

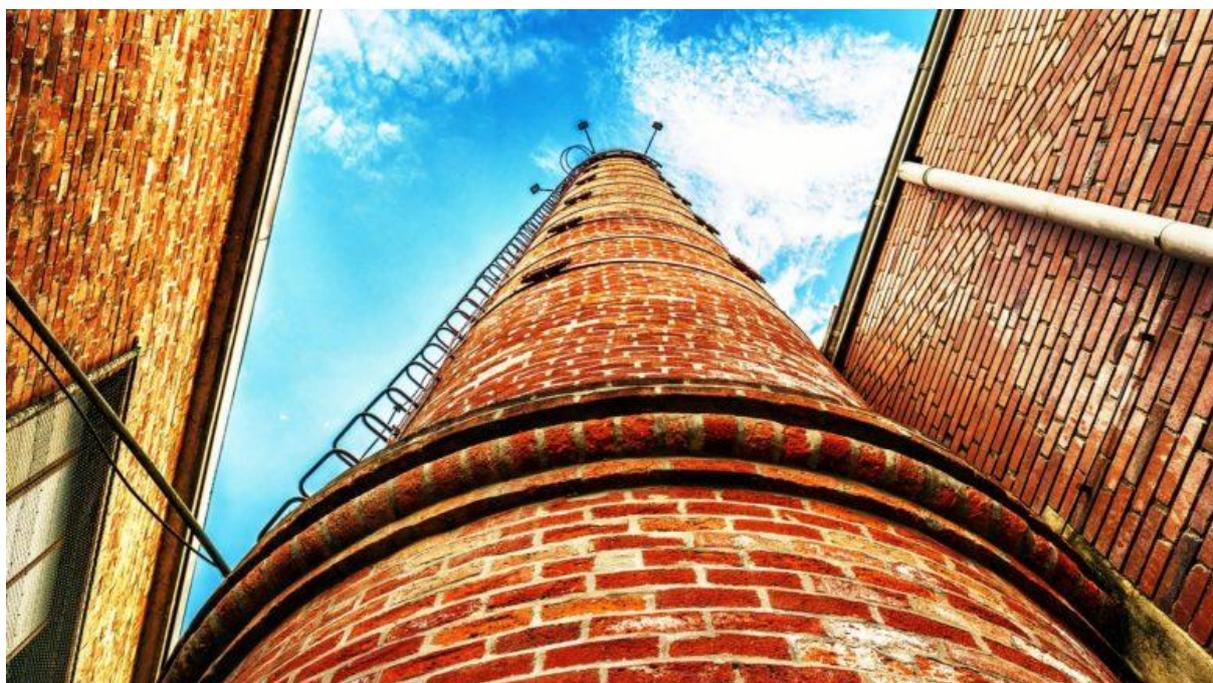
Lettre d'information du lerm n° 39 :

Cheminées d'usines - Marques de fabriques

Posted on 13 juin 2019



N° 39, juin 2019



Editorial

Dessine-moi une usine...



... sa toiture et ... sa cheminée bien sûr !

Sous quelque facette qu'elle se livre, en activité, en friche ou inscrite au patrimoine, la cheminée d'usine symbolise l'ensemble de nos préoccupations contemporaines vis-à-vis du développement responsable et du cycle de vie des structures : concevoir, maintenir, conserver, démolir, se réapproprier, détourner, reconvertir, valoriser ?

Considérations environnementales qui surgissent avec sa construction (sa marque dans le paysage), de par sa fonction même (refoulement de fumées issues d'un process de transformation industrielle), puis lors des questions de son entretien, de sa réhabilitation, de sa conservation au titre des Monuments historiques ou de sa démolition...

Anciennes ou modernes, les cheminées industrielles ne manquent pas de nous stupéfier par la prouesse technique que représente leur élancement et aussi de nous interroger. Elles ont ceci de spécifique qu'elles ne suscitent pas uniquement l'intérêt des gestionnaires du secteur industriel mais également celui du domaine public et même celui de particuliers propriétaires privés.

Alors quelles sont-elles, de quelles pathologies peuvent-elles souffrir, comment les ausculter et effectuer leur maintenance ?...

Laissons-nous cheminer ...

Bernard Quénée, directeur général délégué
Patricia Geretto, rédactrice en chef

Dossiers techniques



[Construis-moi une cheminée](#)

Entretien avec Jean-Bernard Datry, Setec TPI

Dans la conception d'une cheminée, la plus grande difficulté vient du calcul au vent. Outre bien sûr, la stabilité et la turbulence, le phénomène auquel on cherche à échapper, est surtout l'échappement tourbillonnaire...



Inspection en vol et diagnostic au sol

Entretien avec Thibault Chatillon, Setec Capture et Yann Bagbonon, Diadès Vitrolles

Le drone permet aujourd'hui la vue déportée des structures qui était auparavant effectuée soit par des cordistes soit depuis des nacelles élévatrices, tout en offrant des rendus bien plus riches d'informations qu'auparavant.

Des pathologies se manifestent plus particulièrement sur certaines zones de la cheminée...



Sous les radars : l'auscultation

La réflectométrie par radar (radar géophysique) est une méthode d'investigation non destructive à haut rendement, légère, qui permet la reconnaissance interne des structures (géométrie) et la détection d'anomalies pouvant les affecter...



"Une culture de la cheminée" : la maintenance

Entretien avec Pascal Hiriart, MCC2I

La cheminée, c'est l'aval du processus industriel, le bout de la chaîne, et on pourrait avoir tendance à y porter moins d'attention qu'au processus qui se déroule en amont. Or, les cheminées sont aussi un sujet de maintenance, comme le reste des installations...



Sous emprises phénoménales : les désordres

Les matériaux qui composent la cheminée industrielle peuvent être, comme dans toute autre structure bâtie, sous l'emprise de phénomènes de vieillissement, d'usure et d'agressions...

	<p><u>Patrimoniale, monumentale, ornementale</u></p> <p>La cheminée symbole de l'usine s'expose au sein du patrimoine industriel, comme le témoignage d'une activité industrielle dont on cherche à perpétuer le souvenir et comme élément architectural ornemental, vecteur de valorisation d'un bâti...</p>		
	<p><u>Fin de vie : En consultation environnementale</u></p> <p>Opter pour une stratégie de déconstruction qui cible un optimum technico-économique passe par l'analyse et la bonne compréhension des matériaux constitutifs des cheminées afin d'évaluer leur potentiel, minimiser le coût de leur élimination et optimiser leur valorisation...</p>		
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Fumiste</p> <p>Ouvrier qui installe, entretient, répare des appareils de chauffage, des conduits de fumée ou de cheminée (<i>Dictionnaire de l'Académie française</i>)</p> </td> <td style="text-align: center; width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Fumisterie</p> <p>Métier, travail de fumiste (<i>Dictionnaire de l'Académie française</i>)</p> </td> </tr> </table>		<p>Fumiste</p> <p>Ouvrier qui installe, entretient, répare des appareils de chauffage, des conduits de fumée ou de cheminée (<i>Dictionnaire de l'Académie française</i>)</p>	<p>Fumisterie</p> <p>Métier, travail de fumiste (<i>Dictionnaire de l'Académie française</i>)</p>
<p>Fumiste</p> <p>Ouvrier qui installe, entretient, répare des appareils de chauffage, des conduits de fumée ou de cheminée (<i>Dictionnaire de l'Académie française</i>)</p>	<p>Fumisterie</p> <p>Métier, travail de fumiste (<i>Dictionnaire de l'Académie française</i>)</p>		
<p style="text-align: center;">D'où vient l'usage du terme fumisterie au sens de farce ou mystification ?</p>			
<p>« <i>C'est une farce de fumiste</i> », répète un personnage de fumiste d'une comédie-vaudeville après chacune de ses plaisanteries.</p>		<p>Les frères Goncourt emploient le terme de <i>fumisterie</i> pour désigner ce que l'on ne peut prendre au sérieux.</p>	

LERM-Infos



Directeur de la publication : *Bernard Quénée*



Rédactrice en chef : *Patricia Geretto*

Avec nos remerciements les plus chaleureux pour leur contribution experte à Alexa Bresson, Jean-Luc Garciaz, Noureddine Rafai, Isabelle Moulin.

Construis-moi une cheminée

Entretien avec Jean-Bernard Datry, Directeur en charge des ouvrages d'art, ouvrages industriels et bâtiments, Setec TPI



©Anne Claude Barbier pour setec tpi

Bonjour Monsieur Datry, vous êtes directeur en charge des ouvrages d'art, ouvrages industriels et bâtiments à Setec TPI, et nous souhaitons recueillir votre témoignage sur les cheminées industrielles.

Tout d'abord, pouvez-vous nous dire s'il existe un référentiel de conception propre à ce type d'ouvrages ?

Il y a un référentiel Eurocode cheminées et un certain nombre de documentations techniques assez anciennes, pour les cheminées en acier ou en béton. Les cheminées se font indifféremment dans les deux matériaux.

**Quel matériau s'impose, béton ou métal ?
Construit-on encore des cheminées en briques ?**

Beaucoup de cheminées en briques ont été construites, elles ont entre 40 et 50 mètres de hauteur, et parfois jusqu'à cent mètres.

La hauteur des cheminées est calculée en fonction de la pollution des rejets, de leur évacuation vers l'atmosphère et de la vitesse du flux à l'intérieur.

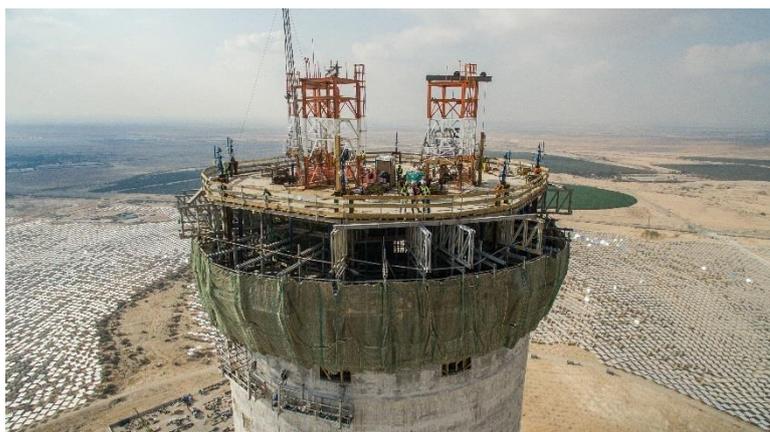
Ensuite, il y a eu les procédés en béton armé. Le procédé Monnoyer était un procédé en préfabrication béton, comme utilisé pour la cheminée de la mine de Carcassonne, que nous avons été amenés à démolir. Il s'agissait de plaques de béton préfabriqué avec des nervures couléées en place, d'épaisseurs assez fines, de 6 à 8 cm dans la partie haute.

Aujourd'hui les cheminées se font en métal pour des hauteurs de cinquante à cent mètres. De nombreuses cheminées de moyenne portée sont en acier. Au-delà de ces hauteurs, on utilise le béton qu'on coule en coffrage glissant. Elles sont plutôt en béton parce que le poids est un avantage vis-à-vis des phénomènes aérodynamiques.

Cela dépend également des pays où elles sont construites. D'une manière générale, il est plus économique de construire en béton.

Pouvez-vous nous en dire plus sur le coffrage glissant ?

Ce sont de petits coffrages d'à peu près un mètre vingt de hauteur, qui avancent à une vingtaine de centimètres par heure, ce qui nécessite des bétons extrêmement spécifiques, qui ne doivent pas prendre trop vite, pour qu'il n'y ait pas d'arrachement lorsqu'on déplace le coffrage qui monte en continu. Ils ne doivent pas être trop mouillés non plus, pour pouvoir tenir lorsque le coffrage est hissé grâce à des vérins placés sur des barres scellées. Donc le réglage du béton est très important en coffrage glissant. Il est possible de réaliser des structures de très grandes hauteurs en coffrage glissant, mais à condition de bien régler le béton.



©General Electrics. Tour Ashalim

Pour donner quelques exemples d'utilisation du coffrage glissant, nous venons de réaliser les études d'exécution de la tour solaire d'Ashalim, qui n'est pas une cheminée proprement dite, au sens d'évacuation de gaz, mais une tour d'environ 260 mètres de hauteur, avec un diamètre de 35 mètres et des parois de 50 et 30 cm d'épaisseur. Nous avons également effectué, il y a plusieurs années, le doublage du puits du Fréjus (puits de ventilation). Ce puits est une cheminée qui amène de l'air frais en temps normal et crache les fumées en cas d'incendie dans le tunnel. Il a été construit depuis le tunnel jusque dans la montagne, sur une hauteur de 800 mètres en coffrage glissant.

Y a-t-il un recours à la précontrainte pour le choix du béton ?

Non, pas vraiment. Beaucoup de personnes ont essayé, notamment pour des fûts d'éolienne, mais cela ne présente pas de grand avantage par rapport au béton armé. Il faudrait vraiment avoir un élancement très fort pour que la précontrainte soit intéressante. Or, on ne peut pas donner d'élancement très fort parce que la cheminée serait trop souple et rencontrerait des problèmes aérodynamiques. Finalement, dans les diamètres qui permettent d'avoir une stabilité aérodynamique, le béton armé est en général largement suffisant.

Quand on parle de cheminées en béton, il ne s'agit jamais de béton seul, non armé ?

Effectivement. On pourrait jusqu'à une certaine hauteur ne pas utiliser de béton armé, parce que les armatures sont peu sollicitées hormis la base. Peut-être faudrait-il initier des recherches sur des armatures en fibres de verre, personne ne s'y est vraiment intéressé pour l'instant. Ce serait très intéressant.

L'armature dans un coffrage glissant a deux fonctions : la première est la résistance, mais elle retient aussi le béton à l'avancée du coffrage. Lorsque le coffrage glisse, il entraîne la peau du béton. L'armature derrière, même une grille en fibre de verre, évite au béton de monter avec le coffrage.

Il s'agit donc une technique très utilisée ?

C'est une technique très utilisée à l'étranger. Nous avons réalisé avec ce procédé les pylônes du pont du Bosphore, qui ont des formes plutôt trapézoïdales et font plus de 300 mètres de haut. Nous avons également effectué en Italie des piles de ponts en coffrage glissant. Pour la tour solaire d'Ashalim, nous avons travaillé avec l'entreprise Gleitbau, une société autrichienne, qui peut réaliser du coffrage glissant dont la géométrie est modulaire.



©Anne Claude Barbier pour setec tpi

D'ailleurs assez paradoxalement, cette technique a été retenue pour les noyaux de l'immeuble de grande hauteur qu'est le Tribunal de Paris, que nous avons réalisés. En effet, en France cette technique est pénalisée par les règlements parce que nous sommes obligés de considérer qu'une partie du béton ne travaille pas ; on dit que la peau ne travaille pas, donc ça réduit l'épaisseur mécanique. C'est dommage. C'est une bonne technique pour les cheminées, car c'est répétitif et cylindrique, ou, au pire, tronconique.

Pour les ingénieurs matériaux, cela demande une bonne maîtrise du temps de prise du béton, une très belle mise au point de ce matériau. Le béton est coulé en continu, nuit et jour sans s'arrêter, avec une vitesse d'entre 20 et 24 cm/heure. C'est en général le ratio du coffrage glissant.

Quelle autre technique utilise-t-on ?

Le coffrage grim pant ou auto-grim pant, c'est-à-dire un coffrage que l'on décale par levée de quatre mètres, est utilisé pour le béton. En ce qui concerne les cheminées en acier, il s'agit de tôles raidies, moyennement épaisses, avec des raidisseurs régulièrement espacés. Les raidisseurs sont des cerces horizontales. Ces cheminées sont souvent doublées, la fumée ne circule pas dedans mais dans une gaine à l'intérieur. Le tube en acier est donc le tube porteur qui comporte un ou plusieurs conduits de fumées qui eux, n'ont pas de résistance mécanique.

Y a-t-il également un conduit à l'intérieur des cheminées en béton ? En matériau réfractaire ?

Les cheminées en béton modernes ont souvent un double chemisage ce qui n'est pas le cas des cheminées anciennes. Il peut y avoir des matériaux réfractaires, à cause de la température du gaz à l'intérieur. Les cheminées sont soumises à de très gros gradients thermiques, en raison de ce qui y circule. Cela dépend de la température des fluides à l'entrée de la cheminée, mais c'est ce qui fait le tirage. Comme il s'agit de gaz chaud, il monte naturellement. Les cheminées sont souvent doublées et les tuyaux calfeutrés, c'est-à-dire qu'à l'intérieur se trouve de la laine de roche, matériau isolant.

Quelle est la plus grande difficulté à prendre en compte lors de la conception ?

L'élancement, caractéristique de la cheminée, implique également de prendre en compte certains phénomènes. En général ce sont des élancements entre le 10 et le 12^{ème}, sauf tour spécifique qui ne serait pas vraiment une cheminée.

La plus grande difficulté vient du calcul au vent. Outre bien sûr, la stabilité et la turbulence, le phénomène auquel on cherche à échapper, est surtout l'échappement tourbillonnaire. Les tourbillons de Karman créent des sollicitations perpendiculaires à la direction du vent. Si le vent souffle dans une direction, la cheminée est sollicitée de manière perpendiculaire au vent. Ces décrochements, phénomènes bien connus des aviateurs, ont été révélés par Von Karman, ingénieur allemand aérodynamicien. Cela provoque des instabilités, et donc de la résonance.

Les effets des détachements tourbillonnaires se rencontrent aux basses vitesses, c'est-à-dire entre 8 et 12 mètres/secondes à peu près, quand le vent décroche de la cheminée. Quand la vitesse est plus importante et que le vent est plus turbulent, ces phénomènes disparaissent. Ils se rencontrent donc pour des vents plus quotidiens que les vents de tempête.

Ces oscillations générées perpendiculairement à la direction du vent se produisent sur toutes les structures élancées. L'Eurocode permet de calculer ces effets, grâce à des formules qui existaient bien avant l'Eurocode dans la littérature. Et quand on ne sait pas le faire, on les identifie en soufflerie.

Quelles sont les remèdes à ces effets d'oscillations ?

Les mesures correctives que nous mettons en place consistent en général à poser des ailettes le long des cheminées. Il s'agit de la correction la plus efficace. Ces petites ailettes disposées souvent en hélices permettent que le vent ne soit plus laminaire au voisinage de la cheminée, donc la turbulence des détachements tourbillonnaires disparaît. C'est un phénomène bien maîtrisé par les spécialistes.

Sur les cheminées en acier qui elles, sont très minces et n'ont donc pas un rapport de masse satisfaisant, nous sommes obligés d'installer des amortisseurs dans la partie haute, c'est-à-dire des masses suspendues et amorties.

En quoi consistent les essais en soufflerie ?

Ces essais sont réalisés sur des maquettes entre le 200^{ème} et le 150^{ème} qui sont posées sur une balance dynamométrique. Les efforts au pied de la tour sont alors mesurés. Cela nous permet de déceler les vitesses d'instabilité.

Les vitesses de vents sont définies par des statistiques issues des mesures d'aéroports. Nous établissons sur chaque site une rose des vents. Nous recherchons la vitesse critique des vents, du diamètre, de la hauteur et de la masse de la cheminée.

Plus la cheminée est haute, plus on s'intéresse à ces phénomènes aérodynamiques.

Les essais en soufflerie nous permettent également de juger de l'efficacité des corrections mises en place.

Quels sont les autres paramètres pris en compte lors de la conception - hauteur, stabilité sous vent, agressivité des fumées ?

La résistance au basculement intervient avec la vitesse de vent maximale, la turbulence, le coefficient de traînée maximal. Nous profitons des essais en soufflerie pour mesurer aussi ce facteur, mais ce sont surtout les instabilités que nous traquons.

L'agressivité des fumées dépend du revêtement intérieur, si la fumée est directement dans le béton ou bien si elle circule dans un tuyau. Mais en fonction de la composition chimique des fumées, il peut se trouver dans les cheminées modernes une tubulure en inox à l'intérieur qui protège le béton.

La vitesse d'un fluide dépendant aussi de la section, plus la section est petite, plus le fluide va vite, et plus il monte haut. Certaines cheminées comportent même des ventilateurs qui accélèrent la vitesse du fluide. Cela évite de construire une cheminée haute, en s'assurant dès la conception que le panache de fumée montera par exemple une vingtaine de mètres au-dessus de la cheminée.

Le recours à l'haubanage est-il répandu ?

Des cheminées métalliques peuvent avoir de l'haubanage, avec deux étages de haubans. C'est relativement compliqué à calculer, il faut compter avec la détente des haubans. Il existe même des conceptions de cheminées en métal articulées en pied et complètement haubanées.

L'haubanage ne se fait pratiquement pas pour les cheminées en béton.

Prévoit-on un monitoring de surveillance dès la conception de la cheminée ?

Des anémomètres tridimensionnels sont installés en haut des cheminées pour mesurer la vitesse du vent, ainsi que des accéléromètres, pour la mesure des mouvements de la cheminée. Les progrès de l'informatique permettent d'avoir des systèmes de capture en continu de données mais encore faut-il pouvoir les exploiter.



©General Electrics. Tour Ashalim

Quelles sont les différentes formes des cheminées ?

Elles sont soit cylindriques, soit tronconiques, soit à la fois tronconiques et cylindriques, c'est-à-dire avec une base en tronc de cône (patte d'éléphant) avec un cylindre au-dessus. Mais évidemment tant qu'il est possible de les construire en forme cylindrique, on le fait parce que c'est plus simple. Que ce soit en métal ou en coffrage glissant, c'est un processus répétitif.

La particularité de la tour d'Ashalim est qu'elle est à la fois rectangulaire et cylindrique, parce qu'il fallait entrer le four à l'intérieur, qui est d'une hauteur de 50 mètres. A l'intérieur de ce four solaire, de la vapeur d'eau est créée, qui redescend par les tuyauteries. Elle permet, après un passage dans une turbine, de créer de l'électricité. C'est la tour solaire la plus haute du monde.

Inspection en vol et diagnostic au sol

Entretien avec Thibault Chatillon, Chef de projet « Setec Capture » et Yann Bagbonon, Responsable du « pôle Inspections », Diadès Vitrolles

Pourriez-vous tout d'abord nous présenter Diadès ?



Thibault Chatillon : Diadès est une société du groupe setec, spécialisée dans le diagnostic et la réparation des ouvrages de génie civil, et qui réalise notamment des inspections et les études de réparation de tous types de structures : ponts, tunnels, cheminées, barrages, aéroréfrigérants, bâtiments ...

Nous souhaiterions connaître les applications de captures d'images que vous mettez en oeuvre. Quelle est la fonction du drone chez Diadès ?

TC : C'est un outil déporté qui capture des images permettant l'aide au diagnostic. Cette vue déportée des structures était auparavant effectuée soit par des cordistes soit depuis des nacelles élévatrices. Aujourd'hui, le drone permet de pallier ces techniques un peu plus dangereuses, et de récupérer beaucoup plus d'informations, pour produire des éléments qu'un cordiste ou un inspecteur sur nacelle n'était pas capable de produire, hormis un reportage photo et une cartographie. La photogrammétrie, la modélisation ne faisaient pas partie de ces éléments.



©Diades. Drone Matrice 210 RTK

Pouvez-vous nous en dire un peu plus sur les technologies utilisées ?

TC : Il existe plusieurs méthodes : soit un inspecteur procède à une levée de doutes en effectuant une prise de photos qui n'est pas destinée à une modélisation mais à un simple reporting photo ; soit le recouvrement total de la surface inspectée par photographies HD est réalisé, qui génère de la photogrammétrie, permettant d'avoir différents rendus : modèle 3D, modèles 3D avec texturage, nuages de points, orthophotos, cartographie sur l'orthophoto projetée sur un modèle 3D ...

Comment se décide en quoi va consister la mission ?

TC : Le cahier des charges du client sert de base pour permettre le choix du type d'engin à utiliser et la distance de capture, en fonction du capteur à embarquer. Chaque engin a un capteur avec des capacités spécifiques qui détermine la distance à adopter en fonction de la résolution attendue. Le plan de vol, le recouvrement ainsi que le nombre de trames de trajectoires qui vont se croiser pour pouvoir recouvrir en totalité la zone, sont définis. La photogrammétrie exige en effet un recouvrement plus complet que pour une photo classique. En règle générale, il doit être de 60 à 40% à l'horizontal et en vertical, et parfois plus si l'on recherche beaucoup plus de définition.

Aujourd'hui, l'ouverture classiquement recherchée est de 0.3 mm, mais elle peut parfois être de 0.1 mm, ce qui oblige à avoir une méthodologie pour obtenir une définition précise par pixel, voire en deçà...



©Diades. Drone Matrice 210 RTK

Des précisions sur le facteur météo qui peut avoir une incidence sur la mission ?

TC : Autant le vent que la luminosité peut influencer la qualité des rendus. Aujourd'hui, nos engins peuvent voler entre 30 et 40 km/h maximum. Mais ce n'est pas non plus un confort de réalisation, parce qu'on doit se positionner relativement près des ouvrages ; s'il y a du vent, on peut toucher la structure. La luminosité est ce qui va contribuer à la qualité de l'image. Et cette qualité est aujourd'hui relativement importante surtout si une définition relativement élevée est exigée. Enfin, la pluie est un scénario difficile.

Certains de nos engins peuvent évoluer quand il pleut, néanmoins la photo n'est pas exploitable lorsque le capteur est mouillé et des gouttes d'eau présentes sur l'objectif.

Dans le cas des cheminées, quels sont les réglages à effectuer, en particulier à l'intérieur des conduits où l'espace et la luminosité sont des facteurs particuliers ?

TC : Auparavant, nous avions un outil qui permettait de faire presque tout, mais de façon moins précise. Depuis plusieurs années, nous définissons différents outils et approches pour différentes applications et choisissons nos capteurs et le drone adapté à la mission en fonction du cahier des charges et des conditions de vols de chaque mission. Une des solutions proposées est un engin équipé de protection et de lumières, qui permet d'aller relativement près et même au contact du parement. S'il s'agit d'un espace confiné, il s'agit du même engin que celui qui permet d'effectuer les inspections de canalisations ou de conduites...

Aujourd'hui, nous avons également des applications autres que les drones, comme des solutions de perches ou de câbles qui permettent de descendre un outillage avec une vision panoramique, ou bien un système qui permet de faire l'acquisition de tunnels avec des caméras thermiques. Nous menons différentes expérimentations qui nous permettront de décider des cas où il est plus pertinent d'utiliser l'une ou l'autre des solutions. Dans le cas de cheminées, nous réalisons les rendus de l'intérieur et l'extérieur, en les faisant correspondre, ce qui n'est pas évident à reconstituer.



©Diades. Inspection de la plus haute cheminée de France à 297m à Gardanne pour Uniper

Parlez-nous effectivement des restitutions que vous effectuez ?

TC : Selon l'attente du client, nous proposons différentes options. En règle générale, c'est une cartographie à plat, éventuellement des ortho-photos : la représentation de l'ouvrage en photos à plat. Les autres options peuvent être des modèles 3D tuilés qui permettent de zoomer relativement près. Les nuages de points servent à différentes autres analyses, à des créations de modèles.

Nous pouvons également réaliser des nuages de points, parce que, dans le cadre d'avant-projets, cela permet de pouvoir dessiner par-dessus, d'observer des corrélations avec d'autres plans déjà élaborés. La technique du nuage de points permet d'effectuer des mesures entre plusieurs points et de comparer. Lorsqu'il y a un texturage ou même un maillage, hormis d'aller dans les précisions très pointues, c'est toujours une approximation, une extrapolation de certains points qui parfois peut être facteur d'erreur, de par la présence d'un artefact, un fantôme. La photo est une vision qui peut être perturbée par un reflet, quelque chose qui se trouve devant l'objectif.

Ce que nous voyons sur la tablette n'est pas assez significatif pour pouvoir observer par exemple une fissure. Des éléments de l'ordre du centimètre ou du millimètre sont très délicats à observer sur le terrain. Bien sûr, si les pilotes observent quelque chose de vraiment rarissime, ils en font un reporting quasiment en temps réel. Mais le détail des données est exploité au bureau. Et au final, les inspecteurs délivrent les interprétations. Le diagnostic est alors élaboré par nos inspecteurs spécialisés à partir des modèles 3D et des traitements semi-automatiques des images.

Aujourd'hui, peut-on imaginer envoyer un drone sans pilote ?

TC : C'est aujourd'hui un projet envisageable. Nous réalisons actuellement un POC (Proof Of Concept) en expérimentation sur des écluses, où un drone autonome, placé dans une boîte et intégrant des plans de vols prédéfinis, pourra aller se recharger automatiquement. L'intérêt de l'automatisation dépend du type d'inspection. Le survol d'un champ ne nécessite pas de pilote. Sur une cheminée où réside une multitude de risques, un opérateur qualifié est exigé. Cependant, une machine faisant seule le recouvrement d'un ouvrage inscrit dans son programme est une solution que des fabricants proposent déjà. La précision reste à affiner mais cela existe. Sur la ligne AEB (Aix Etang de Berre), nous avons réalisé un vol autonome, en modélisant et planifiant le parcours, identifié au bureau, confirmé et lancé sur le terrain. Le vol autonome, répondant à des critères et à des positionnements techniques, est parfois plus précis que le relevé humain.

La solution mobilité sera peut-être totalement envisageable dans 10/15 ans. Aujourd'hui, c'est un peu prématuré. De nombreuses problématiques viennent se greffer, comme la présence d'un pilote rendue obligatoire par la réglementation, les contraintes de l'interactivité des sites (voies ferrées, routes...) et la population, qui doivent à terme être identifiés.

Mais au-delà de la surveillance de structures, les secteurs d'application de la mobilité sont le transport de marchandises ou d'humains, le sauvetage, la livraison du courrier sur les derniers kilomètres... Techniquement, c'est faisable. La dernière brique à positionner dans ce domaine est la gestion des engins volants, l'organisation de la logistique autour de l'information mutualisée des engins référencés, et de l'espace aérien.

Il s'avère que l'automatisation est bien un sujet en plein développement.

TC : C'est pourquoi le retour sur expérience (REX) de toute mission par drone joue un rôle de première importance. Les modes opératoires sont remis en question et évoluent

constamment. Par exemple, dans le cadre de l'inspection d'une tour aéroréfrigérante ou d'une cheminée, les captures d'images par montées et descentes verticales a généré des reprises de recouvrement, suite à des doutes quant au déplacement du drone et à l'absence de GPS. Par la suite, la multitude de données à traiter s'est révélé chronophage. Nous avons ainsi, après plusieurs études, opter pour des captures hélicoïdales, ce qui permet d'éviter les écueils rencontrés. Nous recherchons aujourd'hui des optimisations et la garantie d'une qualité en constante évolution sur les techniques que nous utilisons.



©Diades. Inspection des cheminées de l'usine de Saint Chamas pour Edf



Pouvez-vous nous dire quels désordres Diadès a été amené à observer sur les cheminées ?

Yann Bagbonon : Les principales pathologies que nous avons été amenés à diagnostiquer sur les cheminées en béton sont :

- des éclats de béton avec acier apparent, ou des éclats de bétons en formation (zones de décollement du béton)
- des fissures horizontales et/ou verticales
- des fissures plus ou moins traversantes (intérieur et extérieur). Ces fissures font naître des fuites à des endroits où des fluides ne sont pas censés s'échapper. Cela n'est pas toujours gênant pour l'exploitation, mais cela accélère la dégradation.

Les désordres dépendent de la nature des fumées qui sont évacuées dans les cheminées.

S'il s'agit de vapeur d'eau, des calcites sont visibles sur les parements externes, avec des traces de couleur de calcite. C'est plus ou moins un signe avant-coureur qu'il pourrait s'agir d'une fissure traversante.

S'il s'agit de gaz, on couple nos interventions avec une caméra thermique HR. Celle-ci permet d'observer les différences de température sur les parements, les zones un peu plus chaudes, les zones d'exfiltration qui traversent toute la paroi, et les zones d'éclats de bétons en formation (que ce soit traversant ou non).

Dans le cas de traces de calcites sur les parois, il est possible de savoir si elles sont ou non traversantes, en effectuant des relevés infrarouges, pour détecter les zones concernées.

Quand le désordre est moins conséquent, comment se présente-t-il ?

YB : Il existe effectivement une notion de qualification des désordres. Si les fissures sont de l'ordre de 0,1 à 0,3 jusqu'à 0,5 millimètre, ce n'est pas forcément grave si elles sont stabilisées. Par contre, de 0,5 à 1 mm d'ouverture, l'on doit s'interroger sur les causes possibles de ces désordres, et surtout sur les traitements, sans oublier qu'on ne voit jamais la cause mais toujours la conséquence...

Il peut s'agir d'un problème mécanique, issu d'un effort plus important à certains endroits de la structure, qui présenterait des faiblesses. Cela peut être dû à un phénomène physico-chimique, qui génère la corrosion des aciers sous-jacents et par la suite, provoque des poussées sur une partie du béton, et sa fissuration ; ou bien nous sommes face à un simple retrait du béton. Les fissures de retrait sont beaucoup plus fines et les ouvertures dans ce cas beaucoup plus légères. Elles sont néanmoins contrôlées dans le cadre classique des cycles habituels de surveillance des ouvrages. Si leur ouverture passe de 0,1 à 0,5 millimètre en peu de temps, l'on s'interrogera davantage sur le phénomène qui en est à l'origine.

L'ouverture de la fissure est donc un paramètre qui permet de qualifier le désordre ?

YB : Oui mais pas uniquement. L'ouverture, mais aussi sa position sur le fût, l'évolution, la profondeur, l'activité, ...sont autant de facteurs à caractériser. Si une fissure se trouve en plein milieu du fût, qu'elle est horizontale et qu'elle fait le tour de la structure, on est amené à investiguer bien plus avant car ça peut être grave.... Certaines cheminées précontraintes portent des cerceaux, et les fissurations se produisent sur le cachetage des abouts de la précontrainte. La position et l'ouverture des fissurations participent à la caractérisation de la gravité du désordre.

Y a-t-il des pathologies se manifestant plus particulièrement sur certaines zones de la cheminée ?

YB : Les désordres les plus susceptibles de se produire dans la partie haute de la cheminée sont les éclats de béton et les éclats en formation. Ce sont les zones chaudes, comportant un certain taux d'humidité. En modifiant le pH du béton, la vitesse de corrosion augmente, le béton gonfle, et éclate.

Par souci de sécurité, pour le personnel opérant en-dessous, les zones d'éclats des cheminées sont purgées et retraitées, afin d'éviter que les petites particules de béton ne viennent à tomber sur ceux qui travaillent. On purge les éclats, on brosse les armatures, on passive l'acier pour limiter/freiner le phénomène de corrosion d'armatures, et on ragrée avec du mortier adapté pour protéger les armatures de toutes les agressions extérieures et de tous les phénomènes physico-chimiques créés par l'air ou les fumées.

Pour les autres zones ?

YB : La capacité de la fondation et de l'assise est essentielle. Dans le bas de la cheminée, il peut y avoir plusieurs phénomènes.

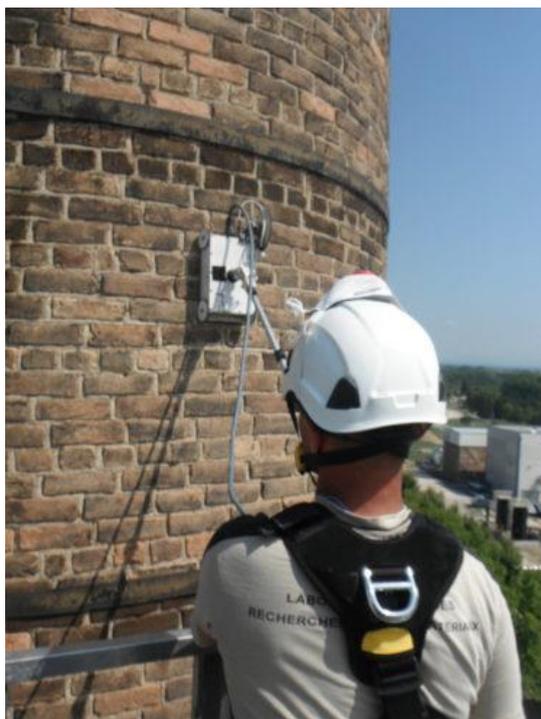
Un tassement différentiel entre les fondations et la cheminée elle-même peut entraîner une fissuration typique, verticale, bien caractéristique, relativement importante en ouverture. Nous cherchons néanmoins à en préciser la cause. Est-ce une défaillance dans le calcul de dimensionnement, ou bien est-ce une défaillance des armatures ? Le ferrailage à l'intérieur permet de reprendre les efforts de la structure. Si ces derniers n'ont pas été pris en compte ou si les aciers sont dégradés, alors se manifeste une pathologie. Nous réalisons l'inspection visuelle puis le programme des investigations qui pourra comprendre des essais et analyses sur les matériaux, afin que nous puissions déterminer au final la cause exacte de la pathologie observée, à l'issue du diagnostic.

Ensuite, à l'intérieur des cheminées, il est possible d'avoir des dépôts de mousse, car de la végétation se développe dans ce milieu chaud et humide. Nous pouvons constater également la présence de larges zones de calcite, mais aussi des éclats de béton en formation car l'eau et les agents extérieurs ont réussi à pénétrer jusqu'aux armatures, et ont accéléré sa corrosion. Des opérations qui font tomber les plaques de mousse sont aujourd'hui mises en œuvre, afin d'être en capacité d'observer l'état des parois.

Sous les radars : l'auscultation

La réflectométrie par radar (radar géophysique) est une méthode d'investigation non destructive à haut rendement, légère, qui permet la reconnaissance interne des structures (géométrie) et la détection d'anomalies pouvant les affecter.

Principe de la méthode : voir Lerm Infos. Interview JL Garciaz (2013) <http://doc.lerm.fr/contrôle-non-destructif-des-ouvrages-et-des-batiments/>



©setec LERM. Radar

Reconnaissance de la structure

Le radar est avant tout un instrument de mesure qui permet de détecter des interfaces entre des matériaux de nature différente, des vides ou encore des éléments métalliques.

L'examen par radar renseigne sur la constitution d'une structure, non pas en termes de nature mais en termes géométriques, par exemple pour mesurer l'épaisseur des différentes couches de briques ou autres (pierres, moellons, béton...).

Il est également possible de repérer les éléments métalliques de renfort d'une cheminée maçonnée (chaînages, filants, tirants... conduits métalliques) et bien sûr la position des aciers (profondeur, maillage) dans le cas du béton armé.

La profondeur d'investigation du radar peut atteindre plusieurs mètres dans les cas les plus favorables. Elle est généralement de l'ordre de 1 à 2 mètres dans les maçonneries et de 0,5 à 1 mètre au maximum dans le béton armé.

Les anomalies

Qu'appelle-t-on anomalie ?

Une maçonnerie de cheminée est souvent constituée de briques et de mortier. Il existe donc une certaine hétérogénéité constitutive normale, et le rendu global de l'examen par radar montre une « image » de référence.

Lorsque l'intensité, le nombre, ou encore la géométrie des échos radar varient par rapport à cette référence, on peut considérer qu'il existe une « anomalie ».

Ainsi, le radar permet le repérage d'anomalies susceptibles de correspondre :

- à des hétérogénéités anormalement importantes, signe d'existence de vides ponctuels multiples, de joints dégradés, de pertes de cohésion des matériaux ;
- à des délaminages importants ou vides francs : décollements entre « rouleaux » de briques, vides liés à des pertes de fines ou de remblais « tout-venant » dans un remplissage interne ;
- à une augmentation anormale de l'humidité

En revanche, il existe des limites : la détection de fissures n'est généralement pas possible car l'épaisseur minimale de vides détectable par radar est pluri millimétrique. De plus les interfaces perpendiculaires à la surface auscultée ne provoquent pas d'écho en retour donc elles ne peuvent pas être détectées.

L'interprétation et le rendu des données radar

L'obtention en temps réel des résultats bruts permet d'implanter sur site avec précision, et sans caractère aléatoire, d'éventuels sondages destructifs (carottages, ouvertures) destinés à contrôler et/ou étalonner certaines anomalies. Ces étalonnages permettent notamment de préciser l'origine et la nature de ces anomalies afin d'étendre l'interprétation des données à l'ensemble de la cheminée auscultée.

L'élaboration de logiciels spécifiques, combinant le traitement mathématique complexe du signal radar brut et l'analyse géométrique de la répartition des cibles détectées, permet la cartographie en 2D ou 3D des anomalies dans les structures auscultées.

Néanmoins, une longue expérience de la méthode est indispensable à la bonne interprétation des données. Se combinent un certain nombre de paramètres qui rendent l'interprétation parfois complexe et délicate, l'humain étant souvent seul capable d'évaluer le seuil hypothétique de ce qui est observé.



©setec LERM. Radar. Principe de représentation cartographique d'anomalies.

Points forts de la méthode

Certes, le radar ne détecte pas « tout » et la complémentarité avec d'autres méthodes d'auscultation (ultrasons, thermographie...) pourrait s'avérer nécessaire dans certains cas.

Mais la légèreté de mise en œuvre et le grand rendement des investigations par radar constituent les points forts de la méthode. Ainsi, l'auscultation devient exhaustive et non plus limitée à quelques zones dites « représentatives », parfois délicates à sélectionner.

Des surfaces de plusieurs dizaines de mètres carrés peuvent être couvertes en radar dans la journée, en fonction des moyens d'accès mis en œuvre (nacelle, cordistes...).

La sensibilité de cet outil permet toujours d'apporter des renseignements utiles au diagnostic d'une structure, en l'occurrence une cheminée.

Origine, développement et applications de la technique du radar

Lerm Infos. Interview JL Garciaz (2013) <http://doc.lerm.fr/contrôle-non-destructif-des-ouvrages-et-des-batiments/>

Article Moniteur du Bâtiment (2010) <https://www.lemoniteur.fr/article/contrôle-non-destructif-des-ouvrages-ou-comment-obtenir-une-échographie-des-structures.1213529>

"Une culture de la cheminée" : la maintenance

Entretien avec Pascal Hiriart, Directeur Général de MCC2I

Bonjour Monsieur Hiriart, pouvez-vous tout d'abord nous présenter MCC2I ?



MCC2I est une entreprise fondée en 1996, dont le métier est la maintenance des cheminées industrielles. Il s'agit de notre métier dédié, autour duquel nous réalisons quelques prestations annexes et proches. L'entreprise est entrée en 2011 dans le groupe Poujoulat qui était alors spécialisé dans les cheminées des habitations de particuliers, et souhaitait étendre son périmètre vers l'industrie. Le groupe avait préalablement acquis la société Beirens, fabricant de cheminées neuves dans la région de Châteauroux. Avec l'intégration de MCC2I, Poujoulat a prolongé sa diversification en intégrant le métier de la maintenance des cheminées industrielles.

Nous travaillons quelquefois pour des particuliers mais majoritairement pour l'industrie, et principalement l'industrie lourde qui possède des

grosses cheminées (raffineries, verreries, cimenteries, chaufferies, entreprises de l'agro-alimentaire...).

Avant d'aborder le sujet de la maintenance elle-même, pouvez-vous nous rappeler à quoi sert la cheminée sur un site industriel ?

Un site industriel est doté d'une cheminée dès lors qu'existe une installation à combustion, soit des chaudières pour produire de l'eau chaude ou de la vapeur, soit des fours qui servent à chauffer un produit pour le transformer.

Son rôle principal est celui d'aspirateur à fumée. Par sa hauteur, la cheminée crée une dépression et connectée en amont à un four ou à une chaudière, cette dépression a pour effet d'extraire du foyer les fumées de combustion.

Le deuxième rôle de la cheminée est de rejeter et de dissiper au mieux les fumées issues de la combustion, c'est-à-dire le plus haut possible pour une meilleure dispersion et ainsi limiter l'impact sur l'environnement. Si le calcul 'environnemental' de la hauteur (défini par des textes réglementaires) donne une hauteur supérieure à celle nécessaire à l'aspiration, c'est cette hauteur-là qui sera prise en compte.



Pour revenir à votre métier lui-même, quelles sont les opérations de maintenance qu'il est nécessaire de réaliser sur les cheminées ?

Il n'y a pas d'obligation légale, mais il existe une norme (NF EN 13084-1, septembre 2007) qui recommande de contrôler les cheminées tous les 2 ans. Cette norme ne présente pas de liste de points de mesure obligatoires.

La question que se pose - ou doit se poser - tout propriétaire de cheminée industrielle est : ma cheminée est-elle en bon état ? Les parties intérieures ne sont-elles pas corrodées, abîmées, percées ? Les parties extérieures présentent-elles une bonne sécurité ?



En termes de sécurité des parties extérieures, c'est assez similaire avec l'entretien d'un bâtiment.

Cependant, la spécificité des cheminées est que ce sont des appareils chauds qui subissent, du fait des fumées, de nombreuses attaques acides, qu'elles soient en métal, béton ou briques. Il faut donc régulièrement vérifier que ces attaques ne les abîment pas.

Par exemple, pour les cheminées en béton, on va trouver du vieillissement chimique ou des délavements en surface, qui font réapparaître des granulats, alors que normalement le béton devrait être lisse. Au fil du temps l'acidité ronge les parties extérieures, on perd un peu d'épaisseur.

Il faut aussi vérifier qu'aucun vieillissement structurel ne pose problème, c'est rare mais cela arrive, sur des ouvrages très vieux, sur des ouvrages en briques. Les vieillissements structurels peuvent également se révéler normaux et acceptables. Typiquement de la

fissuration ou des épaufrures sur du béton sont les manifestations d'un vieillissement structurel, accentué par des effets induits pathologiques (corrosion...).

Enfin, l'état de tous les accessoires d'accès est contrôlé (échelles, passerelles...) mais aussi les accessoires de type paratonnerre, balisage lumineux aérien, et tous les piquages d'instrumentation.

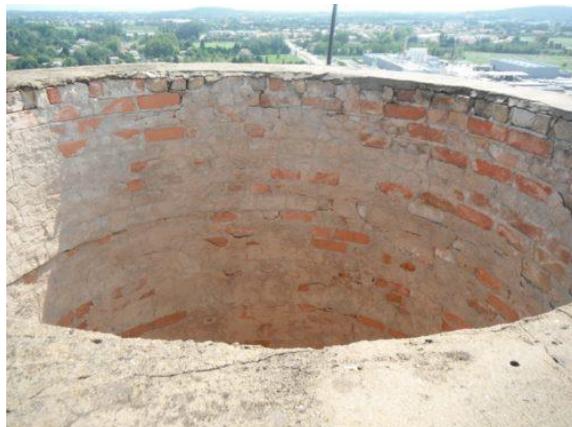
Comment se réalise cet état de la cheminée ?

La maintenance et le diagnostic sont réalisés par du personnel différent, dédié à l'une et l'autre de ces deux activités.

En matière de diagnostic, nous déroulons sur site un programme type d'examen, quel que soit le type de cheminée. Il va consister à inspecter systématiquement toutes les parties citées auparavant (la partie interne pour le vieillissement chimique, la partie externe pour le chimique et le structurel, et enfin tous les accessoires).

Dans une cheminée, il y a deux tubes l'un dans l'autre. La partie extérieure assure la tenue structurelle au vent et autres intempéries (neige, séisme etc.). La partie interne n'est là que pour guider les fumées.

Les examens de la cheminée sont différents selon les matériaux. Si la cheminée est en acier, des mesures d'épaisseur par ultrasons sont réalisées. Si la cheminée est en béton, nous procédons à des contrôles visuels.



©setec LERM

Nous prenons des photos, nous effectuons des relevés dimensionnels, des vérifications d'épaisseur... A la suite des diagnostics visuels, il arrive que nous préconisons des diagnostics complémentaires plus approfondis, parce que des zones présentant une usure anormale ont été détectées. Le matériau présente une apparence poreuse, il s'effrite... ces signes déclenchent une alerte, et nous indiquons au propriétaire qu'il faut investiguer plus avant et se préoccuper de savoir si le matériau dans ces zones n'est pas chimiquement affecté, parce que visuellement nous le suspectons. Voilà comment se déroule le processus d'expertise.

Comment ausculte-t-on l'intérieur des cheminées ? y a-t-il assez de place à l'intérieur ?

La plupart des cheminées industrielles ont un diamètre important. Un homme peut y entrer, voire plusieurs. Ce qui se fait de plus grand en cheminée se trouve dans les centrales électriques, thermiques, au charbon ou au fioul. Ce sont en France principalement des cheminées d'opérateurs de production d'électricité. La plus grande de France fait 300 mètres de hauteur. Le diamètre est de l'ordre de 12 mètres au sommet et de 30 mètres à la base. Mais en général, les cheminées thermiques font 200 ou 220 mètres environ de hauteur, avec un diamètre de 8 à 10 mètres au sommet.

Cependant, une chaufferie industrielle qui procure le chauffage urbain sur un petit quartier, a parfois des diamètres de l'ordre de 400 ou 500 millimètres. Il n'est pas alors possible de s'y glisser. Un mètre de diamètre environ est nécessaire pour qu'un homme puisse travailler à l'intérieur d'une cheminée.



©setec LERM

Il existe des équipements spéciaux pour pénétrer dans la cheminée. C'est le même principe que le travail de cordiste, mais ce sont des petites sellettes et non des cordes qui sont utilisées. A l'aide de câbles, il est possible de progresser de haut en bas dans la cheminée pour aller faire l'inspection visuelle, les prises de mesures, et vérifier l'état. Pour les gros diamètres et les travaux lourds, on installe des passerelles circulaires dans les cheminées, qui montent et descendent sur des systèmes de treuils à câbles.

Lorsque vous détectez donc un problème chimique, un problème d'usure... que se passe-t-il ?

S'il y a un caractère d'urgence majeure, cela arrive rarement mais cela arrive tout de même, le propriétaire en est informé immédiatement, parce qu'il y a danger, une menace de chute par exemple. Il nous est arrivé de dire le jour même de l'inspection qu'il fallait impérativement établir un périmètre de sécurité autour de la cheminée et prévoir une intervention extrêmement rapide.

Mais le cas le plus classique est la rédaction dans le rapport d'expertise d'une liste de préconisations de maintenance : les garde-corps de la passerelle sont abîmés, il faut les

remettre en état ou bien il faut les remplacer, la garniture réfractaire est endommagée mais cela peut encore fonctionner pendant six mois, un an, deux ans etc.

Un message particulier à faire passer concernant la maintenance des cheminées ?

Je pourrais faire une analogie avec la voiture et son pot d'échappement. Ce dernier ne suscite pas en général la même attention que celle que l'on porte aux autres parties du véhicule.

De même, la cheminée, c'est l'aval du processus industriel, le bout de la chaîne, et on pourrait avoir tendance à y attacher moins d'attention qu'au processus qui se déroule en amont. Or, les cheminées sont aussi un sujet de maintenance, comme le reste des installations.

Certains propriétaires industriels en sont très conscients, d'autres moins. Cela est dû à la méconnaissance des phénomènes interagissant entre les substances des fumées et les matériaux constitutifs des cheminées.

Et comme toujours en maintenance, plus on attend, plus les remises en état se révèlent coûteuses. Il faut aller voir de temps en temps. Mieux vaut le faire au fil de l'eau. C'est ça le message.

Quels sont les techniques et les métiers associés à la maintenance des cheminées industrielles ?

Au niveau du savoir-faire, dans les hommes et dans le matériel, tout est spécifique dans ce métier, parce que c'est un créneau étroit. Les techniciens qui montent sur les cheminées, savent ce qu'il faut y faire et comment le faire, à la fois en bonne sécurité et en bonne connaissance technique, représentent entre 50 et 100 personnes en France.

Les gens sont formés de A à Z parce qu'il n'y a pas d'école qui mène à ces métiers. Le savoir-faire est développé en interne, c'est un système qui s'apparente à de l'apprentissage.

Nous avons développé, au niveau des moyens d'accès, des techniques qui nous sont propres, basées sur des techniques existantes dans le commerce mais adaptées pour pouvoir travailler en cheminée, de manière sécurisée, rapide et efficace.

Cependant, toute la difficulté du métier est la mise en œuvre en grande hauteur, dans un environnement industriel. L'aspect sécurité est prépondérant, il y a une exigence de qualité, mais la singularité et la difficulté de cette activité tiennent au fait qu'elle se réalise dans un environnement où d'autres personnes évoluent et travaillent également autour de vous et au pied de la cheminée. Sans oublier la difficulté du planning, parce que la plupart du temps, les travaux sont à réaliser pendant les arrêts de production, qui sont par définition courts.

**Petit détour du côté des premières cheminées d'usines qui étaient en briques.
Quelle maintenance fait-on sur ces cheminées-là ?**



©setec LERM

Il existe deux catégories de cheminées en briques.

En France, un certain nombre de sites industriels anciens ont gardé leur activité industrielle et leurs cheminées en briques. Elles sont utilisées et font l'objet d'un entretien. Leur spécificité est leur âge. A ma connaissance, la construction de cheminées en briques s'est arrêtée aux environs des années 60-70. Les briques sont alors abandonnées pour le béton. Ces cheminées en briques datent donc des années 50, parfois d'avant. Certaines de celles sur lesquelles nous avons travaillé dataient de 1920. Elles peuvent donc avoir une centaine d'années.

Un programme de maintenance spécifique est appliqué, avec un suivi de vieillissement notamment des matériaux. La faiblesse réside principalement dans le vieillissement des joints de maçonnerie. Or, dans une usine qui a toujours été exploitée et entretenue, les briques restent en très bon état car elles sont chaudes en continu. Les matériaux résistent mieux en étant maintenus à température. Donc le niveau de dégradation, notamment vis-à-vis des intempéries, est moindre. Nous réalisons régulièrement les inspections intérieures et extérieures. L'entretien courant consiste à refaire du jointoyage et entretenir la partie réfractaire à l'intérieur.



Cela se complique un peu avec les cheminées qui ne sont plus en activité. Dans des régions qui ont un passé industriel important, comme la région Nord ou l'Est, l'on peut voir beaucoup de cheminées, le long des voies ferrées, des canaux et à proximité des villes. Certaines sont complètement à l'abandon, et quasiment en ruines, voire un peu dangereuses, car des éléments peuvent se détacher. Et d'autres sont maintenues en état, au titre patrimonial. Parce qu'elles ont un intérêt dans l'histoire industrielle. Il existe des programmes de réhabilitation. A ce moment-là, nous avons des donneurs d'ordre très variés, des communes, des particuliers ou éventuellement d'anciennes entreprises, qui ont encore une coactivité, qui entretiennent le patrimoine immobilier même s'il n'est plus utilisé.

La maintenance est rendue plus compliquée, car ces cheminées sont restées arrêtées très longtemps, ont été soumises aux intempéries sans être chaudes, et ont été moins entretenues, ne faisant plus partie de la chaîne de production. Les pathologies sont plus nombreuses et plus fortes.

La maintenance pour l'environnement

Au niveau environnemental, que peut-on dire concernant les cheminées, au regard de nos préoccupations fortes d'aujourd'hui en matière de pollution ? Nuisance sonore, fumées... on ne peut pas éluder cette question d'évacuer la vapeur d'eau, les gaz etc. dans les sites industriels, les cheminées sont donc destinées à perdurer.

Dans les fumées de combustion, il y a des polluants. Sur les gros sites, la gestion de la dépollution des fumées n'est pas traitée dans la cheminée, parce qu'il n'y a pas assez de place, mais entre le four et la cheminée. C'est là où vient s'installer le système de dépollution. Ce sont des équipements très différents d'une cheminée auxquels nous ne sommes pas confrontés, mais un département dans le groupe Pougoulat propose des systèmes de dépollution en amont des cheminées, sur la ligne d'échappement.

Au niveau de la cheminée, nous mettons en place une instrumentation, des appareils qui prennent en permanence des mesures sur les fumées, afin de vérifier leur conformité à la réglementation pollution qui impose des seuils maximums pour chaque type de polluants. Réglementation assez complexe et technique, comme souvent les réglementations environnementales. Chaque usine doit d'une part respecter cela, mais également son arrêté d'exploitation, le document officiel qui lui donne le droit de fonctionner, dans lequel il peut y avoir localement des éléments plus restrictifs que la réglementation nationale.

Pour l'aspect bruit, il y a aussi des normes. Chaque usine doit avoir un seuil de bruit à ne pas dépasser. Sont donc installés, effectivement la plupart du temps à l'intérieur des cheminées, des

dispositifs silencieux. Des silencieux passifs sont posés dans le tube, pour diminuer le niveau sonore, généré en amont par les ventilateurs etc.

Une autre question environnementale liée à la cheminée, est liée aux lois qui régissent les dissipations de panaches. Ces panaches de fumées contiennent des polluants, ils doivent être évacués le plus haut possible, pour une meilleure dissipation.

La hauteur des cheminées en briques qui n'ont pas été conçues en fonction de ces normes récentes, est-elle bien adaptée à la dissipation des fumées ?

Les réglementations actuelles sont immensément plus contraignantes qu'autrefois, et parfois il n'y avait même pas de réglementations. Mais les cheminées étaient déjà très hautes, pour assurer le tirage nécessaire aux fours de l'époque, et parce qu'on savait également que les panaches de fumées gênaient les populations. En général, il faut vérifier les hauteurs, mais il est rarissime qu'il y ait des cheminées en briques trop courtes.

Le système servant à diminuer le niveau sonore est-il soumis à maintenance ? Les fumées ne sont-elles pas susceptibles de l'abîmer ?

Ce sont des éléments statiques passifs, des plaques de 20 cm d'épaisseur, de plusieurs mètres de hauteur, dont les flancs sont perforés et qui sont remplies de laine de roche ou laine de verre, la même qui sert à isoler les bâtiments. Les vibrations de l'air pénètrent à l'intérieur par les trous et sont amorties par la laine de verre. Elles sont disposées parallèlement avec un espace entre elles, ou bien en bulbes concentriques (anneaux). Nous les vérifions, nous prenons des photos, nous utilisons un endoscope pour regarder l'état des plaques, si elles ne sont pas perforées, corrodées, abîmées ou décollées et pour voir si la laine de roche est toujours présente. Comme il y a un passage de fumée permanent, il y a effectivement un effet d'érosion sur ces matériaux.

Sous emprises phénoménales : les désordres

Les matériaux (béton et brique) qui composent la cheminée industrielle peuvent être, comme dans toute autre structure bâtie, sous l'emprise de phénomènes de vieillissement, d'usure et d'agressions.



©lerm. Carotte composée de deux bétons distincts, décollés.
Face externe (à gauche) et face interne (à droite) de la cheminée

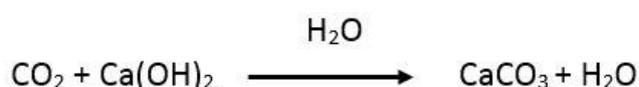
Les deux spécificités de la cheminée sont sa forme de tour, une structure en hauteur soumise aux pressions des vents, et sa fonction de conduit, qui met ses matériaux en contact et en interaction continus avec les substances de la fumée susceptibles de leur porter préjudice.

Parmi les phénomènes observés

Carbonatation

Comme son nom l'indique, la carbonatation met en jeu le dioxyde de carbone (CO₂), naturellement présent dans l'air et de façon accentuée dans les fumées selon leur nature. C'est un phénomène de vieillissement inhérent à la nature minérale des bétons. Le CO₂ entre en réaction avec certains composants du ciment (principalement la portlandite) et des carbonates de calcium se forment, provoquant une baisse du pH de 13,5 à environ 9.

En langage chimique, cette combinaison se formule ainsi :



L'humidité et la température sont des facteurs influençant la cinétique du phénomène de carbonatation de la pâte de ciment.



©setec LERM. Carbonatation d'un béton (zone non colorée). Test à la phénolphthaléine



©setec LERM. Carbonatation d'un béton (zone non colorée). Test à la phénolphthaléine

Conséquences : ce phénomène génère, lorsque le front de carbonatation atteint les armatures, leur dépassivation et la formation d'oxydes et d'hydroxydes de fer, induisant un gonflement et l'apparition de désordres (épaufures et fissures).

Agression par les ions chlorures

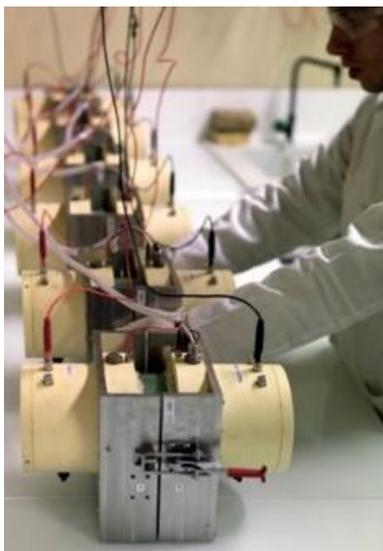
Le béton, matériau poreux, est perméable aux ions chlorures. La mobilité des ions chlorures dans le béton varie, certains se combinent et sont fixés (par les hydrates), d'autres sont libres.

Les ions chlorures peuvent provenir des fumées, mais également des embruns marins si la cheminée se trouve à proximité de la mer. Cependant, leur origine peut être intrinsèque au matériau de la cheminée. En effet, le ciment utilisé jusque dans les années 1960 peut contenir un adjuvant chloré (CaCl₂).

En langage chimique, la formation des chloroaluminates de calcium hydratés peut se produire ainsi :

(C₃A.CaCl₂.10H₂O ou sel de Friedel) à partir de l'aluminate tricalcique (C₃A)





©setec LERM. Mesure de diffusion des ions chlorures

Conséquences : Les ions chlorures traversent le béton d'enrobage, et en arrivant au niveau des armatures, génèrent des piqûres et la corrosion s'amorce. La propagation est plus ou moins longue selon la qualité du béton, l'humidité ... De manière globale, le seuil de la teneur en chlorures admis est de 0.4% (exprimé par rapport à la masse du ciment) dans le cas du béton armé, et de 0.2% dans le cas de la précontrainte (norme EN 206/CN). Au-delà de ces seuils, le risque de corrosion est élevé.

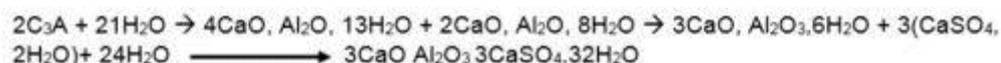
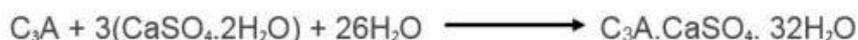
Attaque par les sulfates

Les sulfates proviennent des fumées mêmes de la cheminée (anhydride sulfureux SO₂ ou dioxyde de soufre) mais ils sont également présents sous forme gazeuse dans l'atmosphère, provenant des gaz de combustion (charbon, hydrocarbures divers).

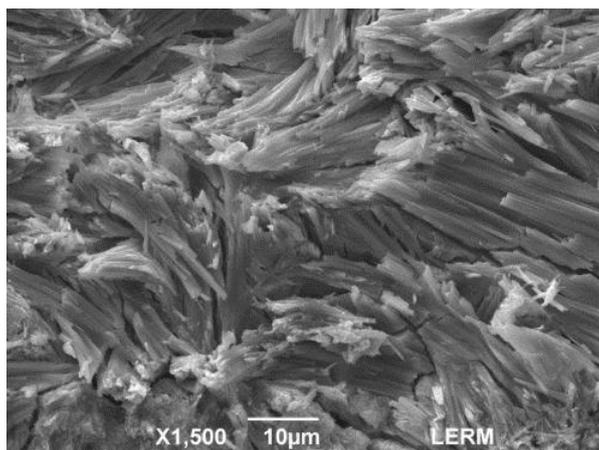
L'anhydride sulfureux SO₂ s'oxyde et se transforme en sulfate. En présence d'humidité et au contact de la matrice cimentaire, il décompose certains hydrates (portlandite principalement). Puis il donne naissance à des phases expansives, avec du calcium pour former du gypse, avec des aluminates pour former de l'ettringite qui peut être massive. Cet effet du dioxyde de soufre est à mettre en parallèle avec le phénomène bien connu des fumées issues des tuyaux d'échappement sur les périphériques.

L'effet des sulfates peut être minimisé si un ciment résistant aux sulfates est utilisé (norme NF P15-319).

En langage chimique, cette combinaison peut se formuler ainsi dans le cas de l'ettringite



(ettringite ou trisulfatealuminat tricalcique hydrate ou encore sel de Candlot).



©setec LERM. Ettringite massive

Conséquences : le béton est endommagé avec apparition de fissures, suite aux contraintes engendrées par l'expansion interne du matériau. La fissuration rend le matériau encore plus perméable. S'ensuivent des pertes de résistance mécanique.

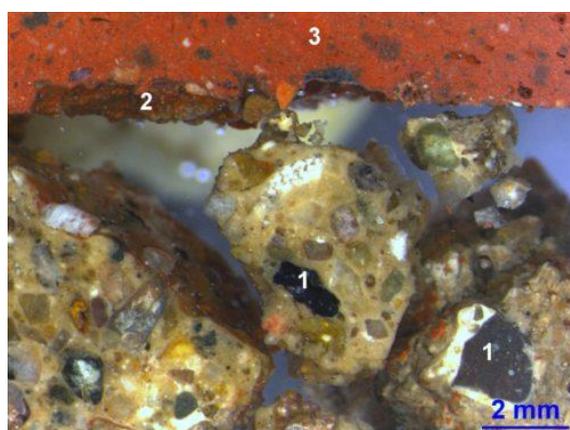
Attaque acide

Certains éléments présents dans les fumées peuvent produire des acides (acide sulfurique, dioxyde de carbone, acide chlorhydrique...), (H_2SO_4 , HCl ...), qui provoquent la dissolution des hydrates constitutifs de la matrice du béton, souvent accompagnée d'une lixiviation.

Conséquences : en plus d'une baisse du pH, il y aura une augmentation de la porosité (départ de matière) et une baisse de résistance mécanique et de rigidité.

En ce qui concerne les briques

Dans le cas du ciment des joints de maçonnerie des briques, les attaques chimiques engendrent des cristallisations secondaires qui peuvent se révéler expansives et délétères. La porosité augmente et la cohésion des mortiers de joint s'affaiblit. Les mortiers de jointoiment peuvent à la longue se morceler et se désagréger. Le contact avec les briques devient peu étroit et éventuellement disparaît par endroit.



©lerm. Interface brique et joint. Photographie à la loupe binoculaire. 1. mortier de joint morcelé. 2. surface de la brique. 3. brique

Les briques quant à elles, peuvent subir des attaques acides dues aux mêmes éléments évoqués plus haut et présenter des néoformations délétères (le plus souvent du gypse) engendrant généralement un écaillage.

Témoignage de Pascal Hiriart, MCC2I :

Les joints des briques : faits de sable et de chaux, avec ciment et même parfois sans ciment, ils redeviennent du sable avec le temps.



Cela provoque un phénomène de descellement des briques, qui engendre, en hauteur, des chutes de briques, et se manifeste plus bas par un écrasement des briques, d'où le fait que les cheminées **se penchent en prenant la forme de bananes.**

Tous ces effets amènent à une décohésion et une fragilisation de la structure.

Le mot de l'ingénieur matériaux (Alexa Bresson, lerm)

« Les relevés visuels sont importants, pour détecter les zones sensibles sur la cheminée. »

« La connaissance des vents est primordiale pour être en mesure de connaître les zones à risques de dégradations. Les fumées sont en effet repoussées par les vents dominants à ces endroits. Cela détermine où l'on doit effectuer les prélèvements de matériaux à analyser. »

« Les prélèvements sont en général à effectuer à différentes hauteurs et, selon la hauteur, à différentes épaisseurs. »

« Le diagnostic se doit d'être exhaustif parce qu'on ne sait pas a priori où et comment d'éventuelles dégradations (externes ou internes) peuvent s'être manifestées. »

« Des essais mécaniques peuvent être mis en œuvre pour mesurer la résistance résiduelle des matériaux. »

« Les résultats des analyses des matériaux portent sur des profondeurs d'altération, des niveaux de pollution par des agents agressifs, des teneurs en phases agressives, des faiblesses de cohésion...»

Patrimoniaire, monumentale, ornementale



La cheminée symbole de l'usine s'expose au sein du patrimoine industriel, comme le témoignage d'une activité industrielle dont on cherche à perpétuer le souvenir et comme élément architectural ornemental, vecteur de valorisation d'un bâti.



[Autour de la Grand Place - Vue aérienne.](#)

Collection particulière de Daniel Labbé, en ligne sur <http://www.bn-r.fr>

Dénommées "**beffrois du travail**" dans le département du Nord, elles sont les représentantes du monde laborieux et le pendant des beffrois des églises.

En 2008, il en a été recensé 320 dans ce département par [l'association Proscitec Patrimoines et Mémoires des Métiers](#).

La plus haute culmine à Tourcoing à 75 mètres ! En 2014, 15% d'entre elles aurait néanmoins disparu.

[Le Centre d'Etudes et de Recherches du Patrimoine industriel du Pays du Gier \(CERPI\)](#) s'est intéressé aux cheminées d'usines en briques rouges de cette vallée, dont la cheminée la plus haute d'Europe construite en briques, **la cheminée Marrel (108,7 mètres !)**. Soubassement présentant un aspect religieux, statue de saint, frises, alternances de disposition de briques, usage de la polychromie, autant d'ornementations qui parent certaines de ces cheminées.

A l'île de La Réunion, plusieurs pré-inventaires et études du patrimoine industriel se sont déroulés dès 1976 et jusqu'aux environs de 2003, au cours desquels a été observé un élément de cheminée qui semblerait propre à l'île, le chaînage horizontal et vertical en bois.

73 d'entre elles en France sont à ce jour classées ou inscrites comme monuments historiques (interrogation [Base Mérimée 07/06/2019](#)), **dont 34 à la Réunion** (cheminées d'usines sucrières).

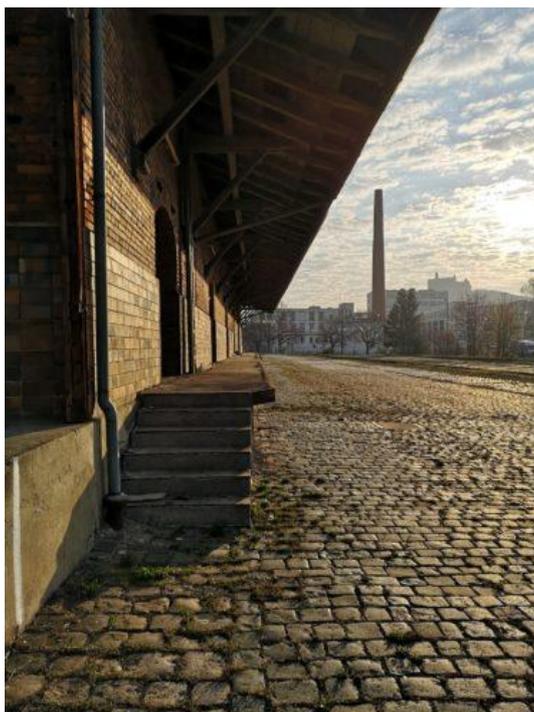
Sujets d'inventaires, les cheminées s'inscrivent dans un processus de reconnaissance de l'histoire industrielle d'un lieu, d'un temps, d'une société.





D'ouvrages en oeuvres...

La cheminée conservée et restaurée est parfois le lieu de manifestations culturelles alliant éléments patrimoniaux et artistiques. Elle accueille expositions, visites, débats, ateliers, et offre son parement aux chorégraphies et aux œuvres de plasticiens. Installations permanentes, signalétiques lumineuses en nocturne, œuvres plastiques visibles en journée...



De la marque de fabrique à l'image de marque...

Élément participatif d'un programme de valorisation, quand elle se mue en hall d'accueil d'entreprise, elle impressionne les visiteurs ; quand elle entre dans la composition architecturale de logements de standing, alors elle figure l'héritage du mythe industriel et populaire du quartier ; sinon, elle se dresse là, ornement monumental, au sein d'une médiathèque, d'un musée, d'archives, d'un pôle événementiel...

... bref, la cheminée d'usine s'accommode de bien des destinées diverses...

Témoignage de Pascal Hiriart, MCC2I

La maintenance pour la préservation patrimoniale

La ville de Mulhouse a fait une démarche patrimoniale sur de très belles cheminées anciennes, démarche gérée au niveau de l'agglomération. Des expertises assez globales et assez poussées ont été réalisées. Entre autres, des prélèvements d'échantillons de matériaux ont été analysés au laboratoire du lerm, pour estimer le vieillissement actuel des briques et des liants, de manière à pouvoir proposer à la ville de Mulhouse, une réflexion sur la pérennisation de ce patrimoine sur le long terme. Un programme de suivi des évolutions de position a également été mis en oeuvre avec un géomètre, en plaçant des capteurs sur les cheminées. Tous les 2 ans nous vérifions que les cheminées n'ont pas bougé, ce qui mettrait en évidence des affaiblissements de maçonnerie. Des analyses chimiques ont permis de savoir s'il était réaliste de prévoir un programme d'entretien à long terme ou si les ouvrages étaient en fin de vie, d'un point de vue de la chimie des matériaux.

En effet, la ville voulait à la fois mettre en évidence ces cheminées, les rendre belles et en faire des supports de communication. Elles sont louées à des artistes qui peuvent y accrocher des œuvres.

La ville de Troyes s'inscrit également dans ce type d'actions patrimoniales. La région comporte d'anciennes filatures et beaucoup de cheminées en briques. Il y a eu des programmes de réhabilitation, avec démontage de têtes de cheminées qui étaient devenues trop fragiles, et remontage à l'identique. Nous avons refait de belles têtes ouvragées pour garder l'apparence jolie de ces cheminées dans la ville.

Quelques particuliers aussi réalisent des travaux de ce type, mais cela peut être relativement coûteux. Si la cheminée est classée, des subventions sont possibles. Nous avons eu le cas d'un particulier en **Normandie**, qui possédait une cheminée non classée, qui a néanmoins réussi à obtenir un peu d'aides de la ville, de la région et du département, ce qui lui a permis d'effectuer les réparations.

Il existe de très belles cheminées dans toute la France. De mémoire, à **Pont en Mousson**, une chapelle est aménagée dans le pied d'une cheminée d'anciennes forges.

Un autre exemple de valorisation de ce patrimoine, pour lequel nous avons travaillé se trouve dans **le Marais à Paris**,

où existait une usine « la Société des cendres ». Des artisans devaient y travailler les métaux et l'or. Le bâtiment a été transformé en magasin, et l'ancienne cheminée en briques a été gardée. Elle est donc au milieu d'une cour. Elle n'est pas très haute, elle sort au-dessus des toits, elle ne doit pas faire plus de trente mètres de hauteur. Elle ne se voit pas de la rue, ou à peine, il faut vraiment lever les yeux pour l'entrevoir. Cependant le pied de la cheminée est conservé dans le magasin, et comme le toit du magasin est une verrière, le reste de la cheminée également est visible de l'intérieur. Elle a été peinte d'une couleur un peu flashy, homogène avec le reste du magasin, c'est réussi.

Sources

[L'inventaire à l'île de la Réunion](#) / Sylvie Réol, Erik Zeimert. *In Situ*, n°3, 2003.

[La cheminée d'usine entre « totem et tabou » : effacement versus appropriation d'un symbole du passé industriel](#) / Vincent Veschambre. *L'Homme & la Société*, n°192, 2014/2, pp. 49-68.

[Les cheminées d'usine : ces symboles fragiles](#) / Stéphanie Fasquelle. *La Voix du Nord*, 26 mars 2011.

La cheminée d'usine, emblème du travail des hommes et des femmes à Roubaix, dans le Nord, possible symbole identitaire du patrimoine industriel en Europe ? / EFAITH, la Fédération Européenne des Associations du Patrimoine Industriel et Technique, 2015. www.e-faith.org/documents/2015/ChemineesduNord.pdf

[Briqueteries de la Vallée du Gier, terre cuite et réfractaires : Bâtiments et cheminées en briques rouges](#) / CERPI, 2018.

Fin de vie de la cheminée : En consultation environnementale



Opter pour une stratégie de déconstruction ciblant un optimum technico-économique peut s'avérer pertinent et judicieux. Trois objectifs peuvent s'envisager :

- **Minimiser le volume de déchets non inertes ou dangereux**
- **Optimiser le volume de déchets inertes**
- **Identifier le recyclage et la valorisation de matériaux issus de la déconstruction.**

Et c'est à ce titre que la fin de vie des cheminées peut répondre à nos considérations actuelles en matière d'économie circulaire et de développement durable.

Cette stratégie participe et assure les bénéfices d'une contribution environnementale affirmée.

Elle est épaulée par une caractérisation correcte des matériaux, à la fois mécanique (résistance à la compression...) et environnementale.

La composition, les caractéristiques physiques et chimiques, l'examen de la profondeur de pollution du béton, la qualité du granulat de béton recyclé qu'il serait possible de produire ... sont autant de paramètres d'aide à la décision.

Des filières potentielles de valorisation peuvent être déterminées (remblaiement, granulat de béton recyclé...), y compris pour répondre éventuellement aux besoins du site même.

Mieux comprendre les matériaux constitutifs des cheminées afin d'évaluer leur potentiel, minimiser le coût de leur élimination et optimiser leur valorisation se révèle une étape incontournable de la déconstruction.



Mise en centre de stockage : ultime phase de la chaîne de traitement des déchets

La réglementation établit trois types de déchets selon les risques qu'ils présentent pour la santé humaine et l'environnement - dangereux, non dangereux, inertes -. Chacun d'entre eux sera mis en stockage dans des conditions qui lui sont spécifiques et adaptés. La mise en décharge intervient en aval de la chaîne de traitement des déchets après qu'ait été considérée la possibilité de leur réemploi, de leur recyclage ou de leur valorisation.

La caractérisation chimique de la mise en décharge

La caractérisation environnementale consiste à déterminer la présence et la quantité d'un certain nombre d'éléments chimiques et de composés organiques.

Ces éléments proviennent des matériaux de construction (béton, brique...), peintures, isolants, suies, éléments métalliques..., autant de constituants résiduels des différentes parties des cheminées (fût, gaine, sole, caniveau, regard...).

Les valeurs limites de ces éléments, définies réglementairement, permettent de définir la catégorie à laquelle ces déchets appartiennent.

Normes européennes :

Directive (UE) n°2018/850 du 30/05/18 modifiant la directive 1999/31/CE concernant la mise en décharge des déchets

Décision du Conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE (2003/33/CE)

Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives



©setec LERM. Cheminée. Déchets matériaux

Réemploi : toute opération pour laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

Recyclage : toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage.

Valorisation : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie.

Extrait de : Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, JO L du 22/11/2008, p.3-30.