâce à la capture successive d'images.

Dans le cas où plusieurs phénomènes se produisent simultanément avec des pics qui se superposent sur le thermogramme, la microscopie peut permettre l'attribution de ces pics avec la visualisation des phénomènes. Par DSC classique, on ne verrait qu'un amas de pics ne permettant pas d'interprétation précise.

Enfin, la microscopie permet l'étude de phénomènes ne générant qu'une très faible énergie (par exemple, une

transition allotropique comme nous le verrons avec l'octogène), mais ce ne sont pas les seules applications de cette technique.

### Apports de cette nouvelle technique

Le premier apport de la  $\mu$ DSC est la visualisation de l'échantillon durant l'expérience. Elle peut permettre de lever une éventuelle ambiguïté dans l'interprétation des pics du thermogramme et également de confirmer une analyse. Ainsi, des pics caractéristiques tels que la fusion, la cristallisation ou encore la décomposition vont pouvoir être observés. Dans le cas des polymères, il peut être également intéressant de visualiser la transition vitreuse.

Bien souvent, il est nécessaire de coupler différentes techniques pour parvenir à une interprétation fiable des données. On peut citer les techniques spectroscopiques (infrarouge, masse), la RMN ou encore la chromatographie qui viennent compléter l'analyse thermique. En dehors des caractéristiques déterminées par DSC classique, de nombreuses grandeurs physico-chimiques ne peuvent être déterminées par cette technique seule. Le couplage avec la microscopie est intéressant dans le sens où il apporte des informations nouvelles par rapport aux techniques citées plus haut.

Par DSC classique, il est possible de déterminer les températures de fusion et surtout de décomposition d'un explosif. Cette dernière donnée permet de connaître le domaine de stabilité d'un explosif. La  $\mu$ DSC peut permettre de visualiser des phénomènes tout aussi importants tels que la nucléation ou la germination, la morphologie, les gonflements ou rétractations de l'échantillon, les altérations de surface, les fissurations ou les transformations allotropiques « solide-solide ». Il va également être possible de déterminer le taux d'expansion ou encore la cinétique de croissance du matériau (ceci avec une calibration préalable). Pour l'étude des explosifs, un autre aspect important est la visualisation des échappements gazeux issus de la décomposition.

En généralisant cette technique à tous types de matériaux, notamment pour des matériaux utilisés en optique, il peut être intéressant d'observer les changements d'intensité lumineuse, les changements de couleurs et de textures, ou encore la transparence.

Les résultats obtenus pour un programme de température entre 25 et 500 °C avec une rampe de 10 °C/min avec la microscopie DSC sont présentés ci-après pour deux explosifs, l'octogène et le TATB.

### L'octogène

L'analyse par  $\mu$ DSC (*figure 8a*) confirme l'étude par DSC classique. À 200 °C, on observe un changement de texture et un gonflement des grains : c'est la transition allotropique. Vers 250 °C, on observe que quelques grains isolés de HMX  $\beta$  fondent. Globalement, la matière « s'agite ». À 280 °C, sur un intervalle d'1 °C, les grains fondent puis disparaissent brusquement et totalement (il ne reste aucun résidu) : la décomposition a eu lieu. Ceci est cohérent avec l'allure du thermogramme par DSC classique : un pic très étroit avec une tangente quasi verticale.

### Le TATB

Le TATB ne présente pas de phénomène de fusion. La décomposition se fait donc à l'état solide. Il passe d'un jaune intense à un rouge brique et devient totalement noir au

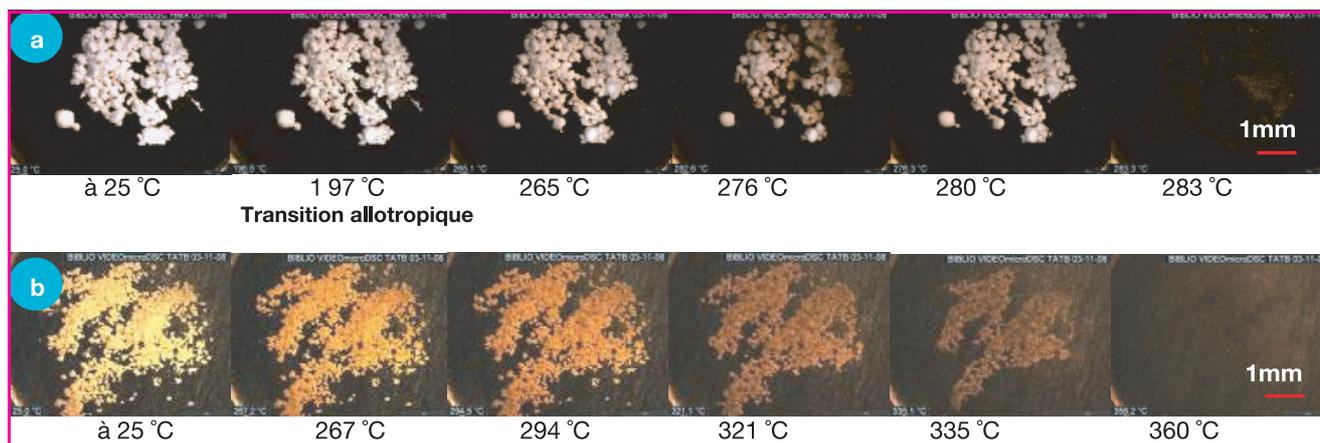


Figure 8 - Instants caractéristiques de la caractérisation thermique par  $\mu$ DSC (a) de l'HMX ; (b) du TATB.

moment de sa décomposition (figure 8b). Par ailleurs, on s'aperçoit que cet explosif se décompose sur une grande plage de température : dès 250 °C, quelques grains de matière disparaissent brusquement et ceci jusqu'à plus de 400 °C. Cette observation n'avait pas été visible par DSC classique malgré un pic de décomposition relativement large (de 340 à 420 °C). Au cours de la décomposition, on observe une disparition assez importante de matière ; il reste néanmoins une grande quantité de résidus à la fin de celle-ci.

L'apport de l'analyse par  $\mu$ DSC permet ainsi une amélioration importante de la compréhension et de la visualisation des événements thermiques des différents explosifs.

## L'analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet la caractérisation de matériaux par la mesure directe de leur variation de masse en fonction du temps ou de la température [6]. Elle fait donc appel à quatre facteurs : l'échantillon, la masse, le temps/la température et l'environnement.

L'ATG est souvent employée pour déterminer les caractéristiques de matériaux, ainsi que pour estimer la cinétique de réaction ou l'adsorption des gaz sur les solides. Cette technique de mesure globale est généralement couplée avec d'autres techniques d'analyse effectuées simultanément, les plus courantes étant la DSC et la spectrométrie de masse (voir encadré).

## Appareillage

Un appareil ATG se compose d'une enceinte étanche permettant de contrôler l'atmosphère de l'échantillon, d'un four permettant de gérer la température, d'un module de pesée, de thermocouples pour mesurer la température du four et de l'échantillon, et d'un ordinateur pour contrôler l'ensemble et enregistrer les données. L'appareil dispose également d'un dispositif de refroidissement. Le système de chauffage de l'échantillon intègre généralement aussi l'aspect confinement de l'atmosphère contrôlée. L'ensemble s'adapte à la balance et l'on trouve donc différentes dispositions (vertical suspendu, vertical soutenu et horizontal).

La balance fonctionne sur un mécanisme de « balance nulle ». On fixe une plaque métallique sur le fléau et l'on place deux capteurs photoélectriques d'un côté. De l'autre côté, on place une source lumineuse : les capteurs enregistrent l'intensité lumineuse qu'ils convertissent en tension électrique. Une perte (ou un gain) de masse fait bouger le fléau et la plaque métallique vient se placer devant l'un des capteurs, engendrant une variation de l'intensité lumineuse reçue. Les capteurs retransmettent la variation de la tension électrique au régulateur qui replace le fléau à sa position initiale. Cette tension est donc directement proportionnelle à la variation de masse.

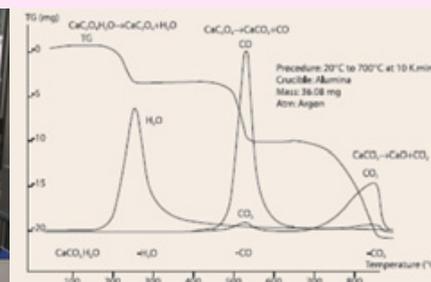
Classiquement, le résultat s'exprime sous la forme d'un thermogramme présentant l'évolution de la masse en

### Couplage ATG/spectrométrie de masse : application à l'oxalate de calcium [7]

Alors que la thermogravimétrie donne une information sur la perte de masse, le couplage à la spectrométrie permet de déterminer la nature des gaz dégagés lors de ce départ de matière. Ainsi, l'ATG fournit une information précise mais globale et la spectrométrie de masse la complète en permettant de remonter aux masses molaires.

Afin de montrer l'intérêt d'un tel couplage, prenons l'exemple de l'oxalate de calcium. De formule  $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  lors d'une analyse en température, il donne lieu à un dégagement d'eau vers 200 °C ( $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g/mol}$ ) puis à un dégagement de monoxyde de carbone vers 500 °C ( $M_{\text{monoxyde}} = 28 \text{ g/mol}$ ) et finalement à un dégagement de dioxyde de carbone vers 700 °C ( $M_{\text{dioxyde}} = 44 \text{ g/mol}$ ).

Le spectre obtenu est présenté conjointement au thermogramme obtenu par ATG (voir figure). On visualise bien que la détection des gaz se fait conjointement aux pertes de masse successives.



Dispositif ATG/spectromètre de masse et thermogramme de la décomposition thermique de l'oxalate de calcium.

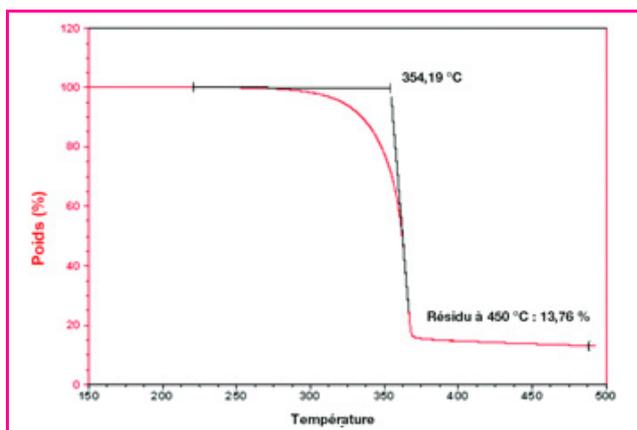


Figure 9 - Thermogramme par analyse thermogravimétrique du TATB.

ordonnée (en grammes ou en %) et le temps en abscisse. Cependant, la variation de température étant linéaire par rapport au temps, c'est la température qui est le plus souvent en abscisse.

### Applications

La principale application de l'ATG réside dans la détermination de la dégradation et de la stabilité thermique des matériaux (explosifs, polymères, protéines...). L'objectif est de connaître le comportement de l'échantillon étudié en fonction de la température et de l'atmosphère. La programmation en température est constituée de rampes et de paliers de température. On utilise aussi différentes atmosphères par commutation de gaz afin de provoquer diverses réactions de décomposition générant des produits volatils. L'exploitation de la cinétique de la perte de masse permet aussi d'établir le vieillissement et la durée de vie des matériaux.

Ainsi, à travers l'étude du TATB par  $\mu$ DSC, nous avons noté la présence de résidus à l'issue de sa décomposition. Leur présence est quantifiable par analyse thermogravimétrique. Le résultat obtenu pour un programme de température entre 150 et 500 °C avec une rampe de 5 °C/min permet d'observer une variation de la masse vers 354 °C qui correspond au maximum de processus de décomposition du matériau. La présence de résidus à l'issue de l'expérience est confirmée puisqu'il reste environ 14 % en masse au-delà de 450 °C (figure 9).

L'ATG permet aussi l'étude de réactions chimiques complexes comme les processus d'oxydation, de corrosion ou d'absorption. Les atmosphères employées au cours de ces essais créent ainsi le plus souvent des composés non volatils qui se traduisent par un gain de masse. Ces réactions impliquent de maximiser la surface d'échange entre l'échantillon et l'atmosphère.

### Conclusion

La caractérisation thermique est une étape clé dans le processus de développement et de mise en œuvre des matériaux énergétiques. Les techniques de DSC et d'ATG sont particulièrement employées. Cet article montre également qu'il est possible d'optimiser ces méthodes afin d'augmenter la qualité des informations qu'elles peuvent apporter et d'améliorer ainsi la compréhension de certains phénomènes thermiques. La microscopie-DSC est à ce titre un très bon exemple de ces développements.

### Références

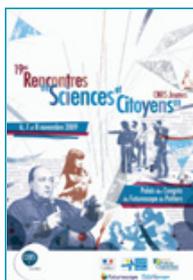
- [1] Speyer R.F., *Thermal Analysis of Material*, Marcel Dekker, Inc., New York, **1994**.
- [2] Hatakeyama T., Zhenhai L., *Handbook of thermal Analysis*, John Wiley & Sons, New York, **1998**, 11, p. 337-377.
- [3] Höhne G.W.H., Hemminger W.F., Flammersheim H.-J., *Differential Scanning Calorimetry*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer-Verlag, Berlin, **2003**.
- [4] Meyer R., Köhler J., Homburg A., *Explosives*, 6<sup>th</sup> ed., Wiley-VCH Verlag, Weinheim, **2007**.
- [5] Vitez I.M., Newman A.W., Davidovich M., Kiesnowski C., The evolution of hot-stage microscopy to aid solid-state characterizations of pharmaceutical solids, *Thermochimica Acta*, **1998**, 324, p. 187.
- [6] Gallagher P.K., *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 1, M.E. Brown, P.K. Gallagher (eds), Elsevier, Amsterdam, **1998**, 4, p. 225-277.
- [7] Daudon J.-L., *Thermogravimétrie*, Technique de l'Ingénieur, **1998**, p. 1260.



J. Saillard

**Jérôme Saillard** (auteur correspondant)  
est ingénieur au CEA Le Ripault\*.

\* CEA Le Ripault, BP 16, 37260 Monts.  
Courriel : jerome.saillard@cea.fr



#### Venez participer aux 10<sup>e</sup> Rencontres CNRS Jeunes « Sciences et Citoyens »

au Palais des Congrès du Futuroscope de Poitiers, du 6 au 8 novembre prochain

Vous avez envie de débattre et d'échanger en toute liberté pour construire ensemble la société de demain ? Comme chaque année, 450 jeunes et 100 chercheurs sont attendus aux rencontres « Sciences et Citoyens ». Chacun apporte ici sa richesse : un savoir, une curiosité, une expérience...

Le Comité scientifique pluridisciplinaire – sous la présidence du chimiste Philippe Garrigues et la présidence d'honneur du sociologue Edgar Morin – a retenu dix thèmes pour l'édition 2009, dont « La crise économique, une chance pour l'environnement ? », « La science en partage ? », « Explorer le passé de la planète pour comprendre son futur », « Énergies : le pétrole, le nucléaire et les autres », « Sexe, amour et sciences »...

• Inscription dans la limite des places disponibles : [www.cnrs.fr/sciencesetcitoyens](http://www.cnrs.fr/sciencesetcitoyens)