



TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS  
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



# GÉNIE NUCLÉAIRE

## DURABILITÉ DES BÉTONS DES CENTRALES NUCLÉAIRES FRANÇAISES

---

Avril / 2022



Date de publication :  
**10 novembre 2021**

# Durabilité des bétons des centrales nucléaires françaises

Cet article est issu de : **Énergies | Génie nucléaire**

par **Valérie L'HOSTIS, Laurent CHARPIN**

## Mots-clés

béton armé | gestion du  
vieillessement | performance  
structurale | entretien

## Keywords

reinforced concrete | ageing  
management | structural  
performane | maintenance

**Résumé** Le matériau le plus utilisé dans une centrale nucléaire est le béton armé : confinement du réacteur, tours de refroidissement, piscines d'entreposage de combustible usé, radier, bâtiments d'exploitation, puits de cuve et canalisations. Ces structures en béton armé sont non seulement exposées à diverses conditions environnementales, mais également à de nombreuses contraintes thermiques, chimiques, hydriques, radiologiques et mécaniques. Dans ce cadre, il est de première importance d'être capable de comprendre, modéliser, prévoir et surveiller ces installations ainsi que de les maintenir dans les meilleures conditions opérationnelles possibles et le plus longtemps possible. Cet article résume les connaissances disponibles sur ces sujets.

**Abstract** Reinforced concrete is the most widely used material in nuclear power plants: reactor confinement, cooling towers, spent fuel pools, basement raft, operations buildings, biological shield, and pipes. These reinforced concrete structures are exposed to a variety of environmental conditions, and to thermal, chemical, hydrological, radiological, and mechanical stresses. Therefore, it is crucial to be able to understand, model, forecast, monitor and maintain these structures in the best operational conditions for the longest possible time. This article is a summary of knowledge available on this topic.

## Pour toute question :

Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com

**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **08/04/2022**

Pour le compte : **7200106152 - éditions ti // céline BLONBOU // 92.170.243.158**

# Durabilité des bétons des centrales nucléaires françaises

par **Valérie L'HOSTIS**

Expert Sénior sur la durabilité des structures en béton  
Direction des programmes énergies, Cellule partenariats institutionnels  
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA Paris-Saclay), Gif-sur-Yvette, France

et **Laurent CHARPIN**

Ingénieur Chercheur, Chef de groupe  
EDF Lab Chatou, Chatou, France

<b>1. Structures en béton et conditions environnementales</b> .....	BN 3 742 – 3
1.1 Enceinte de confinement .....	– 3
1.2 Tours aéroréfrigérantes .....	– 3
1.3 Piscines d'entreposage de combustible .....	– 4
1.4 Canalisations en béton armé et ouvrages de prise d'eau .....	– 4
1.5 Puit de cuve .....	– 4
<b>2. Matériaux</b> .....	– 4
2.1 Composition et structure du béton .....	– 4
2.2 Propriétés mécaniques du béton, des ferraillages, de la précontrainte .....	– 4
2.3 Liners métalliques .....	– 5
<b>3. Durabilité des bétons</b> .....	– 5
3.1 Origines de la dégradation des propriétés .....	– 5
3.2 Corrosion par carbonatation .....	– 5
3.3 Corrosion par les chlorures .....	– 6
3.4 Déformations différées et effets thermohydriques .....	– 7
3.4.1 Problématique industrielle .....	– 7
3.4.2 Impact des déformations différées .....	– 7
3.5 Lixiviation .....	– 8
3.6 Réactions endogènes .....	– 8
<b>4. Gestion du vieillissement des structures du génie civil dans les centrales nucléaires</b> .....	– 9
4.1 Pour les structures normales : maintenance classique .....	– 9
4.1.1 PLANIFIER : développement et optimisation des activités de gestion du vieillissement .....	– 9
4.1.2 FAIRE : fonctionnement et utilisation des structures et des composants.....	– 10
4.1.3 VÉRIFIER : inspection, surveillance et évaluation des structures et des composants .....	– 10
4.1.4 AGIR : entretien des structures et des composants .....	– 11
4.2 Pour les structures particulières (aéroréfrigérants et enceintes de confinement) : la démarche de jumeau numérique .....	– 11
<b>5. Conclusion</b> .....	– 12
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. BN 3 742

**L**e béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Ce matériau est associé à des renforts passifs (les armatures ou ferrillages) et parfois des renforts actifs (les câbles de précontrainte). Le matériau composite ainsi formé permet de construire des structures résistantes et de formes complexes, ce qui en fait un matériau de choix pour la construction.

Ce matériau est largement utilisé dans l'industrie nucléaire, que ce soit dans les centrales nucléaires ou en aval du cycle du combustible pour l'entreposage ou le stockage des déchets nucléaires.

Les composants élémentaires indispensables du béton sont de l'eau, du ciment, et des granulats de différentes tailles (sable, cailloux). Les granulats utilisés sont généralement locaux, en raison des coûts de transport. Ainsi, il n'y a pas d'homogénéité des formulations ni dans le temps ni dans l'espace. Chaque béton est différent.

De plus, chaque structure en béton est exposée à des conditions environnementales différentes, selon qu'elle se trouve dans une région plus ou moins chaude, plus ou moins humide, en bord de mer, soumise au gel et aux sels de déverglaçage, et au contact avec différents types de sols.

L'évaluation de la durée de vie des structures en béton est donc une tâche difficile, qui nécessite d'avoir une vision d'ensemble des pathologies et phénomènes physiques pouvant affecter les bétons, et des chargements (mécaniques et environnementaux) qui s'imposent à une structure donnée.

Enfin, en ce qui concerne le contexte du nucléaire, certaines des structures en béton qui composent une centrale nucléaire ont un rôle important pour la sûreté. Une défaillance de ces structures aurait, outre l'impact économique engendré par une indisponibilité de la centrale, des conséquences sur le risque de rejets radioactifs dans l'environnement, en cas d'accident. C'est le cas par exemple des enceintes de confinement.

En conséquence, les opérateurs nucléaires étudient les pathologies qui affectent les bétons de leurs ouvrages, afin d'être capables d'évaluer la durée de vie résiduelle des structures, et les opérations de maintenance appropriées pour étendre la durée de vie.

Cet article présente tout d'abord les structures en béton pour lesquelles des problématiques de durabilité ont été identifiées et étudiées, telles que les enceintes de confinement, les tours aéroréfrigérantes, les piscines d'entreposage de combustible, les canalisations en béton armé, les ouvrages de prise d'eau, et les puits de cuve. Pour chacune de ces structures, les mécanismes de vieillissement pertinents sont exposés rapidement.

Dans un deuxième temps, le matériau béton est présenté plus en détail : les principales caractéristiques de ses constituants, notamment du ciment, sont exposées, ainsi que le principe de la réaction d'hydratation qui permet au béton de durcir lorsque le ciment est mis en présence d'eau. Les matériaux métalliques fréquemment utilisés en association avec le béton tels que les ferrillages, les câbles de précontrainte, et les liners métalliques, sont également décrits.

Ensuite, les principaux phénomènes de vieillissement qui ont un impact sur les structures en béton et qui sont susceptibles de limiter leur durée de vie opérationnelle dans une centrale nucléaire sont présentés. La corrosion par carbonatation et par les chlorures, puis les déformations différées, et enfin la lixiviation et les réactions endogènes sont décrites en détail.

Enfin, la méthodologie mise en œuvre pour gérer les problèmes concrets de vieillissement dans les centrales nucléaires est expliquée. Deux cas de figures sont distingués : le cas général (d'ailleurs non limité aux structures du génie civil), les structures exceptionnelles pour lesquelles il peut être pertinent de mettre en place une démarche de jumeau numérique pour gagner en efficacité sur leur suivi.

# 1. Structures en béton et conditions environnementales

Au cours de la durée de vie opérationnelle d'une centrale nucléaire (figure 1), les structures en béton sont généralement soumises à un certain nombre de contraintes environnementales (thermiques, hydriques, chimiques, irradiation, etc.), en plus des phénomènes de vieillissement inhérents au matériau (détérioration physique et chimique du béton). Ces phénomènes affectent les performances du béton et sont susceptibles de limiter la durabilité des structures.

Les principales structures en béton concernées par le vieillissement dans une centrale nucléaire ainsi que les mécanismes de vieillissement susceptibles de les affecter sont présentés dans cette section.

## 1.1 Enceinte de confinement

L'enceinte est la troisième et dernière barrière de confinement empêchant les produits de fission de s'échapper dans l'environnement en cas d'accident. La conception de l'enceinte du réacteur diffère selon le type de technologie de réacteur [1]. Les structures de confinement des réacteurs utilisent du béton précontraint. L'épaisseur des parois de l'enceinte de confinement du réacteur est de l'ordre de 1 m.

Le parc nucléaire français comporte trois types d'enceintes :

- les enceintes à simple paroi (ESP) en béton armé précontraint, qui porte la tenue structurelle de l'ouvrage, l'étanchéité étant assurée par un liner métallique (palier 900 MWe) ;

- les enceintes à double paroi (EDP), pour lesquelles l'étanchéité et la tenue structurelle sont assurées par la paroi en béton précontraint (paliers 1 300 MWe et 1 450 MWe) ;
- les enceintes EPR cumulent les deux approches avec une EDP et un liner interne. Le concept EPR2 repose sur une ESP à liner, dont la paroi béton est épaissie pour garantir sa résistance aux agressions externes.

Dans des conditions de fonctionnement normal, l'enceinte de confinement du réacteur est soumise à une gamme de contraintes opérationnelles et environnementales : les épreuves enceintes, les variations de température, les tremblements de terre et les tempêtes. Elle doit également rester étanche en cas d'accident grave. Le béton de cette structure précontrainte est également susceptible de fluer en raison des fortes charges permanentes imposées par la précontrainte, ce qui peut altérer la performance de l'enceinte et son étanchéité.

Certaines enceintes sont également affectées par des réactions de gonflement des bétons, ce qui compense une partie du retrait et du fluage de l'enceinte. Ces réactions peuvent, lorsqu'elles atteignent une amplitude importante, altérer les propriétés mécaniques de l'ouvrage. Ce n'est actuellement pas le cas pour les enceintes du parc français.

## 1.2 Tours aéroréfrigérantes

Elles sont conçues pour évacuer la chaleur des systèmes de refroidissement vers l'environnement extérieur. Elles peuvent atteindre jusqu'à 170 mètres de hauteur tandis que leur base peut dépasser un diamètre de 100 m. Les murs en béton sont cependant très fins, avec une épaisseur minimale de 16 cm [2]. Les tours de refroidissement sont soumises à de fortes contraintes hydriques et thermiques, et de tassement différentiel. Des



La centrale nucléaire du Bugey est équipée de quatre réacteurs de la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP), d'une puissance de 900 MW chacun. Les enceintes simple paroi et les aéroréfrigérants sont ici visibles.

Figure 1 – Vue aérienne de la centrale nucléaire du Bugey, sur la rive droite du Rhône (©EDF)

gradients thermiques et hydriques se produisent entre les surfaces intérieure et extérieure de la structure. Le béton armé présente également des épaisseurs d'enrobage assez modérées en raison de la faible épaisseur de la structure. Cette structure est donc sensible à la carbonatation de l'enrobage en béton et à la corrosion des armatures en acier.

### 1.3 Piscines d'entreposage de combustible

Les parois des piscines de combustible usé sont en béton armé pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur. Selon la configuration, un revêtement en acier inoxydable peut également être utilisé soit en contact avec l'eau (configuration utilisée en France), soit entre deux couches de béton. En l'absence de liner métallique ou en cas de dégradation de celui-ci, le béton peut être en contact permanent avec une eau de pH neutre contenant plus ou moins d'acide borique. Il est possible que le béton subisse une dégradation chimique.

### 1.4 Canalisations en béton armé et ouvrages de prise d'eau

Dans certaines centrales nucléaires, des tuyaux en béton avec des âmes tôles sont utilisés pour certains circuits de refroidissement liés au fonctionnement normal ou de secours. Ces canalisations transportent de l'eau contenant des concentrations variables de chlorures (eau de mer, eau d'estuaire ou de rivière). Elles sont susceptibles d'être affectées par la corrosion de leur âme tôle en acier.

Pour les centrales de bord de mer, de nombreuses structures en béton armé sont également en contact avec l'eau : ouvrages d'amenée d'eau, de prise d'eau, de rejet, et digues. Ces structures peuvent également être touchées par les problématiques de corrosion de armatures.

### 1.5 Puit de cuve

Cette structure en béton supporte la cuve du réacteur. Elle est conçue pour transférer des charges (statiques et sismiques) dans la fondation. Elle assure également une protection (dite biologique) contre les rayonnements émis par le cœur du réacteur. Elle pèse environ 400 tonnes. Les parois de cette structure ont une épaisseur d'environ 1,5 à 2,2 m dans les réacteurs à eau pressurisée (REP). Le béton du puits de cuve est soumis à un flux de neutrons provenant de la cuve du réacteur qui peut induire des modifications microstructurales de granulats et leur gonflement [3]. Les propriétés de ces bétons sont donc susceptibles de se dégrader sur du très long terme : les récentes études montrent qu'il faudrait attendre 80 ans pour voir les effets sur des réacteurs tels que ceux du parc français. Ce risque est donc jugé négligeable vu les durées d'exploitation actuellement prévues pour le parc français.

Cet article se concentrera sur le comportement des structures telles que les enceintes de confinement des réacteurs, les tours de refroidissement, les piscines de stockage de combustible usé et les canalisations en béton armé. Pour plus d'information, voir le rapport de l'AIEA [4].

#### À retenir

- Les principales structures du génie civil concernées par des thématiques de durabilité sont les enceintes de confinement, les tours aéroréfrigérantes, les piscines d'entreposage du combustible usé, les canalisations en béton et les puits de cuve.
- Chacune de ces structures est exposée à des sollicitations spécifiques qui doivent être prises en compte pour évaluer leur durée de vie.

## 2. Matériaux

Les structures en béton liées à la sûreté nucléaire sont composées de divers composants qui remplissent de multiples fonctions, par exemple : support de charge, protection contre les radiations et étanchéité. Ces structures sont principalement composées de béton, d'armatures en acier conventionnelles, d'acier précontraint et de plaques de revêtement en acier (liners). La qualité de ces matériaux est régie par des réglementations, des tests de qualification et des certifications, et est également surveillé tout au long de la construction. De plus amples informations sur ces matériaux de construction sont fournies dans la littérature [5] [4] et dans les normes NF EN 206.

### 2.1 Composition et structure du béton

Le béton est un matériau composite constitué d'un liant (pâte de ciment) et d'une charge (granulats) qui se combinent pour former un matériau composite synthétique. Le ciment est un mélange de composés obtenus par broyage de calcaire concassé, d'argile, de sable et de minerai de fer. Ensemble, ils forment une poudre homogène qui est ensuite chauffée à des températures très élevées allant de 1 400 à 1 600 °C pour former un clinker (voir NF EN 206, NF EN 197-1). Une fois le clinker refroidi, il est broyé et mélangé avec une petite quantité de gypse pour réguler la prise et faciliter la mise en place. Cela produit le ciment Portland à usage général, qui est mélangé à de l'eau pour produire une pâte de ciment qui lie les granulats entre eux.

Les ciments Portland sont principalement composés de quatre composés chimiques anhydres : l'alite (C3S), la bélite (C2S), l'aluminat tricalcique (C3A) et l'aluminoferrite tétracalcique (C4AF). Le type de ciment est conditionné par les proportions de ces quatre anhydres. Ces anhydres réagissent avec l'eau par une série de réactions chimiques. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) constituent environ 75 % de la masse d'hydrates, tandis que 20 % du volume de pâte de ciment durci est de l'hydroxyde de calcium (portlandite). Les hydrates de type sulfoaluminate de calcium (sous forme d'ettringite ou de monosulfate) sont présents en moindre proportion. La solution porale est normalement une solution saturée en hydroxyde de calcium contenant des concentrations élevées d'hydroxyde de potassium et de sodium.

Il existe également un certain nombre de produits qui sont utilisés en substitution d'une fraction de la masse de ciment Portland ; il s'agit de cendres volantes, de laitier de haut fourneau et de fumée de silice. Ces additions apportent divers bénéfices, comme une réduction ou un décalage dans le temps de la chaleur d'hydratation, une moindre production de CO<sub>2</sub> liée à leur production, et sont donc favorisés pour certaines applications [6].

Les granulats occupent généralement 60 à 75 % du volume du béton et, par conséquent, ses caractéristiques influencent fortement les propriétés chimiques, physiques et thermiques du béton, ses proportions de mélange et son coût. Les granulats sont généralement d'origine locale pour limiter les coûts de transport, ce qui fait que les bétons sont différents sur chaque site nucléaire.

Le mélange de béton se compose généralement, en proportions volumiques, de 10 à 15 % de ciment, de 15 à 20 % d'eau et d'air.

### 2.2 Propriétés mécaniques du béton, des ferrillages, de la précontrainte

Les composants sont dosés et mélangés pour réaliser un béton de ciment Portland aux propriétés spécifiques. Selon les caractéristiques de la structure, le mélange de béton peut être ajusté pour offrir une résistance accrue, une durabilité plus élevée ou une meilleure maniabilité pour le placement. Le béton durci fournit la capacité en termes de résistance à la compression de la structure.

Les résistances à la compression du béton se situent généralement entre 25 et 55 MPa (certains bétons spécifiques peuvent atteindre 100 MPa).

La résistance à la traction du béton est d'environ un dixième à un cinquième de sa résistance à la compression, de sorte que le béton ne peut pas résister à des contraintes de traction très élevées. Cette limitation est surmontée en incorporant des armatures en acier dans le béton afin que le béton et l'acier travaillent ensemble. En plus de résister aux charges de traction, le ferrailage est utilisé pour contrôler l'espacement et l'ouverture des fissures, en particulier lorsqu'il est nécessaire de réduire les sections transversales des éléments. Le ferrailage est également utilisé dans les éléments de compression pour se protéger contre les effets de moments de flexion non permanents qui pourraient fissurer ou même casser l'élément. L'efficacité du béton armé en tant que matériau de structure dépend (i) de la liaison interfaciale entre l'acier et le béton pour qu'il agisse comme un matériau composite, (ii) de l'effet passivant de l'environnement du béton hautement alcalin pour inhiber la corrosion de l'acier, et (iii) des coefficients de dilatation thermique similaires du béton et de l'acier. Les armatures utilisées dans les centrales nucléaires sont généralement des barres en acier au carbone ordinaire conformes à la norme NF A 35-080.

La précontrainte par post-tension est une méthode de renforcement du béton avec des câbles à haute résistance (par opposition à la méthode de pré-tension où le béton est coulé sur des câbles en tension, dans la post-tension les câbles sont tendus après la prise du béton). Cette méthode permet à l'élément de structure de résister aux efforts de traction puisque le béton reste en compression grâce à la précontrainte. Un certain nombre de structures de confinement en béton pour les centrales nucléaires utilisent des câbles de précontrainte en acier qui sont conçus pour avoir (i) une résistance à la rupture élevée, (ii) des procédures de précontrainte fiables et sûres, et (iii) en France, une protection anticorrosion et une assurance contre la rupture éventuelle de torons grâce à l'injection, dans les gaines de précontrainte, de coulis de ciment. Les câbles sont installés dans des gaines pré-placées dans la structure et post-tendus à partir d'une ou des deux extrémités après que le béton a atteint une résistance suffisante. Après la mise en tension, les câbles sont ancrés dans une plaque de répartition des efforts par des clavettes. La protection contre la corrosion est assurée en remplissant les conduits avec de la cire ou de la graisse anticorrosion (non liée) ou du coulis de ciment Portland (lié).

## 2.3 Liners métalliques

L'étanchéité des enceintes de confinement en béton armé précontraint est (sur le palier 900 MWe et l'EPR en France, et sur la majorité des enceintes à l'étranger) assurée par une plaque de revêtement en acier. Un revêtement typique est composé de tôles d'acier d'environ 6 mm d'épaisseur, jointes par soudage et ancrées au béton par des goujons et des cornières métalliques. Bien que la fonction principale du revêtement soit de fournir une barrière étanche, il fait partie du coffrage lors de la mise en place du béton et peut être utilisé pour soutenir la tuyauterie ou l'équipement interne. Le liner n'est pas considéré comme contribuant à la résistance de la structure.

### À retenir

- Les bétons des centrales nucléaires sont tous différents : granulats locaux, formulations variées selon les usages.
- L'hydratation des bétons est une succession de réactions chimiques qui entraînent la fabrication progressive d'hydrates, qui donnent sa cohésion au béton.
- Le béton seul a une faible résistance en traction, donc des aciers  $\gamma$  sont ajoutés sous forme de ferrailage dans le génie civil classique, et sous forme de précontrainte dans le cas de certains ouvrages d'art et des enceintes de confinement.
- L'étanchéité de la majorité des enceintes de confinement du monde repose sur un liner métallique.

## 3. Durabilité des bétons

### 3.1 Origines de la dégradation des propriétés

Dès le moment de la construction, les structures en béton armé peuvent commencer à se détériorer sous une forme ou une autre en raison de l'exposition à l'environnement (par exemple température, humidité et charges cycliques) [7]. La durée de vie d'un composant prend fin lorsqu'il ne peut plus répondre à ses exigences fonctionnelles et de performance, lorsqu'il devient obsolète ou lorsque les coûts de maintenance deviennent excessifs.

Les principaux mécanismes (facteurs) qui peuvent entraîner la détérioration prématurée des structures en béton armé dans des conditions défavorables comprennent ceux qui ont un impact sur le béton ou sur les matériaux de renforcement en acier (ferrailage ou précontrainte). La dégradation du béton peut être causée par des performances défavorables de sa matrice de pâte de ciment ou des granulats soumis à une attaque chimique ou physique. En pratique, ces processus peuvent se produire simultanément pour se renforcer mutuellement. Dans presque tous les processus physiques et chimiques influençant la durabilité des structures en béton, les facteurs dominants comprennent les mécanismes de transport dans les pores et les fissures, et la présence d'eau.

L'attaque chimique peut se produire sous plusieurs formes : efflorescence ou lessivage ; attaque par des sulfates, des acides ou des bases ; formation d'ettringite différée et réactions alcalis-granulats. L'attaque physique implique la dégradation du béton due à des facteurs externes et implique généralement une fissuration lorsque la résistance à la traction du béton est dépassée ou que le béton d'enrobage (qui protège la première couche d'armatures) est perdu.

Les mécanismes d'attaque physique du béton comprennent la cristallisation du sel, le gel/dégel, l'exposition thermique/le cycle thermique, l'abrasion/l'érosion/la cavitation, l'irradiation, la fatigue ou les vibrations, l'attaque biologique et le tassement. La dégradation des armatures peut se produire en raison de la corrosion, de l'irradiation, de la température élevée ou des effets de fatigue, la corrosion étant la forme d'attaque la plus probable. Les systèmes de post-tension sont sensibles aux mêmes mécanismes de dégradation que les armatures, auxquels s'ajoutent les pertes de précontrainte, principalement en raison de la relaxation de la tension dans les câbles (très modérée à température ambiante), du fluage et du retrait du béton.

Des informations supplémentaires sur la durabilité des structures en béton armé des centrales nucléaires sont disponibles dans [8].

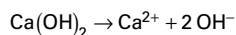
Les sous-sections suivantes décrivent les principaux phénomènes de dégradation pertinents pour chaque structure de béton différente. La corrosion des barres d'armature et des liners en acier est un problème pour les tours de refroidissement à eau (corrosion due à la carbonatation) et les tuyaux en béton armé (corrosion due aux chlorures). La détérioration chimique du béton se produit dans les structures totalement immergées, comme les piscines d'entreposage de combustible usé. La dégradation physique (thermique et hydrique) et le fluage concernent principalement les enceintes de confinement des réacteurs.

### 3.2 Corrosion par carbonatation

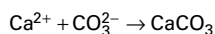
La carbonatation est un phénomène naturel résultant de la dissolution du dioxyde de carbone dans l'air dans la solution interstitielle du matériau cimentaire (milieu poreux plus ou moins saturé en eau). L'effet du  $\text{CO}_2$  se produit à de faibles concentrations (0,04 % de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère). Le  $\text{CO}_2$  diffuse sous une forme dissoute et gazeuse en fonction du niveau de saturation du matériau. L'incorporation de  $\text{CO}_2$  dans la solution fait chuter le pH de la

solution interstitielle, de 13 à des valeurs aussi basses que 8. Une réaction acido-basique se produit alors avec les composés basiques tels que la portlandite et les C-S-H (silicate de calcium hydraté), entraînant des modifications minérales et microstructurales. Les principaux hydrates de la pâte de ciment se dissolvent et les carbonates de calcium précipitent.

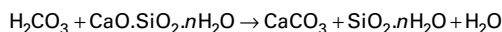
Par exemple, la portlandite se dissout comme suit :



Les ions calcium réagissent ensuite avec les ions carbonate pour former de la calcite :



Les autres composés de la pâte de ciment réagissent également, comme le C-S-H, selon la réaction suivante :



La portlandite et le C-S-H sont complètement dissouts à long terme. L'état ultime de dégradation correspond à l'accumulation de carbonate de calcium et de gel de silice.

Le front de carbonatation se propage selon une cinétique régie par la diffusion :

$$D = K\sqrt{t}$$

avec	<i>D</i>	qui représente l'épaisseur de la couche carbonatée (en mm),
	<i>K</i>	qui représente le coefficient de carbonatation (en mm/√an). Ce paramètre est conditionné par plusieurs facteurs liés aux caractéristiques du béton (rapport eau/ciment, type de ciment) et de l'environnement (humidité relative et concentration en CO <sub>2</sub> ),
	<i>t</i>	qui représente le temps d'exposition (années).

La technique la plus couramment utilisée pour identifier la progression du front de carbonatation consiste à pulvériser un indicateur coloré (phénolphtaléine) sur une carotte de béton. Les zones non carbonatées, avec des valeurs de pH proches de 13, virent au rose tandis que les zones dans lesquelles le pH est inférieur à 9 restent incolores.

Le traitement thermique appliqué à l'armature en acier pendant le processus de fabrication produit une couche nanométrique de magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) sur sa surface [9]. Comme déjà mentionné, le pH de la solution interstitielle dans le béton est d'environ 13. À ce pH, les oxydes de fer (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont stables et l'acier noyé dans le béton est placé dans des conditions passives. La couche d'oxydes de fer est appelée couche de passivation. La cinétique de corrosion des armatures en acier est pratiquement inexistante dans ces conditions. Elle est approximativement égale à 0,1 μm/an [10]. Lorsque le front de carbonatation atteint l'armature en acier ou la doublure en acier, le pH dans les pores chute d'environ 12,5 à 8,5, ce qui rend le fer instable. La dépassivation de l'acier se produit lorsque ce critère est atteint, même si d'autres paramètres doivent être pris en compte : oxygène, eau, disponibilité de l'électrolyte, pH, cellules d'aération différentielle, etc.

Une fois que tous les critères sont remplis, la corrosion devient active. L'acier se dissout selon les réactions électrochimiques suivantes :

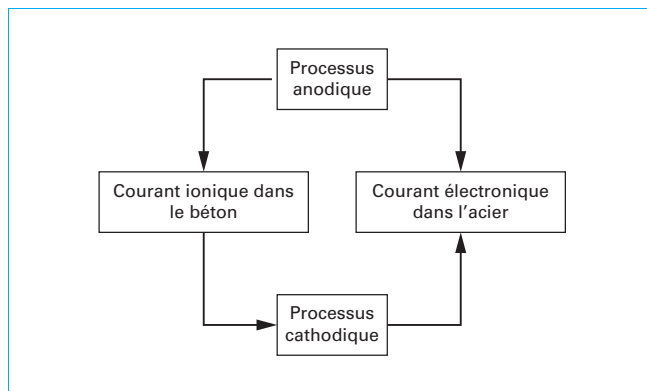
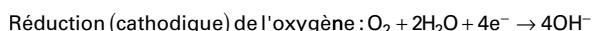
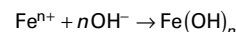


Figure 2 – Représentation schématique des mécanismes électrochimiques de la corrosion de l'acier dans le béton

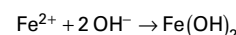
Le système est complet avec deux réactions supplémentaires (figure 2) :

- migration des ions des zones cathodiques vers les zones anodiques dans le béton ;
- transferts d'électrons des zones anodiques vers les zones cathodiques dans le métal.

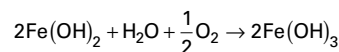
Une réaction entre les produits de la réaction anodique et les produits de la réaction cathodique est alors possible. Ainsi, les produits de corrosion se développent par la formation d'hydroxydes, comme suit :



Par exemple, l'hydroxyde de fer (II) est un produit de corrosion « précurseur » :



Il se transforme en oxyde de fer hydraté (III) en raison de l'oxydation partielle.



Selon Huet *et al.* [11], ces hydroxydes de fer se forment autour d'un pH de 9,4 ou aux valeurs inférieures.

Ces produits de corrosion commencent à précipiter dans la porosité connectée disponible dans le béton entourant la barre d'acier. Au début, un petit volume de produit remplit les pores sans générer d'effets négatifs sur le béton. Cependant, le volume des produits de corrosion augmente à mesure que l'état de corrosion progresse. Il peut même atteindre six fois le volume du fer métallique [12]. Cette augmentation de volume induit une pression sur l'interface acier-béton qui peut conduire à des fissures une fois la résistance à la traction du béton dépassée. Une croissance lente du volume peut entraîner des fissures dans la couche de béton le long de l'acier. Une croissance plus forte du volume peut conduire à un délaminage voire à un éclatement lorsque cette croissance est excessive.

### 3.3 Corrosion par les chlorures

Les chlorures diffusent à travers la structure poreuse capillaire de la pâte de ciment. La cinétique de transport dépend fortement d'un certain nombre de facteurs, par exemple le rapport eau/ciment, le type de ciment, la température du béton et la maturité du béton. Certains chlorures réagissent chimiquement avec les composants du ciment (par exemple les aluminates de calcium) et sont



efficacement éliminés de la solution interstitielle. La fraction de chlorures totaux disponible dans la solution interstitielle pour décomposer le film passif est conditionnée par plusieurs paramètres, par exemple le pH et la source des chlorures-mélange ou l'environnement. Le seuil de concentration de chlorure en dessous duquel une corrosion significative ne se produit pas dépend également de ces paramètres : ce seuil est considéré comme égal à 0,4 % (en poids) de Cl dans le ciment [13].

Les chlorures peuvent être trouvés dans le béton en raison de sources externes (effet de l'eau de mer dans le cas des tuyaux en béton armé pour les centrales nucléaires par exemple). Une fois la couche de passivité de l'acier endommagée, la résistivité électrique du béton et l'oxygène disponible contrôlent la cinétique de corrosion. La disponibilité d'oxygène dans les sites cathodiques est une condition préalable à la corrosion. Parfois, le taux d'oxygène est limité dans les sites anodiques actifs, alors la couleur résultante des produits de corrosion peut être verte, blanche ou noire. Comme mentionné ci-dessus, la conversion du fer métallique en oxyde ferrique (rouille) comprend une augmentation de volume. Le fer métallique peut augmenter en volume d'un facteur six selon l'état d'oxydation. L'augmentation de volume associée à la corrosion peut provoquer des fissures, des éclats et même un délaminage dans le béton. Cependant, le béton d'enrobage peut parfois se désintégrer avant que tout signe de détérioration ne soit visible à la surface du béton.

La résistance structurelle est ainsi réduite lorsque la corrosion entraîne une perte importante de la section de l'acier et/ou une perte de liaison entre l'acier et le béton. Outre la fissuration et l'écaillage, la corrosion entraînera une réduction de la section des armatures, une ductilité réduite et une altération de l'interface entre le béton et l'acier.

## 3.4 Déformations différées et effets thermohydriques

### 3.4.1 Problématique industrielle

À la différence de grands ouvrages de génie civil tels que les ponts ou les barrages, les enceintes de confinement des réacteurs à eau pressurisée ne subissent pas en permanence les sollicitations principales pour lesquelles elles sont conçues : les chargements dimensionnants sont hypothétiques et liés à des conditions accidentelles. Cependant le chargement maximal que doit supporter l'enceinte atteint des niveaux très élevés et non courants pour des ouvrages de génie civil tant vis-à-vis des sollicitations thermomécaniques internes (pression, température) que des sollicitations dynamiques externes (explosion, séisme, chutes d'avion) et environnementales (inondations externes, grands chauds, grands froids), avec de surcroît le cumul de certaines sollicitations externes et internes. Ces spécificités confèrent aux enceintes de confinement un caractère exceptionnel dans le paysage des ouvrages en béton, tant au niveau de la conception que de l'exploitation.

Ces enceintes, comme dans les autres pays, sont en béton précontraint, mais, à la différence des États-Unis, EDF a adopté dès la centrale de Fessenheim le concept de précontrainte adhérente, avec des gaines de précontrainte injectées définitivement au coulis de ciment après tension des câbles. Ceci est justifié par une meilleure protection des câbles vis-à-vis de la corrosion. Cette technique essentiellement développée par la France a été maintenue ensuite sur les enceintes à double paroi ainsi que pour l'EPR, compte tenu de l'excellent comportement des enceintes REP 900.

La problématique de durée de fonctionnement liée à la tenue structurelle est commune aux deux concepts. Elle concerne les pertes de précontraintes qui *in fine* limiteront la durée d'exploitation, lorsque la précontrainte disponible en situation d'accident ne sera plus suffisante pour contrebalancer les effets de l'accident.

### 3.4.2 Impact des déformations différées

Les enceintes de confinement double paroi (EDP) du parc en fonctionnement (1 300 et 1 450 MWe) ne sont pas équipées de liner métallique, ce qui fait reposer la majeure partie de la fonction étanchéité de l'EDP sur l'étanchéité de l'enceinte interne en béton précontraint. Cette étanchéité est liée en grande partie à l'ouverture de fissures existantes (formées principalement lors de la prise du béton dans la zone du gousset par contraction thermique restreinte par le radier) et de nouvelles fissures pouvant apparaître dans des zones singulières telles que le contour du tampon d'accès matériel (TAM), où les déviations des câbles de précontrainte entraînent un état de compression moins prononcé. Pour compenser ce vieillissement des enceintes, l'étanchéité est améliorée sur le parc par la mise en place de revêtements. Le choix des zones à revêtir à partir de prédictions de l'évolution de la fuite des enceintes nécessite une connaissance approfondie des mécanismes sous-jacents.

La progression et l'ouverture des fissures en épreuve sont pilotées en grande partie par le niveau de précontrainte dans le béton au moment de l'épreuve. La connaissance de l'état de précontrainte est donc nécessaire à la prédiction de la fuite transitant par des fissures. L'état de précontrainte découlant lui-même du comportement différé du béton (retrait, fluage) et de la relaxation des câbles, ces deux aspects sont étudiés avec attention. Néanmoins, la relaxation des câbles est modeste à température ambiante. La recherche sur les déformations différées est donc très active (caractérisation expérimentale [14], développement de modèles [15]).

Le programme VERCORS d'EDF (figure 3) repose sur une maquette d'enceinte double paroi à l'échelle 1/3 et un programme de recherche dédié à la compréhension du vieillissement des enceintes à double paroi du parc électronucléaire de manière accélérée [16] [17] [18]. L'accélération provient de l'effet d'échelle : en divisant l'épaisseur de la paroi par 3, on accélère le séchage (phénomène diffusif) d'un facteur 9. Le retrait et le fluage séchants du béton, qui sont pilotés par le séchage, sont accélérés du même facteur, ainsi que la perte de précontrainte. Comme une enceinte réelle, pour laquelle EDF justifie de l'étanchéité au cours des épreuves faites sur un rythme décennal, la maquette subit annuellement des épreuves identiques aux épreuves réalisées sur le parc.

Le programme VERCORS est une occasion unique d'améliorer les lois de comportement phénoménologiques grâce à l'ampleur du programme expérimental (voir la figure 4 pour une comparaison d'une prédiction numérique de déformations à une mesure). Les travaux portent sur la description fine du séchage y compris en contexte non isotherme [19], l'impact de la vitesse de séchage sur les déformations différées, et le comportement du béton en conditions accidentelles principalement. Les déformations différées sont pilotées en bonne partie par le séchage (comme on le voit sur VERCORS, accélérer le séchage d'un facteur 9 a pour effet direct d'accélérer les déformations différées du même facteur à peu près). En outre, une partie de la fuite qui transite partiellement par la porosité du béton est largement dépendante de la saturation de celle-ci, la saturation ayant un impact direct sur la perméabilité du béton.

Une bonne connaissance de l'état de saturation du béton semble donc également nécessaire à une bonne prédiction de la fuite, ce que confirment les travaux récents sur VERCORS [20].

La connaissance de l'évolution de la saturation et des déformations du béton des enceintes se heurte à une difficulté : l'absence d'essais matériaux dédiés sur les bétons d'enceinte, et l'absence de mesure de saturation sur les enceintes (ce second point fait l'objet de travaux importants [21]).

La caractérisation expérimentale du fluage est longue et coûteuse, et envisageable uniquement pour des bétons dont on dispose de carottes ou qu'il est possible de reformuler au laboratoire (avec un ciment et des granulats restant proches de ceux du béton d'origine). Le plus souvent, seule la formule du béton est accessible. Il est alors nécessaire de recourir à la modélisation en mettant au point des lois de comportement ou en estimant les paramètres de lois existantes, pour chaque béton.



Figure 3 – Photo et représentation schématique de la maquette VERCORS à EDF (EDF Lab Les Renardières)

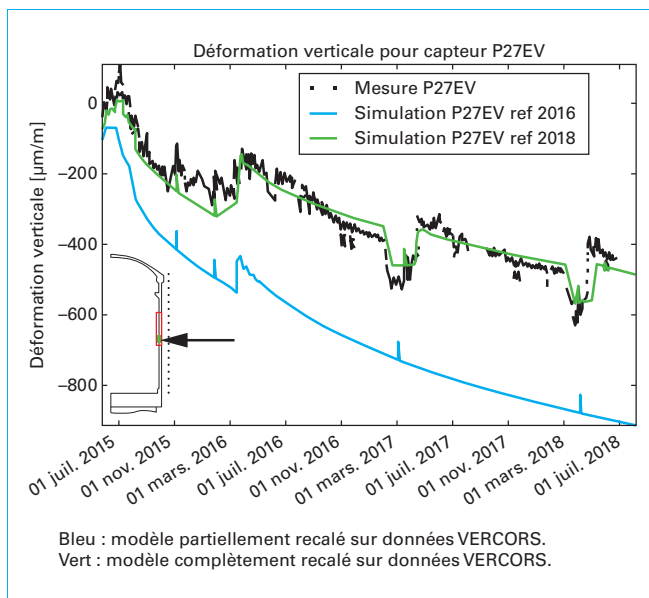


Figure 4 – Évolution des déformations verticales sur la maquette VERCORS comparée aux simulations

### 3.5 Lixiviation

Dans le cas des piscines d'entreposage de combustibles usés, le béton est un système chimique évolutif hautement alcalin. Dans certaines conceptions de piscines rencontrées à l'international, le béton est au contact d'une solution plus acide, c'est-à-dire de l'eau contenant différents ions, dont l'acide borique en particulier. En matière de durées de vie définies dans les normes, le matériau est durable lorsqu'il est fabriqué et mis en œuvre selon les pratiques de pointe. L'eau est le vecteur commun à tous les agents corrosifs du béton car elle dissout les composés gazeux et solides. Les matières corrosives sont principalement transportées par perméation et diffusion, deux indicateurs clés de durabilité eux-mêmes conditionnés par la compacité du béton.

Deux mécanismes couplés sont impliqués dans l'attaque chimique du béton : la dissolution/hydrolyse des hydrates dans la pâte de ciment et la précipitation des sels. Les conséquences comprennent généralement une augmentation de la porosité et de la fissuration, une augmentation de la perméabilité et de la diffusivité, et une perte de rigidité et de résistance mécanique. Les paramètres de durabilité chimique sont :

- paramètres matériaux : conditions chimiques et minéralogiques du ciment comme la nature des composants, potentiel  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ , etc.), ou les propriétés de transport du béton (compacité) ;
- paramètres environnementaux : état physique (solide, liquide ou gazeux), forme chimique (acide, base, sel) de l'agent corrosif, conditions météorologiques générales et locales (immérgé, partiellement immergé, fluctuations du niveau d'eau, humidité relative, température) ;
- paramètres structurels : exigences d'exploitation (charges, fatigue) et fissuration.

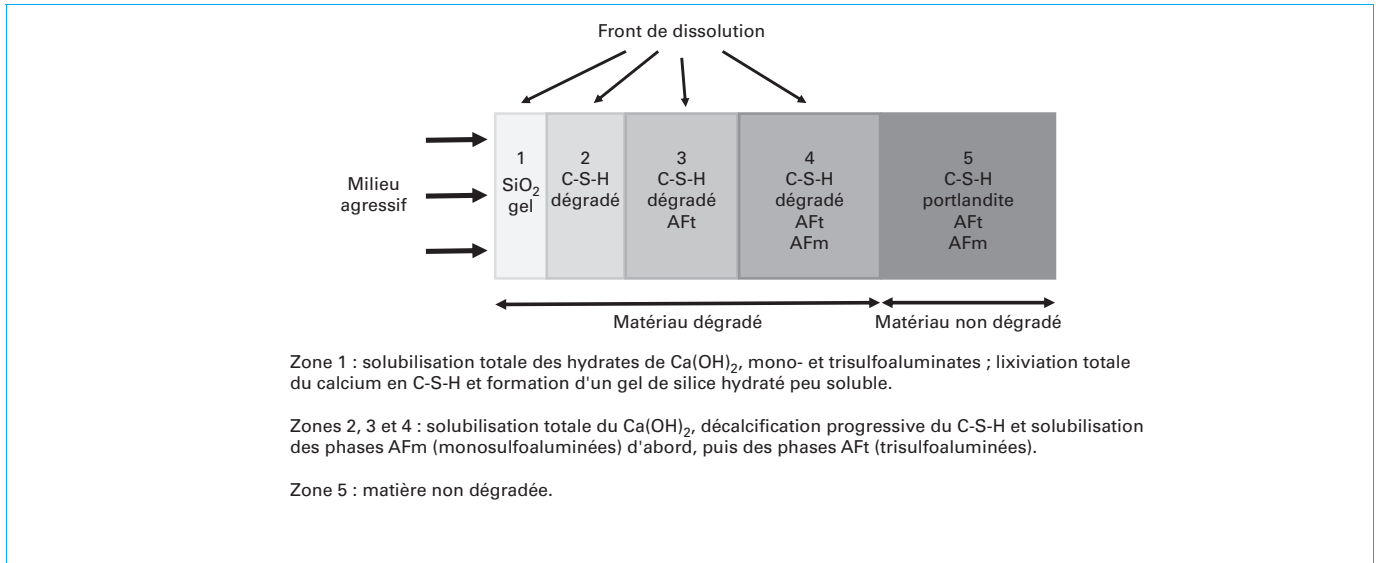
Le béton utilisé pour construire les piscines d'entreposage du combustible usé peut être soumis à une lixiviation s'il est en contact direct avec l'eau de la piscine. Le processus de lixiviation est illustré à la figure 5 : la dissolution de la portlandite, la décalcification progressive des C-S-H et la solubilisation des phases AFm (monosulfate) et AFt (ettringite) conduisent à la formation d'un gel de silice à la surface du matériau sans cohésion.

### 3.6 Réactions endogènes

La réaction alcalis-granulats et la réaction sulfatique interne sont deux réactions endogènes des bétons, qui se produisent sans apport de produits chimiques de l'extérieur du béton, mais par réaction des éléments en présence dès le coulage du béton, lorsque la formulation présente certaines propriétés.

La réaction alcalis-granulats [23] consiste en une dissolution partielle de la silice amorphe de certains types de granulats par la solution interstitielle du béton, fortement basique. Cette dissolution est suivie de la formation d'un gel silico-calco-alcalin qui peut gonfler en présence d'eau. La réaction est possible en présence d'une quantité d'alcalins significative, et seulement pour certains types de granulats qui sont alors qualifiés de réactifs ou potentiellement réactifs.

La réaction sulfatique interne (RSI) [24] consiste en la formation d'ettringite, qui est un cristal dont la croissance peut générer des efforts significatifs, à un stade de maturation où le béton est déjà



**Figure 5 – Schéma de principe montrant la dégradation d'une pâte de ciment soumise à une lixiviation par de l'eau pure déionisée stabilisée à pH 7 (d'après [22])**

solide. Cette réaction se produit lorsque la température lors de la prise est trop élevée pour permettre la formation de l'ettringite dans le béton encore frais, ce qui fait que les sulfates, éléments indispensables à la formation d'ettringite, sont stockés temporairement dans les hydrates (notamment les C-S-H), pour être relargués dans la solution interstitielle suite au retour à la température ambiante, entraînant une formation tardive d'ettringite. Cette réaction nécessite un échauffement de l'ordre de 65 °C ou plus pour se produire, et la présence d'espèces chimiques dans la formulation (sulfates, alcalins), en proportions particulières. La température élevée est en général due à l'échauffement lors de la prise des pièces massives, ou l'étuvage des pièces lors de la préfabrication. Un échauffement tardif peut également déclencher la RS1.

Ces deux réactions ont pour point commun de nécessiter des formulations particulières, et de ne développer des gonflements significatifs qu'en cas de disponibilité d'eau, et sur des durées très longues. Le gonflement macroscopique observé résulte du cumul de gonflements locaux liés à la création d'une fissuration diffuse produite par le gonflement du gel dans le cas de la réaction alcalis-granulats, ou les pressions générées par la croissance de l'ettringite dans le cas de la réaction sulfatique interne. Cette fissuration est orientée par les chargements macroscopiques appliqués sur l'élément de béton considéré, ce qui rend l'expansion dépendante de l'état de chargement de l'élément de structure. La microfissuration est également à l'origine d'une baisse des propriétés mécaniques des bétons affectés (rigidité et résistance).

#### À retenir

- La corrosion des armatures en béton, qui peut être déclenchée suite à la dépassivation des armatures en raison de la carbonatation, l'attaque par les chlorures, ou la lixiviation en milieu acide, est une pathologie des bétons comportant un risque pour la tenue structurelle.
- Les déformations différées des bétons ont un impact sur la durée de vie des enceintes de confinement (EDP), car elles affectent leur étanchéité.
- Les réactions de gonflement se produisent dans des conditions de formulation et de fabrication particulières, et peuvent comporter un risque pour les structures en raison des gonflements et des pertes de propriétés mécaniques associées.

## 4. Gestion du vieillissement des structures du génie civil dans les centrales nucléaires

### 4.1 Pour les structures normales : maintenance classique

Un programme de gestion du vieillissement est un ensemble d'actions intégrées d'ingénierie, d'exploitation et de maintenance conçues pour contrôler la dégradation des systèmes, structures et composants due au vieillissement dans des limites acceptables. La gestion du vieillissement des structures en béton des centrales nucléaires est assurée par des inspections périodiques des zones accessibles ; d'autres techniques sont utilisées pour surveiller le vieillissement des zones qui ne sont pas facilement accessibles. Ce programme identifie les actions et les mesures à mettre en œuvre au bon moment pour gérer le vieillissement. Il doit fournir des indicateurs de performance pour mesurer l'efficacité des pratiques actuelles sur la base des évaluations du vieillissement et de l'état des structures en béton. Il peut inclure la surveillance de l'état des ouvrages, des inspections périodiques et leur maintenance. Il est généralement basé sur le cycle Plan-Do-Check-Act de gestion du vieillissement, comme illustré à la figure 6. Une comparaison de cette stratégie à celle d'EDF est proposée dans [25].

#### 4.1.1 PLANIFIER : développement et optimisation des activités de gestion du vieillissement

L'activité « PLANIFIER » de la figure 6 fait référence aux activités de coordination, d'intégration, de maintenance et d'amélioration de la gestion du vieillissement des structures. Elle inclut la documentation des exigences réglementaires, des critères de sécurité et des activités pertinentes, la description du mécanisme et des processus de coordination et l'amélioration de l'efficacité de la gestion du vieillissement sur la base des connaissances actuelles, de l'auto-évaluation et de l'examen par les pairs.

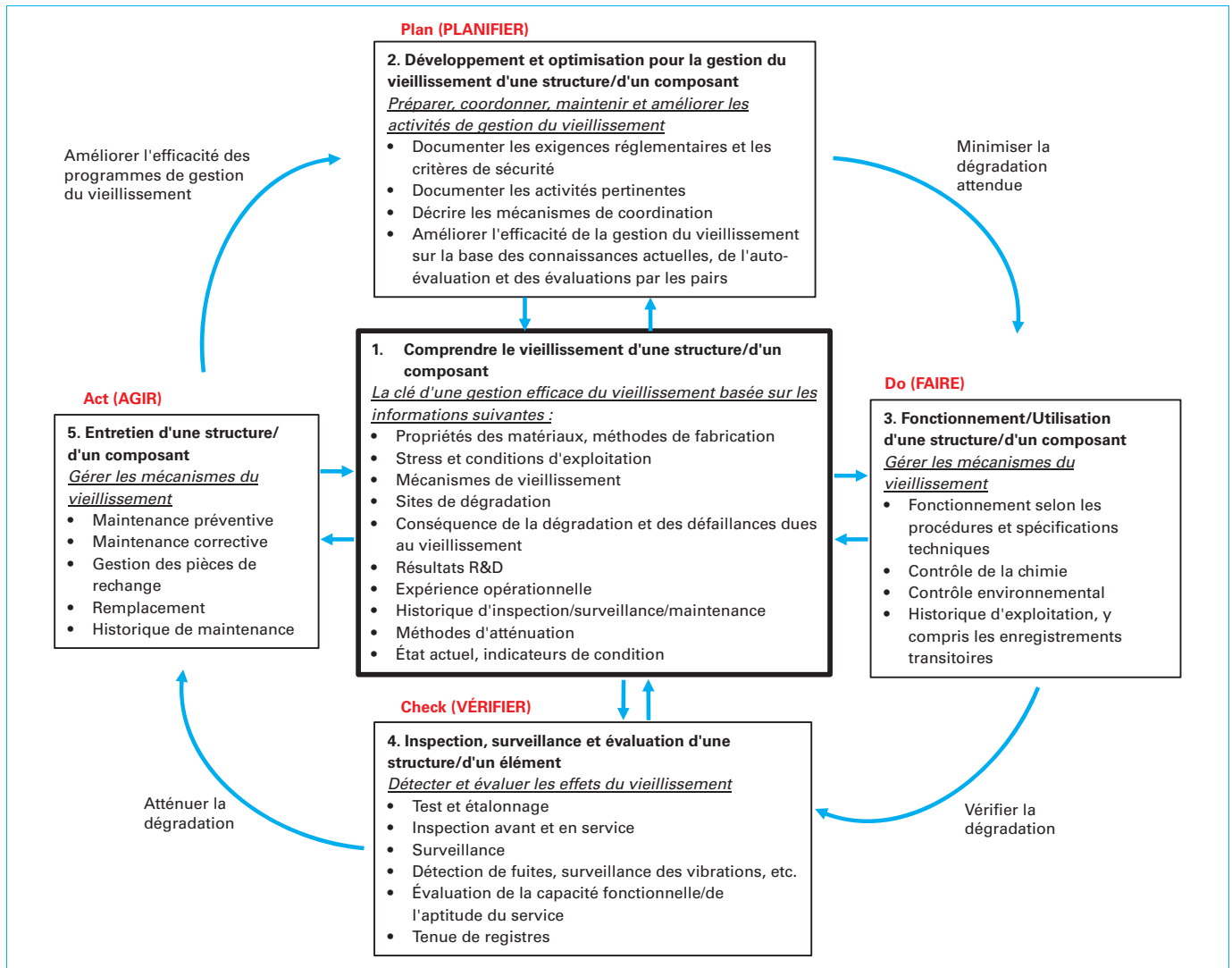


Figure 6 – Approche systématique de la gestion du vieillissement pour les structures ou composants (d'après [26])

#### 4.1.2 FAIRE : fonctionnement et utilisation des structures et des composants

L'activité « FAIRE » de la figure 6 implique la gestion des mécanismes de vieillissement en minimisant la dégradation attendue des structures ou des composants conformément aux procédures d'exploitation et aux spécifications techniques approuvées. Cela comprend également le maintien des conditions de fonctionnement dans les limites de conception, l'établissement d'un contrôle chimique et d'un contrôle environnemental appropriés, et le maintien de l'historique d'exploitation, y compris les enregistrements transitoires.

#### 4.1.3 VÉRIFIER : inspection, surveillance et évaluation des structures et des composants

L'activité « VÉRIFIER » de la figure 6 comprend l'inspection, la surveillance et l'évaluation des structures. Les données identifiées dans le programme de surveillance doivent être collectées et

enregistrées pour fournir une base de décision sur le type et le calendrier des actions de gestion du vieillissement [27] [28].

L'inspection visuelle est le type d'examen non destructif le plus courant utilisé pour détecter les effets du vieillissement des structures en béton. L'inspection visuelle des surfaces de béton accessibles permet de détecter les défauts à la surface des structures, par exemple fissuration, écaillage, changement de volume, séparation ciment-agrégat, dégradation mécanique ou mouvement d'humidité (figure 7). L'inspection visuelle peut être complétée par d'autres méthodes non destructives telles que le scléromètre, la mesure d'ouverture de fissure grâce à un fissurotest, l'écoute acoustique, le radar et le pachomètre pour détecter les ferraillages, le sonnage (impact echo) pour détecter les décollements, et de manière plus ciblée la thermographie infrarouge, la vitesse ultrasonore, la tomographie par ultrasons, et le test de taux de fuite pour les enceintes de confinement [29] [30].

La surveillance est également assurée par l'installation de systèmes d'auscultation à demeure, notamment pour le suivi des déformations. Les capteurs utilisés classiquement sont des fissuromètres installés en parement pour suivre l'ouverture des fissures, des



Bâtiment réacteur : espace entre enceintes, le technicien en visite vérifie l'étanchéité des deux enceintes du bâtiment réacteur.

**Figure 7 – Opérations de maintenance à la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, arrêt de tranche 2 (©EDF)**

capteurs à corde vibrante noyés (installés à la construction) pour suivre l'évolution des déformations de l'ouvrage [27].

#### 4.1.4 AGIR : entretien des structures et des composants

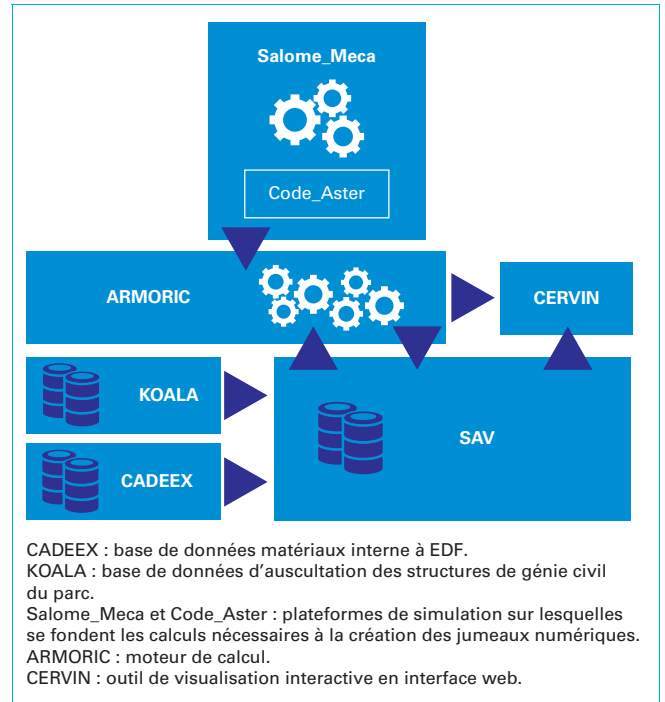
L'activité « AGIR » de la figure 6 fait référence à la mise en œuvre d'activités de maintenance, de réparation et de remplacement. Elle comprend la maintenance préventive, la maintenance corrective, la gestion et le remplacement des pièces de rechange, etc.

### 4.2 Pour les structures particulières (aéroréfrigérants et enceintes de confinement) : la démarche de jumeau numérique

Certaines structures nécessitent une démarche particulièrement rigoureuse et complexe de recalcul, dans un objectif de justifier leur tenue auprès des autorités compétentes, ou d'accompagner les décisions de maintenance. Lorsque le maître d'ouvrage dispose de données d'observation, de conception ou de construction qui doivent être intégrées au calcul (en entrée ou pour la calibration des paramètres des modèles), le travail de gestion des données, de recalage, de mise en place des simulations et des post-traitements peut être très coûteux en temps et nécessiter un niveau de qualité élevé pour éviter les erreurs. Pour cette raison, certains maîtres d'ouvrages développent des jumeaux numériques de leurs ouvrages, qui visent à automatiser certaines étapes des études de façon à pouvoir :

- les rejouer à volonté, dans un objectif de vérification ou pour les actualiser suite à une modification des données d'entrée, de l'étude elle-même, ou de l'environnement logiciel (prérequis, etc.) ;
- les versionner, afin d'avoir la capacité d'associer à une étude réalisée pour produire une justification précise le jumeau numérique de l'ouvrage qui a permis de réaliser l'étude (et de le faire vivre dans le temps).

Ce paragraphe présente, au travers de l'exemple du jumeau numérique de la maquette VERCORS (figure 3), l'utilisation qui peut être faite de cet outil et son potentiel. Du point de vue du vocabulaire, on distingue les outils qui permettent de construire le jumeau numérique (usine à jumeaux numériques), du jumeau numérique en tant que tel, à savoir le modèle numérique et les



CADEEX : base de données matériaux interne à EDF.  
 KOALA : base de données d'auscultation des structures de génie civil du parc.  
 Salome\_Meca et Code\_Aster : plateformes de simulation sur lesquelles se fondent les calculs nécessaires à la création des jumeaux numériques.  
 ARMORIC : moteur de calcul.  
 CERVIN : outil de visualisation interactive en interface web.

**Figure 8 – Usine à jumeaux numériques VERCORS**

résultats qu'il donne. L'usine à jumeaux numériques de VERCORS (figure 8) [17] regroupe les outils suivants :

- SAV (Système Accompagnateur de VERCORS) : base de données d'auscultation, chantier et matériau de la maquette. Cette base de données est reliée à d'autres bases de données d'EDF, qui centralisent les données d'auscultation et les données matériaux du parc (et de VERCORS) ;
- ARMORIC (Analysis and Research around MOdap for Reactors Improvement of Containment Capacity) : la plateforme de simulation associée à VERCORS (et aux enceintes du parc). Elle regroupe les maillages, les calculs et les post-traitements. Cette plateforme génère la maquette numérique de VERCORS, c'est-à-dire une représentation 3D numérique de la géométrie sur laquelle il est possible de visualiser des mesures ou des résultats numériques ;
- CERVIN (Comportement des Enceintes de Réacteurs : Visualisation Interactive) : outil web permettant d'extraire et visualiser l'évolution des mesures effectuées sur la maquette. Cet outil génère une autre maquette numérique dédiée dans un premier temps à l'auscultation.

Ces outils travaillent sur les données expérimentales et aussi sur les simulations numériques pour produire l'image la plus précise et la plus réaliste de l'état (passé, présent ou futur de l'ouvrage). La question du traitement des données expérimentales et de leur interopérabilité avec les résultats des simulations est ici primordiale. Les façons de représenter les différents champs physiques doivent être unifiées pour que des opérations de combinaison soient effectuées sur ces derniers. Du point de vue utilisateur, la disponibilité de post-traitements qui permettent de vérifier le bon fonctionnement du jumeau numérique en comparaison de la réalité, et d'avoir un accès facilité à l'information, est primordiale.

Les jumeaux numériques peuvent prendre différentes formes : des prédictions scalaires de taux de fuites ou des prédictions de champs de déformation.

La question des données est cruciale tant pour leur analyse a posteriori que pour l'alimentation en amont des codes de simulation. Ce sont les données et leur qualité qui déterminent en grande partie la qualité des jumeaux numériques produits.

Cet exemple illustre le potentiel offert par l'intégration des moyens numériques de capitalisation et gestion des données, maquettage numérique, simulation avancée des phénomènes physiques, restitution des résultats, couplée aux moyens de mesure, pour modéliser et prédire de la façon la plus réaliste possible le comportement des structures.

#### À retenir

- La gestion du vieillissement des ouvrages est primordialement pour garantir leur durée de vie et la sûreté de l'exploitation des centrales. Le cycle Plan-Do-Check-Act permet le maintien en condition de fonctionnement des composants utilisés dans les centrales nucléaires.
- Pour certains ouvrages nécessitant une démarche de recalcul et une gestion des données coûteuse et rigoureuse, des jumeaux numériques sont mis en place.

## 5. Conclusion

Au fur et à mesure que le béton vieillit, des changements dans ses propriétés se produisent en raison de changements microstructuraux continus (par exemple l'hydratation lente, la cristallisation

de composants amorphes, les réactions entre la pâte de ciment et les agrégats), ainsi que des influences environnementales. Ces changements ne doivent pas être préjudiciables aux exigences de performance imposées au béton. Cet article a présenté : (i) une description des matériaux de base utilisés pour la fabrication du béton armé, (ii) un examen du vieillissement du béton en fonction des structures et des conditions environnementales, et (iii) des informations sur la gestion du vieillissement des structures en béton des centrales nucléaires. Plusieurs domaines dans lesquels des recherches supplémentaires seraient bénéfiques pour la gestion du vieillissement des structures en béton des centrales nucléaires peuvent être proposés :

- 1) Des modèles de dommages améliorés et critères d'acceptation à utiliser dans les évaluations de l'état actuel, ainsi que l'estimation de l'état futur des structures ;
- 2) Des méthodes non destructives pour inspecter les structures et les sous-sols en béton à parois épaisses et fortement renforcées ;
- 3) Des données sur l'application et la performance (par exemple, la durabilité) des matériaux et techniques de réparation ;
- 4) Une application de la modélisation probabiliste de la performance des composants pour fournir des critères fondés sur les risques pour évaluer comment le vieillissement affecte la capacité structurelle.

# Durabilité des bétons des centrales nucléaires françaises

par **Valérie L'HOSTIS**

Expert Sénior sur la durabilité des structures en béton  
Direction des programmes énergies, Cellule partenariats institutionnels  
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA Paris-Saclay),  
Gif-sur-Yvette, France

et **Laurent CHARPIN**

Ingénieur Chercheur, Chef de groupe  
EDF Lab Chatou, Chatou, France

## Sources bibliographiques

- [1] PICAUT (J.). – Bulletin 13, Nuclear Containments, FIB (2001).
- [2] LOUHI (A.). – *Intégrité des tours aéroréfrigérantes en béton armé sous sollicitation extrêmes : vent et séisme*. Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, Lyon (2015).
- [3] LE PAPE (Y.), ALSAID (M.H.) et GIORLA (A.B.). – *Rock-forming minerals radiation-induced volumetric expansion – Revisiting literature data*. Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 16, n° 5 (2018).
- [4] IAEA. – *Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants*. IAEA Nuclear Energy Series n° NP-T-3.5, International Atomic Energy Agency, Vienna (2016).
- [5] IAEA. – *Assessment and Management of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety : Concrete Containment Buildings*. IAEA-TECDOC-1025, International Atomic Energy Agency, Vienna (1998).
- [6] CARÉ (S.), BAROGHEL-BOUNY (V.), DE LARRARD (F.), CHARONNAT (F.) et LINDER (R.). – *Série Ouvrages d'Art OA33 – Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons – Plan d'expérience et analyse statistique*. Études et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris (2000).
- [7] VICHOT (A.) et OLLIVIER (J.-P.). – *La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Collectif Presses de l'École Nationale des Ponts et chaussées, Eyrolles, Paris (2008).
- [8] NAUS (D.). – *Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures – A Review of Pertinent Factors*. NUREG/CR-6927, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (2007).
- [9] L'HOSTIS (V.), NEFF (D.), BELLOT-GURLET (L.) et DILLMANN (P.). – *Characterization of long-term corrosion of rebars embedded in concretes sampled on French historical buildings aged from 50 to 80 years*. Materials and Corrosion (2009).
- [10] L'HOSTIS (V.), AMBLARD (E.), BLANC (C.), MISERQUE (F.), PARIS (C.) et BELLOT-GURLET (L.). – *Passive corrosion of steel in concrete in context of nuclear waste disposal*. Corrosion engineering, science and technology, vol. 42, n° 2 (2011).
- [11] HUET (B.), L'HOSTIS (V.), TRICHEUX (L.) et IDRISSE (H.). – *Influence of alkali, silicate, and sulfate content of carbonated concrete pore solution on mild steel corrosion behavior*. Materials and corrosion, vol. 61, n° 2 (2010).
- [12] LIU (T.) et WEYERS (R.W.). – *Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures*. Vol. 28, n° 3 (1998).
- [13] ANGST (U.), ELSENER (B.), LARSEN (C.K.) et VENNESLAND (Ø.). – *Critical chloride content in reinforced concrete – A review*. Cement and Concrete Research, vol. 39, n° 12 (2009).
- [14] CHARPIN (L.), LE PAPE (Y.), COUSTABEAU (E.), TOPPANI (E.), HEINFLING (G.), LE BELLEGO (C.), MASSON (B.), MONTALVO (J.), COURTOIS (A.), SANAHUJA (J.) et REVIRON (N.). – *A 12 year EDF study of concrete creep under uniaxial and biaxial loading*. Cement and Concrete Research, p. 140-159 (2017).
- [15] FOUCAULT (A.), MICHEL-PONNELLE (S.) et GALENNE (E.). – *A new Creep model for NPP containment behaviour prediction*. in SSCS 2012, Aix-en-Provence, France (2012).
- [16] CHARPIN (L.), NIEPCERON (J.), CORBIN (M.), MASSON (B.), MATHIEU (J.-P.), HAELEWYN (J.), HAMON (F.), AHS (M.), APARICIO (S.), ASALI (M.), AZENHA (M.), BOUHJITI (D.), CALONIUS (K.), CHU (M.), HERMAN (N.), HUANG (X.), JIMENEZ (S.), MAZARS (J.) et NAHAS (G.). – *Ageing and air leakage assessment of a nuclear reactor containment mock-up : VERCORS 2<sup>nd</sup>*. Submitted to Nuclear Engineering and Design (2021).
- [17] MATHIEU (J.-P.), CHARPIN (L.), SÉMÉTÉ (P.), TOULEMONDE (C.), BOULANT (G.), HAELEWYN (J.), HAMON (F.), MICHEL-PONNELLE (S.), HÉNAULT (J.-M.) et TAILLADE (F.). – *Temperature and humidity-driven ageing of the VeRCORs mock-up*. in Euro-C, Austria (2018).
- [18] NIEPCERON (J.), CORBIN (M.) et MASSON (B.). – *Appraisal of the VERCORS 2018 benchmark*. in Transactions, SMIRT-25, Charlotte, NC, USA (2019).
- [19] POYET (S.) et CHARLES (S.). – *Temperature dependence of the sorption isotherms of cement-based materials : Heat of sorption and Clausius – Clapeyron formula*. Cement and Concrete Research (2006).
- [20] COURTOIS (A.). – *Contribution à la surveillance des structures épaisses en béton : proposition d'une démarche pour intégrer le suivi de la teneur en eau dans le pronostic*. Thèse de doctorat. Université de Paris Saclay (2019).
- [21] VAUTRIN (D.), TAILLADE (F.), COURTOIS (A.), CLAUZON (T.), BORE (T.), DAOUT (F.), PLACKO (D.), LESOILLE (S.) et SAGNARD (F.). – *Adaptation of a TDR probe design for the estimation of water content in concrete*. in TINCE, Paris (2016).
- [22] ADENOT (F.). – *Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment*. Thèse de doctorat, Orléans (1992).
- [23] SWAMY (R.N.). – *The alkali-silica reaction in concrete*. CRC Press (1991).
- [24] TAYLOR (H.), FAMY (C.) et SCRIVENER (K.). – *Delayed ettringite formation*. Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 5 (2001).

- [25] STEPHAN (P.) et SALIN (J.). – *Ageing management of concrete structure : Assessment of EDF methodology in comparison with SHM and AIEA guides*. Construction and building materials, vol. 37 (2012).
- [26] IAEA. – *Ageing Management for Nuclear Power Plants*. IAEA Safety Guide NS-G-2.12 (2009).
- [27] COURTOIS (A.), HENAUULT (J.M.), SIMON (A.), BECK (Y.L.) et SALIN (J.). – *La surveillance en exploitation des enceintes de confinement et des aéroréfrigérants à tirage naturel du parc nucléaire d'EDF*. Revue Générale Nucléaire, vol. 2 (2011).
- [28] ORCESI (A.) et CREMONA (C.). – *Projet national S3 : Surveillance de santé structurale des ouvrages*. Études et Recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées OA71, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux – IFSTTAR (2012).
- [29] (\*). – *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*. Association française de génie civil, & Confédération française pour les essais non destructifs, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées (2005).
- [30] BALAYSSAC (J.P.) et GARNIER (V.) (Eds.). – *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. Elsevier (2017).
- [31] AÏTCIN (P.-C.). – *Cements of yesterday and today : concrete of tomorrow*. Cement and Concrete Research, vol. 30 (2000).

### À lire également dans nos bases

BOUNIOL (P.). – *Béton de radioprotection*. [BN 3 740] Génie nucléaire (2021).

L'HOSTIS (V.), RAHARINAIVO (A.) et TACHÉ (G.). – *Corrosion des armatures dans les bétons – Mécanismes*. [COR 07] Matériaux (2016).

### Normes et standards

NF EN 206	2014	Béton – Spécification, performances, production et conformité.	NF A 35-080	2020	Aciers pour béton armé – Aciers soudables – Partie 1 : barres et couronnes.
NF EN 197-1	2012	Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.			



# Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

## SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## Les offres Techniques de l'Ingénieur

### INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

### MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

### MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

### ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

### ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

### GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

### ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

### TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

### AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

### INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

### MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

### PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

### SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

### BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

### CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

## OFFRE



### Plastiques et composites

Choisir et mettre en oeuvre des matériaux capables de remplacer les matériaux traditionnels  
Ref : TIP100WEB

## PRÉSENTATION

Toutes les données nécessaires pour appréhender les polymères: propriétés, procédés de mise en oeuvre, essais, conception de pièces, finition, recyclage,  
Une étude détaillée des différentes fibres de renforcement et des méthodes de transformation des plastiques renforcés,  
Des monographies sur les principaux thermoplastiques et thermodurcissables,  
De nombreux développements consacrés au comportement et aux applications des matériaux composites.

## VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP100WEB	Plastiques et composites	2 385 €	1	2 385 €
Total H.T en €				2 385 €
T.V.A : 5,5%				131,18 €
Total TTC en €				2 516,18 €

## VOS COORDONNÉES :

Civilité  M.  Mme

Prénom \_\_\_\_\_

Nom \_\_\_\_\_

Fonction \_\_\_\_\_

E-mail \_\_\_\_\_

Raison sociale \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

Code postal \_\_\_\_\_

Ville \_\_\_\_\_

Pays \_\_\_\_\_

Date :

Signature et cachet obligatoire

## CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur [www.technique-ingenieur.fr](http://www.technique-ingenieur.fr)

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.