

# Le grand livre des bétons

Connaissances et pratiques - Avancées environnementales  
Réglementation et cadre normatif

Sous la direction  
de Laetitia D'Aloia-Schwartzentruber  
et Jean-Michel Torrenti

RÉFÉRENCE  
TECHNIQUE

EDITIONS

**LE MONITEUR**

editionsdumoniteur.com

+ de 200 schémas

---

---

# Sommaire

---

	Sigles et abréviations.....	7
	Préface .....	11
<b>Partie 1</b>	<b>Enjeux du béton</b> .....	19
1	Bétons et développement durable .....	21
2	Durabilité, approches prescriptive et performantielle.....	59
3	Contexte normatif .....	115
<b>Partie 2</b>	<b>Constituants du béton</b> .....	121
4	Ciments .....	123
5	Granulats .....	159
6	Eau de gâchage.....	177
7	Adjuvants.....	185
8	Additions minérales .....	203
<b>Partie 3</b>	<b>Formulation des bétons</b> .....	225
9	Propriétés des bétons .....	227
10	Méthodes de formulation .....	245
11	Gamme des bétons modernes .....	271
<b>Partie 4</b>	<b>Fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle</b> .....	313
12	Fabrication et transport .....	315
13	Mise en œuvre .....	337
14	Contrôle des bétons .....	381

<b>Partie 5</b>	<b>Comportement mécanique</b> .....	389
<b>15</b>	Microstructure et déformations du béton au jeune âge.....	391
<b>16</b>	Comportement mécanique du béton .....	405
<b>17</b>	Déformations différées du béton .....	417
<b>18</b>	Maîtrise de la fissuration en béton armé .....	431
	Index .....	437
	Table des matières.....	443

# Bétons et développement durable

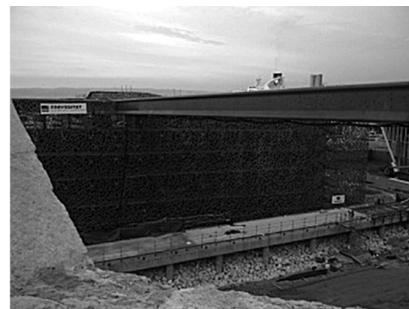
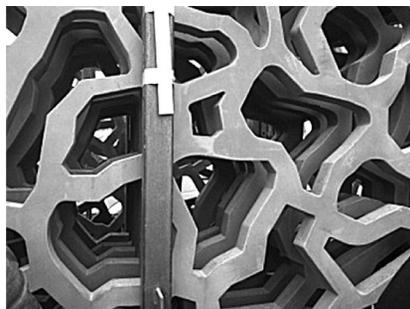
Laetitia D'Aloia-Schwartzentruber, Jean-Marc Potier, Adélaïde Féraïlle, Maxime Trocmé

## 1.1 Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Bien que connu et utilisé par les Romains, sa redécouverte, son industrialisation et son véritable essor ne datent que des années 1820-1850. À de rares exceptions près, il est désormais omniprésent et incontournable, dans l'habitat individuel comme dans le collectif, dans les équipements et les infrastructures de transport. Il structure aujourd'hui notre quotidien et fait partie du paysage visuel en investissant aussi bien les espaces publics (mobi-

lier urbain, sols urbains structurés, voiles architectoniques) que privés (revêtements de murs et de sols des pièces sèches et humides, plans de travail).

Les différentes finitions, l'enrichissement de la palette de ses constituants, les adaptations et progrès techniques liés à sa formulation et à sa mise en œuvre, son association à d'autres matériaux comme le bois ou l'acier en font le matériau de tous les possibles. Durable et présent dans les applications structurelles ou non structurelles, il permet l'innovation et devient objet d'art (photo 1.1).



**a** Résilles et passerelle en Ductal® du MuCEM à Marseille : Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée (architecte Rudy Ricciotti)



**b** Plaques d'habillage en BSI® du nouveau rectorat de Dijon (architecte Rudy Ricciotti)

Photo 1.1. Quelques applications en béton fibré hautes performances

La prédominance du matériau béton dans notre quotidien et les préoccupations actuelles liées à la prise en compte du développement durable nous amènent à nous interroger non seulement sur les impacts de ce matériau sur l'environnement (émissions de CO<sub>2</sub> liées au ciment, consommation des ressources en granulats, valorisation de sous-produits industriels, utilisation des adjuvants, etc.), mais également sur la place des différents secteurs d'activités et les approches mises en œuvre par secteur pour réduire ces impacts.

Il est donc également nécessaire de faire un point sur les méthodes et outils développés et utilisés pour évaluer ces impacts à l'échelle du matériau comme à celle de la structure, ainsi que sur la réglementation mise en place.

## 1.2 Production et données économiques

### 1.2.1 Le béton, un matériau minéral de construction au succès universel

On estime la consommation annuelle moyenne du béton à un peu moins de 1 m<sup>3</sup> par habitant à l'échelle de la planète, c'est-à-dire un volume total annuel d'environ 6 milliards de mètres cubes.

Cette forte utilisation du béton peut s'expliquer par les nombreux avantages qu'il offre :

- il est facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien, il est donc assez peu coûteux ;
- les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en grandes quantités ;

- sa résistance et sa durabilité sont reconnues ;
- il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- il épouse toutes les formes qui lui sont données.

Le béton peut être projeté ou coulé en place. Il est le plus souvent associé à l'acier (béton armé, fibré ou précontraint) et intervient également dans la composition de produits préfabriqués.

### 1.2.2 Industrie du béton : situation en France

En 2012, la production française de béton a été d'environ 60 millions de mètres cubes, regroupant le béton prêt à l'emploi (BPE), la préfabrication et les bétons réalisés sur chantier.

Toujours en France, la production annuelle moyenne de bétons prêts à l'emploi (BPE) atteint 0,6 m<sup>3</sup> par habitant en 2012 (au total 39,4 millions de mètres cubes, ce qui représente une baisse de 5,3 % par rapport à 2011, après une hausse de 11 % par rapport à 2010, et un chiffre d'affaires d'environ 4 milliards d'euros). C'est un peu plus que la moyenne annuelle européenne qui se situe à 0,54 m<sup>3</sup> par habitant (au total 236,6 millions de mètres cubes), avec des écarts importants entre pays (les ratios extrêmes sont de 0,28 m<sup>3</sup> par habitant pour le Royaume-Uni et de 1,26 pour l'Autriche, pour des productions annuelles respectives de 17,6 et 10,6 millions de mètres cubes). En volume, la France se classe 3<sup>e</sup> après l'Allemagne et l'Italie (avec respectivement 46 et 40 millions de mètres cubes, représentant des baisses respectives de 4,2 et 22,8 % par rapport à 2011). Des volumes importants pour ces deux pays, malgré une forte baisse pour l'Italie (encore marquée en 2013, avec – 20 % par rapport à 2012), en

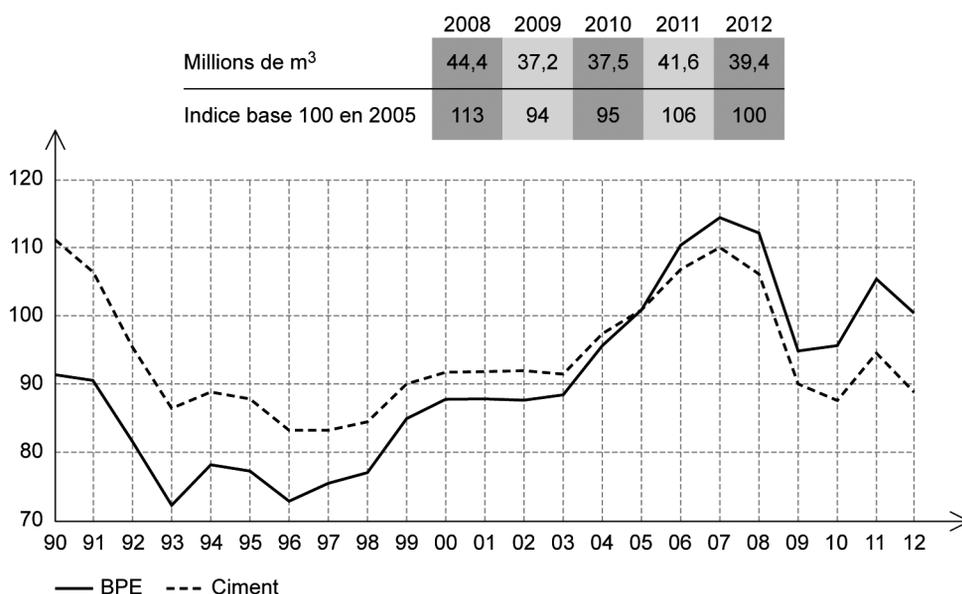


Fig. 1.1. Évolution de la production de BPE en France de 1990 à 2012 (source : Unicem/SNBPE 2012)

**Tab. 1.1. Répartition de la production de béton par gamme de résistance de 2010 à 2013** (source : Ermco 2011 à 2013)

	Production (%) par classe de résistance (MPa)															
	< C16/20				C16/20 à C20/25				C25/30 à C30/37				> C35/45			
Année	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013
France	2	2	2	1	64	43	41	29	30	49	50	59	4	6	7	11
Europe	6	7	6,5	6,5	29	24	25,4	22,4	54	55	56,9	58,8	11	13	11,1	12,3

**Tab. 1.2. Répartition de la production de béton par gamme de consistance de 2010 à 2013** (source : Ermco 2011 à 2013)

	Production (%) par classe de consistance (NF EN 206/CN)															
	S1				S2 à S3				S4 à S5				BAP			
Année	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013
France	1	8	8	10	66	71	70	69	28	16	16	15	5	5	6	6
Europe	5	6	6,9	7	49	51	52,3	55,5	44	40	38,6	35,2	2	2	2,2	2,3

partie expliqués par une tradition de réalisation de routes en béton (Unicem/SNBPE 2011 et 2012, Unicem 2012 et Ermco, 2011 à 2013). L'évolution de la production de BPE en France entre 1990 et 2012 est présentée en figure 1.1.

Il est également intéressant de s'attarder sur la répartition de la production française et européenne par gamme de résistance et par gamme de consistance (tab. 1.1 et 1.2).

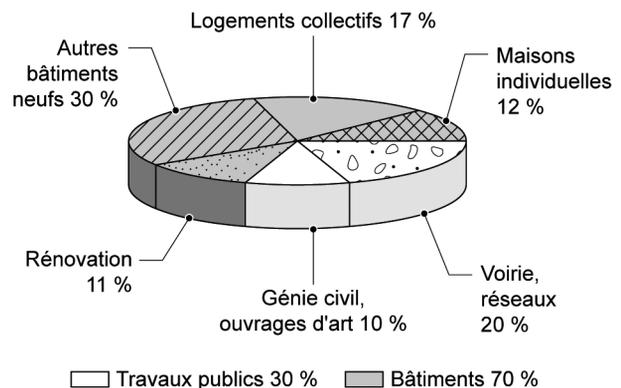
On constate que l'essentiel des bétons produits entre dans une gamme de résistance modérée : environ 30 % des bétons sont de classe inférieure à C20/25 et environ 90 % sont de classe inférieure à C30/37 en 2013. On observe entre 2010 et 2013 une diminution de la production de béton de classe de résistance comprise entre C16/20 et C20/25 essentiellement au profit de la catégorie C25/30 à C30/37 (respectivement – 35 % pour la catégorie C16/20 à C20/25 et +29 % pour la catégorie C25/30 à C30/37). Cette évolution a tendance à rendre la production française plus conforme à la production européenne.

En ce qui concerne la répartition de la production française par gamme de consistance, on constate peu d'évolution entre 2010 et 2013, si ce n'est un léger glissement vers les consistances les plus fermes, tout comme pour la production européenne. La production française reste plus importante pour les classes S2 et S3, et dans une moindre mesure S1, que la production européenne. Les classes de consistance S2 et S3 sont les plus fréquentes en France et représentent 69 % de la production en 2013. Par ailleurs, la part des bétons autoplaçants (BAP) dans le BPE est de 6 % en France en 2013 (2 % en 2010), soit un peu plus que la moyenne européenne à 2,3 % qui reste stable et relativement faible depuis 2010 (2 % en 2010).

Les statistiques européennes montrent également que la teneur moyenne en ciment a tendance à diminuer. En France, elle passe de 299 à 290 kg/m<sup>3</sup> de béton entre 2009 et 2013.

La tendance européenne est similaire avec toutefois une valeur légèrement inférieure. Elle passe de 293 à 285 kg/m<sup>3</sup> de béton entre 2009 et 2013, ce qui représente une diminution d'environ 10 kg de ciment par mètre cube de béton en 5 ans. Les additions minérales les plus utilisées en France sont les cendres volantes. Leur consommation passe de 0,45 à 0,6 million de tonnes entre 2009 et 2011 et reste stable depuis.

En France, le béton est utilisé dans 90 % des ouvrages, qu'il s'agisse de bâtiments (logements neufs, hôpitaux, écoles, etc.) ou d'ouvrages de génie civil (routes, ponts, etc.). La répartition du BPE par secteur est donnée dans la figure 1.2 pour l'année 2010.

**Fig. 1.2. Répartition du marché du BPE en France par secteur en 2010** (source : SNBPE 2012)

On notera enfin que les unités de production de BPE sont un peu moins de 1 900 en France en 2012, ce qui représente une densité d'environ 34 unités pour 10 000 km<sup>2</sup>. Ces unités captent 58 % du ciment produit en France (soit 10,5 millions de tonnes), contre 15 % pour les produits en béton (soit 2,7 millions de tonnes) (SNBPE 2012, Infociments 2012).

## 1.3 Aspects environnementaux

### 1.3.1 Impacts sur l'environnement

#### 1.3.1.1 Émissions de gaz à effet de serre et réchauffement climatique

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et principalement de CO<sub>2</sub> est aujourd'hui un enjeu planétaire souligné notamment par le protocole de Kyoto entré en vigueur en 2005. En 2003, la France a pris l'engagement devant la communauté internationale de « diviser par un facteur 4 les émissions nationales de GES de 1990, d'ici à 2050 ». Cet objectif a été par la suite validé par le Grenelle de l'environnement en 2007 et confirmé en 2013 lors du débat national sur la transition énergétique. En effet, lors de la conférence environnementale de septembre 2012, le Gouvernement a établi une feuille de route pour la transition écologique. Cette dernière inclut notamment la transition énergétique qui conduit elle-même, non seulement à la réduction de la part du nucléaire dans la production d'énergie, mais aussi à la rénovation thermique du bâti existant dont les maîtres mots sont efficacité et sobriété énergétique. Il va sans dire que l'industrie du béton a également son rôle à jouer dans cette transition écologique.

En ce qui concerne la production de béton, le constituant à l'origine de l'essentiel des émissions de GES est le ciment. Il en représente environ 90 % des émissions. L'industrie du ciment est ainsi un émetteur important de CO<sub>2</sub>. Elle est responsable d'environ 5 % des émissions mondiales de GES (2,5 % en France – fig. 1.3) (Infociments 2008). Face à ce constat, les cimentiers ont réagi et pris des mesures qui se sont révélées efficaces. C'est ainsi que ces 20 dernières années les émissions de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment ont été réduites de 18,5 %. Les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> se situent désormais autour de 730 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment (tous types confondus) (Infociments 2008).

Provenance du CO<sub>2</sub> émis lors de la fabrication du ciment

Le CO<sub>2</sub> émis lors de la fabrication du ciment et plus exactement du clinker<sup>(1)</sup> provient de deux sources distinctes (fig. 1.4) :

– la dépense d'énergie liée à la nécessité d'obtenir de très hautes températures pour la production de clinker au moyen de processus physico-chimiques spécifiques. Le clinker est le produit de la cuisson des matières premières dans le four à une température de 1 450 °C ;

(1) Le clinker additionné de sulfate de calcium constitue le ciment Portland artificiel. Lorsque le clinker est cobroyé avec des additions minérales (laitiers des hauts fourneaux, cendres volantes, fillers calcaires, fumées de silice, etc.), on obtient tout une gamme de ciments composés selon la nature des additions et leurs proportions.

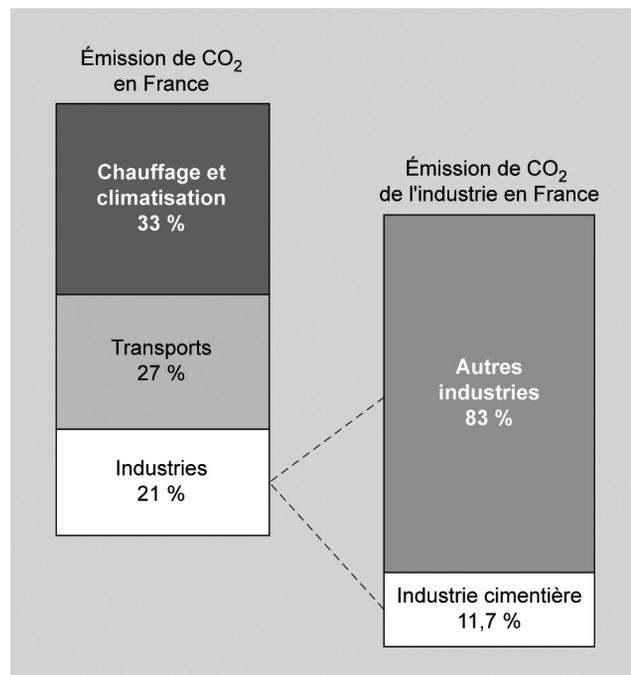


Fig. 1.3. Place de l'industrie cimentière dans les émissions de GES en France (source : Infociments 2008)

– la transformation du calcaire (CaCO<sub>3</sub>) en chaux (CaO) et en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) sous l'effet de la chaleur. Cette décarbonatation se produit dès 700 °C lors de l'échauffement des matières premières dans l'échangeur à cyclones avant même leur entrée dans le four.

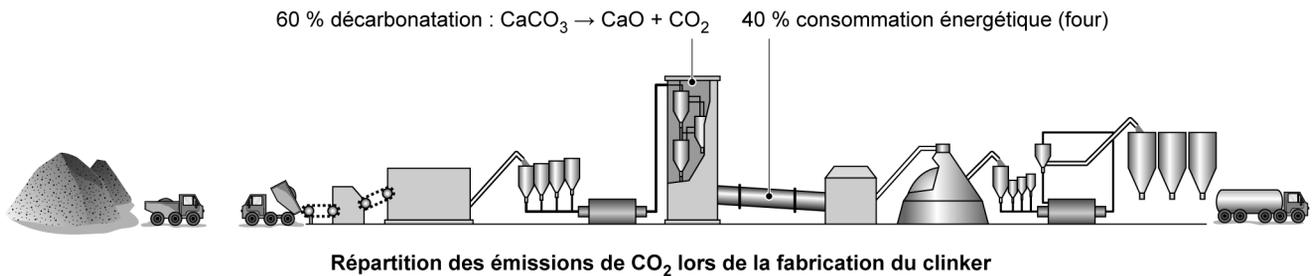
Environ 60 % du CO<sub>2</sub> émis lors de la fabrication du clinker provient de cette décarbonatation. Le calcaire étant, avec l'argile, l'une des deux principales matières premières permettant de produire du clinker.

Depuis de nombreuses années, l'industrie cimentière a pris des mesures pour réduire ses émissions :

– amélioration de l'efficacité énergétique des procédés ;  
 – valorisation de déchets comme combustibles. En effet, s'ils n'étaient pas brûlés en cimenterie, ces déchets étaient de toute façon éliminés par une incinération traditionnelle et les déchets ultimes placés en décharge. Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la valorisation énergétique de ces déchets viennent donc en déduction de celles liées à la production du clinker.

La seconde source d'émissions de GES est plus difficile à appréhender dans la mesure où il s'agit d'émissions liées au procédé même de fabrication du liant. Certaines mesures, parfois indirectes, peuvent cependant être prises. Ces dernières visent en particulier à :

– incorporer dans les matières premières, avant cuisson, certains matériaux sélectionnés déjà décarbonatés ou exempts de calcaire ;



**Fig. 1.4. Origine des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la fabrication du clinker**

– incorporer dans les ciments des additions minérales (cendres volantes, laitiers des hauts fourneaux, *fillers* calcaires, etc.) réduisant d’autant la quantité de clinker, issu de la cuisson et constituant de base du ciment.

À plus long terme, le développement de nouveaux liants associés à des procédés de fabrication différents et à des applications spécifiques constitue également une piste que les cimentiers ont déjà commencé à explorer.

#### 1.3.1.2 Autres impacts sur l’environnement

L’évaluation environnementale d’un matériau va cependant bien au-delà de l’estimation des seules émissions de CO<sub>2</sub> liées à sa fabrication. D’autres catégories d’impact sur l’environnement doivent être considérées afin d’éviter les transferts de pollution, comme par exemple la consommation des ressources naturelles ou la consommation énergétique. L’évaluation de ces impacts lors de la réalisation d’une analyse de cycle de vie (ACV), par exemple, fait appel à différentes méthodes de calcul développées par différents organismes de recherche internationaux. Certains de ces indicateurs d’impact et les méthodes de calculs associés sont détaillés au § 1.4.

#### 1.3.1.3 Prise en compte de l’ouvrage et cycle de vie

C’est bien l’impact de l’ouvrage lui-même qui doit être évalué et l’ensemble de son cycle de vie qui doit être considéré.

En effet, non seulement il n’y a pas qu’un seul béton, mais le béton n’est pas le seul matériau de construction entrant dans la réalisation d’un ouvrage de bâtiment ou de génie civil. Le bilan environnemental de l’ouvrage doit intégrer les impacts des différents constituants pondérés par leur masse et prendre également en compte des modes de mises en œuvre et des durées de vie spécifiques à chacun d’entre eux.

Par ailleurs, considérer uniquement les impacts de la construction d’un bâtiment ou d’un ouvrage de génie civil pourrait conduire à des solutions effectivement « économes » au regard de la construction, mais « énergi-

vores » au regard de leur utilisation, avec un bilan global qui peut être très défavorable, comme c’est d’ailleurs le cas pour le secteur du bâtiment où la phase de vie en œuvre représente environ 80 % des impacts. Il convient donc de raisonner sur toutes les étapes du cycle de vie : production et transport des matériaux, construction, utilisation et fin de vie (démolition et recyclage).

### 1.3.2 Outils d’évaluation des impacts sur l’environnement

Les questions environnementales prennent une place de plus en plus importante dans les décisions politiques, économiques, industrielles et individuelles (Jolliet *et al.*, 2005). Il est donc primordial de disposer d’outils d’évaluation et de management permettant d’améliorer un produit ou un projet. Quelques-uns de ces outils, dont certains couvrent l’ensemble des dimensions du développement durable (cas des grilles d’évaluation multicritères), sont présentés ci-après. Ces outils peuvent ne couvrir que la dimension environnementale et être monocritères (cas du Bilan Carbone<sup>TM</sup>) ou peuvent être multicritères (cas de la haute qualité environnementale (HQE) ou de l’analyse du cycle de vie). Le plus souvent développés pour un secteur particulier, ils peuvent être adaptés à d’autres secteurs, appliqués à différents stades d’avancement d’un projet ou combinés suivant le contexte et les objectifs visés, avec des limites qui sont propres à chacun d’entre eux.

#### 1.3.2.1 Grilles d’évaluation multicritères

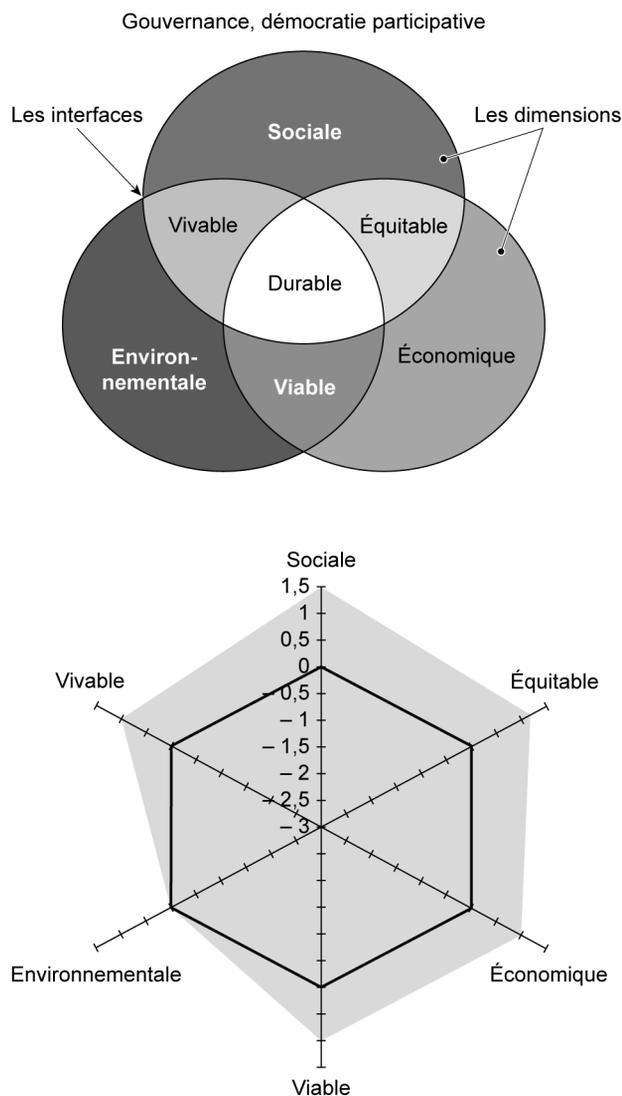
Plusieurs dizaines de grilles d’analyse multicritères pour lesquelles toutes les dimensions du développement durable sont concernées ont pu être recensées (Boutaud 2004). Ces grilles s’appuient par exemple sur la Stratégie nationale de développement durable (SNDD) ou bien encore sur les principes de la déclaration de Rio. Par exemple, la grille RST02, qui a été développée au sein du réseau scientifique et technique (RST) du ministère de l’Écologie, permet d’analyser un projet, de le questionner vis-à-vis du développement durable et d’identifier des marges de progrès. Il est donc essentiel que cette grille soit utilisée

au sein d'une équipe projet réunissant des compétences et des sensibilités différentes afin de permettre la confrontation des points de vue. Les projets peuvent être de nature variable, relatifs à un aménagement local ou concerner un plan ou un programme d'action. Aujourd'hui, cette grille est déclinée dans des métiers comme l'eau, les transports, l'urbanisme et le logement.

La grille RST02 est un outil développé et déployé depuis plusieurs années. On dispose ainsi d'un certain retour d'expérience. Volontairement objective, cette grille s'appuie sur les principes de la déclaration de Rio de 1992. Elle comporte 29 critères à passer successivement en revue, avec quatre critères pour chacune des dimensions et interfaces, et cinq pour la gouvernance (fig. 1.5). Ces critères sont d'égale importance et noté de -3 à +3. Une note moyenne est attribuée à chaque domaine, chaque interface, ainsi qu'à la gouvernance. La représentation des résultats se fait essentiellement sous la forme d'un diagramme type « radar », appelé profil de développement durable. Bien qu'elle puisse être appliquée aux différents stades d'un projet, son utilisation est plus pertinente au stade amont avec une marge de manœuvre plus grande.

### 1.3.2.2 Méthode Bilan Carbone<sup>TM</sup>

La méthode Bilan Carbone<sup>TM</sup> est un outil monocritère développé initialement en 2004 par Jean-Marc Jancovski pour le compte de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et qui a fait l'objet d'évolutions successives. Il s'agit avant tout d'une démarche d'évaluation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique d'un organisme public ou privé, d'une collectivité ou bien encore de toutes les activités d'un territoire. La méthode est aujourd'hui reprise par l'association Bilan carbone. Elle permet de comptabiliser les émissions des GES identifiés par le protocole de Kyoto sur la base de facteurs d'émissions qui permettent de convertir les données observables de l'entité en émissions de GES (exprimées en équivalent carbone ou équivalent CO<sub>2</sub>). Compte tenu de l'utilisation de facteurs d'émission moyens et des hypothèses à poser lors de la collecte des données, elle ne fournit que des ordres de grandeur qui permettront néanmoins de tirer des conclusions pratiques quant aux postes les plus émetteurs et aux actions à mener pour réduire les émissions. Les émissions prises en compte sont les émissions directes qui prennent place au sein de l'entité, ainsi que les émissions indirectes induites par des clients et des fournisseurs. La méthode Bilan Carbone<sup>TM</sup> a également fait l'objet de déclinaisons sectorielles. Un guide méthodologique bilan carbone appliqué au bâtiment est paru en 2011 (Ademe 2011). Ce guide fournit des facteurs d'émission de bâtiment génériques et, bien que la méthode soit monocritère, les aspects méthodologiques développés peuvent inspirer d'autres secteurs du génie civil et des travaux publics.



**Fig. 1.5. Dimensions et interfaces du développement durable et exemple de profil de développement durable**  
(source : Certu)

### 1.3.2.3 Méthode haute qualité environnementale (HQE)

La méthode HQE est un système de management des opérations (adaptation des normes ISO 14 000)<sup>(2)</sup>. Créée en 1996, l'association HQE regroupe les acteurs du bâtiment afin de développer la qualité environnementale des bâtiments de manière concertée. La démarche HQE<sup>®</sup>, promue par l'association HQE, vise à améliorer la qualité environnementale des bâtiments (QEB) neufs et existants. La certification HQE est un moyen pour les maîtres d'ou-

(2) [assohqe.org/hqe/](http://assohqe.org/hqe/)

vrage de faire reconnaître la qualité environnementale de leur démarche et de leur réalisation par une tierce partie indépendante. Il s'agit donc d'une démarche volontaire proposée aux maîtres d'ouvrages qui souhaitent valoriser leurs actions et offrir à leurs interlocuteurs une assurance quant aux performances obtenues en matière environnementale : ouvrages sains et confortables dont les impacts sur l'environnement, évalués sur l'ensemble du cycle de vie, sont les plus maîtrisés possibles. La certification HQE atteste de la conformité à un référentiel de certification et de la mise en place d'un système de management environnemental (SME). Sur cette base, le maître d'ouvrage définit des niveaux de performance et s'engage à donner les moyens aux acteurs du projet pour les atteindre. La certification HQE existe pour les bâtiments neufs comme pour les bâtiments existants, dans les domaines des bâtiments tertiaires, de la maison individuelle et du logement collectif. Son périmètre d'action s'étend depuis 2010 officiellement aux quartiers avec la certification HQE Aménagement™.

Le référentiel DEQE (définition explicite de la qualité environnementale) décrit les qualités environnementales des bâtiments. Il formalise le contenu des 14 « cibles » de la HQE (tab. 1.3). Sept cibles sont obligatoires dont trois visent la performance maximale.

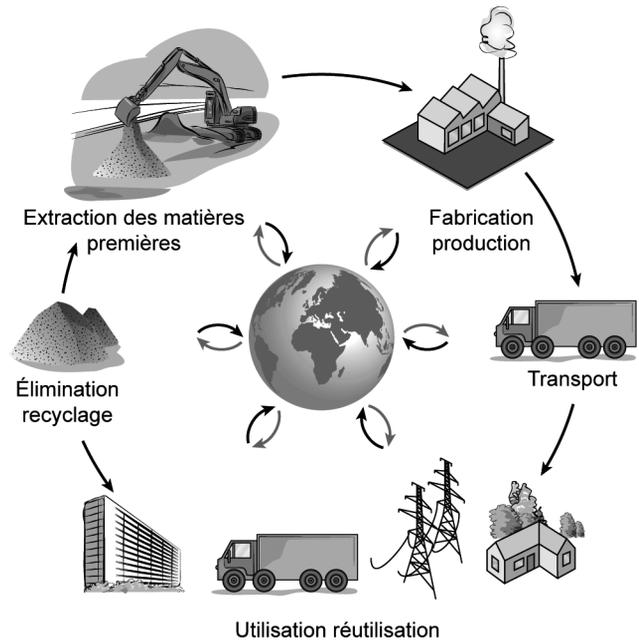
Le Grenelle de l'environnement et plus récemment la transition écologique sont porteurs d'une mutation importante, celle de la performance des bâtiments. L'association HQE s'est fixé comme objectif de proposer un cadre de référence pour évaluer cette performance afin de rendre plus lisible la démarche HQE des bâtiments auprès de ses utilisateurs et des partenaires. Les points importants de la certification HQE sont :

- une certification multicritère ;
- une liberté de choix en termes de solutions techniques et architecturales ;
- une certification délivrée par une tierce partie indépendante ;
- des référentiels de certification élaborés par consensus entre représentants professionnels, pouvoirs publics, clients/utilisateurs, organismes techniques, etc. ;
- des référentiels régulièrement révisés.

La certification HQE, confiée à Afnor certification, est intitulée : « NF ouvrage – Démarche HQE ».

#### 1.3.2.4 Méthode d'analyse de cycle de vie (ACV)

L'analyse de cycle de vie est une méthode multicritères et multi-étapes (voir § 1.4.1). Elle s'intéresse au cycle de vie complet du produit ou service étudié (fig. 1.6), ainsi qu'à la quantification des entrants et sortants (consommations des ressources, émissions dans l'air, l'eau, le sol, etc.) pour toutes les étapes du cycle de vie. Les résultats sont donnés pour différentes catégories d'impact pouvant faire appel à



**Fig. 1.6. Les différentes étapes du cycle de vie d'un produit et leur interaction avec l'environnement**

plusieurs méthodes de calcul. L'ACV s'appuie sur la définition d'une unité fonctionnelle qui caractérise le système à étudier. Elle présente l'avantage de créer une interaction forte entre performance environnementale et fonctionnalité (Jolliet *et al.*, 2005). L'ACV est ainsi un outil d'aide à la décision qui répond au besoin d'identifier les actions à engager en priorité, parmi l'ensemble des mesures envisageables permettant de maîtriser et limiter les impacts sur l'environnement.

Plusieurs « outils » ACV sont notamment dédiés au domaine du bâtiment (Elodie, Equer, Team « Bâtiment »). L'ACV est également mise en œuvre dans d'autres secteurs du génie civil et des travaux publics. Les méthodologies développées et différentes applications sont présentées dans le § 1.4.5.

## 1.4 Écoconception : du matériau aux ouvrages

Introduite récemment dans le secteur de la construction, l'écoconception permet de traiter objectivement la question de l'environnement dans un projet (fig. 1.7). En effet, un bâtiment est un système qui transforme des flux entrants (énergie, matières, fluides) et émet certains flux (déchets liquides solides ou gazeux, pollution). L'écoconception permet de maîtriser et d'optimiser ces flux grâce à une méthodologie d'évaluation : l'analyse de cycle de vie ou ACV (voir § 1.4.1).

Tab. 1.3. Les 14 cibles de la HQE

<b>Famille D1 : Les cibles de maîtrise des impacts sur l'environnement extérieur.</b>	<b>Famille D2 : Les cibles de création d'un environnement intérieur satisfaisant.</b>
<i>Famille F1 : Les cibles d'écoconstruction</i>	<i>Famille F3 : Les cibles de confort</i>
<p><b>Cible n° 1/Relation harmonieuse du bâtiment avec leur environnement immédiat.</b> Utilisation des opportunités offertes par le voisinage et le site. Gestion des avantages de la parcelle. Organisation de la parcelle pour créer un cadre de vie agréable. Réduction des risques de nuisances entre le bâtiment, son voisinage et son site.</p> <p><b>Cible n° 2/Choix intégré des procédés et produits de construction.</b> Adaptabilité et durabilité des bâtiments. Choix des procédés de construction. Choix des produits de construction.</p> <p><b>Cible n° 3/Chantier à faibles nuisances.</b> Gestion différenciée des déchets de chantier. Réduction du bruit de chantier. Réduction des pollutions de la parcelle et du voisinage. Maîtrise des autres nuisances de chantier.</p>	<p><b>Cible n° 8/Confort hygrothermique.</b> Permanence des conditions de confort hygrothermique. Homogénéité des ambiances hygrothermiques. Zonage hygrothermique.</p> <p><b>Cible n° 9/Confort acoustique.</b> Correction acoustique. Isolation acoustique. Affaiblissement des bruits d'impact et d'équipements. Zonage acoustique.</p> <p><b>Cible n° 10/Confort visuel.</b> Relation visuelle satisfaisante avec l'extérieur. Éclairage naturel optimal en termes de confort et de dépenses énergétiques. Éclairage artificiel satisfaisant et en appoint de l'éclairage naturel.</p> <p><b>Cible n° 11/Confort olfactif.</b> Réduction des sources d'odeurs désagréables. Ventilation permettant l'évacuation des odeurs désagréables.</p>
<i>Famille F2 : Les cibles d'écogestion</i>	<i>Famille F4 : Les cibles santé</i>
<p><b>Cible n° 4/Gestion de l'énergie.</b> Renforcement de la réduction de la demande et des besoins énergétiques. Renforcement du recours aux énergies environnementalement satisfaisantes. Renforcement de l'efficacité des équipements énergétiques. Utilisation de générateurs propres lorsqu'on a recourt à des générateurs à combustion.</p> <p><b>Cible n° 5/Gestion de l'eau.</b> Gestion de l'eau potable. Recours à des eaux non potables. Assurance de l'assainissement des eaux usées. Aide à la gestion des eaux pluviales.</p> <p><b>Cible n° 6/Gestion des déchets d'activité.</b> Conception des dépôts de déchets d'activités adaptée aux modes de collecte actuel et futur probable. Gestion différenciée des déchets d'activités adaptée au mode de collecte actuels.</p> <p><b>Cible n° 7/Entretien et maintenance.</b> Optimisation des besoins de maintenance. Mise en place de procédés efficaces de gestion technique et de maintenance. Maîtrise des effets environnementaux des procédés de maintenance.</p>	<p><b>Cible n° 12/Conditions sanitaires.</b> Création de caractéristiques non aériennes des ambiances intérieures satisfaisantes. Création de conditions d'hygiène. Facilitation du nettoyage et de l'évacuation des déchets d'activité. Facilitation des soins de santé. Création de commodités pour les personnes à capacités réduites.</p> <p><b>Cible n° 13/Qualité de l'air.</b> Gestion des risques de pollution par les produits de construction. Gestion des risques de pollution par l'entretien ou l'amélioration. Gestion des risques de pollution par les équipements. Gestion des risques d'air neuf pollué. Ventilation pour garantir une qualité d'air satisfaisante.</p> <p><b>Cible n° 14/Qualité de l'eau.</b> Protection du réseau de distribution collective d'eau potable. Maintien de la qualité de l'eau potable dans les bâtiments. Amélioration éventuelle de la qualité de l'eau potable. Traitement éventuel des eaux non potables utilisées. Gestion des risques liés aux réseaux d'eaux non potables.</p>

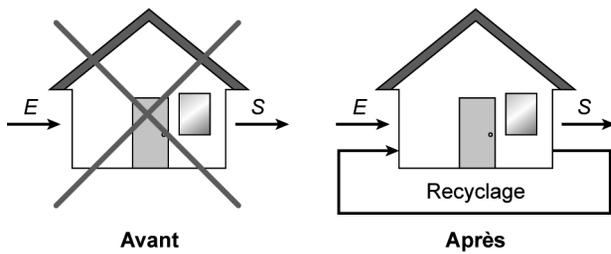


Fig. 1.7. Écoconception et construction

L'écoconception s'applique à différentes échelles. Elle peut s'appliquer au composant (voir § 1.4.4), mais une application à l'ouvrage reste à privilégier pour une plus grande pertinence (voir § 1.4.5). Enfin, l'écoconception peut s'appliquer à l'échelle du quartier ou de la ville où de nouveaux leviers de réduction des impacts environnementaux apparaissent, sous réserve d'aborder un mode de conception intersectoriel.

#### 1.4.1 Principes de l'analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée dont le cadre général et les lignes directrices sont donnés par les normes internationales NF EN ISO 14040 et NF EN ISO 14044. Elle permet d'estimer les flux de matières et d'énergies, ainsi que les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service au cours de son cycle de vie, et donc d'établir les interactions entre les procédés technologiques et leurs effets sur l'environnement. Les phases du cycle de vie comprennent « du berceau à la tombe » (voir fig. 1.6) :

- l'extraction et l'acquisition des matières premières ;
- la production ;
- le transport ;
- l'utilisation ;
- le traitement en fin de vie, le recyclage et la mise au rebut.

L'ACV a été initialement développée et formalisée pour des produits pouvant inclure des biens (produits manufacturés, matières issues de procédés, logiciels, etc.) ou des services. Son application aux matériaux de construction et aux constructions, à des ouvrages de génie civil et des infrastructures est plus récente et donne lieu à un certain nombre d'études et de questionnements. Plusieurs travaux illustrent l'utilisation de l'ACV dans ces domaines (voir § 1.4.4 et 1.4.5).

L'ACV étant une analyse multicritère, elle permet d'éviter le transfert de pollution d'un milieu vers un autre, induit par exemple par un changement de procédé. Le caractère multi-étape de l'ACV permet également d'éviter un transfert temporel de pollution. En effet, l'amélioration du bilan d'une des étapes du cycle de vie peut dégrader celui d'une autre étape. Les données spécifiques à chaque étape

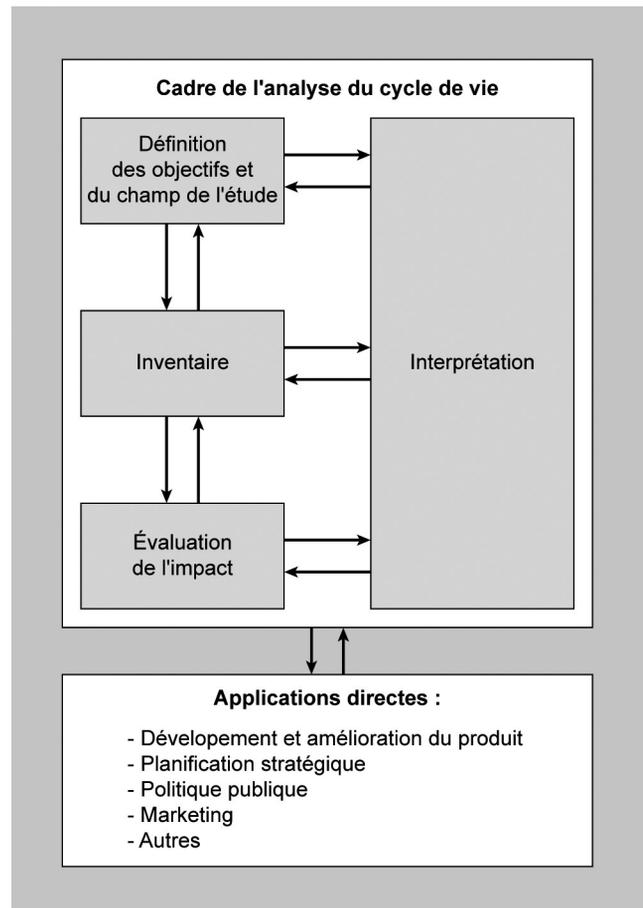


Fig. 1.8. Cadre de l'étude de l'ACV (NF EN ISO 14040)

du cycle de vie étudié permettent le calcul de l'inventaire complet des ressources prélevées, des polluants émis et des déchets générés.

Enfin, les résultats sont exprimés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement générés tout au long du cycle de vie, et rapportés à une unité fonctionnelle intégrant une durée de vie. L'unité fonctionnelle est donc l'unité de compte à laquelle se réfère l'ACV. Elle doit être définie avec précision et en cohérence avec les objectifs et le champ de l'étude, car toutes les données d'entrée et de sortie du système, ainsi que les flux, lui sont affectés. L'unité fonctionnelle se décompose donc en :

- une unité de produit ;
- une unité de fonction ;
- une unité de temps (« durée de vie typique »).

Ainsi, réaliser une analyse de cycle de vie complète permet d'évaluer l'impact environnemental global de l'unité fonctionnelle préalablement définie et implique le suivi de la méthodologie décrite dans les normes NF EN ISO 14040 et NF EN ISO 14044. C'est un processus itératif qui se décompose en quatre étapes (fig. 1.8).

# Le grand livre des bétons

Le béton est un matériau de construction fabriqué à partir de granulats agglomérés par une matrice cimentaire. Ses caractéristiques de mise en œuvre ou finales peuvent être améliorées et optimisées en utilisant des adjuvants, des additions ou des additifs. Les nombreux bétons disponibles, qu'ils soient fabriqués sur chantier, en centrale BPE (béton prêt à l'emploi) ou en usine de préfabrication, répondent à des cahiers des charges précis et peuvent être inclus dans des gammes spécifiques telles que les bétons hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants (BAP), les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), etc.

*Le Grand Livre des bétons* traite de tous les bétons en détaillant les caractéristiques de leurs constituants, afin d'optimiser leur impact environnemental, leur durabilité, leur formulation, leur fabrication, leur transport et leur mise en œuvre sur le chantier, ainsi que leur contrôle *in situ* ou en laboratoire.

Il rappelle les spécifications auxquelles ils doivent répondre en tenant compte des exigences environnementales, des contraintes appliquées et des moyens de mise en œuvre.

Il étudie les bétons spéciaux et les nouveaux bétons (bétons à hautes performances, bétons de fibres, etc.).

Cet ouvrage de référence, comportant de nombreuses illustrations, permet d'avoir une vue d'ensemble de tous les paramètres régissant la qualité et la durabilité du béton, qui a permis, ces dernières années, les réalisations architecturales les plus audacieuses et spectaculaires. Rédigé par les meilleurs spécialistes à la pointe de la recherche et de l'application de ces matériaux, il s'adresse aux fabricants de béton, maîtres d'ouvrage, chefs de projet, services techniques, maîtres d'œuvre, ingénieurs, architectes, ainsi qu'aux étudiants.

RÉFÉRENCE  
TECHNIQUE

EDITIONS  
**LE MONITEUR**

editionsdumondeur.com

ISSN 1257-9823  
ISBN 978-2-281-11689-2



9 782281 116892

## Sommaire

### Partie 1. Enjeux du béton

1. Bétons et développement durable
2. Durabilité, approches prescriptive et performantielle
3. Contexte normatif

### Partie 2. Constituants du béton

4. Ciments
5. Granulats
6. Eau de gâchage
7. Adjuvants
8. Additions minérales

### Partie 3. Formulation des bétons

9. Propriétés des bétons
10. Méthodes de formulation
11. Gamme des bétons modernes

### Partie 4. Fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle

12. Fabrication et transport
13. Mise en œuvre
14. Contrôle des bétons

### Partie 5. Comportement mécanique

15. Microstructure et déformations du béton au jeune âge
16. Comportement mécanique du béton
17. Déformations différées du béton
18. Maîtrise de la fissuration en béton armé

Sous la direction de Laetitia D'Aloia-Schwartzentruber et Jean-Michel Torrenti, une trentaine de spécialistes ont participé à la rédaction de l'ouvrage, provenant de l'industrie (Sika, Cemex, Atilh/EFB, Synad, Cerib, Rector Lesage, Vinci, Eiffage, Bouygues, SNBPE, MAPEI), d'organismes institutionnels (Cerema, CNRS, Ifsttar, CETU) et de laboratoires universitaires (universités de Toulouse, de La Rochelle, École Centrale Nantes, École nationale des ponts et chaussées).

**Laetitia D'Aloia-Schwartzentruber**, ingénieur divisionnaire des travaux publics de l'État, chargé d'études et de recherches au sein du pôle matériaux structures et vie de l'ouvrage (MSVO) et chargé de mission développement durable au Centre d'études des tunnels (CETU).

**Jean-Michel Torrenti**, ingénieur des ponts, des eaux et des forêts, responsable recherche et développement du département matériaux et structures de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).