

LE STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)

Décembre 2011

Le Structural Health Monitoring (SHM), ou contrôle santé intégré, consiste en la surveillance en temps réel ou à intervalles réguliers de l'intégrité d'une structure (détection de fissure ou de corrosion).

Les technologies, principalement issues du Contrôle Non Destructif (CND), intègrent ou collent à la structure des capteurs, permettant une surveillance suivie et reproductible pouvant s'effectuer éventuellement en service et sans nécessiter d'intervention humaine

PRINCIPE

Suivant les techniques d'analyse et de traitement des données, le SHM permet d'accéder à cinq niveaux d'information :

- détection de défaut,
- localisation de défaut,
- typologie du défaut,
- taille du défaut,
- anticipation de défaut.

Le traitement des données, et notamment l'anticipation d'apparition de défauts, repose particulièrement sur une bonne compréhension du comportement de la structure et sur la modélisation ou la simulation de ce comportement.

Ce traitement est donc fortement impacté par l'historique et la comparaison avec des cas connus de défaillances de structure.

L'implantation d'un SHM demande donc des compétences en :

- évaluation opérationnelle ;
- acquisition des données, normalisation et nettoyage ;
- mode de détection et condensation de l'information ;
- développement de modèles statistiques pour discriminer les modes détectés.

Suivant les technologies utilisées, et l'intégration dans la structure, les systèmes sont plus ou moins compacts et le problème de surcharge de la structure par les capteurs doit être considéré.

À l'heure actuelle, le SHM permet surtout de détecter les endroits et les moments où une inspection plus précise (par exemple par CND) doit être effectuée, la précision du diagnostic étant souvent plus limitée.

Enfin, le SHM peut être présenté comme un premier stade de structures dites « intelligentes », la surveillance de son état étant la première étape avant une réaction aux conditions extérieures.

Outre le fait de réduire les temps d'immobilisation d'une structure et d'apporter une sécurité supplémentaire, le SHM permet surtout de simplifier la maintenance d'une structure en l'intégrant et en l'automatisant.

L'apport du SHM est aussi économique. Il permet, par exemple, d'utiliser des structures plus fines, plus légères, sans sacrifier la sécurité grâce à la mise en place d'une maintenance préventive.

Le gain sur la maintenance permet donc d'envisager un retour sur investissement au-delà du gain en sécurité de la structure.

La première étape avant le SHM est le « Health and Usage Monitoring » qui consiste à mesurer les changements des conditions d'environnement et de prédire leur effet sur la structure.

Les défauts recherchés dépendent des matériaux utilisés. Les matériaux métalliques sont sensibles aux fissures et à la corrosion, tandis que les chocs et le délaminage sont très importants pour les composites.

De plus, certaines zones sont plus critiques que d'autres, par exemple les zones d'assemblage, avec de forts risques de fissuration.

TECHNOLOGIES

Dans sa première fonction de détection et de localisation des défauts, le SHM est très proche du Contrôle ou de l'Essai non Destructif (CND/END). C'est pourquoi on peut retrouver un grand nombre de techniques communes. Bien sûr, le suivi continu in situ empêche le recours à certaines techniques, soit à cause de la taille, soit à cause de l'impact sur l'environnement direct. Ainsi, on ne retrouvera pas de tomographie à rayon X, ni de thermographie infrarouge, qui nécessite des sources de chaleur très fortes (Lampes halogènes, lampes flash ou courants de Foucault).

On peut intégrer le capteur directement dans la structure (cas de fibres optiques dans des composites par exemple) ou bien attacher le capteur à la surface alors que la structure est utilisée (cas des CVM, Comparative Vacuum Monitor, voir page suivante).

Enfin, le degré d'intégration de SHM peut varier. On peut, par exemple, n'intégrer que le capteur pour faciliter le suivi régulier d'une structure en branchant directement le lecteur au moment souhaité.

Ces dispositifs de surveillance simplifiés permettent un suivi plus rapide et plus automatisé de la structure, sans la solliciter en continu et en mutualisant les équipements de lecture.

Des vis « intelligentes » avec capteur piézoélectrique intégré, telles que celles de Intellifast, peuvent ainsi être utilisées dans un programme de suivi régulier de serrage de points critiques, et simplifier la maintenance.

A noter qu'il existe aussi des capteurs passifs, pour lesquels le matériau n'est pas sollicité.

Par contre, nous ne retiendrons pas les cas où le système de contrôle est entièrement externalisé (CND au lieu de SHM, par exemple pour une surveillance ponctuelle d'arbres métalliques par ultrasons, avec représentation graphique).

La connaissance du comportement du matériau avant l'apparition de défauts est nécessaire, notamment pour les méthodes par ultrasons.

Mais en règle générale, les méthodes SHM permettent de connaître l'apparition de défauts en comparant des signaux dans le temps et en détectant des dérives significatives.

Une des grandes difficultés reste l'intégration des composants (sonde, source d'énergie, câblage, traitement de données).

Beaucoup d'efforts de recherche portent sur la mise à disposition de sondes autonomes sans fil. Dans ce cas, plusieurs architectures sont possibles.

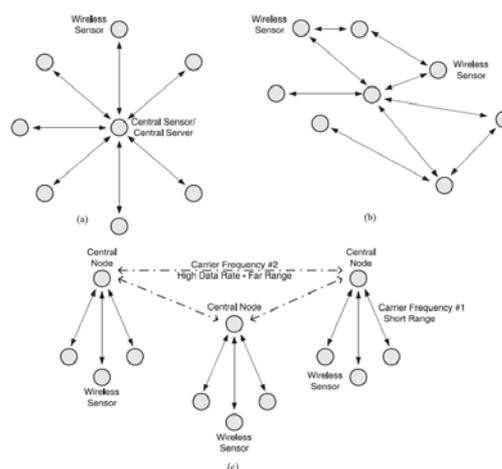


Fig. 1: réseaux type d'architecture sans fil - a) Star; b) peer-to-peer; (c) two-tier

Les systèmes peer-to-peer sont en fort développement. Ils permettent une plus faible consommation d'énergie pour la communication. Celle-ci est plus importante, mais elle se fait à courte distance. De plus, cette architecture s'affranchit des risques de défaillance d'un nœud de transfert de données.

Un des défis reste la durée de vie des capteurs. Des études comparatives ont montré qu'un capteur piézoélectrique est actuellement plus endurant que le substrat qu'il surveille ^[1].

Par contre, le problème apparaît pour les autres composants, et notamment les batteries pour les systèmes sans fil, ainsi que l'électronique, alors que le matériel peut être soumis à des conditions environnementales difficiles.

Ainsi, en cas de panne ou de maintenance du capteur, il faut bien souvent changer l'élément qui l'intègre.

Enfin, au-delà des technologies physiques, le traitement des données nécessite aussi un fort savoir-faire. De nombreux travaux de R&D y sont consacrés.

Impédance électromécanique et techniques électriques ou capacitives

Une technologie simple est le coupe-fil, contrôlé électriquement de part et d'autre de la zone à surveiller.

Vibrations

Cette technique repose sur l'analyse modale de vibrations, soit les vibrations libres, soit les vibrations forcées.

Les capteurs sont des accéléromètres ou des capteurs piézoélectriques.

Ces technologies sont par contre limitées pour localiser la dégradation ou la déformation et pour la caractériser. Mais elles sont peu coûteuses, compactes et très précises.

Comparative Vacuum Monitor (CVM)

Le Comparative Vacuum Monitor (CVM) est une technologie datant de 1994 fournissant uniquement une information locale sur l'apparition d'une fissure.

Le capteur, fabriqué à base de silicone, présente deux réseaux de petites galeries, l'un étant rempli d'air, l'autre dans lequel on fait le vide.

Le capteur est collé sur la surface contrôlée. Si une fissure apparaît, elle relie les deux réseaux de galeries et il n'est plus possible de faire le vide dans le deuxième réseau uniquement.

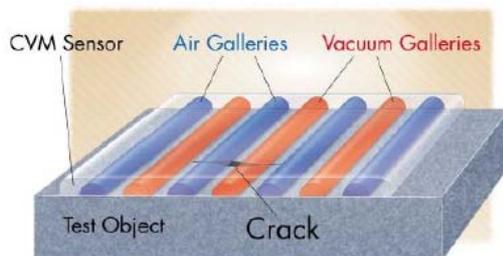


Fig. 2 : schéma de principe d'un capteur CVM

La surface d'étude est définie et limitée par la taille du capteur car elle ne permet de détecter que les défauts de surface.

Par contre le CVM présente l'intérêt d'être très souple, applicable à des surfaces courbes, et surtout à n'importe quelle surface.

La technologie est donc appliquée à des zones difficiles d'accès ou à des points critiques. Elle est notamment utilisée en aéronautique pour le contrôle des points de rivetage. On peut aussi l'utiliser après détection d'un défaut local dont on veut mesurer précisément l'évolution dans le temps.

Courants de Foucault

L'utilisation de courants de Foucault est limitée aux matériaux conducteurs. Les courants de Foucault sont des courants induits par la variation d'un champ magnétique, qui circulent localement en fonction de la forme et du matériau de la pièce (conductivité, perméabilité magnétique).

La présence de défauts à la surface perturbe la circulation des courants de Foucault, donc l'impédance apparente de la bobine qui crée le champ magnétique.

Cette technique ne permet que des mesures locales, au voisinage du capteur.

Elle est bien adaptée aux surfaces revêtues. L'interprétation des données, selon la conductivité et la perméabilité magnétique du matériau, peut être difficile.

Antennes micro-ondes

Des antennes micro-ondes miniaturisées intégrées dans la structure permettent de détecter la présence et la progression de moisissures. La méthode peut être utilisée pour suivre les structures composites sandwich.

Ultrasons

Les ondes ultrasonores utilisent des fréquences supérieures à 20kHz, généralement via des capteurs et des transducteurs piézoélectriques. Ces systèmes nécessitent d'adapter l'impédance (gel, etc.), sauf dans le cas d'utilisation d'EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducer) pour des plaques conductrices. L'inconvénient : être près de la surface.

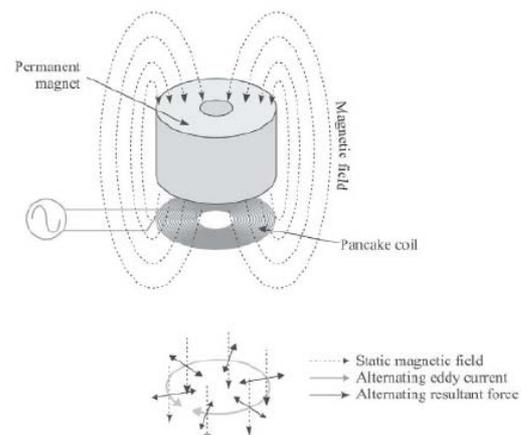


Fig. 3 : représentation d'EMAT

La taille de défaut détectable est théoriquement de l'ordre de la longueur d'onde. Les systèmes haute fréquence sont donc plus précis mais pénètrent moins profondément dans les matériaux.

Les techniques ultrasonores font appel soit à un mode pulse (écho) qui mesure à partir d'un seul point les ondes réfléchies dans le matériau (et qui ne nécessite donc l'accès qu'à une seule surface du matériau), soit à une méthode Pitch-catch qui mesure la transmission entre 2 sondes.

La détection est meilleure lorsque les défauts sont perpendiculaires à la propagation des ultrasons.

Les US permettent surtout :

- de détecter les défauts à la fois en surface et en volume ;
- une application sur une large gamme de matériaux, dont les composites ;
- une utilisation simple, avec une représentation par imagerie possible pour la maintenance ;
- un coût modéré.

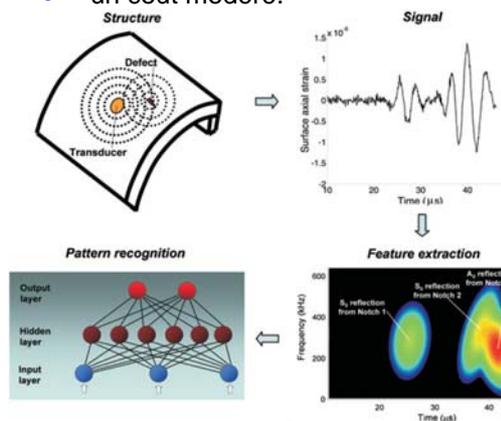


fig.4 : exemple d'utilisation d'ultrasons [2]

Contrôle par ondes guidées

On distingue les émissions acoustiques (systèmes passifs) des systèmes actifs, où un transducteur permet de générer les ondes (ondes de Lamb).

ÉMISSION ACOUSTIQUE

L'émission acoustique consiste en la mesure d'une onde, généralement ultrasonore, émise par la création ou la propagation d'un défaut (fissure, déformation, dislocation, changement de phase). Contrairement aux autres méthodes, c'est une méthode passive, où on ne sollicite pas la pièce. Elle est très sensible pour détecter des défauts lorsque la pièce est sollicitée. Elle permet de vérifier si ces défauts se propagent.

L'inconvénient vient du bruit de l'environnement d'utilisation, ce qui nécessite une forte expertise sur le traitement du signal, et de la difficulté à quantifier les défauts.

ONDES GUIDÉES

On constate un recours de plus en plus courant aux ondes de Lamb, ondes élastiques qui se propagent dans des structures de faible épaisseur (plaques) sur de très grandes distances.

Cette technique permet de n'utiliser que deux transducteurs pour des pièces très grandes, là où des ondes US conventionnelles nécessiteraient de répartir des transducteurs à plusieurs endroits.

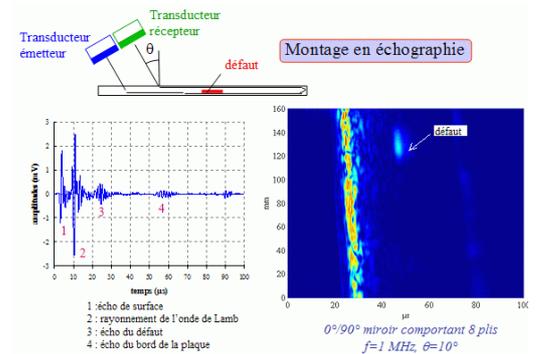


Fig. 5 : exemple d'utilisation d'ondes de Lamb. Les transducteurs peuvent aussi être de part et d'autre de la pièce (mesure en transmission, et non en échographie) [3]

Fibre optique

Des fibres optiques peuvent être intégrées dans le matériau, notamment pour les composites : leur faible poids et leur faible diamètre permet de ne pas perturber la structure du composite.

Les fibres optiques permettent de mesurer de nombreuses grandeurs physiques (déformation, température, humidité, pression...). Elles présentent l'avantage d'être facilement intégrées, d'être insensibles aux interférences électromagnétiques, et de pouvoir fournir de nombreuses données, avec plusieurs capteurs sur une même fibre.

Les technologies utilisées peuvent différer par le montage : mesure d'amplitude, interférométrie ou réseau de Bragg. La mesure à réseau de Bragg est actuellement la plus utilisée. Elle repose sur des fibres optiques spécifiques, qui contiennent de petites sections à l'intérieur du câble où le cœur de la fibre a été gravé avec une série de lignes également espacées qui agissent comme des miroirs

partiellement réfléchissants (réseau de Bragg). Ainsi seule une bande très étroite de la longueur d'onde se reflète jusqu'à la source optique. Et une déformation entraîne un décalage de la longueur d'onde réfléchie.

Cette technologie à base de fibre optique est beaucoup utilisée dans la surveillance des ouvrages d'art et des installations nucléaires, où elle permet par exemple de détecter et localiser des fluctuations de température en continu.

CAS D'UTILISATION

Les technologies SHM sont, actuellement, principalement utilisées pour des ouvrages d'art et des structures de génie civil (bâtiments ou infrastructures tels que des rails ou des ponts).

Près de 60% des applications de SHM dans le monde concernent des ponts.

En France, l'utilisation du SHM reste balbutiante. On peut citer par exemple la surveillance en continu du viaduc de Millau.

EDF surveille ainsi les structures critiques (centrales nucléaires, ponts, barrages, conduites forcées, digues...).

Les technologies les plus utilisées sont les ultrasons et les ondes de Lamb, suivies des fibres optiques et des CVM.

Globalement, il faut remarquer que l'utilisation de SHM est émergente.

Par exemple, si le SHM est beaucoup étudié en aéronautique, il n'est pour l'instant intégré dans aucune norme.

Aéronautique

Boeing travaille sur l'intégration de SHM notamment pour diminuer les coûts de maintenance et pour utiliser des avions plus légers (en diminuant les marges sur les structures).

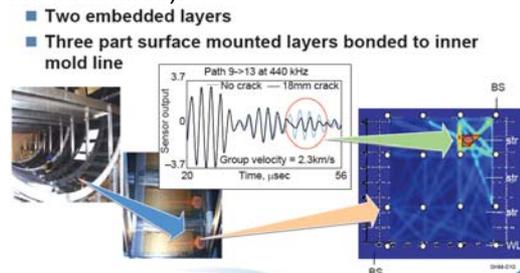


Fig. 6 : Système testé par Boeing

Pour les mêmes raisons, Airbus travaille aussi sur l'intégration de SHM, en complément des CND et des contrôles visuels. L'utilisation de SHM permet de surveiller en plus des dégâts de structure :

- les charges sur les structures ;
- les conditions environnementales et conditions de vol ;
- les paramètres de production.

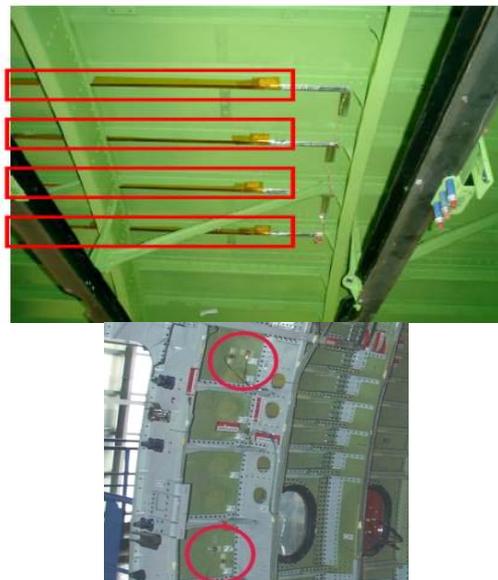


Fig. 7 : Systèmes intégrés par Airbus

ULTRASONS

Acellent Technologies est un acteur des SHM très actif dans le développement de la technologie pour l'aéronautique.

Acellent a été créée par des chercheurs de l'université américaine de Stanford.

Cette société propose des capteurs ultrasonores, les Smart Layer.

Ils se présentent sous la forme d'un film sur lequel sont collés les capteurs piézoélectriques. Ce film peut être inséré par exemple au sein même de la structure composite entre 2 plis de tissus.

Ces capteurs peuvent aussi se coller à la surface des structures métalliques (ondes de Lamb).



Fig.8 : exemple d'utilisation de SMART Layer sur un réservoir en composite^[4]

Acellent a aussi développé un « SMART SUITCASE », valise qui comprend le matériel nécessaire à l'installation d'un système d'ondes guidées (générateur haute fréquence, acquisition de données, amplificateur et traitement du signal). Ce « SMART SUITCASE » permet une installation rapide sur le terrain pour relever des informations de capteurs sans fils.

Ce système a, par exemple, été rendu compatible avec un ordinateur central de maintenance (Central Maintenance Computer, CMC, développé par Honeywell Aerospace), pour une utilisation en IVHM (Integrated Vehicle Health Management) en aéronautique.

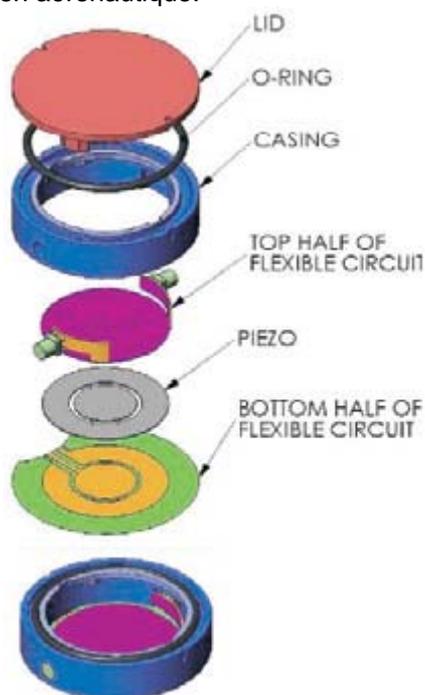


Fig.9: architecture de capteur fourni par Acellent [5]

La société française M2M commercialise aussi des films équipés de capteurs ultrasonores, ainsi que des capteurs par courant de Foucault.

FIBRES OPTIQUES

La compagnie Fiberpro de Donam Systems (Corée) a réalisé des tests en soufflerie sur des modèles d'ailes de Boeing pour montrer la viabilité de systèmes SHM par fibres optiques selon la méthode des réseaux de Bragg.



Fig. 10 : schéma du test de Fiberpro [6]

CVM

La technologie a été utilisée pour la première fois en 2002 sur un hélicoptère de l'US Navy, et en 2003 sur des avions civils (DC-9 et A320).

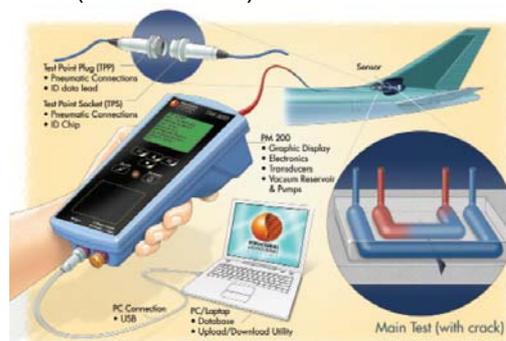


Fig. 11 : Illustration d'utilisation d'un système CVM [7]

La société australienne SMS (Structural Monitoring Systems) commercialise des systèmes CVM.

MODÉLISATION

Le CEA et EADS travaillent sur la modélisation des ondes guidées. Ils se sont notamment concentrés sur les structures aéronautiques de type plaque (d'où l'utilisation d'ondes guidées) en matériaux composites ou aluminium, avec

des raidisseurs, qui diffractent les ondes guidées. L'impact du poids des capteurs sur la structure a aussi été étudié.

Les structures aéronautiques de type plaque sont fabriquées en matériaux composites ou en aluminium et sont généralement raidies. Les ondes guidées vont être diffractées par le raidisseur ou la série de raidisseurs.

Le but est notamment d'optimiser le positionnement des capteurs afin d'examiner l'ensemble de la structure tout en recueillant des signaux d'amplitude assez forte pour que l'interprétation soit fiable.

Énergie

Beaucoup d'applications potentielles dans l'énergie (hors ouvrages d'art) concernent les éoliennes, car dans ces équipements les systèmes critiques sont difficiles d'accès.

Le Smart Embedded Sensor System (SESS) est un programme de recherche applicatif financé par le programme EUROSTARS.

Le but du programme est de développer des solutions de SHM pour les pales d'éolienne.

La solution proposée est un réseau de capteurs piézoélectriques intégrés dans les pales d'éolienne, pour détecter et localiser précocement les fissures et/ou les dégâts critiques. Le but est de proposer à la fois un système passif et un système actif.

Le projet a été lancé en janvier 2009, avec une phase de démonstration à l'été 2010.

Autres secteurs

Des SMART LAYERS ont été développés pour des applications automobiles.

Les systèmes ont été optimisés pour s'adapter aux formes complexes automobiles.

Des preuves de concept utilisant ce système ont été réalisées par BMW dans des échantillons en fibre de carbone, pour des applications de détection d'impact^[8].

Sources :

- [1] Review of guided-wave SHM, Doane and giurgiutiu (2005),
- [2] Review of guided-wave SHM, Ajay Raghavan and Carlos E. S. Cesnik
- [3] Catherine Potel, LAUM
- [4] Acellent
- [5] Acellent/review of guided-wave SHM
- [6] Smart Materials and Structures, vol. 12, In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system
- [7] Compositesworld
- [8] Panajott, 2001
 - The Shock and Vibration Digest 2006; 38; 91; A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring
 - Engineering Transactions, Structural Health Monitoring
 - Airbus, Holger Speckmann, "SHM: History and Future"
 - Boeing, Arne Lewis, "Structural Health Management/monitoring"
 - Contrôle Essais Mesures; 'en route pour l'autodiagnostic'
 - Onera, thèse de Bastien Chapuis, Contrôle Santé Intégré par méthode ultrasonore des réparations composites collées sur des structures métalliques
 - Conférences COFREND 2011

Note de veille rédigée par Eric Naudin et Olivier Fallou, Erdyn Consultants

Ensemble pour les entreprises de la mécanique



Département
Veille Technologique et Stratégique

Contact

Pierre-Alain Hacq
Cetim - B.P. 80067
60304 Senlis Cedex
Tél. : 03 44 67 32 06
pierre-alain.hacq@cetim.fr



Retrouvez nos notes de veille dans la Mécathèque du site Cetim :
<http://www.cetim.fr/cetim/fr/Mecattheque>



Consultez le guide des Technologies prioritaires 2015 sur le site Cetim :
<http://www.cetim.fr/cetim/fr/Mon-espace> - Cliquez sur :