

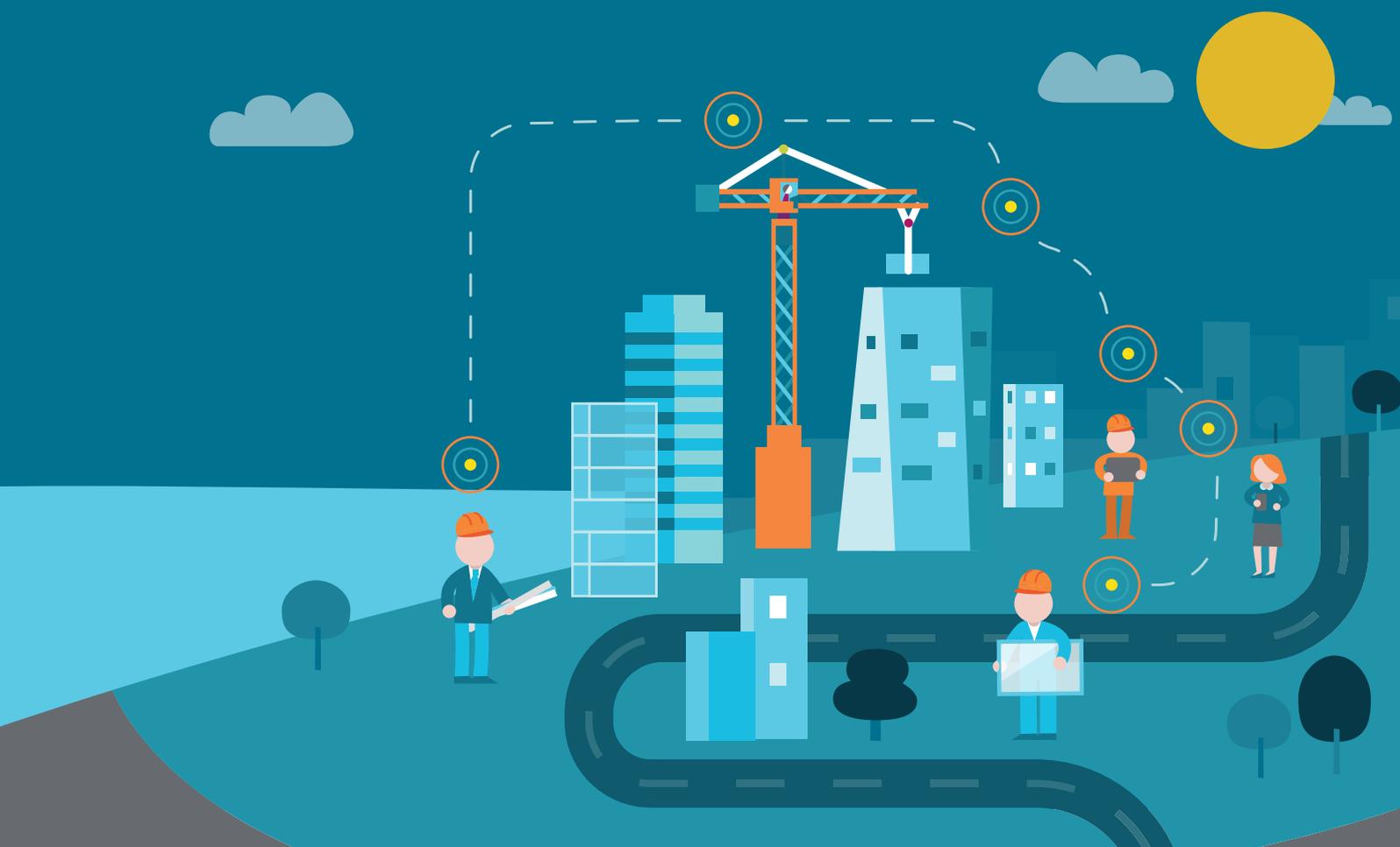


# Focus

#21 - Novembre 2016

## Nouvelles technologies au service de la construction : BIM, instrumentation, nanomatériaux

Nécessité ou effet de mode ?





# SOMMAIRE

## 5 | INTRODUCTION

*Jean Tuccella, Directeur Département Décennale SCOR Global P&C*

## 6 | LE BIM : BUILDING INFORMATION MODELLING

*Pierre Mit, Président de Mediaconstruct*

6 | L'origine du BIM

9 | Les orientations prioritaires du Plan Transition Numérique

9 | La normalisation du BIM

11 | En conclusion

## 12 | LE MONITORING PAR CORDE OPTIQUE AU SERVICE DES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION

*Bernard Hodac, Président Société Osmos*

12 | Le cadre juridique et réglementaire

13 | L'utilisation des instruments par corde optique

14 | Les contextes d'intervention

14 | Un exemple qui parle

15 | La prévention

15 | Une technologie française

15 | Des champs d'applications sans limite

16 | Conclusion

## 17 | LES NANOMATERIAUX

*Simon Clavaguera, Chef de projet à la Plateforme NanoSécurité, CEA Grenoble*

18 | Une grande diversité de nanoparticules

18 | Propriétés et formes des nanomatériaux

21 | Utilisation des nanomatériaux

22 | Quelques projets de recherche sur les nanomatériaux et le secteur de la construction

24 | Conclusion



# INTRODUCTION

**À l'occasion de cette Matinée Décennale de SCOR, nous avons choisi de célébrer le passé, en l'occurrence le 10<sup>ème</sup> anniversaire de cette rencontre, en nous tournant vers l'avenir. Les nouvelles technologies sont en train de révolutionner le monde de la construction et il nous paraît primordial de suivre leurs applications dans le futur.**

Parmi ces nouvelles technologies, nous avons identifié le Building Information Modelling (BIM) ou l'utilisation de la modélisation de l'information sur un bâtiment depuis sa conception jusqu'à son exploitation que Monsieur Pierre Mit, président de Mediaconstruct, nous expliquera.

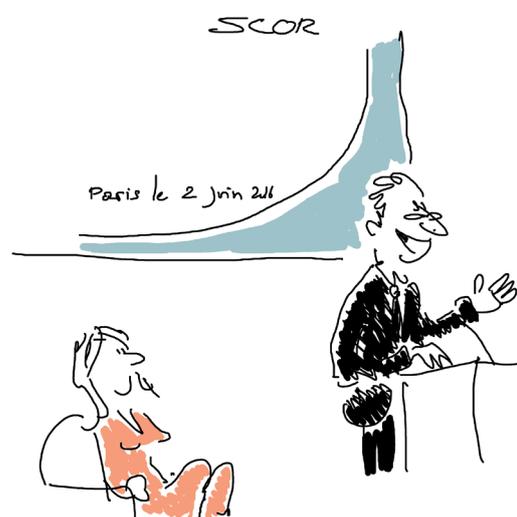
Une seconde intervention par Monsieur Bernard Hodac, président de la société OSMOS, nous fera découvrir l'instrumentation des ouvrages par corde optique, technique permettant de suivre le comportement d'un ouvrage et d'en détecter éventuellement les anomalies.

Enfin Monsieur Simon Clavaguera, chef de projet à la Plateforme NanoSécurité du CEA de Grenoble, nous exposera les technologies relatives aux nanomatériaux.

L'objectif de cette matinée décennale est tout d'abord de découvrir ces nouvelles technologies mais également de savoir si elles ne sont qu'un effet de mode et amenées à disparaître ou, si au contraire, elles nous seront de plus en plus nécessaires.

Si nous concluons à leur nécessité et à leur développement inéluctable, il sera intéressant de s'interroger sur les améliorations qu'elles apportent en matière de normalisation des risques, en matière d'amélioration des contrôles dans la construction, mais il faudra également se pencher sur les risques nouveaux qu'elles engendrent. Je n'invente rien en disant cela, c'est la réaction normale de tout assureur face à l'innovation. Quels sont les bénéfices que l'on peut en tirer en termes de sinistralité, quels sont les risques nouveaux engendrés ?

Nous espérons que cette publication vous apportera quelques éléments de réponse à ces questions.



## JEAN TUCCELLA

Directeur Département Décennale, SCOR Global P&C

[jtuccella@scor.com](mailto:jtuccella@scor.com)

Diplômé de l'Institut National des Sciences Appliquées, Jean Tuccella a travaillé pour une filiale du groupe Eiffage pendant plus de 10 ans comme responsable d'un centre de travaux.

Il a rejoint SCOR en 1995 comme souscripteur pour l'assurance construction. Après trois ans, il a intégré le département engineering avant de revenir en 2001 dans l'équipe décennale pour en prendre la direction, fonction qu'il occupe toujours à ce jour.

# LE BIM : BUILDING INFORMATION MODELLING



**PIERRE MIT**  
Président de Mediaconstruct

Économiste de la construction et « Past President » de l'Untec qu'il a dirigée pendant 6 ans, Pierre MIT a été élu le 30 novembre 2015 Président de Mediaconstruct. Cette association, chapitre français de BuildingSMART International, assure la promotion du Building Information Model (BIM) en France et défend l'openBIM. Après avoir co-piloté le rapport « BIM et gestion du patrimoine » du Plan Bâtiment Durable, Pierre MIT est fortement impliqué dans le Plan de Transition Numérique du Bâtiment en tant que personnalité qualifiée et participe à l'EU BIM Task Group.

## Introduction

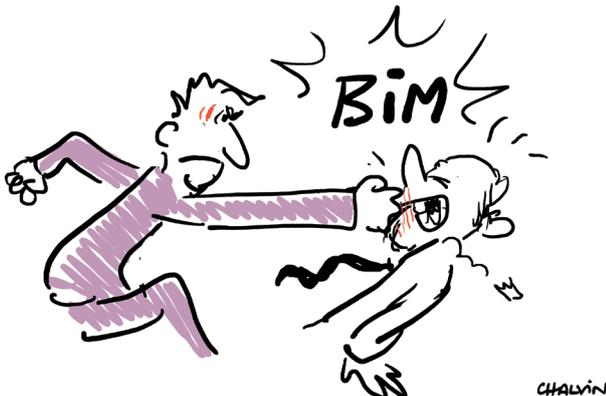
En tant que pionnier du BIM, je défends depuis 10 ans les mérites de cette technologie. Le but de mon article ici sera de retracer d'où nous venons et de voir ce qui se passe chez nos

voisins, parce que le BIM n'est pas français, ni européen, mais bien une technologie mondiale.

## L'origine du BIM

Dans le monde du BIM, nous constatons que certains sont partis en train et d'autres en TGV comme les multinationales disposant de leur propre département de Recherche & Développement (R&D).

### RETOUR D'EXPÉRIENCE



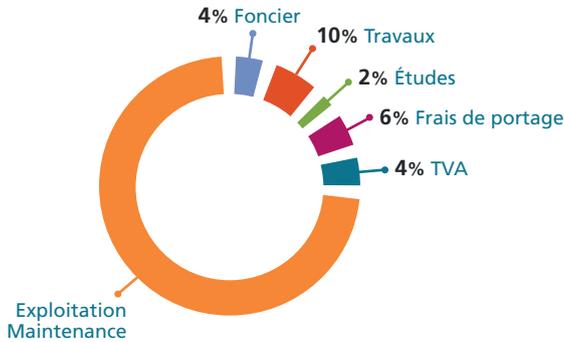
Aujourd'hui ces acteurs, même s'ils ont parfois démarré un peu vite, ont contribué à faire avancer les choses. Pour avoir une information fiable, il faut avoir une multitude de retours d'expérience qui soient comparables les uns aux autres, ceux qui commencent seulement, en profitent déjà.

Le monde du bâtiment est compliqué non seulement en raison de la multitude d'acteurs, mais également parce que c'est un sujet qui se traite sur le long terme. Entre l'idée de faire un bâtiment, l'étude de faisabilité, et sa déconstruction, il peut se passer un certain nombre d'années. Beaucoup de personnes vont travailler sur le même bâtiment, ce qui complique les échanges et peut parfois coûter extrêmement cher.

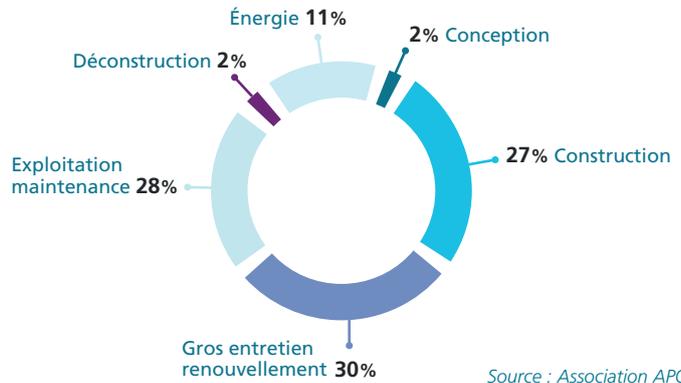
Comment peut-on dépenser l'argent d'une façon plus intelligente, sachant qu'on aura besoin d'une information qui soit pérenne sur le cycle de vie d'un bâtiment ? (cf. figure 1).

**FIGURE 1 :**  
CYCLE DE VIE D'UN BÂTIMENT ET RÉPARTITION DU COÛT GLOBAL D'UN BÂTIMENT SUR 50 ANS :  
CAS D'UN LOGEMENT ET D'UN LYCÉE

Le véritable coût du logement sur son cycle de vie



Répartition du coût global d'un bâtiment sur cinquante ans (exemple d'un lycée)



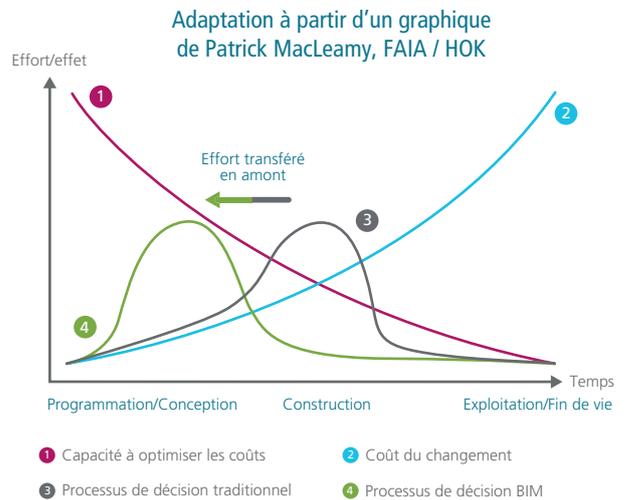
Source : Association APOGEE

« PLUS TÔT NOUS COMMENÇONS À RÉFLÉCHIR À LA RÉOLUTION D'UN PROBLÈME, MOINS CELA COÛTE À LE RÉSOUDRE. »

En effet si on avait réfléchi en amont à la manière de mettre tout en place, la résolution du problème coûterait beaucoup moins cher. La figure 2 montre que l'anticipation peut être une réelle source d'économie. Dans le monde du bâtiment les plans ont toujours existé, les premiers étaient sur des papyrus. Puis la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et les Dessins Assistés par Ordinateur (DAO) sont arrivés, on y retrouve les mêmes informations que sur les papyrus.

Puis les images 3D ont fait leur apparition permettant de voir un bâtiment dans son site, mais sans améliorer les échanges d'informations nécessaires entre la multitude des acteurs qui travaillent autour d'un bâtiment.

**FIGURE 2 :**  
L'ANTICIPATION EST SOURCE D'ÉCONOMIE



Source : BSI

ANTICIPER POUR ÉCONOMISER



Dans les industries automobiles, aéronautiques et en construction navale le travail est fait en série. Or, dans le bâtiment on ne fait que du prototype. Les acteurs dans la construction de série ont réfléchi à la manière de communiquer et d'échanger plus facilement entre différents acteurs dans différents pays.

L'idée est de créer une maquette virtuelle composée des éléments qui constituent un bâtiment. Sur chaque élément on peut récupérer des informations qui lui sont propres, avoir une traçabilité de l'information et aussi une connexion entre les ouvrages.



Les formats Industry Foundation Classes (IFC) permettent de tout classer de la même façon. Le fait d'avoir tous ces éléments réunis d'une façon cohérente permet de gérer le temps et le budget du projet ainsi que la maintenance du patrimoine.

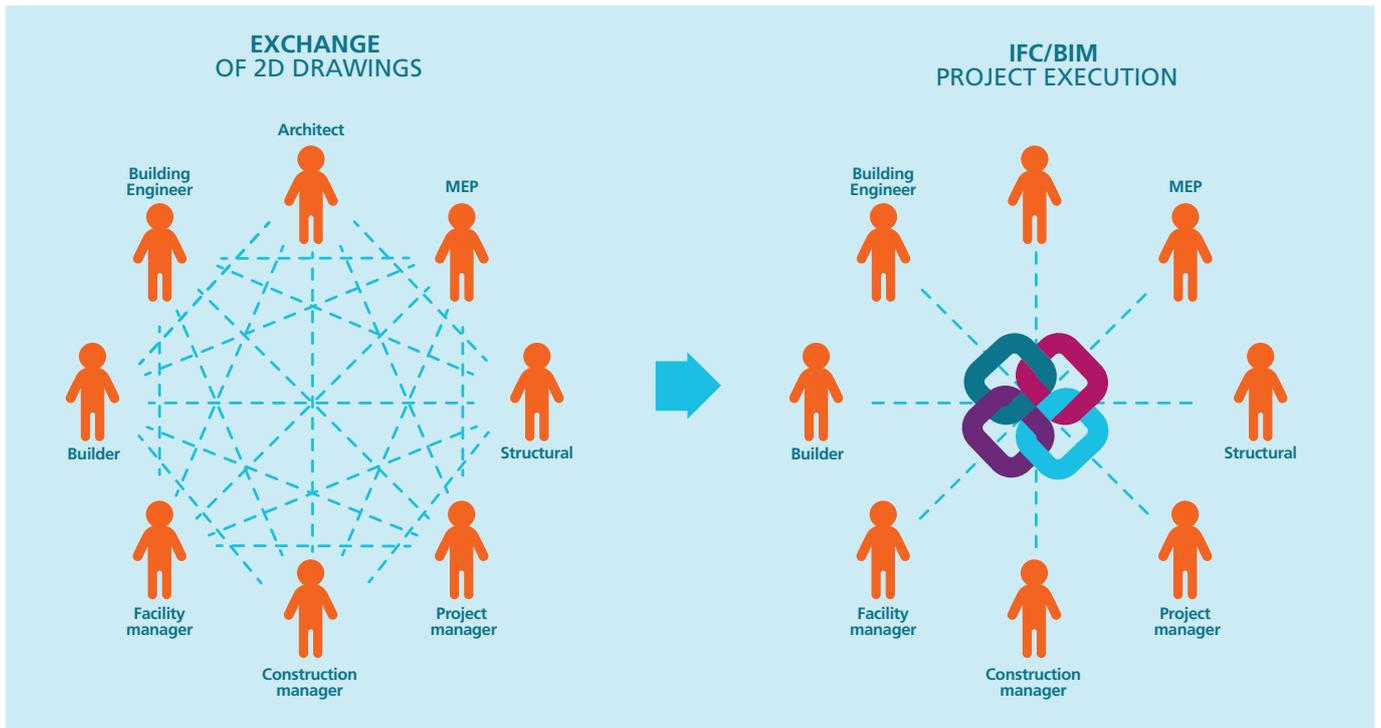
Pour qu'un assureur puisse assurer un immeuble, il est important qu'il puisse avoir toutes les informations pour évaluer cet immeuble et établir le montant de la prime.

Si toutes les informations sont déjà bien organisées et centralisées, il perdra moins de temps dans la récupération de celles-ci. Le but étant que tous les acteurs travaillent ensemble d'une façon collaborative, mais chacun doit garder sa responsabilité (cf. figure 3). Avec les outils offerts par ces nouvelles technologies, certaines personnes souhaitent tout prendre en main mais sont-elles assurées pour le faire alors qu'elles n'ont pas les compétences requises ? Il est souhaitable que chaque acteur fasse son métier et garde ses responsabilités, le dialogue s'établit alors plus facilement.

Le BIM va obliger les acteurs à rentrer dans une démarche de qualité et de traçabilité. C'est pour cela qu'on parle du management de l'information. L'utilisation du BIM nécessite une extrême rigueur avec une validation régulière à chaque phase et une saisie et une vérification rigoureuse des informations. La mission de synthèse doit être faite au fur et à mesure que le chantier avance.

La France s'est beaucoup préoccupée du numérique dans divers secteurs d'activité, et le bâtiment commence juste à bouger grâce notamment au fond de compensation d'assurance construction qui a débloqué 20 millions d'Euros en 2014 pour mettre en place un Plan Transition Numérique dans le bâtiment.

FIGURE 3 : LE BIM ENSEMBLE : L'INTEROPÉRABILITÉ



Source : IFC/BIM Project Execution

## Les orientations prioritaires du Plan Transition Numérique

Le Plan Transition Numérique est organisé autour de trois axes :

- > **Axe 1** : expérimenter, capitaliser, convaincre pour donner envie aux acteurs de s'approprier le numérique ; pour cela il faut diffuser les retours d'expérience.
- > **Axe 2** : accompagner la montée en compétence numérique des professionnels du bâtiment et impulser le développement d'outils adaptés à toutes les étapes des projets et en accordant une attention toute particulière aux solutions BIM pour les petits projets. Il est important également d'expliquer que la politique de la France envisage le BIM pour tous, quels que soient les acteurs, quels que soient les chantiers. La France est la seule au niveau mondial qui a eu cette initiative.

- > **Axe 3** : développer un écosystème numérique de confiance en encourageant les travaux de normalisation dans le but de faciliter l'interopérabilité des logiciels et un accès standardisé aux informations sur les matériaux, produits, équipements et systèmes. Afin d'assurer des solutions pérennes, il faut positionner et mettre en place un maximum de règles.

**Premiers retours d'expérience** : pour obtenir les premiers retours d'expérience, l'Agence Qualité Construction (AQC) a décidé de prendre un panel de bâtiments neufs et de bâtiments réhabilités. Même si les acteurs concernés étaient pleins de bonne volonté, la méconnaissance des outils, le manque de coordination et le franchissement d'autorité ont été de vrais obstacles au bon fonctionnement. Pour avancer, il était donc nécessaire de mieux coordonner, organiser et normaliser le BIM.

## La normalisation du BIM

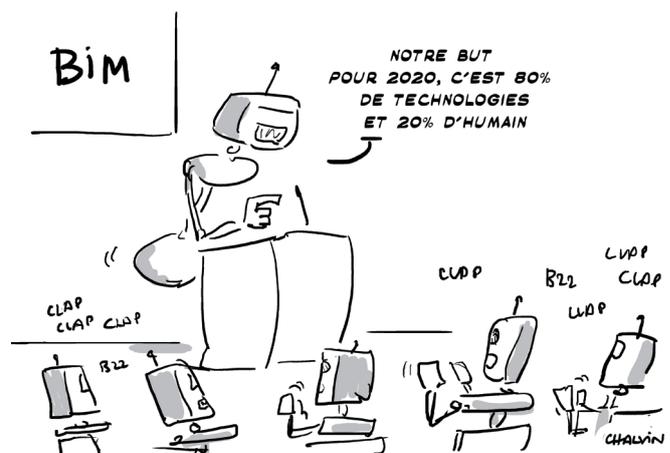
Au niveau mondial nous avons BuildingSMART International qui a donc créé et développé les IFC. Son objectif était que tous les acteurs de la filière travaillent, sans ressaisie, à partir d'un même ensemble de données et puissent passer d'un environnement applicatif à un autre en s'appuyant sur un langage informatique partagé et normé dont elle est garante. Depuis seulement un an, l'Europe a décidé de faire de la normalisation du BIM une « task » force européenne .

Le format IFC est ce fameux format d'échange mondial. En 2013 le format IFC 2x3 TC 1 a été normé par l'ISO. Aujourd'hui notre souhait est de le faire descendre au niveau de l'Europe.

Après avoir été d'accord sur la formation, la définition et l'organisation des données, il s'agit maintenant d'organiser les données qui sont à l'intérieur et qui se cachent derrière chaque produit. La maquette est comme une armoire où vous avez bien rangé vos affaires. Vous pouvez mettre plein de choses, mais si vous ne la gardez pas bien rangée et que vous ne la mettez pas à jour, vous aurez un magnifique outil qui ne servira strictement à rien.

Aujourd'hui, des équipes notamment françaises travaillent sur le recensement de tout ce dont on a besoin comme caractéristique derrière chaque objet et travaillent aussi sur ce qu'on appelle l'objet générique.

« ENSUITE, IL FAUT REPRÉSENTER LES OBJETS. LE BIM C'EST 20 % DE TECHNOLOGIES ET 80 % D'HUMAIN. »



## Le BIM va permettre le dialogue entre tous les acteurs

### Comment tous ces acteurs vont-ils communiquer ?

Le BIM est un peu l'Espéranto du monde de la construction parce qu'il doit permettre de mieux échanger et collaborer. Aujourd'hui, il y a 66 références internationales.

Aujourd'hui un guide méthodologique de rédaction a été mis en place pour une convention de projet en BIM<sup>1</sup> (cf. figure 4).

La question est de savoir comment les acteurs à l'intérieur d'une opération vont travailler en utilisant cette technologie en fonction des outils et de leur savoir-faire.

**FIGURE 4 :**  
**GUIDE DE RÉDACTION DE CONVENTION BIM**



Source : Mediaconstruct

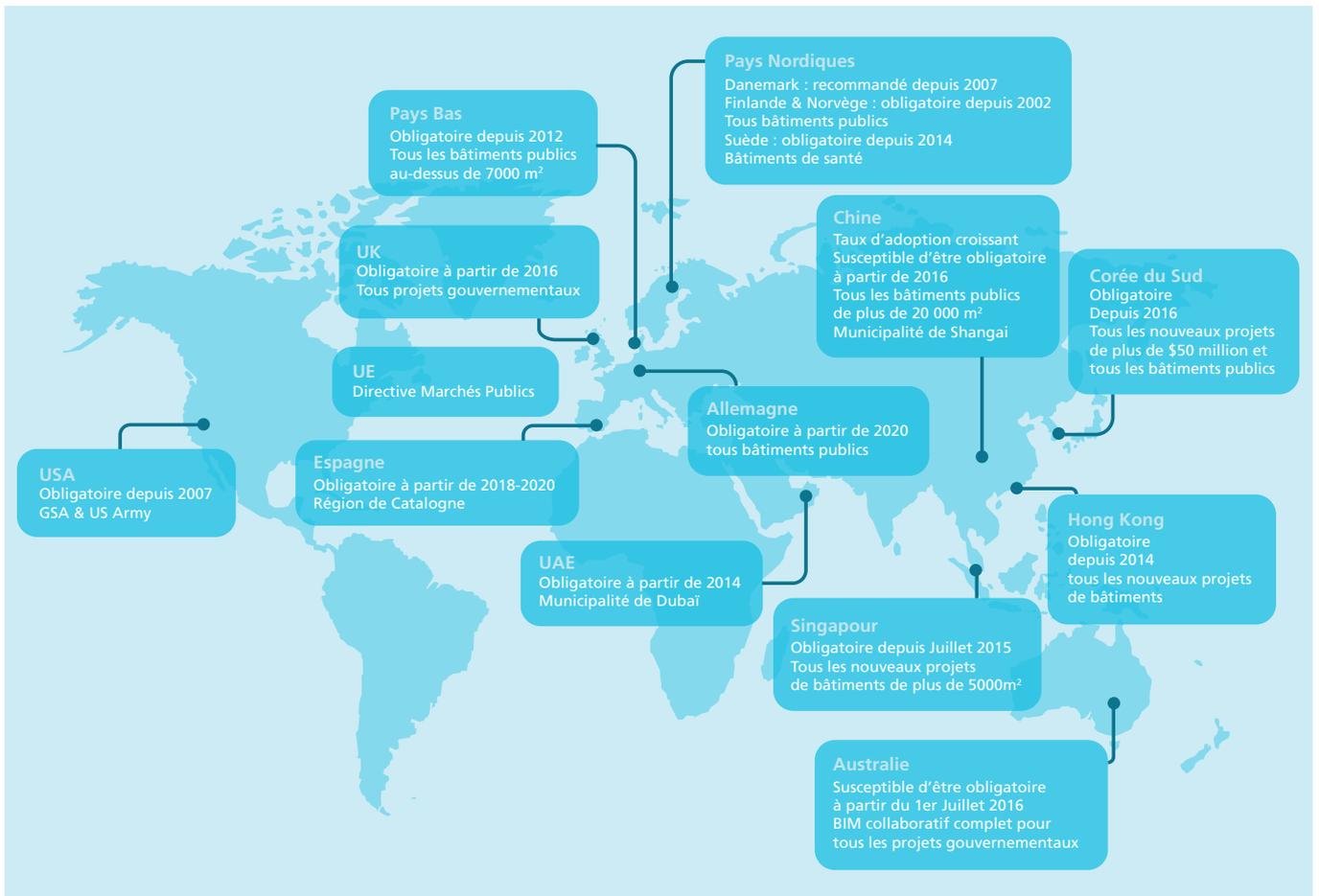
Au niveau de l'Europe, six ou sept pays seulement ont la chance d'avoir un outil équivalent au Plan Transition Numérique dans le bâtiment. Les acteurs aimeraient une harmonisation sur certains sujets, notamment au niveau de la passation des marchés, de la technique et des compétences. Plusieurs réflexions sont menées sur le sujet (cf. figure 5).

En ce qui concerne la sécurisation des données, certains acteurs acceptent de mettre une donnée dans une maquette, mais ne sont pas encore prêts à partager le savoir-faire.

« À COMPTER DE 2017, CHAQUE PAYS DEVRA S'ADAPTER JUSQU'À CE QUE CES OUTILS SOIENT DEVENUS COMMUNÉMENT DISPONIBLES. »

1. <http://www.mediaconstruct.fr/mission-numerique/guide-methodologique-convention-bim>

FIGURE 5 :  
ETAT DES LIEUX DES PAYS SUR LE PLAN TRANSITION NUMÉRIQUE



Source : Legrand – Pierre MIT

## En conclusion

Il n'y a aucun doute que le BIM est aujourd'hui lancé en France. Il est nécessaire d'accompagner sa mise en place pour que cela se fasse naturellement sur plusieurs années car le niveau d'investissement est important.

Une fois rodée, je n'ai aucun doute que la maquette va faciliter le travail des bureaux de contrôle et de tous les acteurs du bâtiment dont les assureurs.

### VÉRIFIER LA TECHNOLOGIE DU BIM



# LE MONITORING PAR CORDE OPTIQUE AU SERVICE DES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION



**BERNARD HODAC**

Président Fondateur du groupe OSMOS

À 22 ans, Bernard HODAC crée la société CRIFA, Agence de Recherche & Développement Franco-Allemande avec pour point fort les techniques nouvelles du génie civil. Il s'associe ensuite à Bayer, Strabag et F&G au sein de la société SICOM dont il prend la Direction Générale. Il développe alors la précontrainte par fibre de verre, à laquelle il intègre le premier monitoring à base de fibre optique.

En 1993, il obtient le premier marché de surveillance des structures principales de la Tour Eiffel, toujours en service. En tant qu'inventeur, Bernard Hodac est à l'origine de plus de 40 brevets.

## Introduction

La technologie des instruments par corde optique se propose de combler le maillon souvent manquant entre la conception, la réalisation et le cycle de vieillissement des structures. Au fil de l'eau, ces âges successifs des structures génèrent interventions (fondées ou non), transferts de responsabilité, contestations, litiges, etc.

Cet article a pour objectif de vous donner un premier aperçu des applications de cette technologie qui monte en puissance en France, particulièrement depuis deux ans.

## Le cadre juridique et réglementaire

Paradoxalement, le cadre réglementaire de cette nouvelle technologie existe déjà d'une certaine façon, même s'il n'est pas affiché ou peu visible pour les différents acteurs qui rentrent dans cette problématique.

Les Eurocodes prévoient déjà dans leurs différentes éditions le recours à ce qu'on appelle la méthode observationnelle pour s'assurer de la réalité des comportements qui affectent les structures. Cela est déjà prévu, sans bien entendu, prescrire les technologies *ad hoc*.

Si nous regardons les différents articles concernés du code de l'environnement, du code de la construction, du code des assurances et même du code civil, nous trouvons de multiples aspects qui indiquent la nécessité de pouvoir, en fonction de l'état de l'art et en fonction des avancées scientifiques, s'assurer de la pertinence des approches ou de mettre les avancées scientifiques ou les améliorations techniques au service de la qualité du management et de l'exploitation des ouvrages et des bâtiments.

## L'utilisation des instruments par corde optique

Face au "Domaine Construit", l'approche traditionnelle, dès lors qu'il y a des suspicions de faiblesse, consiste à aborder la réalité des ouvrages en fonction de critères d'aspect dans le meilleur des cas, et/ou de critères physico-chimiques. Ce qui est intéressant, c'est la notion même de vieillissement, car il s'agit là d'une notion à définitions multiples.

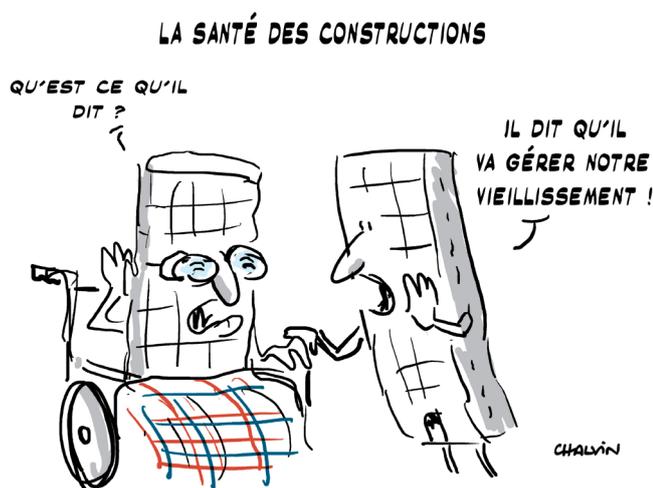
En situation courante, le vieillissement, c'est soit une obsolescence technique, soit une obsolescence commerciale, soit l'une et l'autre à la fois. Dans le dernier cas, par exemple, si l'on veut relancer sur le marché un immeuble de rapport défraîchi pour le transformer en immeuble de bureau ; cela peut être tout simplement des critères d'aspect, lesquels gouvernent majoritairement les diagnostics.

diagnostic qui ne soit pas uniquement gouverné par des critères d'aspect, et suffisamment en amont pour que ce « modèle vrai » puisse porter tous ses fruits.

On pourrait rappeler deux adages populaires : « il vaut mieux prévenir que guérir », et « l'habit ne fait pas le moine ». C'est le sujet du registre dans lequel cette technologie évolue. Nous « reprenons en main » un domaine construit sur lequel des inquiétudes ou des enjeux technico-financiers sont généralement importants, notamment lorsqu'il s'agit de structures porteuses d'un ouvrage pour lesquelles la confiance du maître d'ouvrage ne peut être qu'aveugle. L'objectif de cette nouvelle technologie est d'objectiver cette confiance aveugle, c'est-à-dire de lui donner un socle objectif, rationnel et conclusif.

Ces domaines d'intervention (cf. figure 1), qui sont la capacité de voir plus loin dans le temps en termes de vieillissement et plus près en termes de fatigue, de dégradation et d'altération, débouchent sur trois bénéfices-clients majeurs :

- > **anticiper les dommages** au plus près des risques au cœur même des phénomènes.
- > **échapper aux contraintes** qui découlent de toutes les situations d'urgence.
- > **dégager de la marge budgétaire**, tout cela étant éminemment lié à la nature économique de l'exploitation du maître d'ouvrage et des objectifs liés à son projet.



L'instrumentation par cordes optiques est une technologie embarquée sur les structures qui permet de conclure sur le comportement vrai des structures de façon à pouvoir obtenir un

**FIGURE 1 :  
DOMAINES D'INTERVENTION**



## Les contextes d'intervention

Puisque nous intervenons sur les objets physiques et reprenons en main le comportement des structures, nous pouvons effectivement quantifier *a posteriori* (plus rarement *a priori*) les économies ou les gisements d'économie qui sont potentiellement atteignables grâce à une ingénierie comportementale adaptée.

## Un exemple qui parle

Prenons l'exemple de la Tour Eiffel. Elle est évidemment une référence emblématique pour le groupe OSMOS, en termes de monitoring des structures principales du monument. En se plongeant dans les notes de calcul de Gustave Eiffel, dans les notes d'exécution de la société Eiffel de l'époque et les premières années d'exploitation sous la concession de Gustave Eiffel, nous pouvons dire **qu'il a pratiqué le BIM avant l'heure !**



Lorsque Gustave Eiffel avait été interrogé par des militaires au départ de la Première Guerre Mondiale (un peu avant la bataille de la Marne), sur ce qu'il adviendrait si les prussiens tiraient sur le tour Eiffel, il a répondu : « la meilleure protection de la tour c'est le vide ». C'est d'ailleurs, la prouesse de cette réalisation, avec les moyens de calcul et les moyens d'exécution de l'époque. Si elle devait être calculée d'après des Eurocodes d'aujourd'hui, elle serait beaucoup plus massive, elle coûterait plus chère et elle mettrait plus longtemps à être exécutée. On a affaire à un ouvrage hors-normes, un ouvrage atypique, mais qui est également aux normes en termes de résistance structurelle. Pour la Ville de Paris, la Tour Eiffel doit être toujours apte au service tant il est vrai qu'elle est une source de revenus considérables. Mais c'est aussi un symbole. Tout ce qui la concerne de près ou de loin fait face à une caisse de résonance médiatique qui peut être très importante.

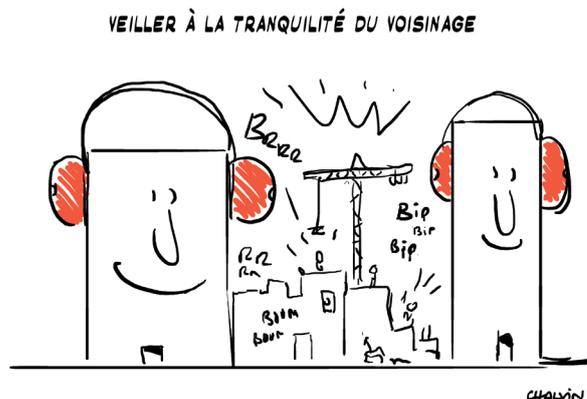
Pour un ouvrage historique déjà ancien, la Tour Eiffel dispose d'un fonds documentaire très riche et très bien entretenu. Mais dans l'immense majorité des cas, il est très difficile d'avoir des

Ces promesses touchent, à tout niveau, les préoccupations des experts, des assureurs et des réassureurs. Dans le domaine qui est le nôtre, la notion de risque est essentiellement une notion liée à la résistance des matériaux en fonction d'hypothèses de calcul connues ou à connaître. C'est pour cela que l'on parle de « modèle vrai ».

plans de recollement, des études de sol ou des notes de calculs corroborées par une expertise récente ou à laquelle on puisse se fier. L'enjeu des acteurs comme OSMOS est de surveiller les structures principales qui ne peuvent pas être reconstruites et, comme la Tour Eiffel, ont la vocation de rester « éternellement » aptes au service, ou en tout cas, le plus longtemps possible.

La technologie des instruments à corde optique permet notamment la levée de doute, c'est-à-dire de requalifier (ou de confirmer) les inquiétudes. Très souvent il s'agit de requalifier les ouvrages et leurs conditions opérationnelles dans un sens beaucoup plus positif que ne permet l'approche visuelle ou le re-calcul sur des critères subjectifs ou spéculatifs.

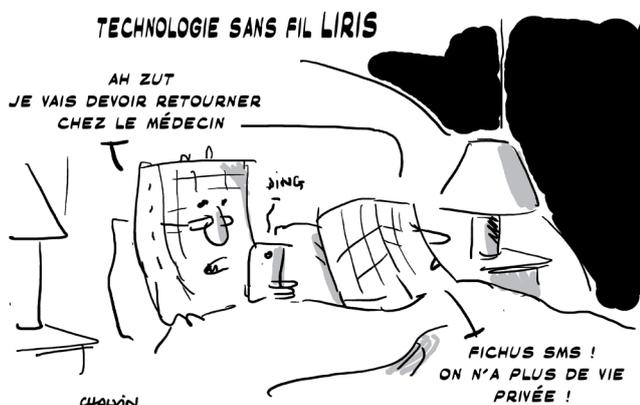
Il est également possible d'utiliser ces technologies en cours de travaux pour les ouvrages neufs, comme cela a été le cas par exemple pour la surveillance du grand projet de la Fondation Louis Vuitton qui a aussi des particularités très spécifiques et des aspects très prototypiques. Il y a un volet générique extrêmement répétitif qui est la surveillance des phases de construction et de chantier, notamment vis-à-vis des avoisinants dans le cadre, ou non, des référés préventifs. Et la gestion de crise lorsqu'il y a des restrictions d'usage ou des scénarios de restrictions d'usage ou de nature post-catastrophique et qui nous appartient de gérer pour limiter les effets ou limiter la propagation d'effets amplificateur de crise.



## La prévention

La prévention est devenue possible avec une technologie extrêmement puissante qui se déploie au travers d'un réseau de capteurs et d'automates de surveillance :

- > **Système expert KEPLER** : station universelle destinée à équiper des ouvrages sur le très long terme dans des conditions sévères d'application et avec une gestion sur site et hors site, la plus puissante du marché.
- > **Système sans fil LIRIS** : système qui se déploie de façon très économique avec un échantillonnage très réduit bénéficiant d'un ratio technico-économique très attractif, sur une multitude d'ouvrages et surtout sur des situations à faible budget ou présentant des risques aléatoires.



« LA PUISSANCE DE RENSEIGNEMENT ET LA FACILITÉ DE DÉPLOIEMENT DE CE SYSTÈME NOUS PERMET DE POUVOIR OPÉRER EN PRÉVENTIF, SEULE TECHNOLOGIE À POUVOIR PROPOSER CELA. »

Le monitoring d'ouvrages peut, à faible coût, poser un regard objectif sur le comportement des bâtiments sur le long terme. De façon à ce qu'au fil de l'eau, les opérateurs, les gestionnaires, les maîtres d'ouvrages puissent bénéficier, de façon immédiate et d'autant plus fiable que ces ouvrages sont sous monitoring préventif, de la chaîne décisionnelle qui importerait d'opérer en fonction de soupçons de faiblesse ou de problèmes divers et variés.

Le principal obstacle de cette technologie reste le maître d'ouvrage qui pense ne pas avoir besoin d'en savoir plus et pense déjà avoir les moyens et les fonds disponibles en cas de crise ou d'indisponibilité prolongée de son ouvrage.

## Une technologie française

La France, au-delà de l'agro-alimentaire ou du luxe, est un pays phare de l'ingénierie de la construction et de la Construction. Dans le passé avec Gustave Eiffel, puis au 20<sup>ème</sup> siècle Albert Caquot, Eugène Freyssinet ont développé des méthodes de calculs et des procédés qui ont fait nos codes. La précontrainte du béton a été l'une des avancées majeures du BTP au

20<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui l'ingénierie comportementale, dont OSMOS est le pionnier, est une avancée tout aussi importante pour le domaine construit et les travaux neufs et dans tous les contextes de l'assurabilité, des recours en garantie et du contentieux.

## Des champs d'applications sans limite

Les applications sont illimitées et elles concernent trois grands pôles :

- > **celui du bâtiment** : de la copropriété extrêmement banale jusqu'à la cathédrale de Cologne ou celle de Beauvais
- > **celui des infrastructures et des ouvrages d'art** : de la passerelle en lamellé-collé jusqu'au viaduc de Millau ou au viaduc d'Austerlitz
- > **celui de l'industrie** : depuis des appareils de levages, de stockages, etc., jusqu'au domaine de la sûreté nucléaire.

## Conclusion

Les applications et les contextes de la technologie des Cordes Optiques sont illimités.

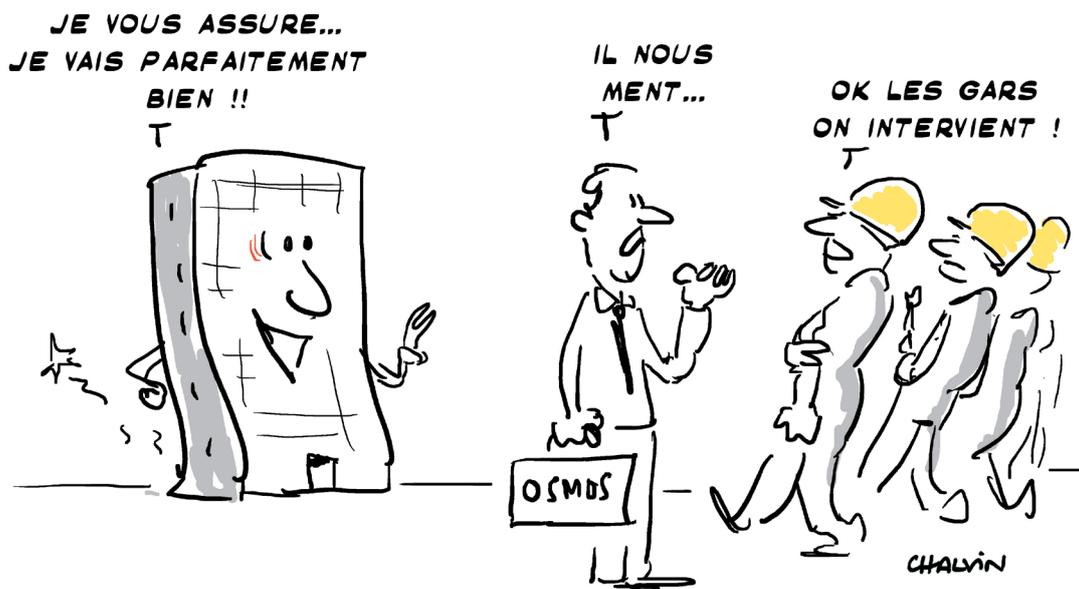
En phase de conception ou en phase de travaux, l'intervention se fait à l'étape où le BIM apparaît, pour une prise en compte, puis une confirmation des hypothèses de calculs ou pour gérer les situations qui peuvent être potentiellement hors-normes ou porteuses de complexités ignorées ou mal appréhendées.

Dans le langage de l'assureur, c'est l'assurabilité. C'est un champ extrêmement important sur lequel nous travaillons.

Les autres contextes sont les doutes, les suspicions de faiblesse, les inquiétudes diverses et variées qui se manifestent de façon externe aux phénomènes qui affectent les structures, comme une inclinaison, un tassement, de la corrosion, de l'humidité, les suspicions suite à un micro-séisme ou à un typhon.

Placées au cœur des phénomènes, ces solutions par cordes optiques permettent **d'anticiper les dommages au plus près des risques !**

### OSMOS LE MENTALISTE DES BÂTIMENTS !



# LES NANOMATÉRIAUX



**SIMON CLAVAGUERA**

Chef de projet à la Plateforme NanoSécurité, CEA Grenoble

Simon Clavaguera est ingénieur chimiste de formation, diplômé en 2004 de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier. Au cours de sa thèse de doctorat effectuée à la direction des applications militaires du CEA, il participe au développement de capteurs pour la détection de traces d'explosifs. De 2007 à 2009, il occupe un poste de post-doctoral fellow dans le groupe du Prof. Y. Rubin à UCLA sur la chimie des fullerènes. A son retour en France, il intègre le CEA – LITEN où il développe des outils de détection et de quantification d'aérosols chimiques et particulaires.

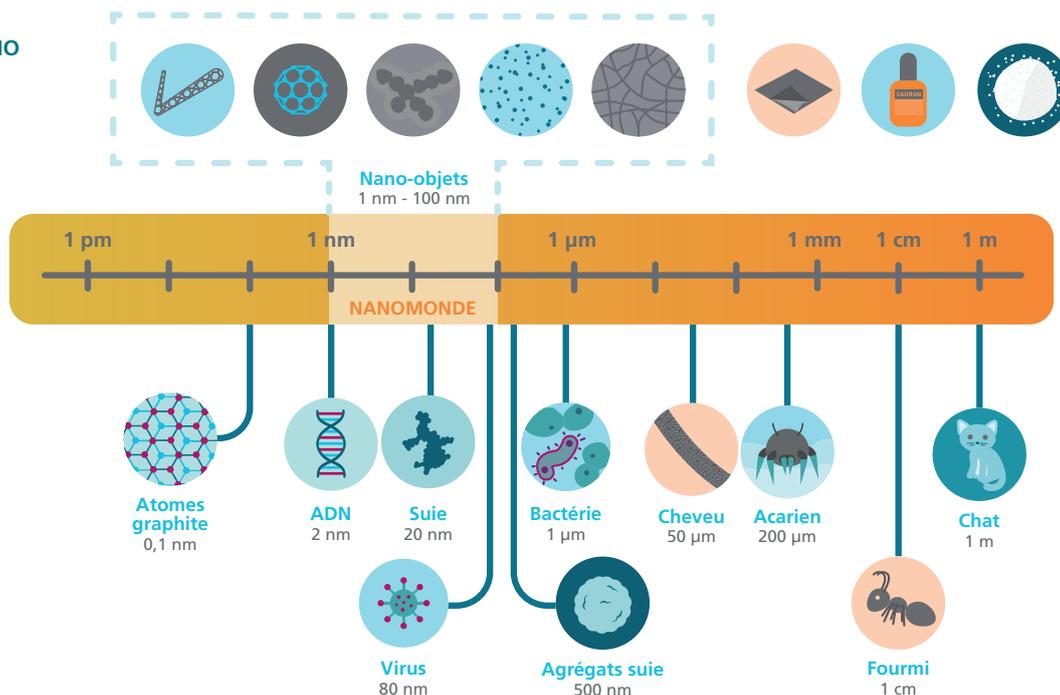
Depuis 2013, il est chef de projet à la Plateforme NanoSécurité du CEA. Simon Clavaguera est auteur de 14 publications scientifiques, 11 brevets et 5 articles de vulgarisation et chapitres d'ouvrages.

## Introduction

Les nanomatériaux appartiennent au monde de l'infiniment petit. À titre d'illustration, le fullerène  $C_{60}$  est 50 000 fois plus petite que le diamètre d'un cheveu (voir figure 1). Nous appelons

nanoscience la science qui s'adresse au monde nanométrique, et les nanotechnologies sont l'application de ces sciences pour en générer des produits.

**FIGURE 1 :  
L'ÉCHELLE NANO**



Source : INERIS

Les nanomatériaux sont des matériaux manipulables sous la forme de poudre, de suspension colloïdale ou de solides structurés. Ils peuvent être confondus avec des matériaux analogues de plus grande taille malgré certaines propriétés dues à l'échelle « nano » qui diffèrent notablement mais pour lesquelles un regard de spécialiste est souvent nécessaire.



La question qui se pose pour ces matériaux est celle de leur impact à long terme vis-à-vis des travailleurs, des consommateurs, mais également de l'environnement (toxicité, écotoxicité).

Aujourd'hui, ce sont des matériaux nouveaux pour lesquels nous n'avons que peu de recul en comparaison aux matériaux conventionnels.

Les quantités auxquelles nous sommes quotidiennement exposés posent question. À titre d'exemple, en atmosphère intérieure nous trouvons entre 2 000 et 10 000 particules par cm<sup>3</sup> d'air. Ce sont majoritairement des particules d'origine naturelle et anthropique que nous respirons à chaque inhalation. Si nous faisons un barbecue, nous passons à des niveaux de plusieurs centaines de milliers de particules.

Nous nous interrogeons sur la toxicité à long terme, particulièrement pour les espèces manufacturées pour lesquelles nous n'avons pas de recul.

## Une grande diversité de nanoparticules

- > **La première classe concerne les nanoparticules d'origine naturelle :** produites par les vents de sable, les embruns ou les émissions volcaniques par exemple. En bord de mer, les nanoparticules de chlorure de sodium que nous respirons ne posent aucun problème pour la santé. Le vivant lui-même génère des matériaux qui sont nanostructurés.
- > **La seconde, les nanoparticules d'origine anthropique :** liées à l'activité humaine, issues de la combustion, des transports ou de l'industrie.
- > **Enfin, la dernière catégorie concerne les nanoparticules manufacturées :** dans cette classe, il y a la notion d'intention de fabriquer des nanoparticules. Il est intéressant de rappeler que nous avons appris, *a posteriori*, que des matériaux qui étaient utilisés dans l'industrie depuis des centaines d'années étaient en fait des nanomatériaux.

Aujourd'hui quand nous dressons un panorama des normes et définitions relatives à ces particules, l'ISO définit des particules sous trois classes comme illustré en figure 2 :

- > **les particules** elles-mêmes qui sont la plupart du temps composées de particules sphériques, cubiques ou facettées mais qui sont compactes.
- > **les fibres** qui sont bidimensionnelles, c'est-à-dire qu'il y a une longueur qui est supérieure à 100 nanomètres et deux autres dimensions qui sont inférieures

- > **les nanofeuilletés** qui sont des plaquettes pour lesquelles seule l'épaisseur est dans la gamme de 1 à 100 nanomètres.

En 2011, la Commission Européenne a émis la définition suivante des nanomatériaux :

« ON ENTEND PAR NANOMATÉRIAU, UN MATÉRIAU, QU'IL SOIT NATUREL, FORMÉ ACCIDENTELLEMENT OU MANUFACTURÉ CONTENANT DES PARTICULES DONT AU MOINS 50 % EN NOMBRE PRÉSENTENT UNE DIMENSION NANOMÉTRIQUE. »

Cette définition est la prémisse d'une réglementation qui n'a pas encore abouti.

FIGURE 2 : DIMENSIONS EXTERNES DE TAILLE NANOMÉTRIQUE (< 100 NM)



En 2012, en France, un décret du Code de l'Environnement a donné une définition différente puisqu'elle ne se focalise que sur les matériaux qui sont fabriqués **intentionnellement**, mettant de côté tout ce qui est formé naturellement ou d'origine anthropique.

Entre les définitions ISO, européennes et françaises, il y a des divergences d'appréciation sur ce que nous appelons nanomatériaux. Aujourd'hui, il n'y a pas encore de réglementation, ni de valeur limite d'exposition professionnelle aux nanomatériaux, néanmoins ces divergences de définition posent question.



## Propriétés et formes des nanomatériaux

Ces matériaux ont différentes propriétés et différentes formes. En effet, ils peuvent être structurés sous forme d'arborescence tridimensionnelle. C'est le cas par exemple d'une armature à base de nanotubes de carbone. Typiquement dans l'industrie du gaz où des matériaux nanostructurés sont utilisés, ces derniers permettent de stocker des quantités bien plus importantes de gaz par adsorption que ce que l'on ferait dans des volumes identiques avec les méthodes de compression classique.

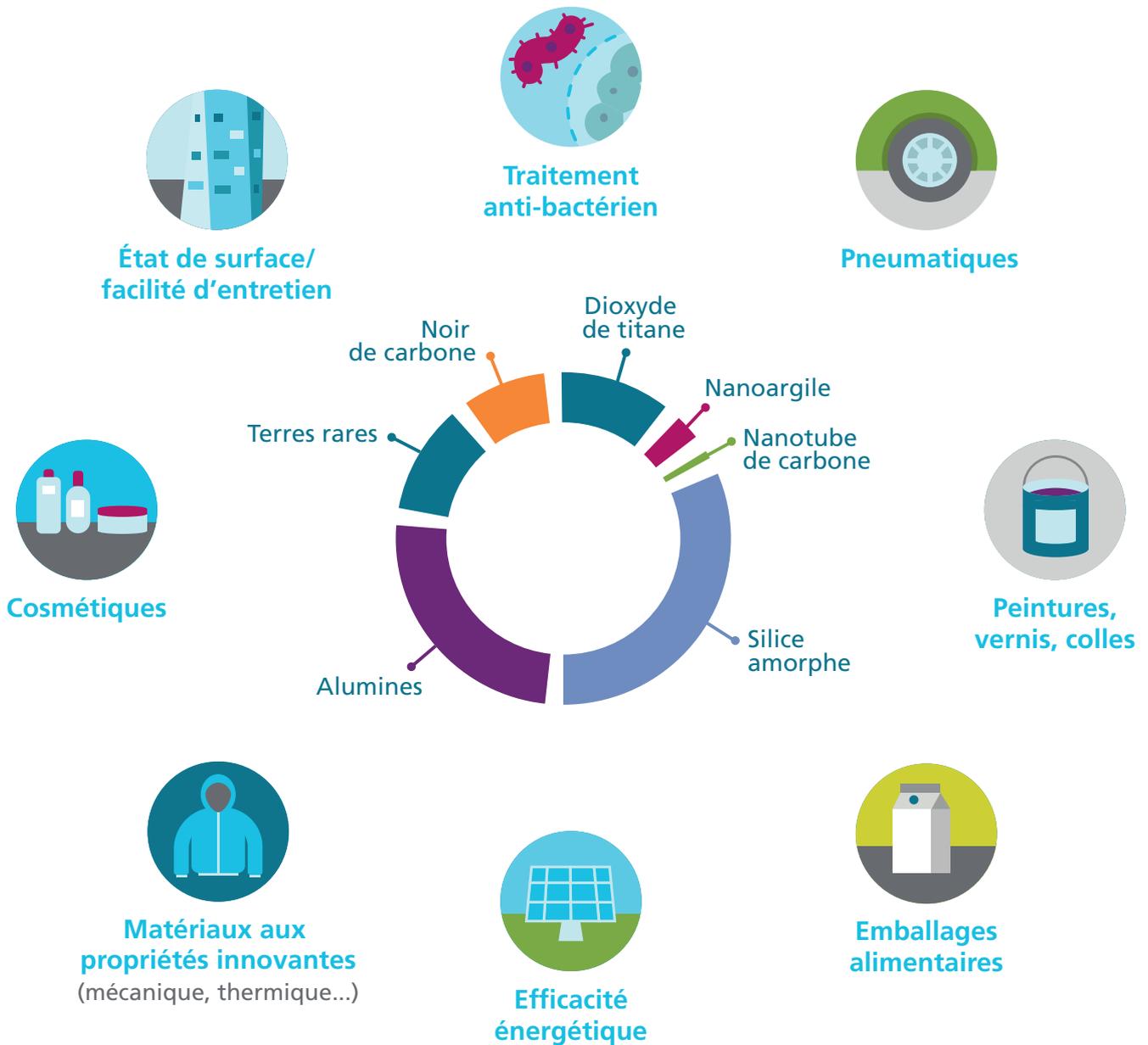
Par ailleurs, la fonctionnalisation externe d'une particule permet son incorporation dans une matrice de type béton pour favoriser les réactions d'interface entre la particule qui apporte une propriété spécifique et le milieu dans lequel elle est introduite.



Il y existe une diversité quasiment infinie de particules possibles. Prenons le cas de l'oxyde de zinc ZnO, nous observons une étonnante diversité de structures, de formes, de morphologies pour une seule et même composition chimique. Le choix de la particule pour un but spécifique nécessite de contrôler sa composition chimique, sa morphologie, sa taille et tous les autres paramètres qui en découlent.

Depuis 2013 en France, chaque importateur, fabricant ou distributeur de nanomatériaux se doit d'effectuer une déclaration auprès de l'ANSES sur les quantités qui sont supérieures à 100 grammes qui sont mises en œuvre dans une entreprise ou un laboratoire. Chaque année la France référence 400 000 tonnes de nanomatériaux qui transitent sur le territoire. Sur la base de ces déclarations, différentes familles d'utilisation sont répertoriées (cf. figure 3).

FIGURE 3 : DOMAINES D'APPLICATIONS ET PRODUITS DE LA VIE QUOTIDIENNE



Source : INERIS

## Utilisation des nanomatériaux

Aujourd'hui, en France, comme il n'y a pas de valeur limite d'exposition professionnelle réglementaire aux nanomatériaux, le principe de précaution s'applique. L'entreprise doit être en mesure de prouver qu'elle met tout en œuvre pour que ses salariés ou les futurs consommateurs soient protégés vis-à-vis de ce risque émergent.

« LES TROIS PREMIÈRES FAMILLES D'UTILISATION SONT : L'UTILISATION DANS LES ARTICLES EN PLASTIQUE ET CAOUTCHOUC, ENSUITE DANS LES MACHINES ET LES ARTICLES ÉLECTRIQUES, ET ENFIN DANS LES VÉHICULES. LE BÂTIMENT APPARAÎT EN CINQUIÈME POSITION SUR LE CLASSEMENT DES DESCRIPTEURS D'ARTICLES OÙ LES NANOMATÉRIAUX SONT DÉCLARÉS AUPRÈS DE L'ANSES<sup>1</sup>. »

La silice est le nanomatériau le plus utilisé, c'est notamment elle qui est utilisée en renfort dans les pneumatiques pour leur conférer de bonnes propriétés mécaniques et ainsi limiter l'usure prématurée du pneu tout comme le noir de carbone. Un autre exemple d'utilisation de nanomatériaux concerne les emballages alimentaires. En effet, les films plastiques sur un steak contiennent des nanoparticules d'argile qui font barrières à la diffusion de l'oxygène et donc préservent les aliments. Des nanomatériaux aux propriétés biocides sont également parfois rencontrés pour limiter la prolifération microbienne sur les surfaces notamment.

Dans le cas particulier des ciments, mortiers et bétons, le nanomatériau le plus intéressant est la silice car elle participe à améliorer la fonction structurale et la durabilité des édifices. Lorsque les nanoparticules de silice sont introduites dans un mélange de ciment, elles s'insèrent entre les grains de la pâte de ciment et chassent l'eau qui s'y trouvait. Cette eau chassée est utilisée pour avoir une meilleure fluidité du béton, et donc une meilleure processabilité. Cette particule participe de plus

aux réactions chimiques qui donnent une structure au béton. Elle joue un rôle de noyau de nucléation au niveau des réactions qui forment le liant du béton, les silicates de calcium hydraté en particulier et confèrent à ce matériau d'excellentes propriétés mécaniques.

D'autres utilisations existent, notamment les nanotubes de carbone qui participent aux propriétés de résistance à la traction. Pour les utilisations très spécifiques, ils peuvent également apporter des propriétés de conductivité électrique.

Dans un autre registre d'applications dans le secteur de la construction, nous pouvons citer les aérogels qui sont des gels le plus souvent à base de silice, un composé très couramment rencontré dans l'environnement, mais qui est nanostructuré. Le procédé de fabrication est complexe et nécessite soit du CO<sub>2</sub> supercritique, soit une étape de lyophilisation. L'intérêt de ce matériau est qu'il est extrêmement léger, il emprisonne l'air et il empêche le passage de la chaleur avec de très bonnes propriétés de protection thermique. Cependant, ce matériau présente à ce jour de mauvaises propriétés mécaniques.



Dans la construction, d'autres matériaux peuvent être utilisés comme revêtement par exemple sur des vitrages pour filtrer la lumière incidente. D'autres particules peuvent être utilisées également pour l'éclairage en ajustant la température de couleur afin de procurer une lumière blanche la plus naturelle possible.

En ce qui concerne la récupération énergétique, des panneaux solaires peuvent équiper les bâtiments, et dans cette technologie de nombreux nanomatériaux sont utilisés. Nous observons l'utilisation de revêtements nanostructurés, de nanoparticules de dioxyde de titane ou d'oxyde de zinc, et tous participent aux bonnes performances de ces panneaux.

<sup>1</sup> Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Par ailleurs, la société Tesla développe des batteries qui peuvent être utilisées pour équiper le bâtiment, et permettre de stocker l'énergie électrique excédentaire afin de lisser la consommation et la production d'électricité du bâtiment lui-même. Les matériaux d'électrode dans ces batteries contiennent des nanoparticules. Certaines technologies utilisent des fibres de carbone, d'autres du graphite ou des feuillets de graphène, et tous ces matériaux confèrent aux électrodes des propriétés de conductivité électrique.



Enfin, une dernière catégorie de fonctions apportées par les nanomatériaux concerne les propriétés autonettoyantes et dépolluantes. Ce sont les propriétés que nous observons le plus

dans les bâtiments qui sont construits actuellement. Le dioxyde de titane est un composé qui participe à la dégradation de polluants organiques qui se trouvent soit dans le bâtiment, soit à l'extérieur. Ces polluants sont *in fine* oxydés en CO<sub>2</sub> qui peut être ensuite ventilé aisément.

**FIGURE 4 :**  
LE « WATER CUBE » À BEIJING - BÂTIMENT RÉALISÉ À L'AIDE D'UN CIMENT CONTENANT DES NANOPARTICULES (TiO<sub>2</sub>) PERMETTANT DE FACILITER L'ENTRETIEN ULTÉRIEUR DU BÂTIMENT.



## Quelques projets de recherche sur les nanomatériaux et le secteur de la construction

La Commission Européenne finance un certain nombre de projets de recherche parmi lesquels nous pouvons distinguer ceux qui développent de nouveaux matériaux présentant des propriétés adaptées au besoin de l'industrie du bâtiment (TiO<sub>2</sub> photocatalytique, efficacité énergétique, durabilité) de ceux qui évaluent leur innocuité vis-à-vis des travailleurs, du consommateur et leur impact environnemental.

L'objectif du projet NANOLEAP de la Commission Européenne est de mettre au point des lignes pilotes de production de nanomatériaux pour l'industrie du bâtiment. Dix unités pilotes sont distribuées sur le territoire européen. L'objectif est de monter des infrastructures de fabrication de nanomatériaux à l'échelle pilote, d'ouvrir ces dernières pour structurer une filière et ainsi commencer à rentrer sur le marché.

Le CEA participe à ce projet pour promouvoir le développement responsable de ces nanomatériaux pour le bâtiment en toute sécurité vis-à-vis des travailleurs et du grand public. À titre d'exemple, certaines lignes de production consistent à fabriquer des nanoparticules unitaires. D'autres lignes de production visent

à agglomérer ces particules pour pouvoir les traiter plus facilement et limiter l'exposition potentielle aux nanoparticules. En effet, le travailleur ne serait pas directement exposé à une particule à l'état unitaire, mais à des agrégats de grosse taille et donc non inhalables. La difficulté, ensuite, est d'utiliser ces poudres et de les re-disperser lorsqu'elles sont mises en mélange pour pouvoir être, par exemple, utilisées dans le béton.

Il existe deux unités de production d'aérogel. Ces matériaux sont très intéressants car ils ne coûtent pas chers et ils sont performants en termes d'isolation thermique. Néanmoins ce sont des matériaux fragiles. C'est la raison pour laquelle une autre unité pilote réfléchit à utiliser ces aérogels, non plus à base de silice, qui est cassante, mais à base de matériaux carbonés, notamment la graphène qui lui confère une meilleure élasticité.

Les projets orientés « nanosécurité » visent à mettre au point un certain nombre de méthodes et procédures pour évaluer l'émission de particules, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment, et qui donnent lieu à une exposition des travailleurs ou de l'environnement.

Des études sont menées sur l'évaluation de l'exposition potentielle, notamment :

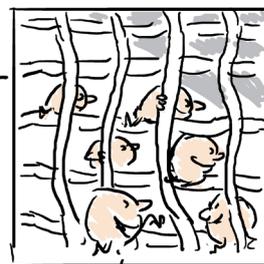
- > par voie d'inhalation pour des travailleurs qui fabriquent ces matériaux
- > l'exposition potentielle des utilisateurs de ces matériaux
- > l'impact sur l'environnement
- > le traitement des matériaux en fin de vie

En France et en Europe, la plupart des essais sont effectués en laboratoire ou sur des échelles réduites.

Un objectif particulier est de considérer les risques liés à l'utilisation des matériaux pour les travailleurs qui manipulent ces poudres sur les chantiers. À titre d'exemple, le projet SCAFFOLD, dans lequel nous étions partenaires, vise à évaluer l'exposition professionnelle de salariés du bâtiment et de mesurer l'efficacité des équipements de protection collectifs et individuels : les ventilations, les tenues de travail, les gants, les masques que portent les travailleurs pour se protéger des particules de silice et de TiO<sub>2</sub> qui sont utilisées dans les mélanges de ciment.

### DANGERS ET NANO MATÉRIAUX

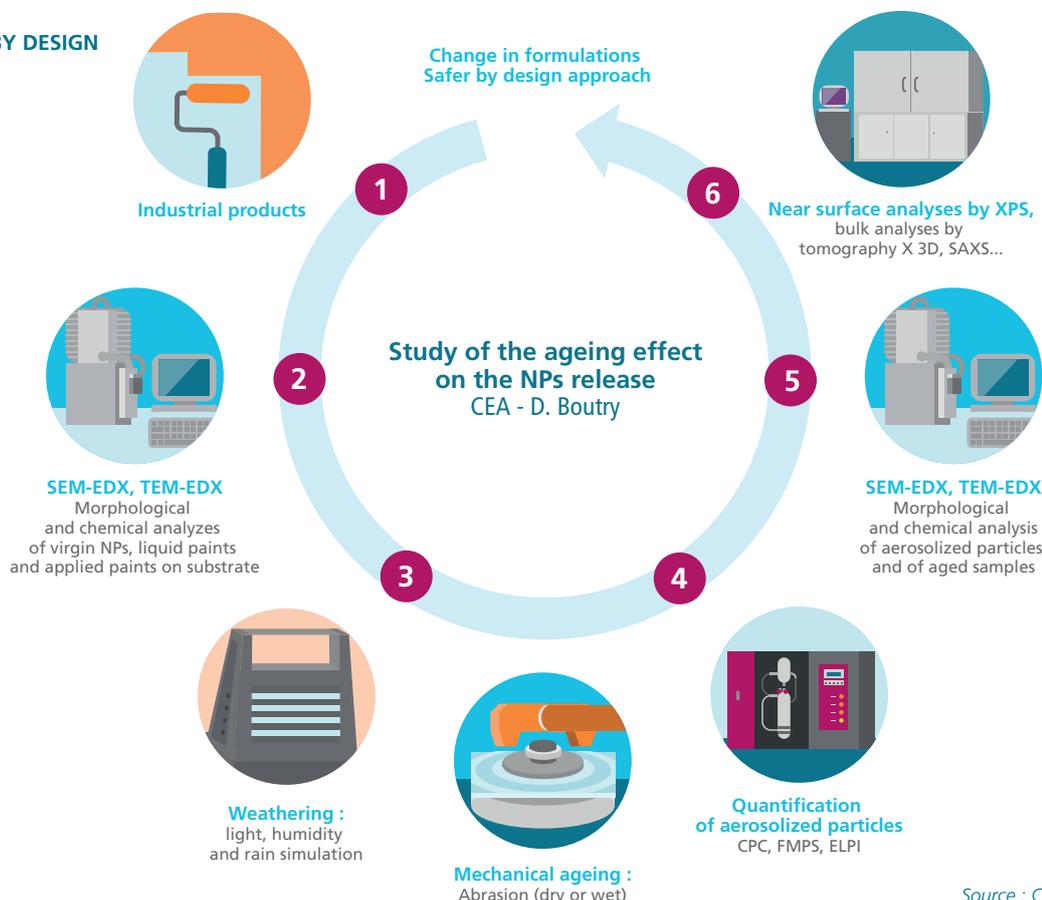
JE NE RISQUE RIEN  
J'AI MON ÉQUIPEMENT  
DE PROTECTION



ILS SONT NAIFS CES HUMAINS...

Le projet LabEx Sérénade nous permet de développer de nouveaux matériaux éco-conçus, qui sont plus sûrs grâce à une approche qu'on appelle *Safer-by-design*. Ce design nous permet d'améliorer notamment la dispersion des particules dans la matrice, de modifier la surface et la fonctionnalisation de ces dernières pour qu'elles restent dans le matériau et ne se relarguent pas vers l'extérieur (cf. figure 5).

FIGURE 5 : L'APPROCHE SAFER BY DESIGN



Source : CEA - D. Boutry

Un autre aspect est de jouer sur la matrice elle-même. Dans le cas d'une peinture classique, nous avons une matrice organique. Le  $\text{TiO}_2$  photocatalytique détruit la matrice quand il est trop efficace. La peinture vieillit de façon accélérée à cause de cette propriété et se désagrège laissant à sa surface les nanoparticules. Une solution consiste à faire évoluer la nature de cette matrice vers des matrices inorganiques.

Un autre aspect consisterait à agir sur les usages, notamment la restriction d'un usage particulier d'un produit pour un scénario spécifique. À titre d'exemple, l'argent peut poser un problème environnemental si les déchets ne sont pas traités de façon spécifique. Il peut être envisageable d'imposer de façon réglementaire de traiter ces matériaux dans des cas très spécifiques, par des filières appropriées.

## Conclusion

La réglementation sur les nanomatériaux est balbutiante. En particulier, il n'existe pas à ce jour de valeurs limites d'exposition professionnelle aux nanomatériaux que ce soit en France ou à l'étranger. Il y existe toutefois quelques recommandations mais qui n'ont pas de valeur réglementaire. De plus, l'inquiétude de la population générale vis-à-vis de ces matériaux et les aspects éthiques qui en découlent nécessitent de la part des pouvoirs publics, de la communauté scientifique et des industriels des efforts à faire sur la communication.

De grands acteurs industriels produisent déjà des nanomatériaux pour des applications spécifiques et l'utilisation de ces produits pour l'industrie du bâtiment reste à mettre au point et à développer.

Un aspect clé du secteur de la construction auxquels les nanomatériaux peuvent répondre est la durabilité. En effet, la commission européenne incite les groupes de recherche, les PME et les industriels au travers des appels à projets du programme H2020 à structurer cette filière d'utilisation des nanomatériaux dans le bâtiment pour des propriétés bien spécifiques. Il faut certainement suivre de près tous ces développements qui apporteront de nouvelles perspectives au secteur de la construction.



Remerciements au dessinateur Marc Chalvin pour ses croquis.

Toute reproduction totale ou partielle de ce document doit faire l'objet d'une autorisation préalable du Responsable de la Publication.



Responsable de la publication : SCOR Global P&C  
Stratégie et Développement  
[scorglobalpc@scor.com](mailto:scorglobalpc@scor.com)

**No. ISSN 1638-3133**  
**Focus #21 - Novembre 2016**

SCOR, 5 avenue Kléber  
75795 Paris Cedex 16 - France  
[www.scor.com](http://www.scor.com)