COMPAGNIE NATIONALE DES EXPERTS JUDICIAIRES DE LA CHIMIE

CHIMIE & COMPAGNIES

№21 - JUIN 2026

RECUEIL TECHNICO-JURIDIQUE DES EXPERTS CHIMISTES AU SERVICE DES ANALYSES EXPERTALES MULTISECTORIELLES

ÉDITO

À l'interface du savoir scientifique et de l'exigence juridique, la chimie occupe une place singulière.
Discipline de la preuve, de la mesure et de l'interprétation, elle intervient de plus en plus fréquemment dans les contentieux contemporains : environnement, santé publique, responsabilité industrielle, sécurité des produits. Pourtant, le dialogue entre chimistes et juristes demeure souvent entravé par des différences de langage, de méthodes et de référentiels.
Chimie & Compagnies s'adresse précisément à celles et ceux qui, magistrats, avocats, experts et praticiens d'autres disciplines, sont amenés à mobiliser ou à confronter des données scientifiques dans leur exercice professionnel. Notre ambition n'est pas de simplifier à l'excès, mais de rendre intelligible : expliciter les concepts, clarifier les incertitudes, exposer les limites des analyses comme leurs apports probatoires.
Car la chimie, lorsqu'elle entre dans le prétoire, change de statut. Elle ne se contente plus de décrire ou d'expliquer ; elle contribue à établir des faits, à éclairer des responsabilités, à orienter des décisions. Cette translation du laboratoire vers l'arène judiciaire suppose une rigueur accrue, mais aussi une pédagogie renouvelée.
Au fil de ses pages, la revue propose des éclairages sur des expertises récentes, des retours d'expérience, des analyses croisées entre scientifiques et juristes, ainsi qu'une réflexion sur les enjeux éthiques et méthodologiques liés à l'usage de la preuve scientifique. Elle se veut un outil de compréhension mutuelle, au service d'un dialogue éclairé entre disciplines.
Dans un contexte où les affaires techniques se multiplient et se complexifient, renforcer cette culture commune apparaît non seulement utile, mais nécessaire. C'est à cette exigence que Chimie & Compagnies entend contribuer.

Bonne lecture.
Stephane Pirnay, Président

SOMMAIRE

LES NEWS

P2. Retour sur...

P3. Paroles de présidents - Gilles de Courcel

P5. L'actualité de la Compagnie

P6. 2 Membres de la CNEJC - Islem Belaid & Babak Sayah

JUSTICE & ORGANISATION

P8. Dopage par contamination, action pénale

P10. Procédure civile, expertise judiciaire, référés

SCIENCES & TECHNIQUES

P15. Fiche technique d'analyse : prélèvement et mesure des hap

P16. 200 ans anniversaire du "roi" de la thermodynamique Sadi Carnot

P20. Les élastomères dans l'art contemporain

COMITÉ DE RÉDACTION

Alexandre Fleurentin, alexandre.fleurentin@metallocorner.fr - Stephane Pirnay, expertoxca@gmail.com - Jean Pédelaborde, jean.pedelaborde@gmail.com - Simon Choumer, schoumer@9online.fr - Valérie Corizzi, vcorizzi@sfr.fr

Toutes les informations compilées dans ce recueil sont fournies à titre informatif et n'engagent en aucun cas pénalement et civilement la Compagnie Nationale des Experts Judiciaire de la Chimie ainsi que les membres du comité de rédaction.

RETOUR SUR ... CHIMIE ET MOBILITÉ

Le 11 février 2026 s'est tenu à la Maison de la Chimie le colloque sur la mobilité.

Mobilités automobile, ferroviaire, aéronautique : nous sommes tous concernés par la mobilité et ses évolutions. Beaucoup de progrès ont été réalisés concernant la sécurité des matériaux, l'économie d'énergie et le développement durable. De plus, de nombreux nouveaux modes de déplacement urbains sont apparus et sont en plein développement.

L'un des enjeux primordiaux est l'élimination des gaz à effet de serre (GES) produits par les mobilités des biens et des personnes.
Afin de tendre vers le « net zéro carbone », d'autres sources d'énergie ont été étudiées, notamment l'hydrogène, les biocarburants, les carburants synthétiques et la capture du CO_2.

En Europe, l'ensemble des mobilités produit environ 36% des gaz à effets de serre. Il est par conséquent indispensable de réaliser la décarbonation. Pour ce faire, trois voies sont nécessaires :
- Sobriété : réduction des déplacements, allègement des moyens de locomotion ,vélo, transports en commun
- Efficacité : principalement par la propulsion
- Changement d'énergie : électricité décarbonée, hydrogène, biomasse et SAF (Sustainable Aviation Fuel), soit CAD (Carburant Aviation Durable), produit à partir de déchets forestiers et de résidus tels que les huiles de cuisson usagées. Le CAD émet 65% de CO_2 de moins que le kérosène fossile courant ; et on peut le mélanger à 50% dans le kérosène.

En ce qui concerne les batteries, celles-ci ont beaucoup évolué depuis les batteries au plomb vers les batteries lithium-ions et bientôt sodium-ions. Ces dernières sont plus performantes, moins chères et moins sensibles géopolitiquement.

La Chine détient le record mondial de fabrication des batteries au lithium, avec 82%.
Et l'Australie détient 87% de l'approvisionnement mondial de lithium.

Les batteries jouent aujourd'hui un rôle central dans la transition énergétique. Le recyclage de ce métal alcalin (lithium)est donc indispensable, et seule la Chine recycle presque totalement ses batteries, alors que l'Europe a un taux de recyclage encore faible.

En ce qui concerne le ferroviaire, le développement des batteries à hydrogène devrait remplacer à terme les moteurs diesel.



Simon CHOUMER, VP
Expert judiciaire en génie chimique

PAROLES DE PRÉSIDENT

Gilles de Courcel, Vice-Président de la Compagnie Nationale des Experts Comptables de Justice (CNECJ)

LA TENTATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

« L'homme est plus libre d'éviter les tentations que de les vaincre » Jean-Jacques Rousseau

En moins de deux années l'Intelligence Artificielle (« IA ») s'est imposée comme objet de toutes les curiosités de la part d'un très large public et sujet de vifs débats dans les cercles juridiques, judiciaires et expertaux.

Pour autant et à ce jour, la définition de l'IA et la connaissance des outils qui y sont associés demeurent d'autant plus imprécis que, dans ses fondements comme dans ses applications, l'IA semble empreinte de mutations fulgurantes et continues.

Paradoxalement, en regard de la complexité du sujet et d'élaboration de ses outils applicatifs, l'usage de l'IA relève d'accès les plus faciles. Observant nos contemporains, force est de constater que, des plus jeunes aux plus âgés, rares sont ceux qui ne succombent pas à la tentation d'y recourir, sans pourtant en mesurer toutes les conséquences.

Cette situation bien particulière ne nous replace-t-elle pas, en quelque sorte, dans celle décrite dans le Livre de la Genèse ? Adam et Eve devant l'arbre de la connaissance du bien et du mal, qui goutent au fruit défendu après que le serpent leur ai dit « le jour où vous en mangerez, vos yeux s'ouvriront, et vous serez comme des dieux, connaissant le bien et le mal ». On connait la funeste suite … .

Certes, comparaison n'est pas raison, c'est donc avec prudence que je me permets cette analogie entre l'IA et l'arbre de la connaissance, d'autant plus que notre monde actuel semble bien éloigné du jardin d'Eden.

Cependant il me semble pertinent d'attirer l'attention des lecteurs de la Revue sur les possibles risques sous-jacents au développement de l'usage de l'IA par les experts de justice au regard de trois enjeux majeurs

LA QUALITÉ DE LA DÉMARCHE EXPERTALE

Partant du constat que les experts de justice fondent leurs analyses et opinions sur des informations dont ils s'efforcent de déterminer l'exacte origine pour en apprécier la véracité, convenons que le premier risque que fait encourir la tentation de l'IA découle, quelque part, de sa facilité d'utilisation, et qu'ainsi de son usage non maîtrisé une conséquence très matérielle pourrait être l'affaiblissement de la démarche expertale (analyse personnelle des données communiquées, vérifications matérielles, revue et analyse critique des résultats, …).
Le corollaire de ce risque général prend la forme de deux risques spécifiques :
- le risque d'erreur grossière, tant il est vrai que l'IA se caractérise parfois par sa capacité à générer des hallucinations, c'est-à-dire à produire une réponse fausse ou une réponse trompeuse, pourtant présentée comme certaine ;
- le risque d'altération du jugement professionnel, c'est-à-dire cette capacité fondamentale de l'expert de justice à juger et apprécier des faits au regard de son expérience professionnelle, en toute indépendance et en pleine conscience de ses moyens.

LA CONFIANCE DES JUGES ET DES JUSTICIABLES

L'usage non maîtrisé de l'IA fait courir plus généralement à la communauté des experts de justice, dont nos Compagnies sont les représentantes et les garantes, un risque de perte de confiance dans la démarche expertale et dans l'opinion délivrée par les experts de justice à destination des juges comme des justiciables et leurs conseils.

Une exigence de transparence dans l'utilisation de l'IA s'impose dans le recours que l'expert de justice peut en faire pour la conduite de ses travaux et dans l'élaboration de ses conclusions. La perception qui se ferait jour d'un usage intensif et non maîtrisé de l'IA dans la conduite des expertises de justice conduirait rapidement, me semble-t-il, à une perte de confiance de la part des juges et des justiciables à l'égard des experts comme de leurs institutions.

L'ENJEU DE SOUVERAINETÉ NATIONALE

Dans un rapport de septembre 2024 consacré à l'avenir de la compétitivité européenne, l'ancien président de la Banque Centrale Européenne, Mario Draghi, formulait le sombre constat, confirmé par des études plus récentes, que les efforts en matière de développement des outils d'analyse, d'enrichissement puis de stockage de la donnée sont concentrés aux USA et en Asie.

Ces développements technologiques permettent une circulation des données à une vitesse sidérante (car numérisées) et en facilitent la consultation de n'importe quel point de la planète aussi éloigné soit-t-il de leur lieu de stockage. C'est sur cette base technologique que se fonde le développement de l'usage de l'IA.

L'avenir de l'accès aux données numériques nous semble dès lors constituer un enjeu majeur pour l'exercice de nos fonctions ; sans libre accès aux données numériques, où qu'elles se trouvent, l'indépendance des experts de justice se trouvera gravement affectée. Et dans ce domaine, à l'image d'autres, un embargo hégémonique ne peut être écarté.

Dans un pays tel que le nôtre, doté d'une culture juridique, judiciaire et expertale exemplaire et reconnue, c'est d'une perte de souveraineté dont il s'agirait.

Ces mises en garde ne sont pas destinées à détourner les experts de justice de la tentation d'utiliser l'IA dans la conduite de leurs missions, mais de les encourager à la prudence en les incitant à user de la liberté qui est encore la leur d'éviter d'y céder lorsqu'ils ne sont pas pleinement assurés de leur pleine maîtrise de la matière et du process.



Gilles de Courcel, Vice-Président de la Compagnie Nationale des Experts Comptables de Justice (CNECJ)

L'ACTUALITÉ DE NOTRE COMPAGNIE

Benoît PIRO, professeur de chimie appliquée à l'Université Paris-Cité et expert chimiste près la cour d'appel de Paris.

La première moitié de l'année 2026 démarre, comme d'habitude, sur les chapeaux de roues. C'est le cas de le dire puisque notre Assemblée Générale Ordinaire 2026 se tiendra le 16 juin à Compiègne, non loin de son Musée National de la Voiture et du Tourisme (vous y trouverez la Jamais Contente, voiture électrique de… 1899 ayant atteint 100 km/h à l'époque. L'histoire est un éternel recommencement).

Cette édition 2026, pour la première fois tenue en dehors de Paris, permettra d'ouvrir nos discussions à des personnalités et à des experts de la région, qui n'auraient pas l'occasion de nous rencontrer sans cela. Nous espérons des rencontres riches et pleines de potentiel.

Toujours avec l'idée d'étendre le rayonnement de la Compagnie, nous avons en ce début d'année discuté de l'opportunité de l'ouvrir davantage à des candidats experts ou à des experts associés, n'exerçant pas nécessairement dans les métiers de la chimie mais dans des domaines qui l'utilisent (nous le savons tous, la chimie est partout). Plus largement, fixons-nous comme objectif de faire croître raisonnablement le nombre de membres, ou restons-nous (très) petits, au risque de n'être pas assez visibles ?

Avec le même objectif d'accroître notre visibilité, le renouveau du site Internet de la Compagnie s'impose. C'est une action qui sera engagée avant la fin 2026.

Enfin, nous souhaitons fêter les 10 ans de notre revue Chimie & Compagnie, un jalon symbolique dans la vie de cette publication mais aussi un témoin de notre dynamisme. Cet évènement se tiendra au cours du dernier trimestre 2026, dans un lieu parisien, typique, qui reste à déterminer. À cette occasion, nous avons lancé un appel à sponsoring : les membres en mesure de contribuer financièrement à l'évènement au travers de leur entreprise, ont été invités à se déclarer : c'est un immense succès ! Vous êtes très nombreux à souhaiter apparaître comme sponsors, avec en contrepartie la visibilité de votre entreprise dans Chimie et Compagnie et dans les communications liées à l'évènement.

Nous vous souhaitons un bel été.



Benoît PIRO, professeur de chimie appliquée à l'Université Paris-Cité et expert chimiste près la cour d'appel de Paris.

2 MEMBRES DE LA CNEJC

ISLEM BELAID



Conseil en propriété industrielle (brevets) – Mandataire agréé près l'Office Européen des Brevets
Membre associé

Docteure en chimie et Conseil en propriété industrielle, Islem Belaid a construit un parcours reliant la recherche en chimie à la propriété industrielle.

Sa trajectoire débute par une formation d'ingénieure en chimie analytique à l'Université de Tunis El Manar, puis par un Master II en matériaux innovants à l'INSA Lyon. Elle réalise ensuite une thèse de doctorat à l'Université Claude Bernard Lyon 1, au laboratoire C2P2, en partenariat avec Michelin. Ses travaux portent sur la synthèse d'élastomères de performance par copolymérisation de l'éthylène et de diènes conjugués, avec une approche allant de la synthèse de catalyseurs métallocènes à la caractérisation des polymères, en passant par la compréhension des mécanismes de polymérisation associés, ainsi que l'évaluation des propriétés du polymère final destiné à être intégré dans un pneu.

Elle choisit ensuite d'appliquer cette culture scientifique au brevet d'invention. Elle se forme au Centre d'Études Internationales de la Propriété Intellectuelle (CEIPI), puis exerce, de 2019 à 2024 comme ingénieur brevets au sein du cabinet de propriété industrielle PACT-IP, avant d'obtenir le titre de Conseil en propriété industrielle et celui de mandataire agréée près l'Office Européen des brevets. Depuis juin 2024, elle exerce à Paris chez Bandpay & Greuter.

Aujourd'hui, elle accompagne des clients dans un large spectre de domaines de la chimie, notamment la chimie organique et inorganique, la pharmacie, les dispositifs médicaux, la cosmétique, les polymères et leurs applications, l'énergie et les technologies batteries, ainsi que le traitement de l'eau et de l'air. Elle accompagne les entreprises industrielles sur des questions de brevetabilité, de liberté d'exploitation et de contrefaçon. Elle intervient également dans des procédures d'opposition devant l'Office européen des brevets et dans des litiges devant la Juridiction Unifiée du Brevet.

2 MEMBRES DE LA CNEJC

BABAK SAYAH
Membre associé



Il est docteur en chimie organique. Il débute sa carrière chez Provence Technologies avec une solide culture de recherche fondamentale et appliquée. Très tôt, il évolue vers des fonctions à responsabilité lui permettant de conjuguer vision scientifique et pilotage d'activités économiques.
Cette double compétence deviendra le fil conducteur de son parcours.

Pendant plus de quinze ans, il y occupe successivement les fonctions de Directeur R&D puis de Directeur Général Opérationnel. Dans un environnement de chimie fine orienté services industriels et pharmaceutiques, il structure et développe l'activité autour de prestations de synthèse organique à forte valeur ajoutée.
Parallèlement, il impulse des axes de recherche stratégiques qui mèneront au développement de plusieurs médicaments innovants dont le Proveblue® pour le traitement symptomatique aigu de la méthémoglobinémie. Ses recherches mèneront également à la constitution d'un portefeuille important de brevets à couverture internationale. Cette période forge sa capacité à allier performance économique, excellence scientifique et vision long-terme.

En 2019, il rejoint Provepharm en tant que Directeur Développement Chimique & Innovation et membre du comité de direction. Son rôle prend alors une dimension plus globale, intégrant à la fois la R&D, l'industrialisation, la qualité, le CMC et la propriété intellectuelle. Sous son impulsion, plusieurs développements pharmaceutiques franchissent avec succès les étapes menant à l'autorisation de mise sur le marché en Europe et aux États-Unis. Il coordonne également des partenariats internationaux avec des CDMO et contribue aux échanges avec les autorités réglementaires telles que l'EMA et la FDA.

Depuis fin 2025, Babak exerce en tant que consultant indépendant et accompagne des sociétés pharmaceutiques en leur apportant une expertise technico-stratégique pour le développement de leurs produits. Il s'impose ainsi comme un acteur capable de conduire des projets de l'idée au marché, tout en sécurisant leur valeur technologique et économique.

RETOUR AU SOMMAIRE

JUSTICE ET ORGANISATION

DOPAGE PAR CONTAMINATION

QUAND LE PENAL EST PLUS FAVORABLE AU SPORTIF QUE LE DISCIPLINAIRE (2ème partie)

Christophe AYELA, avocat associé STATS & ASSOCIÉS

COLLOQUE DU 16 JUIN 2025 COMPAGNIE NATIONALE DES EXPERTS JUDICIAIRES DE LA CHIMIE (CNEJC)

3. DOPAGE PAR CONTAMINATION : QUAND LE DROIT PÉNAL EST LE SEUL À PRÉSERVER LES DROITS DU SPORTIF

3.1.QUAND L'ESPRIT DE LA LUTTE CONTRE LE DOPAGE EST BAFOUÉ PAR LE DROIT DISCIPLINAIRE

Le Code mondial antidopage, édité par l'AMA, rappelle expressément que l'objectif de la lutte antidopage est « de protéger le droit fondamental des sportifs de participer à des activités sportives exemptes de dopage, et ainsi de promouvoir la santé, l'équité et l'égalité des sportifs du monde entier ».

Ce louable souci d'équité et d'égalité des sportifs gouverne ainsi en façade l'action des instances antidopage : « Les programmes antidopage cherchent à préserver l'intégrité du sport par le respect des règles, des autres concurrents, de la concurrence loyale, de l'égalité entre les participants et de la valeur du sport propre pour le monde. ».

Comment expliquer dans ce cas qu'un sportif victime d'une contamination, qui n'a absorbé à son insu qu'une dose infinitésimale d'une substance interdite, laquelle n'a eu strictement aucun effet sur ses performances et qui n'a donc disposé d'aucun avantage indu par rapport à d'autres sportifs, puisse être sanctionné au nom de « l'équité et l'égalité des sportifs » ?

La triste réalité est que, face à des pratiques dopantes de plus en plus élaborées, les instances antidopage, dans une sorte d'aveu d'impuissance, ont finalement décidé de ne plus trouver, ni même chercher les véritables tricheurs, mais d'imposer aux sportifs des règles si drastiques qu'elles pensent être dissuasives, les sportifs innocents sacrifiés sur l'autel de la lutte antidopage ayant pour elles valeur d'exemple.

Ainsi les instances antidopage font-elles application de l'adage « Mieux vaut une injustice qu'un désordre »…

Il n'en demeure pas moins que cette lutte effrénée, pour ne pas dire aveugle des instances antidopage, conduit à des situations ubuesques, dans lesquelles le sportif est moins bien traité par le droit disciplinaire que ne l'est le criminel par le droit pénal :

- Coût de la procédure et des moyens de défense :

Rappelons que, dans les cas de contamination, le sportif doit pour se défendre solliciter à la fois (i) le « Dossier analytique » de l'échantillon A, (ii) le « Dossier analytique » de l'échantillon B et (iii) l'analyse de l'échantillon B.

Or, l'AFLD et le Laboratoire d'analyses antidopage de Châtenay-Malabry facturent ces prestations au sportif au prix de 600€ pour chaque dossier analytique et 360€ pour l'analyse de l'échantillon B, soit un coût total de 1.560€, auquel s'ajoute celui des conseils du sportif (avocats, experts).

En revanche, dans le cade d'une enquête pénale, aucune des investigations sollicitées par le mis en examen ne lui sont facturées, lequel peut par ailleurs bénéficier gratuitement de l'assistance d'un avocat commis d'office, ce qui n'est pas le cas dans le cadre d'une procédure disciplinaire.

- Absence de possibilité du sursis pour le sportif :

En droit pénal, le principe d'individualisation de la peine permet notamment aux juridictions d'appliquer des peines assorties d'un sursis, de préférence à des peines

RETOUR AU SOMMAIRE

« fermes », le sursis étant d'ailleurs la règle puisque 75% des peines en sont assorties.
En droit disciplinaire – ou plus précisément dans le droit disciplinaire de la lutte antidopage, puisque les autres droits disciplinaires appliquent des peines avec sursis – le sportif se voit dénier le droit de bénéficier d'un sursis.
Il n'existe qu'un seul cas dans lequel le sportif convaincu de dopage peut bénéficier d'un sursis, celui dans lequel il apporte une « aide substantielle » à l'instance antidopage, c'est-à-dire trivialement en "balançant" d'autres sportifs dopés… (art. L. 232-23-3-2 et L. 230-4 du code du sport).
Le sportif victime d'une contamination, qui ne peut donc pas bénéficier d'un sursis, se voit ainsi moins bien traité qu'un sportif qui s'est volontairement dopé ou même qu'un criminel.
L'iniquité du droit disciplinaire est telle que, le sportif se voit aujourd'hui confronté à des paradoxes qui pourraient prêter à sourire, s'ils n'étaient pas réels.

3.2. LES PARADOXES DU SPORTIF

3.2.1.COUPABLE EN DROIT DISCIPLINAIRE ET VICTIME EN DROIT PÉNAL

Dans les cas de contamination, le sportif se trouve face au paradoxe d'être à la fois :
- coupable et sanctionné par le droit disciplinaire ;
- et victime et indemnisé par le droit pénal…
→
le sportif peut en effet agir comme victime, en poursuivant pénalement le fabricant du produit contaminé pour tromperie (art. L.441-1 du code de la consommation) ou mise en danger de la vie d'autrui (art. 223-1 du code pénal).

3.2.2. DE L'INTÉRÊT D'UTILISER LES PRODUITS DOPANTS EN SA POSSESSION

Volontairement choquante, la formule n'en est pas moins représentative du sort réservé au sportif.
Rappelons en effet que (i) la détention de produits dopants, qui constitue une infraction (art. L. 232-26 du code du sport) peut être sanctionnée disciplinairement et pénalement, alors que (ii) l'usage de produits dopants n'est puni que d'une sanction disciplinaire.
Le sportif qui détient des produits dopants sans en avoir fait l'usage risque ainsi d'être puni plus sévèrement que celui qui les a utilisés.

Morale immorale pour les sportifs : si vous faites l'acquisition de produits dopants, dépêchez-vous de les utiliser !

CONCLUSION

Alors qu'elle devrait faire l'unanimité en leur sein, la lutte antidopage, menée de façon inique par les instances antidopage, ne cesse de cristalliser les reproches des sportifs.
La situation est telle que, l'idée même de lutte antidopage trouve aujourd'hui ses détracteurs, ainsi qu'en atteste l'organisation en mai 2026 des premiers « Enhanced Games » (« Jeux améliorés ») à Las Vegas, auxquels participeront des sportifs qui utiliseront ouvertement et sciemment des substances interdites par les instances antidopage (le terme de dopage se voyant substituer celui d'amélioration), manifestation au sujet de laquelle le CIO (Comité International Olympique) est jusqu'à présent resté silencieux et sur laquelle peu de sportifs de renom se sont publiquement exprimés.
Si de telles extrémités doivent naturellement être combattues, elles ne doivent pas pour autant conduire à éluder certaines errances des instances antidopage, dont l'application d'un droit disciplinaire toujours plus strict et attentatoire aux libertés individuelles, errances qui conduiront immanquablement à une fronde d'envergure des sportifs qu'elles sont pourtant censées protéger…ainsi une présomption irréfragable de culpabilité pour le sportif.

Peu importe l'origine de la présence de la substance interdite dans l'organisme du sportif, comme dans les cas de contamination, cette seule présence suffit désormais à sanctionner le sportif, sans qu'il lui soit possible de se défendre ou de démontrer l'absence de dopage au sens littéral du terme.
Les instances antidopage agissent à leur guise et n'ont que faire des explications fournies par les sportifs, qui reposent pourtant le plus souvent sur des expertises scientifiques



Christophe AYELA, avocat associé STATS & ASSOCIÉS

PROCÉDURE CIVILE - EXPERTISE JUDICIAIRE - RÉFÉRÉS - PARIS LE 11 MAI 2026

Philippe Mammar avocat au barreau de Paris

Les expertises devant les juridictions de l'ordre judiciaire ordonnées en référé : les fondements des articles 145, 834, 835 du code de procédure civile (ci-après aussi CPC) et leurs équivalents commerciaux (art. 872, 873 et 873-1) : approche sur les clefs de la réussite de la mesure.

L'expertise judiciaire constitue un outil technique essentiel et utile aux parties dans de nombreux contentieux : construction, médicale, économique, informatique, financière, etc… dans les domaines civils, pénaux, administratifs…
Maîtriser son déroulement pour l'expert judicaire désigné quelle que soit sa spécialité constitue une condition de sa réussite pour que le juge du fond éventuellement saisi puisse ensuite trancher un contentieux au visa du rapport de l'expert ou même amener les parties opposées, en dehors la présence de l'expert qui n'a pas pour mission de les concilier, à dégager une solution amiable entre elles.

1. TROIS TEXTES, TROIS LOGIQUES POUR LE DEMANDEUR

Le droit positif français du référé offre aux parties et aux juges trois véhicules procéduraux pour solliciter et ordonner une expertise judiciaire. Chacun répond à une logique propre et à des conditions d'ouverture distinctes.
Les confondre expose à une irrecevabilité de la demande ; les articuler avec précision permet en revanche de construire une stratégie probatoire et conservatoire cohérente — valable tant devant le tribunal judiciaire que devant le tribunal de commerce, dont les textes 872, 873 et 873-1 sont le strict miroir des articles 834 et 835.
En pratique le visa simultané des trois textes aux conditions d'applications différentes est également possible.

1.1. L'ARTICLE 145 — LA MESURE D'INSTRUCTION « IN FUTURUM »

L'article 145 du CPC constitue le fondement exclusivement probatoire : il autorise « tout intéressé » à solliciter, avant tout procès au fond, les mesures d'instruction légalement admissibles, dès lors qu'il justifie d'un motif légitime de conserver ou d'établir la preuve de faits dont pourrait dépendre la solution d'un litige. La condition d'urgence est absente du texte — ce qui distingue radicalement ce fondement des deux suivants. La mesure peut être demandée devant le président du tribunal de commerce compétent lorsque le litige potentiel est de nature commerciale (art. 872 CPC, qui vise également ce fondement par renvoi).

La demande doit être introduite avant toute assignation au fond. Dans tous les cas, le respect du contradictoire est pleinement applicable dès la désignation de l'expert : les parties doivent être convoquées, entendues et mises en mesure de présenter leurs observations à chaque étape.

1.2) L'ARTICLE 834 CPC (= ARTICLE 872 DEVANT LE TRIBUNAL DE COMMERCE)

L'article 834 du CPC dispose qu'«en cas d'urgence, le président du tribunal judiciaire peut ordonner en référé toutes les mesures qui ne se heurtent à aucune contestation sérieuse ou que justifie l'existence d'un différend».

Devant le tribunal de commerce, l'article 872 du CPC reproduit à l'identique cette compétence au profit du président du tribunal de commerce. Les conditions d'ouverture sont rigoureusement les mêmes : la première étant l'urgence caractérisée et la seconde l'absence de contestation sérieuse ou l'existence d'un différend.

La finalité est ici conservatoire et provisoire : la mesure d'expertise vise moins à établir une preuve exhaustive qu'à permettre de procéder à des constations dans l'urgence avant par exemple que les preuves ne disparaissent. L'expert désigné doit conduire ses opérations contradictoirement en toutes circonstances (art. 160 du CPC). Les modalités pratiques — délai de convocation, nombre de réunions — seront nécessairement adaptées à l'urgence, mais aucune partie ne peut être privée du droit de faire valoir ses observations.

1.3) L'ARTICLE 835 DU CPC (= ARTICLES 873 ET 873-1 DEVANT LE TRIBUNAL DE COMMERCE)

L'article 835 du CPC comporte deux alinéas.
Son premier alinéa permet au juge de prescrire les mesures conservatoires ou de remise en état s'imposant pour prévenir un dommage imminent ou faire cesser un trouble manifestement illicite, même en présence d'une contestation sérieuse.
Son second alinéa permet d'allouer une provision ou d'ordonner l'exécution d'une obligation non sérieusement contestable.

Devant le tribunal de commerce, l'article 873 du CPC reproduit exactement l'article 835 alinéa 1er (dommage imminent / trouble manifestement illicite), tandis que l'article 873-1 du CPC couvre l'hypothèse de l'obligation non sérieusement contestable, équivalent du second alinéa de l'article 835. Le parallélisme est donc complet : les praticiens du contentieux commercial disposent des mêmes outils procéduraux que devant les juridictions civiles et l'expert désigné voit sa mission soumise aux mêmes exigences, au premier rang desquelles le respect absolu du contradictoire.

2. LE CONTRADICTOIRE : UN PRINCIPE D'ORDRE PUBLIC PROCÉDURAL SANS EXCEPTION QUI S'APPLIQUE A L'EXPERT COMME AU JUGE ET AUX PARTIES

Le principe du contradictoire est absolu en toute expertise judiciaire
L'article 160 du CPC dispose sans réserve que le technicien commis doit accomplir sa mission contradictoirement. Ce principe est d'ordre public procédural : il s'impose dans tous les cas d'expertise judiciaire, y compris ordonnée en référé d'urgence sur le fondement des articles 834, 835, 872, 873 ou 873-1 du CPC et même dans des domaines particuliers comme l'expertise médicale ou le secret médical emporte des contraintes et une méthodologie supplémentaire liée à l'accord du patient notamment. Ce qui peut varier selon l'urgence, ce sont aussi les modalités pratiques (délai de convocation plus court, convocation téléphonique documentée, réunion unique), jamais le principe lui-même.
Un rapport d'expertise rendu sans respecter le contradictoire encourt la nullité, quelle que soit la base légale de la désignation.

En cas d'irrégularité affectant les opérations d'expertise, la nullité est encourue si celui qui l'invoque apporte la preuve d'un grief (Cass. ch. mixte. 28-9-2012 n°11-11.381 PBRI ; Cass. 2ème civ. 29-11-2012 n° 11-10.805 FS-PB ; Cass. 2ème civ. 30-4-2014 n° 13-13.579 F-PB). Ce principe vaut pour les expertises judiciaires, mais également pour les expertises médicales techniques (Cass. 2ème civ. 23-1-2020 n° 19-10.584 F-PBI).

2.1. LE CONTRADICTOIRE DANS « L'EXPERTISE 145 »

Dans le cadre d'une expertise ordonnée sur le fondement de l'article 145 du CPC, le contradictoire s'exerce dans sa plénitude : convocations recommandées, réunions successives, échanges de dires, communication du pré-rapport, délai de réponse. L'expert qui méconnaît cette obligation expose son rapport à son annulation et sa responsabilité personnelle est susceptible d'être engagée

La jurisprudence sanctionne sévèrement les expertises conduites sans respecter l'égalité des armes entre les parties. Il est cependant rare qu'un rapport d'expertise soit annulé, les parties ayant la possibilité, en cours d'expertise de saisir le Juge Chargé du Contrôle des Expertises de toute difficulté rencontrée en cours d'expertise.

2.2. LE CONTRADICTOIRE DANS « LES EXPERTISES 834, 835 » ET LEURS ÉQUIVALENTS COMMERCIAUX

La confusion la plus répandue consiste à croire que l'urgence peut justifier de s'affranchir du contradictoire.

L'urgence peut moduler les modalités pratiques du contradictoire, non le principe lui-même :

- Modalités adaptables : délai de convocation réduit (48 heures peuvent suffire si les parties sont joignables), convocation par tout moyen laissant une trace écrite (téléphone documenté, courriel, SMS avec accusé), réunion unique si les circonstances l'imposent.

- Principe intangible : chaque partie doit avoir été mise en mesure de se faire représenter, d'observer, de soumettre ses remarques à l'expert avant que celui-ci ne rende son rapport. Aucun rapport ne peut valablement être déposé sans que toutes les parties aient eu cette possibilité.

- Sanction : un rapport rendu en violation du contradictoire est susceptible d'être écarté des débats par le juge, quelle que soit la base légale de la désignation (art. 145, 834, 835, 872, 873 ou 873-1 du CPC).

Dans la pratique il est sage pour l'expert d'accepter par principe d'accorder un délai à une partie qui le sollicite dès lors qu'une telle demande ne parait pas dilatoire et abusive même si un calendrier avait été annoncé.

3. LA MISSION DE L'EXPERT SELON LE FONDEMENT RETENU

3.1. « L'EXPERTISE 145 » : MISSION EXHAUSTIVE ET PROCÉDURE PLEINE

L'expertise ordonnée sur le fondement de l'article 145 du CPC offre à l'expert un cadre complet. Sa mission est généralement large : constater, analyser, donner un avis technique. Il dispose d'un délai souvent de six à dix-huit mois. Il conduit des réunions contradictoires, reçoit et répond aux dires des parties, communique un pré-rapport et/ou une note de synthèse répondant provisoirement aux chefs de missions ordonnés par la décision l'ayant désigné, puis dépose un rapport définitif, après avoir recueilli les dernières observations des parties. Les articles 232 à 284-1 du CPC s'appliquent dans leur intégralité.

Le financement repose sur une provision ad litem qui doit être consignée, sous peine de caducité de la mesure d'expertise, par le demandeur dans un délai fixé par l'ordonnance.
L'expert n'est pas tenu de débuter ses opérations en l'absence de consignation initiale. En cas de non-versement d'une consignation complémentaire ordonnée en cours d'expertise par le juge l'expert pourra solliciter l'autorisation de déposer son rapport « en l'état ». Cette procédure est identique devant le tribunal de commerce qui dispose également d'un juge Chargé du Contrôle des Expertises statuant sur les incidents pouvant survenir en cours d'expertise.

3.2. «LES EXPERTISES 834/835 ET 872/873/8731» : MISSION CIBLÉE ET TEMPO PLUS SERRÉ EN PRINCIPE

Lorsque l'expertise est ordonnée sur ces fondements, la temporalité change substantiellement. L'urgence impose une première intervention rapide, un rapport resserré et une mission limitée aux constats strictement nécessaires. L'expert ne conduit en principe pas une instruction contradictoire longue : il constate et photographie la réalité technique à un instant T.

Le rapport peut parfois ne comporter qu'une dizaine de pages. Mais - et c'est l'erreur à ne pas commettre - la brièveté du rapport ne dispense pas de la rigueur. Il n'est pas rare non plus que l'expertise ordonnée sur ces fondements s'étendent dans le temps au-delà des délais initiaux fixés par le juge pour la remise du rapport.
L'expert judicaire se verra dans l'obligation de solliciter une demande de prorogation du délai de dépôt de son rapport auprès de la juridiction qui l'aura désigné, laquelle lui sera accordée en principe sans difficulté sauf imprévu.

4. ARTICULATION DES FONDEMENTS : STRATÉGIE PROCÉDURALE

Les trois fondements textuels du code de procédure civile ne s'excluent pas, ils se complètent et il n'est pas rare que les 3 textes soient valablement visés lors de la demande en justice.

Phase 1 — une demande en « référé 835 » (ou 873 devant le tribunal de commerce) pour faire constater en urgence un trouble illicite ou un dommage imminent et obtenir une expertise conservatoire, conduite contradic-

toirement dans des délais resserrés ;

Phase 2 — une demande en « référé 145 » pour organiser une expertise approfondie, permettant d'établir les responsabilités et de chiffrer le préjudice en vue de l'assignation au fond ;

Phase 3 — le cas échéant, une demande en « référé 834 » (ou 872) pour obtenir des mesures provisoires (arrêt de chantier, séquestre) le temps que l'expertise 145 se déroule.

Dans tous les cas il convient de rappeler que l'ordonnance de référé ne tranche pas le litige au fond mais est exécutoire de plein droit immédiatement sur minute et avant enregistrement si le juge l'ordonne.

5. LES ACTIONS DE L'EXPERT POUR UNE EXPERTISE « RÉUSSIE »

La plupart du temps y compris pour des expertises comprenant un grand nombre d'avocats et de parties, l'expert judicaire sera légitime à mettre en œuvre les principes suivants qui lui permettront d'agir avec l'autorité technique mais aussi la sérénité que ses opérations exigent :

1. Avant d'accepter la mission, l'Expert devra :
- Vérifier son indépendance et l'absence de conflit d'intérêts ; refuser la mission en cas de doute sérieux.
- S'assurer de sa compétence technique dans la spécialité concernée et envisager l'assistance d'un sapiteur dans une autres spécialité.

2. Au début des opérations, l'Expert devra :
- Vérifier que la consignation ordonnée par le juge a été effectuée.
- Prendre contact avec les avocats pour organiser la première réunion.
- Lire et expliquer intégralement la mission donnée par le juge aux parties.
- Identifier clairement les participants (parties, avocats, assistants techniques) et écarter ou encadrer la présence de tiers.
- Estimer la durée et le cout de ses opérations notamment en fonction d'éventuelles mise en cause.
- Expliquer comment il souhaite organiser ses opérations en invitant les parties et leurs avocats à s'exprimer sur la méthode envisagée (par exemple en cas de nécessité d'intervenir sur des sites hautement sécurisés, …)

3. Pendant les opérations, l'Expert devra :
- Convoquer toutes les parties et leurs conseils à chaque réunion utile.
- Veiller à la communication contradictoire des pièces et observations ; renvoyer ou régulariser les envois non contradictoires.
- Répondre aux dires techniques, annexer les observations écrites à la demande des parties après communication à toutes.
- Respecter la courtoisie, la loyauté, l'égalité d'humeur, même en cas de tensions ces obligations reposant bien entendu aussi sur les parties et leurs avocats.
- Effectuer, si nécessaire, des investigations techniques hors la présence des parties, mais avec leur accord préalable en leur permettant d'en discuter la portée avant le rapport.

4. Au moment de conclure ses opérations, l'Expert devra :
- Impartir et Respecter les délais, ou solliciter une prorogation motivée.
- Tenir, si possible, une réunion de synthèse ou adresser un pré-rapport pour recueillir les dernières observations verbales et à défaut écrites.
- Rédiger un rapport clair, limité à la mission, sans appréciation juridique, en exposant les éléments utiles et en respectant le secret professionnel et en répondant aux dires des parties en applications de l'article 276 du code de procédure civile.

En cas de doutes ou de difficultés résultant des circonstances, par exemple si les parties forment des réclamations ou des demandes en visant le principe du contradictoire qui n'aurait pas été respecté, l'extension de sa mission à de nouvelles parties ou en termes d'investigations, l'expert a la possibilité, tout au long de l'expertise, d'interroger le Juge chargé du contrôle des expertises afin d'être guidé sur la marche à suivre, en application des articles 242, 243 et 245 du code de procédure civile. Il ne doit pas s'en priver.

6. CONCLUSION SUR L'EXPERTISE JUDICIAIRE « RÉUSSIE »

Les Articles 145, 834, 835 du Code de procédure civile et leurs miroirs commerciaux (872, 873, 873-1) forment un triptyque procédural cohérent au service de l'établissement ou de la conservation de la preuve, de la protec-

JUSTICE ET ORGANISATION

tion provisoire des droits, de la détermination de la cause et de l'origine technique d'un sinistre, de la définition des mesures de remise en état et de l'estimation des préjudices matériels, économiques, physiques selon la matière, dans le cadre des mesures d'expertise judiciaire qu'ils permettent d'organiser.
Leur maîtrise impose de distinguer rigoureusement leurs conditions d'ouverture.
Une constante se retrouve dans chaque mesure d'instruction et notamment dans l'expertise judiciaire : le respect du principe du contradictoire, ce d'autant plus que souvent l'expert a pour mission de « donner un avis sur les responsabilité encourues ». La charge de cet avis est lourde de conséquence

L'urgence, la matière commerciale, la brièveté de la mission ne constituent pas des dérogations - elles imposent seulement d'adapter les modalités pratiques sans jamais sacrifier la forme et le fond.

L'expert judicaire qui intègre cette réalité conduit des expertises solides, résistantes à la contestation et réellement utiles au juge, quelle que soit la juridiction par laquelle il est désigné ; en ce sens ses expertises judiciaires sont « réussies » même si leurs conclusions ne satisfont pas toutes les parties ce qui est le plus souvent le cas.



Philippe Mammar avocat au barreau de Paris

Références : art. 145, 160, 232 à 284-1, 834, 835, 872, 873, 873-1 CPC · Loi n° 71-498 du 29 juin 1971 relative aux experts judiciaires. « Recommandations sur les bons usages entre avocats et experts » du 6 mai 2022 conclue entre CNB (Le conseil national des barreaux) et CNCEJ (Le Conseil National des compagnies d'expert de justice)

FICHE TECHNIQUE D'ANALYSE

PRÉLÈVEMENT ET MESURE DANS L'AIR DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

Paolo BRUNO, expert judiciaire près de la cour d'appel de Versailles





Acronymes	HAP / HAP+ · HPLC-FLUO / HPLC-UV
Principe	Les HAP sont des contaminants organiques issus des **combustions incomplètes** (trafic, industrie, chauffage). Hydrophobes et stables, ils se répartissent entre une **fraction particulaire** (hautes masses moléculaires) et une **fraction gazeuse** (faibles masses moléculaires). La méthode d'analyse dans l'air repose sur un **prélèvement actif** de l'air par pompe à débit contrôlé, sur deux supports séquentiels : **un filtre en quartz** (fraction particulaire) suivi d'une **résine adsorbante XAD-2** (fraction gazeuse). Après désorption dans des solvants appropriés, les extraits sont séparés et quantifiés par **chromatographie liquide haute performance (HPLC)** avec détection UV et fluorimétrique.
Méthode	**INRS MetroPol 332** : évaluation des expositions professionnelles aux HAP en milieu de travail.
Composés ciblés	**16 HAP prioritaires** (dont naphtalène, benzo[a]pyrène, fluoranthène, chrysène, pyrène, …)
Exemples d'application	**Fabrication et pose d'enrobés bitumineux et matériaux goudronneux.** Lors de la fabrication, de la pose et du recyclage à chaud des enrobés, le chauffage des matériaux favorise l'émission des HAP. Certain matériaux goudronneux peuvent continuer à émettre des HAP légers (naphtalène) longtemps après l'application. Analyse du risque d'exposition professionnelle et d'exposition chronique sur le long terme. **Incendies et sinistres** La combustion incomplète de matériaux organiques libère des concentrations élevées de HAP dans l'atmosphère et dans les cendres et suies. Analyses dans le cadre d'expertise judiciaire et de sécurité civile pour évaluation des risques de réoccupation de locaux sinistrés. **Cokeries, fonderies, traitement du bois (créosote), industrie pétrochimique** Source majeures de HAP. Analyse du risque d'exposition professionnelle.

RETOUR AU SOMMAIRE

200 ANS ANNIVERSAIRE DU "ROI" DE LA THERMODYNAMIQUE SADI CARNOT

Mongi SALKY, Expert près la cour d'appel de Paris, membre du CA du CNEJC

L'explication de la relation entre la thermique et la mécanique, la science que nous connaissons aujourd'hui sous la dénomination de "la thermodynamique" a été publiée par l'ingénieur militaire Sadi Carnot, il y a exactement 200 ans.

En 1796, dans une période troublée de l'histoire de France, Lazare Carn est un ingénieur militaire qui a adhéré à la Révolution française. Il parvient à la Législature en 1791, puis au Comité de Salut Public en 1792, pour devenir l'un des cinq directeurs fondateurs du comité de direction. Il est ensuite le premier à être nommé par Napoléon Ier, à l'âge de 26 ans, comme chef de l'Armée d'Italie.

Sadi Carnot, fils de Lazare Carnot, est né le 1er juin 1796 au Palais du Luxembourg à Paris où son père avait des appartements.
Son père a été exilé pendant quelques années puis Napoléon le fit revenir en France et le nomma ministre de la Guerre en avril 1800. C'est ainsi que le jeune Sadi Carnot entre en contact avec Napoléon et son entourage. On raconte qu'il n'avait que quatre ans lorsqu'il accompagna son père à une réunion au Château de Malmaison, à 16 kilomètres à l'ouest de Paris, pour la première fois.
Pendant ces réunions, Sadi était pris en charge par Joséphine de Beauharnais, l'épouse de Napoléon.
Lors d'une autre visite au Château de la Malmaison, Sadi Carnot a disparu et fut finalement retrouvé dans un moulin à eau, interrogeant le meunier sur le fonctionnement du mécanisme.

Cet intérêt pour la mécanique et la physique l'a conduit à suivre des cours particuliers au lycée Charlemagne à Paris avant de s'inscrire à l'École Polytechnique en 1812.
L'École Polytechnique, fondée par le mathématicien Gaspard Monge avec le soutien de Lazare Carnot, est transformée en académie militaire en 1804 sur ordre de Napoléon pour développer les compétences techniques des officiers de l'armée française.
Sadi Carnot y est élève pendant deux ans, excellent dans les études militaires et géométriques, sa formation est perturbée par diverses campagnes militaires dans le pays et à l'étranger.

Après la restauration de la monarchie sous Louis XVIII en mai 1814, les étudiants de l'École Polytechnique furent mobilisés pour défendre le Château de Vincennes assiégé par les royalistes, sous le commandement du général Pierre Daumesnil.
Le lieutenant Sadi Carnot, âgé de 18 ans, fut enrôlé dans le corps des ingénieurs de l'armée napoléonienne au début de 1815, mais après la défaite française, son père Lazare Carnot tomba à nouveau en disgrâce et fut envoyé en exil. Son exil se prolongea jusqu'à son décès en 1823 à Magdebourg, en Allemagne. Auparavant il s'était réfugié à Varsovie, en Pologne.
Joséphine de Beauharnais a encouragé son père à orienter Sadi Carnot vers une carrière scientifique. Néanmoins la carrière de soldat-ingénieur de Sadi s'enlise dans un premier temps. Il enchaîne les postes sans évolution, réparant des murs et dessinant des plans d'ouvrages qui ne seront jamais exécutés.

En 1819, il est muté à l'État-Major à Paris, ce qui lui

RETOUR AU SOMMAIRE

permet de reprendre ses études scientifiques. Il se lie alors d'amitié avec deux chimistes, Nicolas Clément et Charles-Bernard Delorme, tous deux plus âgés que Carnot d'une vingtaine d'années.
Ils travaillent alors sur une méthode permettant de déterminer le rapport des chaleurs spécifiques Cp/Cv, appelé indice adiabatique ou cœfficient de Laplace. L'expérience Clément-Delorme est approximative avec une erreur de 4% par rapport à la valeur réelle.
Ensemble, ils étudient plusieurs phénomènes chimiques, dont le monoxyde de carbone, l'acide sulfurique et l'iode. Clément est également responsable de définir la calorie comme unité de chaleur et avait travaillé sur la valeur calorifique du charbon, l'équivalent mécanique de la chaleur, l'application de la puissance de la vapeur dans les moteurs et l'estimation du zéro absolu.

En 1824, après cinq années d'études auprès de Nicolas Clément et Charles-Bernard Delorme, Sadi Carnot publie un volume décrivant ses pensées sur les principes qu'il a conçus.

Il s'agit de réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines associées au développement de cette puissance. C'est une réflexion profonde sur la conversion de la chaleur en une force mécanique.
Mais Sadi Carnot n'arrive pas véritablement à exprimer ses idées par manque de vocabulaire pour décrire les phénomènes physiques et le principe de fonctionnement de cette machine.
Plutôt que d'analyser les machines les plus performantes de l'époque, il envisage une machine idéale, fonctionnant à travers des différences de température infinitésimales et entièrement hypothétique. Il développe ensuite ses idées et en conclut que les machines à vapeur sont vouées à être inefficaces car elles fonctionnent entre des températures d'environ 160°C pour la source chaude et 40°C pour la source froide. Sadi Carnot omet de dire que le charbon fournissant la chaleur brûle à plus de 1000°C et donc que la majeure partie de de la chaleur, lors de la chute de températures est improductive. Cela l'amène à conclure que les machines à vapeur à haute pression sont nécessaires mais nécessitent trois ou quatre étapes de détente pour améliorer leur efficacité.
Pour parvenir à ces conclusions, il cite de nombreuses publications scientifiques françaises, anglaises et allemandes montrant qu'il connaissait parfaitement la littérature scientifique, y compris des articles récents de Humphrey Davy, Michael Faraday et John Dalton en Angleterre ainsi que de Gay-Lussac, Clément et Delorme, entre autres en France.

Sir William Thomson a présenté une critique des Réflexions de Carnot à la Royal Society d'Édimbourg en 1849. Il avait passé un an à étudier avec Regnault à Paris après avoir obtenu son diplôme de l'Université de Cambridge, l'aidant dans ses expériences sur les propriétés des gaz et avait noté que cela fournissait les données empiriques qui manquaient à Sadi Carnot. Thomson a écrit : « M. Regnault m'informe qu'il est en train de terminer certaines recherches, grâce auxquelles nous pouvons espérer, peut-être avant la fin de cette année, obtenir toutes les données pour cinq ou six liquides différents dont nous (ne) disposons actuellement que celles pour l'eau. Il faut donc espérer que, sous peu, un test très important de la validité de la théorie de Carnot sera fourni. »

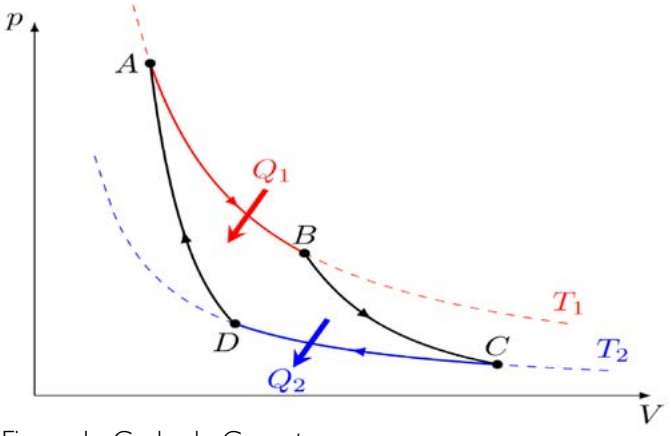


Figure 1 : Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot comprend la réduction de volume à température constante (chaleur retirée), la réduction de volume sans retrait de chaleur, l'augmentation de volume à température constante (chaleur ajoutée) et l'augmentation de volume sans ajout de chaleur. Un apport de travail est nécessaire pour réduire le volume, et du travail est extrait lorsque le volume est augmenté.

Le cycle de Stirling comprend la réduction de volume à température constante (chaleur retirée), l'augmentation de température à volume constant (chaleur ajoutée), l'augmentation de volume à température constante (chaleur ajoutée) et la réduction de température à volume constant (chaleur retirée).

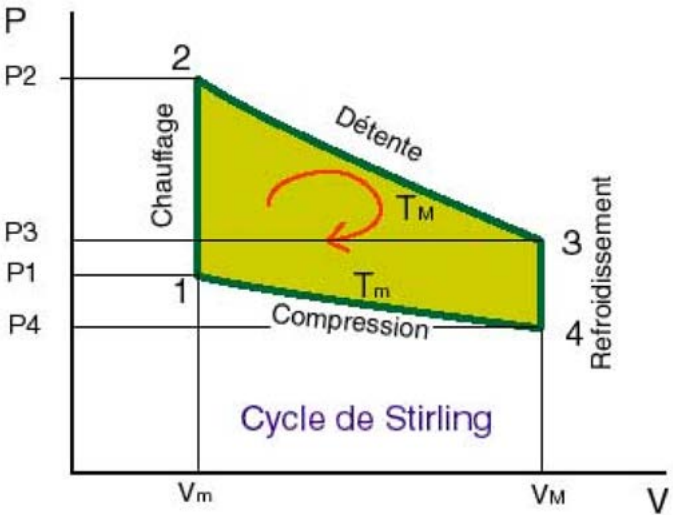


Figure 2 : Cycle de Stirling

Le cycle de Brayton idéal est le cycle théorique correspondant au fonctionnement d'une turbine à gaz élémentaire, principalement utilisée pour la production d'électricité. Il en existe deux types selon que le cycle est ouvert ou fermé :
- dans un cycle fermé, le gaz reste à l'intérieur du moteur. La chaleur est apportée par un échangeur de chaleur ou par une combustion externe, et expulsée via un échangeur de chaleur ;
- dans un cycle ouvert, l'air est aspiré, passe par trois étapes du cycle puis est expulsé dans l'atmosphère. Les cycles ouverts permettent une combustion interne. La description ci-dessous est celle d'un cycle ouvert, effectivement employé dans les
centrales électriques à turbines gaz-vapeur.

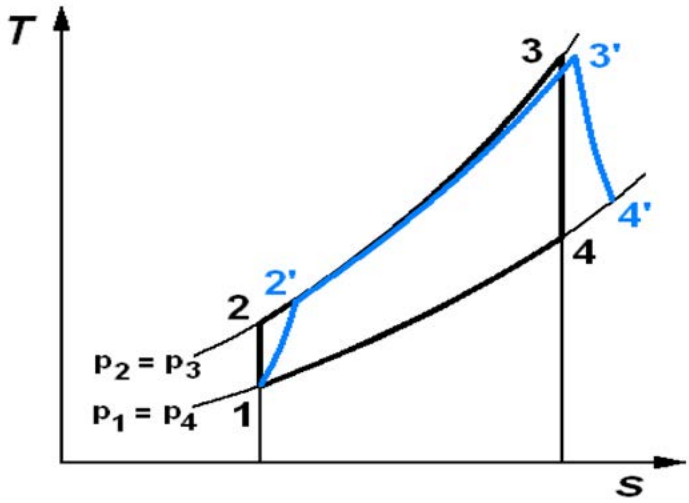


Figure 3 : Diagramme température-entropie du cycle de Brayton idéal (en noir) et réel (en bleu).

Les cycles de Carnot et de Stirling ont le même rapport de conversion idéal, connu sous le nom de rendement de Carnot et exprimé n=1-Tf/Tc, où Tf (la source froide) et Tc (la source chaude) pour un moteur thermique de production d'énergie. Carnot connaissait le cycle de Stirling, que Sir William Thomson décrivait comme « le magnifique moteur inventé par Galton », mais il n'avait aucun détail, disant seulement : « On dit que des tests réussis ont été effectués très récemment en Angleterre sur le développement de la force motrice par l'action de la chaleur sur l'air atmosphérique Nous n'avons aucune idée en quoi consistaient ces tests, s'ils sont effectivement réels ». Cela n'est pas surprenant car le brevet de Stirling est daté de 1820, et il travaillait dans le comté d'Ayrshire, au sud-ouest de l'Écosse.

En plus de ses études scientifiques et d'ingénierie à partir de l'âge de 22 ans, Sadi Carnot était un grand lecteur et un grand amateur de sports physiques. Il était également un musicien accompli, jouant du piano et du violon. On peut se faire une idée de son caractère en lisant les aphorismes qu'il a notés dans ses carnets, qui donnent l'impression d'un homme modeste, peu enclin à occuper le devant de la scène mais heureux de partager une blague avec ses amis.

Sadi Carnot tomba malade d'une pneumonie et de la scarlatine. Cette maladie dura plus d'un mois, dont douze jours au lit sans sommeil ni nourriture, et le laissa faible. Fin juillet, il sentit ses forces revenir progressivement, mais quelques semaines plus tard, toujours faible, il contracta le choléra et mourut le 24 août 1832 à 36 ans.

Les multiples facettes de Sadi-Citations de ses carnets personnels

SADI LE SOLDAT
« À chaque conquérant peut-on dire, quand il a cessé de tourmenter notre pauvre globe : "N'aurais-tu pas pu te battre aussi bien contre un petit globe de carton ? " »
« Les lois de la guerre, dit-on ? Comme si la guerre n'était pas la destruction de toutes les lois. »

SADI LE PHILOSOPHE
« Ne te tourne jamais vers le passé, si ce n'est pour éclairer l'avenir. »
« Parle peu de ce que tu sais, et pas du tout de ce que tu ne sais pas. »
« Pourquoi ne dis-tu pas plus souvent je ne sais pas ? »

SADI L'HOMME POLITIQUE
« Ne dirigez jamais un argument contre qui que ce soit. Si vous connaissez des détails contre votre adversaire, vous avez le droit de le lui faire connaître pour le garder sous contrôle, mais procédez avec discrétion et ne le blessez pas devant les autres. »
« Quand la discussion dégénère en dispute, taisez-vous ; ce n'est pas se déclarer vaincu. »

SADI L'ÉCONOMISTE
« Toutes les modifications d'impôts doivent, en général, être faites graduellement, afin d'éviter des changements brusques de fortune. »
« Selon le système des économistes modernes, il serait souhaitable que le gouvernement intervienne le moins possible dans le commerce et l'industrie du pays. Néanmoins, nous ne pouvons nier que dans certaines circonstances cette intervention soit très utile. »

SADI L'AMI
« Pourquoi essayer d'être spirituel ? Je préfère passer pour stupide et modeste que spirituel et prétentieux. Abstenez-vous de toute plaisanterie qui pourrait blesser. »

SADI LE SPORTIF
« Varier les exercices mentaux et corporels avec la danse, l'équitation, la natation. L'escrime à l'épée et au sabre. Le tir au fusil et au pistolet, le patinage. La fronde, les échasses, le tennis, la pétanque, sauter à cloche-pied, croiser les bras, sauter haut et pour tourner sur un pied appuyé contre le mur faire de l'exercice en chemise le soir pour se lever une transpiration avant d'aller se coucher, tourner la menuiserie, le jardinage, lire en marchant la déclamation, le chant, le violon, la versification, la composition musicale, huit heures de sommeil. Une marche au réveil, avant et après le repas, une grande sobriété, manger lentement peu et souvent, éviter l'oisiveté »



Mongi SAKLY

LES ÉLASTOMÈRES DANS L'ART CONTEMPORAIN

Maxime Genestoux, Expert Chime Matériaux - Elanova
Expert près la cour d'appel de Paris, membre du CA du CNEJC
Lucille Royan, Conservatrice-restauratrice - MNAM Centre Pompidou

Les collections « arts plastiques » et « design » du Musée National D'Art Moderne (MNAM- Centre Pompidou) comprennent une certaine quantité d'œuvres principalement composées, ou contenant, divers élastomères. Ces œuvres, bien que souvent relativement récentes, et qui continuent très régulièrement à entrer dans les collections, présentent des signes prématurés de dégradation parfois très avancés et devraient être conservées dans les meilleures conditions afin de préserver leur intégrité physique aussi longtemps que possible et éviter la perte irrémédiable de leur matérialité. De plus, les solutions de traitements de conservation-restauration font souvent défaut et les œuvres sont laissées en attente en l'absence de connaissance précise des matériaux et de leurs mécanismes de vieillissement.
Un projet de recherche a été initié entre le Musée National d'Arts Moderne (MNAM-Centre Pompidou) et la Bibliothèque Nationale de France afin de mieux les identifier, les traiter et, in fine, les conserver. La première étape du projet est dédiée à l'identification des caoutchoucs de la collection, la seconde à la caractérisation des dégradations et au traitement des objets et la troisième à la conservation préventive de la collection de caoutchoucs.

Dans le cadre de ce projet, Elanova, Laboratoire des Caoutchoucs et Polymères a mis à profit son savoir-faire en matière d'analyses et de fabrication des caoutchoucs.

Une première étape vise à identifier la formulation complète des élastomères composant les œuvres. La compréhension du mécanisme d'altération vient également compléter cet état des lieux des œuvres choisies pour leur état avancé de dégradation. Une fois cette première étape de déformulation réalisée à partir de quelques milligrammes de matière, la seconde étape consiste à reformuler une matière similaire pour obtenir une pièce modèle. Ceci passe par une étape de mélangeage puis de vulcanisation du mélange pour in fine obtenir un caoutchouc sous forme de plaques ou produits finis.
Ces échantillons sont alors vieillis artificiellement pour atteindre un état de dégradation proche de l'état réel de vieillissement.

La troisième étape de ce projet, réalisée par les restauratrices du Mnam consiste alors à partir de ce modèle vieilli, à déterminer les solutions de traitement curatif et préventif afin de préserver le plus longtemps possible l'intégrité de ces œuvres.



Serra Richard *Plinths*,1967

Fibres de verre, caoutchouc, néon bleu, transformateur et câbles électriques.



RETOUR AU SOMMAIRE

Les élastomères, souvent dénommés « caoutchoucs », représentent une grande famille de matériaux polymères naturels ou synthétiques et sont utilisés dans un grand nombre d'applications. L'ajustement de leurs propriétés d'usage nécessite une bonne connaissance de leur composition chimique, de leur morphologie aux échelles macromoléculaires et microstructurales, de leur procédé d'élaboration et de leurs propriétés physico-chimiques.

LA FORMULATION DES ÉLASTOMÈRES

ROLE DE L'ADDITIF	ELASTOMÈRES(S) 100 pce	DIFFÉRENTS TYPES D'ADDITIFS
Réseau tridimensionnel élastique	SYSTEME DE VULCANISATION 5-10 pce	Soufre, peroxyde, accélérateurs, oxydes métalliques
Renforcement et/ou Dilution	CHARGE(S) 0-100pce	Noir de cabone, silice, kaolin, craie
Mise en œuvre, Tenue à froid, Tg	PLASTIFIANT(S) 0-30 pce	Huile pétrolières, phtalates
Protection veillissement, chaleur, uv, ozone	STABILISANT(S) 1 pce	Antioxydants aminés ou phénoliques
Tenue au feu, mousse, mise en œuvre, adhésion, couleur	INGREDIENTS DIVERS	Agents : ignufugeant, gonflant, de mise en œuvre, d'adhésion, pigment, ...

Figure 1 : Composition d'un mélange élastomère

La formulation s'impose dans la mesure où les matrices élastomères, même vulcanisées, ne possèdent pas les propriétés nécessaires pour des applications industrielles.

Il est donc nécessaire d'ajouter aux élastomères de nombreux ingrédients ayant chacun un rôle bien défini ; dans une formule élastomère, la quantité des ingrédients (et additifs) est introduite en pce (en parts pour cent en poids d'élastomère).

Les pièces en élastomère sont constituées d'un mélange de différents ingrédients dont l'élément principal est l'élastomère ou un coupage de 2 ou 3 élastomères.

Le choix de l'élastomère va se faire en fonction des limites de température, des sollicitations mécaniques et dynamiques, de l'environnement O2, O3, UV et du prix.
Les propriétés d'utilisation et vieillissement du mélange final vont dépendre de la nature chimique des différents ingrédients de cette formulation.

L'ANALYSE DE LA FORMULATION : LA DÉFORMULATION

Les élastomères vulcanisés sont obtenus sur la base d'un mélange d'ingrédients intervenant à des taux pondéraux et volumiques différents ; La déformulation du mélange nécessite donc la détermination de la composition pondérale du mélange et de la nature chimique des principaux ingrédients (élastomères, plastifiants, charges et additifs). L'ensemble de cette démarche appelée « déformulation » nécessite diverses techniques d'analyses qui sont résumées sur la figure suivante :

RETOUR AU SOMMAIRE

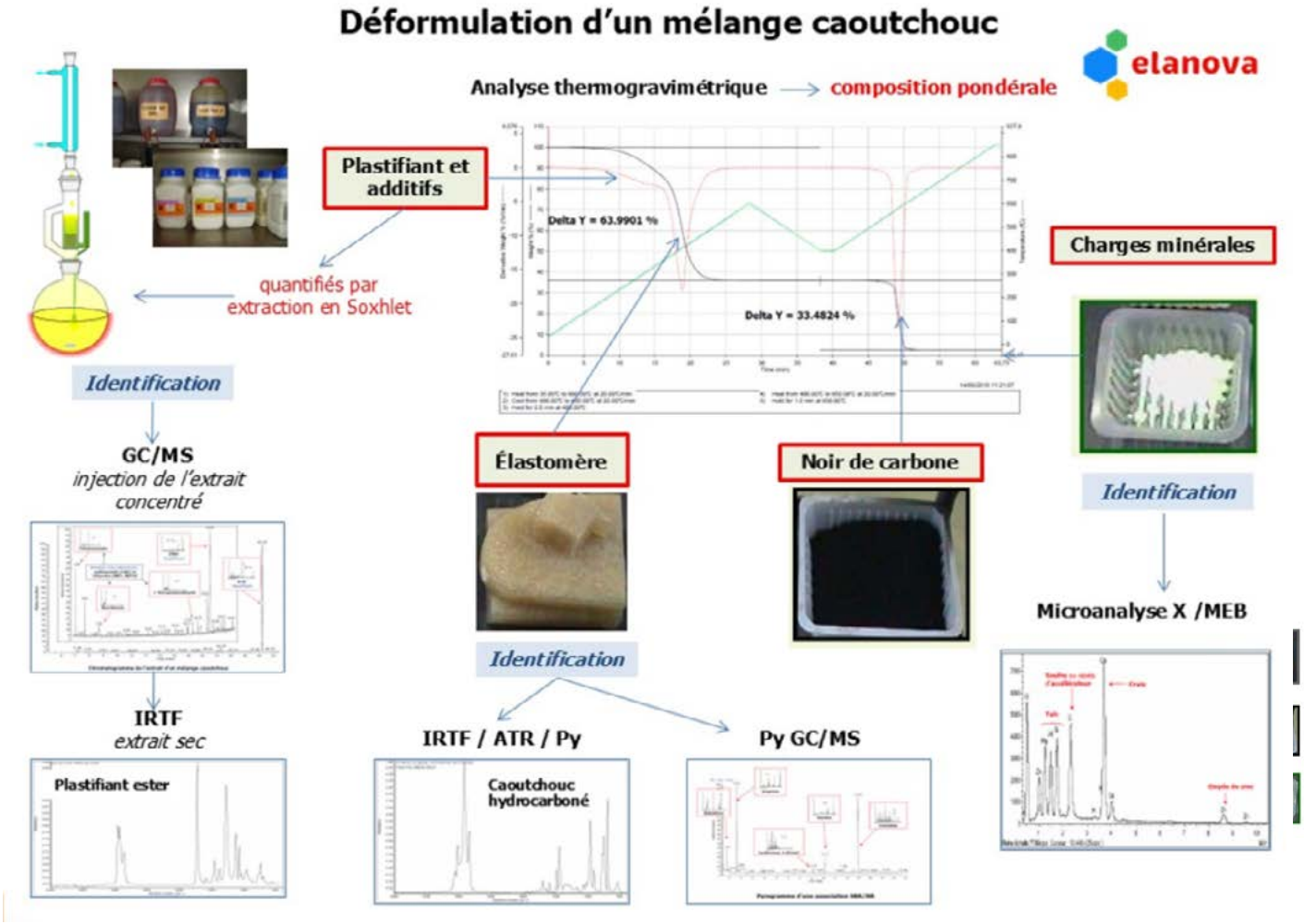


Figure 2 : Schéma d'une déformulation

La première étape de la déformulation nécessite la détermination de la composition pondérale de la formulation : L'analyse de la composition pondérale consiste à évaluer la part massique du maximum d'ingrédients de la formulation. Pour cela, on distingue les ingrédients qui ont une interaction forte avec le polymère de ceux qui sont plus facilement extractibles.
La première étape démarre par une extraction en plaçant un échantillon de caoutchouc dans un extracteur de type soxhlet. L'extraction au soxhlet permet à l'aide d'un solvant bien choisi d'extraire l'ensemble des plastifiants et additifs de la formulation.
Après l'extraction, le solvant de la phase soluble est éliminé par passage à l'évaporateur rotatif, le résidu est séché et l'on peut déterminer ainsi le taux d'extrait (additifs) de la formulation.

La deuxième étape consiste à évaluer le taux de polymère, des charges organiques (noir de carbone s'il y a lieu) et la part de charges minérales. On réalise pour cela une analyse thermogravimétrique (ATG) sur l'échantillon de caoutchouc extrait.
Cette analyse est utilisée dans ce cadre pour mesurer la perte de masse en fonction de la température sous des atmosphères différentes permettant de distinguer la part de matière oxydable, de la matière pyrolysable.
La troisième étape de la déformulation permet de déterminer la nature chimique des différents ingrédients.

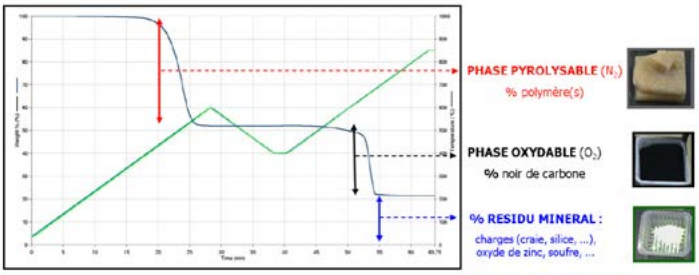


Figure 3: Thermogramme d'un échantillon de caoutchouc

La nature du polymère de base est déterminée par spectrométrie infrarouge ou par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse.
L'ensemble des analyses par spectrométrie de masse des pics chromatographiques permet, à partir de l'identification des composés de dégradation, de déterminer la nature des élastomères comme cela est présenté dans la norme NF ISO 1725

Composés identifiés	Attributions
1,3 Butadiène	Copolymère butadiène-nitrile acrylique **(NBR)**
2-Propènenitrile	
Cyclohexène 4-éthènyl	
1,3-Butadiène	Copolymère butadiène- Styrene **(SBR)**
Cyclohexène 4-éthènyl	
Styrène	
1,3 Butadiène	Caoutchouc Polybutadiène **(BR)**
Cyclohexène 4-éthènyl	
Isoprène	Caoutchouc naturel et/ou isoprene synthetique **(NR/IR)**
Limonène	
Acide chlorhydrique	Caoutchouc chloroprene **(CR)**
2-Chloro-1,3-butadiène	
1-Chloro-5-(1-chloroéthényl)-cyclohexène	
1-Chloro-4-(1-chloroéthényl)-cyclohexène	
Propene	Ter polymère d'éthylène – propylène – diène **(EPDM)** ou copolymère éthylène – propylène **(EPM)**
1-hexene	
1-heptene	
2-methyl-1,3,5-hexatriene	
2-methyl-1-heptene	

Tableau 1 : Exemples d'attributions selon la norme ISO 17257

Pour déterminer la nature chimique des additifs, deux analyses complémentaires peuvent être réalisées: l'analyse de l'extraction chimique et l'analyse de l'extrait thermique.

EXTRACTION CHIMIQUE

Les extraits obtenus au soxhlet sont concentrés puis analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS).

EXTRACTION THERMIQUE

L'échantillon est directement analysé par pyrolyse GC/MS à une température inférieure à la température de dégradation du polymère. Les composés sont alors thermodésorbés puis analysés en chromatographie et identifiés en spectrométrie de masse. Cette technique est préconisée dans le cas d'une faible quantité de matière comme c'est le cas lors des prélèvements sur les œuvres d'art.

Le résidu minéral obtenu à l'issu de l'analyse thermogravimétrique est analysé par microanalyse électronique (EDX) comme le montre le spectre suivant. La nature des charges peut alors être déduite (tableau 10)
La spectrométrie infrarouge permet également l'identification des principales charges minérales des caoutchoucs.

Les éléments détectés sont recensés dans le tableau ci-après.

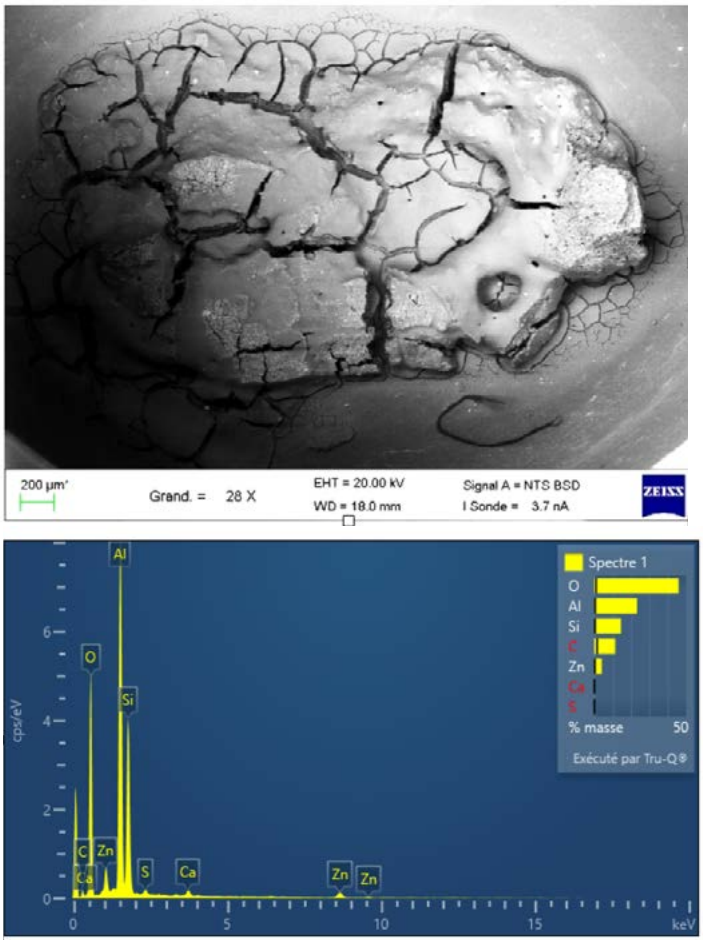


Figure 4 :Vues des cendres et analyse EDX du prélèvement

Élément détecté	Echantillon prélevé (29,5 %)	Identification
Al (Aluminium)	**xx**	**Kaolin** (silicate d'aluminium)
Si (Silicium)	**xx**	
S (Soufre)	**Traces**	Soufre
Ca (Calcium)	**Traces**	Craie
Zn (Zinc)	**x**	Oxyde de zinc (**ZnO**)

Tableau 2 : EDX des cendres

L'ensemble des analyses réalisées sur le prélèvement permet ainsi d'établir la composition en l'état du matériau constitutif de l'œuvre comme le résume le tableau suivant :

			Echantillon prélevé sur œuvre
COMPOSITION DU MÉLANGE	**Élastomère**	Pourcentage	61,9 % ± 0,3 %
		Nature	**NR/IR**
	Plastifiants et matières extractibles	Pourcentage	8,6 % ± 0,3 %
		Activateur de vulcanisation :	Acide stéarique
		Protecteur :	Antioxydant **BHT**
		Accélérateur :	Accélérateur thiazolé
		Plastifiant :	Huile minérale
		Retardateur :	Inhibiteur pré-vulcanisation N-cyclohexyl (thio)phtalimide
	Résidu minéral	Pourcentage	29,5 % ± 0,3 %
		Charge(s) minérale(s) (et/ou supports pour agent de réticulation)	**Kaolin** Craie
		Système de réticulation	**ZnO** Soufre

Tableau 3 : Récapitulatif de la composition du mélange

Une nouvelle pièce est alors formulée sur cette base et vieillie artificiellement afin d'atteindre un état de dégradation similaire à l'œuvre. Le travail des restauratrices commence alors sur ce factice avant la restauration finale de l'œuvre et sa remise en exposition.

Si vous êtes intéressés à publier un article technico-scientifique ou en rapport avec la rubrique Justice et Réglementation, n'hésitez pas à le transmettre aux membres du comité de rédaction (adresse mails en première page).

PROCHAIN NUMÉRO À PARAÎTRE JANVIER 2027