

RECOMMANDATIONS : BIEN PRESCRIRE LES BÉTONS

CHOIX DES CLASSES D'EXPOSITION SELON LA NORME NF EN 206/CN

La classe d'exposition est la porte d'entrée pour la durabilité des ouvrages en bétons.

Le choix de la (ou des) classe(s) d'exposition dépend de l'environnement lié à l'ouvrage à réaliser et de son exploitation pendant sa durée d'utilisation.

Le choix des classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage est de la responsabilité du maître d'ouvrage.

Il est également de la responsabilité du maître d'ouvrage de faire l'analyse de l'agressivité des sols et eaux souterraines ainsi que des autres agressions auxquelles le béton de certaines parties d'ouvrage peut être soumis. Cette analyse doit être incluse dans les documents d'appel d'offres.

Ces classes d'exposition pour chaque partie d'ouvrage doivent être prescrites dans le CCTP par son rédacteur.

Ce choix a une forte incidence sur

- **Le béton**
 - Le choix des constituants (ciment, granulats, additions, adjuvants)
 - Le dosage en ciment (ou en liant équivalent) et le rapport E/C (Eau efficace / Liant eq.)
 - Sa classe de résistance
- **L'enrobage et le dimensionnement des armatures (ouverture des fissures)**
 - (Voir fiche enrobage des armatures)

Nota : pour l'enrobage, il convient de différencier par exemple les faces intérieures et extérieures d'un mur et de ce fait, la classe d'exposition du béton (pris identique pour tout le mur) peut être différente des classes d'exposition de chaque face pour le calcul de l'enrobage.

Pour le choix des classes d'expositions, on peut utilement se référer aux tableaux de l'Ecole Française du Béton qui, selon la localisation géographique du projet et les caractéristiques de l'environnement, recensent, par partie d'ouvrage, les classes d'exposition à considérer.

<http://www.efbeton.com/site/publications/bibliographie>

DÉFINITION DES CLASSES D'EXPOSITION

Cette partie ne traite que des classes d'exposition définies par la norme NF EN 206/CN, les classes XH et XAR sont traitées respectivement dans les recommandations relatives à la RSI et à la RAG.

Les classes d'expositions traduisent l'influence de l'environnement sur les bétons de l'ouvrage, mais aussi sur l'ouvrage lui-même, via une potentielle dégradation des armatures.

Deux types d'agression peuvent ainsi être distingués :

- Les attaques sur le matériau béton ;
- Les agressions sur les armatures du béton.

Il est important de lister l'ensemble des classes auquel est soumis la partie d'ouvrage en béton considérée car ces deux types d'agressions peuvent être concomitants.

La composition du béton doit donc satisfaire aux critères les plus exigeants de ces différentes classes.

Les classes d'exposition permettent, pour garantir la durée d'utilisation de projet spécifiée :

- de donner des valeurs limites de composition du béton dans le cas de l'approche prescriptive (ou de fixer des seuils d'indicateurs de durabilité dans le cas de l'approche performantielle) ;
- de fixer des valeurs minimales pour l'enrobage des armatures ;
- de dimensionner les armatures pour limiter l'ouverture des fissures de l'élément en béton.

Classes concernant les attaques du matériau béton :

Classes X0

Pour le béton non armé ou sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf l'attaque chimique ou le gel-dégel.

Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques : très sec.

Nota : Un béton est réputé non armé au sens de la classe X0, s'il ne contient aucune armature ou s'il est faiblement armé avec un enrobage d'au moins 5 centimètres.

Classes XF : Attaques gel/dégel, avec ou sans agent de déverglaçage

En France, le choix de la classe d'exposition au gel-dégel est déterminé par rapport à l'intensité de gel et à la fréquence de salage et non comme dans la version européenne de la norme EN 206 (Tableau 1 du § 4.1) par l'état de saturation du béton.

La prise en compte de l'état de saturation du béton, par exemple dans le cas de surfaces horizontales, peut intervenir de façon complémentaire pour des éléments très exposés au salage, dans le cas de salage très fréquent.

Les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4 sont indiquées dans le Tableau NA.1.

Tableau NA.1 — Classes d'expositions en fonction de l'intensité du gel et de la fréquence de salage

Gel	Salage	Aucun	Peu fréquent	Fréquent	Très fréquent
Faible ou modéré		XF1	XF1	XF2	XF2 ³
Sévère		XF3	XF3	XF4	XF4

³ A l'exception des chaussées en béton et des éléments d'ouvrages d'art très exposés qui seront classés en XF4.

Les niveaux de gel sont définis dans le Fascicule de Documentation FD P 18-326.

La carte NA3 du § NA 4.1.6 de la norme NF EN 206/CN donne une indication du niveau de salage recommandé, mais il conviendra de se rapprocher du gestionnaire de la voirie pour connaître les pratiques réelles.

Note : Pour des ouvrages particuliers, des prescriptions complémentaires peuvent être trouvées dans la recommandation « prescriptions complémentaires vis-à-vis de la durabilité au gel »

Dans le cas d'ouvrages d'art, l'appréciation du salage se réfère à la voie franchie par l'ouvrage, sauf :

- pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité en béton, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée,
- pour les corniches et corniches caniveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.

Le salage est considéré comme « peu fréquent » lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, « très fréquent » lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et « fréquent » entre ces deux cas.

En application de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-2 les parties extérieures d'ouvrages d'art situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées exposées ou très exposées aux projections de sels de déverglaçage, selon la fréquence du salage.

Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties d'ouvrages peuvent ne pas être exposées aux effets du salage (appuis d'un ouvrage franchissant un vallon sans voie de communication, partie supérieure du tablier d'un ouvrage ferroviaire, par exemple), on considèrera alors pour ces parties d'ouvrages la colonne « salage peu fréquent ».

Spécificités de la classe XF2

Conformément au § NA 5.3.2.2 de la norme NF EN 206/CN, les bétons des parties d'ouvrage soumises à la classe d'exposition XF2 peuvent être formulés de deux façons différentes :

- avec une teneur en air occlus supérieure ou égale à 4%,
- avec une teneur en air occlus inférieure à 4% (et donc potentiellement sans utilisation d'adjuvant entraîneur d'air) et les spécifications correspondant à la classe d'exposition XD3.

Ce choix est de la Responsabilité de l'entreprise.

Les formulations avec une teneur en air occlus inférieure à 4% ne doivent pas être employées pour les pièces très exposées au risque d'écaillage. Ces pièces correspondent aux éléments saturés en eau et soumis aux projections directes de sels de déverglaçage : corniches, solins d'ancrage des joints de chaussées, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue... La notion d'élément très exposé au risque d'écaillage dû à l'action des sels de déverglaçage est différente de celle de la norme NF EN 1992-2 (ensemble des pièces situées à moins de 6 m horizontalement et verticalement d'une voie salée), qui concerne uniquement le risque de corrosion des armatures.

Classes XA : Attaques chimiques

Le Fascicule de Documentation FD P 18-011 « Bétons – Définitions et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons » donne les règles de classification de ces environnements.

Ces règles dépendent du type d'attaque chimique (sulfates, acides, ...), il est donc nécessaire de préciser dans le tableau de définition des bétons quelle agression est visée par la classe XA indiquée (Ex. XA2 vis-à-vis du pH)

Le rédacteur du CCTP devra s'assurer que les données nécessaires sont précisées dans le dossier d'appel d'offres. En particulier, les analyses des sols et des eaux souterraines doivent être faites en amont de la rédaction du CCTP, par exemple au moment de l'étude géotechnique.

Note 1 : L'agressivité d'un terrain ou d'une nappe dépend aussi souvent de sa localisation, de sa géologie, de son passé industriel ou agricole

Note 2 : L'agressivité du sol et des eaux souterraines peut évoluer au cours du temps, si ce risque est avéré, il conviendra de le prendre en compte

L'attaque chimique du béton par l'eau de mer est traitée par les classes XS (Classes concernant l'attaque des armatures)

Voir le paragraphe **Analyse des sols** pour la détermination des agressivités chimiques

Classes concernant l'agression des armatures

Classes XC : Carbonatation

XC1 : les parties d'ouvrages à l'abri de la pluie, à l'exception des parties classées en XC3 ; *C'est le cas notamment des bétons en intérieur des bâtiments ;*

XC2 : les parties d'ouvrages au contact de l'eau à long terme : *C'est le cas notamment des fondations en zone humide, des réservoirs, etc. ;*

XC3 : les parties d'ouvrages à l'abri de la pluie mais non closes, ou exposées à des condensations importantes à la fois par leur fréquence et leur durée ;

XC4 : les parties aériennes d'ouvrages d'art et les parties extérieures des bâtiments non protégées de la pluie, comme par exemple les façades, les pignons et les parties saillantes à l'extérieur, y compris les retours de ces parties concernés par les cheminements et/ou rejaillissements d'eau.

Classes XD : Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine (par exemple eaux industrielles)

XD1 : les surfaces modérément humides exposées à des chlorures transportés par voie aérienne ;

XD2 : les piscines ou les parties exposées aux eaux industrielles et contenant des chlorures ;

XD3 : les parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures, et sous réserve d'absence de revêtement d'étanchéité assurant la protection du béton.

C'est le cas notamment des parties supérieures des dalles et rampes de parcs de stationnements de véhicules ne comportant pas de revêtement pouvant assurer la protection du béton pendant la durée de vie du projet.

Classes XS : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

XS1 : les éléments de structures, non en contact avec l'eau de mer et non exposés aux embruns mais directement exposés à l'air salin (ce sont des éléments situés à moins de 1 km de la côte) ;

XS2 : les éléments de structures marines immergés en permanence ;

XS3 : les éléments de structures marines en zone de marnage et/ou exposés aux embruns (ce sont en général ceux situés à moins de 100 m de la côte).

Les classes XS2 et XS3 couvrent l'attaque chimique du béton par l'eau de mer par l'imposition d'un ciment de caractéristique complémentaire PM

Les éléments en béton non armé situés en zone de marnage et/ou exposés aux embruns (ce sont en général ceux situés à moins de 100 m de la côte) sont à classer en XA1 pour prendre en compte l'agressivité chimique de l'eau de mer.

Note : En cas de conditions particulières (telles que la topographie, les vents dominants, ...), les distances précitées pourront être portées à 5 km pour la classe XS1 et à 500 m pour la classe XS3.

ANALYSE DES SOLS, DES EAUX SOUTERRAINES ET DES AUTRES EFFLUENTS

La définition de l'agressivité chimique (et en particulier la collecte des informations concernant la composition chimique des milieux avec lesquels certains bétons seront en contact) relève de la responsabilité du maître d'ouvrage, assisté le cas échéant dans cette tâche par le maître d'œuvre.

Le nombre et la nature des essais dépendront du nombre de couches homogènes rencontrées.

Pour plus de détail, voir l'annexe « Analyse des eaux souterraines »

Attaque chimique

Lorsque le béton est soumis à une attaque chimique par les sols, les eaux et les effluents, les classes d'exposition doivent être définies selon le Tableau 1 du FD P 18-011:

Le choix de la classe se fait par rapport à la caractéristique chimique correspondant à l'agression la plus élevée.

(Ce tableau, pour plus de clarté est présenté ci-après, scindé en trois parties)

Agressivité chimique liée aux eaux et autres effluents

Pour les parties d'ouvrages en contact avec la nappe, la détermination de la classe d'exposition se fait à partir de l'analyse de l'eau souterraine

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN:2014		
		XA1	XA2	XA3
Agressivité des eaux en fonction de leur concentration en agents agressifs et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale.				
CO ₂ agressif (mg/l)	NF EN 13577 ^{a)}	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 ^{b)} jusqu'à saturation
SO ₄ ⁻	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6000 ^{c)}
Mg ⁺⁺ (mg/l)	NF EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 ^{b)} jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100 ^{c) d)}
pH	NF T90-008	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0 ^{c)}
TAC (mé/l) ^{e)}	NF EN ISO 9963-1 et NF EN ISO 9963-2	≤ 1,0 et ≥ 0,4	< 0,4 et ≥ 0,1	< 0,1 ^{b)}

- a) Il est également possible d'utiliser la méthode Legrand-Poirier
- b) Une protection externe (enduits, revêtements) ou interne (imprégnation) est recommandée lorsque la concentration dépasse significativement la valeur seuil de la classe
- c) Si le degré d'agressivité des solutions, des sols et des gaz présentés dans ce tableau dépasse les concentrations de la classe XA3, il est nécessaire de prévoir une protection externe (enduits, revêtements) ou interne (imprégnation) à défaut d'une étude particulière sous la responsabilité du prescripteur, montrant que les caractéristiques physiques et chimiques du béton permettent de résister à de telles attaques (essais performantiels, retours d'expérience...)
- d) Lorsque la concentration massique en ions bicarbonate (HCO₃⁺) est supérieure à la concentration en ions ammonium (NH₄⁺), il n'est pas nécessaire de prévoir de protection et les dispositions de XA3 suffisent, indépendamment de la concentration en NH₄⁺
- e) 1 mé/l = 50 mg/l d'équivalent CaCO₃ = 5 degrés français = 2,8 degrés allemands.

Note : la norme ISO 7150-2 est annulée, c'est donc l'ISO 7150-1 qui s'applique

Agressivité chimique liée aux sols hors présence de la nappe

Pour les parties d'ouvrages enterrés hors présence de la nappe, la détermination de la classe d'exposition se fait à partir de l'analyse du sol. Le degré d'acidité du sol doit être déterminé si les autres essais conduisent à une classe inférieure ou égale à XA1

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN:2014		
		XA1	XA2	XA3
Agressivité des sols				
SO ₄ ⁻ (mg/kg de sol séché à 105 °C ± 5 °C) ^{f)}	NF EN 196-2	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	>12 000 et ≤ 24 000 ^{c)}
Degré d'acidité Baumann-Gully (ml/kg)	NF EN 16502	> 200	g)	g)

- c) Si le degré d'agressivité des solutions, des sols et des gaz présentés dans ce tableau dépasse les concentrations de la classe XA3, il est nécessaire de prévoir une protection externe (enduits, revêtements) ou interne (imprégnation) à défaut d'une étude particulière sous la responsabilité du prescripteur, montrant que les caractéristiques physiques et chimiques du béton permettent de résister à de telles attaques (essais performantiels, retours d'expérience...)
- f) Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10⁻⁵ m/s peuvent être placés dans une classe inférieure. En cas de risque d'accumulation d'ions sulfate dans le béton due à l'alternance de périodes sèches et de périodes humides ou par « succion capillaire » une valeur égale ou supérieure à 2 000 mg/kg conduit à un classement en XA2.
- g) Conditions d'attaque non observées en pratique.

Agressivité chimique liée aux gaz

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN:2014		
		XA1	XA2	XA3
Agressivité des gaz en milieu humide > 75 % en présence d'oxygène				
SO ₂ (mg/m ³)	NF EN 14791	≥ 0,15 et ≤ 0,5	> 0,5 et ≤ 10	> 10 et ≤ 200 ^{c)}
H ₂ S (mg/m ³)	NF EN ISO 19739	< 0,1 ^{h)}	≥ 0,1 et ≤ 10 ^{h)}	> 10 et ≤ 200 ^{c) h)}

- c) Si le degré d'agressivité des solutions, des sols et des gaz présentés dans ce tableau dépasse les concentrations de la classe XA3, il est nécessaire de prévoir une protection externe (enduits, revêtements) ou interne (imprégnation) à défaut d'une étude particulière sous la responsabilité du prescripteur, montrant que les caractéristiques physiques et chimiques du béton permettent de résister à de telles attaques (essais performantiels, retours d'expérience, ...)
- h) Les valeurs mentionnées correspondent à des concentrations supposées homogènes. Dans le cas contraire, les limites sont ramenées à ≥ 0,1 et ≤ 7 (XA2) et > 7 et ≤ 25 (XA3), exprimées en concentration moyenne du milieu considéré (en mg/m³)

Note 1 : Lorsqu'au moins deux caractéristiques agressives correspondent à une même classe, l'environnement doit être classé dans la classe immédiatement supérieure, sauf si une étude spécifique démontre que ce n'est pas nécessaire.

Note 2 : Si plusieurs agents agressifs sont présents avec des concentrations conduisant à un classement en XA3, la classe d'exposition reste XA3

Note 3 : Les environnements chimiques agressifs classés dans le Tableau 1 sont fondés sur des sols et des eaux, dont la température est comprise entre 5 °C et 25 °C, et où la vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment faible pour être assimilée à des conditions statiques.

ANALYSE DE L'AGRESSIVITÉ INTÉRIEURE/EXTÉRIEURE

Un même béton peut être soumis à deux différents types d'agression selon sa face.

De manière générale, le béton sera formulé en tenant compte de l'agression la plus sévère.

Par contre, la définition de l'enrobage devra être effectuée face par face.

Par exemple, pour des voussoirs d'ouvrage d'art, la face interne sera classée en XC3 alors que les faces extérieures pourront être classées en XF ou XS suivant le cas

De même que pour l'agressivité extérieure (analyse des sols et des eaux souterraines, fréquence de salage...), il est de la responsabilité du maître d'ouvrage de définir le niveau d'agressivité pouvant exister à l'intérieur de l'ouvrage, ainsi que la nature des agents agressifs correspondants. Cette agressivité intérieure est directement liée à l'exploitation prévue de l'ouvrage : elle dépend de la nature des produits stockés, des traitements réalisés (qui doivent se traduire en station d'épuration par la mise à disposition d'une note d'ambiance précisant les concentrations d'agents agressifs à prendre en compte), de la ventilation des locaux, ...

COMPLÉMENT D'INFORMATION UTILE SUR L'IMPACT DU CHOIX DE LA CLASSE D'EXPOSITION SUR LE CHOIX DES MATÉRIAUX

Type de ciment

Classes XA : Attaques chimiques

Pour les principaux milieux rencontrés (milieux contenant des sulfates, eau de mer, milieux acides, eaux pures) et en fonction de la classe d'agressivité chimique, une recommandation pour le choix des ciments est donnée au Tableau 2 du Fascicule de Documentation FD P 18-011 « Bétons – Définitions et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons ».

Tableau 2 — Choix du ciment en fonction du milieu

Milieu	Classe d'exposition	Choix du ciment
Milieu contenant des sulfates (solutions) à l'exclusion de l'eau de mer	XA1	pas de recommandations particulières
	XA2	(au-dessous de 1 500 mg/l) <ul style="list-style-type: none"> — ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 — ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES)
		(au-dessus de 1 500 mg/l) <ul style="list-style-type: none"> — ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 — ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)
	XA3	<ul style="list-style-type: none"> — ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 — ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)
Milieu contenant des sulfates (sols)	XA1	pas de recommandations particulières
	XA2	<ul style="list-style-type: none"> — ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 — ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES)
	XA3	<ul style="list-style-type: none"> — ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 — ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)
Milieux acides et eaux pures	XA1	<ul style="list-style-type: none"> — CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-P, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III conformes à la norme NF EN 197-1 — ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 — ciments conformes à la norme NF P 15-317 (PM) ou NF P 15-319 (ES) — CEM IV/A et B conformes à la norme NF EN 197-1
	XA2	<ul style="list-style-type: none"> — CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-P, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III conformes à la norme NF EN 197-1 ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et aux exigences complémentaires données en 6.3 — CEM V conformes à la norme NF P 15-319 (ES) — CEM IV B conformes à la norme NF EN 197-1 — ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES)
	XA3	<ul style="list-style-type: none"> — CEM III/A, B et C, CEM V/A et B conformes à la norme NF P 15-319 — CEM IV/B conformes à la norme NF EN 197-1

NOTE : Les ciments sursulfatés SSC conforme à la norme NF EN 15743 +A1 et les ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647 peuvent être utilisés dans toutes les classes d'exposition.

Classes XF : Attaque gel/dégel, avec ou sans agent de déverglaçage

Pour la classe XF4, utiliser un ciment de caractéristique complémentaire SR conforme à la NF EN 197-1 dont la teneur en SO₃ ne doit pas excéder 3,5 % pour les SR 0 et les SR 3 et 2,5 % pour les SR 5 et dont, pour les ciments CEM I et CEM II, les teneurs en C3A et C4AF du clinker doit satisfaire à la condition suivante : $(C4AF) + 2 (C3A) \leq 20 \%$, ou un ciment conforme à la norme NF P 15-317 (PM) ou à la norme NF P 15-319 (ES). S'il est prévu de n'utiliser que des sels de déverglaçage conformes aux classes A ou B de la norme NF P 98-180, ou conformes à la norme XP P 98-181, pendant toute la vie de l'ouvrage, il est possible de déroger à cette exigence

Choix des granulats

Pour les bétons soumis à des environnements particulièrement agressifs (classes d'exposition XF4 et XA3), les granulats doivent présenter une absorption d'eau déclarée* (WA24 pour les gravillons et Ab pour les sables) indiquée A (< 2,5 %) et leurs autres caractéristiques doivent être au minimum indiquées B ; Pour les classes XF3 et XF4, les granulats doivent être non gélifs au sens de la norme NF P 18-545.

** L'attention du rédacteur du CCTP est attirée sur la disponibilité locale du granulat qui doit être vérifiée*

Choix des additions

Une addition est un matériau minéral finement divisé qui peut être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés pour lui confier des propriétés particulières ou pour diminuer son impact environnemental.

Il est autorisé d'utiliser une addition en substitution et en combinaison avec un CEM I ou un CEM II/A afin de constituer un liant équivalent.

Les additions normalisées sont :

- les cendres volantes de houille conformes à la norme NF EN 450-1,
- les fumées de silice conformes à la norme NF EN 13263-1+A1,
- les métakaolins (addition pouzzolanique) conformes à la norme NF P18-513.
- les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau conformes à la norme NF EN 15167-1,
- les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508,
- les fillers siliceux conformes à la norme NF P 18-501,

Leur taux de substitution est défini en fonction des classes d'exposition selon les tableaux NA.F1 et NA.F2 de la norme NF EN 206/CN.

La possibilité d'utiliser les Tableaux NA F3 et NA F4 (béton d'ingénierie) peut être spécifiée par le rédacteur du CCTP

ANNEXE

Analyse des eaux souterraines

A1 - Préambule

Le fascicule de documentation FD P 18-011 définit les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques par les sols et les eaux souterraines.

Si les modes opératoires sont bien décrits dans les textes normatifs, l'échantillonnage et la conservation des prélèvements ne sont pas toujours explicités, le texte ci-dessous précise les modes opératoires pour une approche analytique des analyses d'eau.

A2 - L'échantillonnage.

L'échantillonnage est primordial car il conditionne la pertinence de l'analyse. Il doit être réalisé avec soin mais également représentatif de ce que l'on veut analyser.

Le nombre et la nature des essais dépendront du nombre de couches homogènes rencontrées dans le sol, mais aussi de la nature et des dimensions de l'ouvrage.

Par exemple, dans le cas d'un pont, un prélèvement par appui (piles et culées) est souhaitable.

Dans le cas d'une fondation profonde, si plusieurs couches sont traversées, il convient d'analyser l'agressivité de chaque couche.

Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon.

Dans le cas de l'analyse d'un sol, ce dernier sera placé dans un sac étanche.

A2.1 Matériau de flaconnage

La nature du matériau constitutif du récipient de prélèvement est importante, car celui-ci ne doit pas entrer en réaction avec l'eau à analyser pour éviter le passage en solution d'éléments chimiques entrant dans la composition du flacon ou fixation de certains ions de l'eau sur les parois du récipient.

Le matériau idéal n'existe pas et l'emploi de tel produit plutôt que tel autre dépend de la nature des éléments à doser :

- le quartz est le matériau le plus adapté pour la bonne conservation des échantillons mais s'avère très fragile ;
- le verre et le Pyrex peuvent être employés sans problème pour le dosage des ions majeurs. Cependant des oligo-éléments peuvent passer en solution dans l'eau (silice du verre et bore du Pyrex) ;
- le polyéthylène est souvent recommandé pour tout échantillonnage. Toutefois, il est relativement poreux vis-à-vis des gaz, et il est préférable d'utiliser le verre pour le prélèvement et la conservation des eaux fortement chargées en gaz (la diffusion est cependant assez lente).
- les sachets de prélèvement en polyvinyle présentent l'avantage de ne servir qu'une seule fois, mais ils ont l'inconvénient de libérer du chlore si ces sachets restent trop longtemps exposés à la lumière.

Dans le cas des eaux en contact avec les bétons pour les environnements XA1, XA2 et XA3, le verre et le pyrex voire le polyéthylène sont les plus adaptés et ne transforment pas les compositions des eaux permettant de fixer les classifications.

A2.2 Modifications possibles de l'échantillon

Le fait de prélever un échantillon d'eau et de le séparer de son milieu naturel entraîne des modifications plus ou moins importantes selon les paramètres. Certains peuvent être considérés comme stables à l'échelle de temps à laquelle on réalise l'analyse, mais d'autres varient très rapidement : la température, la conductivité, le pH et les gaz dissous, les nitrates et les sulfates.

Une variation de température entraîne une modification des constantes d'équilibres des éléments en suspension. Pour établir de nouveaux équilibres à la nouvelle température ambiante, diverses réactions chimiques se produisent qui peuvent entraîner la précipitation de sels, favoriser la mise en solution de gaz... Toutefois, une température basse (environ 4°C) bloque l'évolution des réactions.

La mise en contact avec l'air et la décompression sont également responsables de changements au sein de la solution.

Chaque espèce ionique participe à la conductivité totale d'une solution. Aussi, toute modification des équilibres chimiques, donc des proportions relatives des éléments dissous, entraîne un changement de conductivité. Le CO₂ en solution tend d'autant plus à s'échapper que la température de l'eau est plus élevée. Un départ de CO₂ peut provoquer la précipitation de carbonate, qui à son tour modifie le pH. Les nitrates et les sulfates peuvent être réduits par l'activité bactérienne.

Par exemple, pour les spécifications de la norme européenne NF EN 13577, il faut conserver les prélèvements à 4°C à l'abri de l'air et les analyses doivent être effectuées à une température ambiante ne dépassant pas 25 °C. Si des conditions de température sont en dehors de cette plage 5-25°C il faut en tenir compte pour bien cibler l'environnement du béton.

A3 - Représentativité des échantillons

- **Puits et forages**

Un prélèvement effectué sur une eau ayant longtemps stagné n'est pas représentatif de la nappe. En effet, l'eau a subi l'influence du matériau de tubage et des éléments extérieurs (pollution, pluie...). Pour obtenir un échantillon moyen de l'horizon capté, il est nécessaire de pomper suffisamment longtemps pour renouveler l'eau contenue dans le tubage / cuvelage.

Si l'ouvrage traverse plusieurs horizons aquifères, l'échantillon sera un mélange des différentes eaux, dont les proportions sont directement liées aux transmissivités des différents niveaux. Pour obtenir des échantillons ponctuels à différentes profondeurs, il est possible d'utiliser des récipients lestés et munis d'un système de fermeture actionnable depuis la surface (hydrocapteurs).

Pour limiter le brassage de l'eau lors de la prise d'échantillon, il est recommandé d'utiliser des hydrocapteurs dont le diamètre est très inférieur à celui du forage et de les manipuler avec une extrême lenteur. L'utilisation d'hydrocapteurs descendus en position ouverte permet de les rincer au fur et à mesure de leur descente.

- **Eaux superficielles**

Les prélèvements doivent être effectués de façon à éviter au maximum les effets de bords (oxygénation trop près de la surface, mise en suspension des matières solides trop près du fond, eau stagnante trop près des rives...). Il peut être nécessaire de constituer un échantillon " moyen " en mêlant plusieurs prélèvements effectués en divers points d'une section de rivière, afin de mieux connaître la chimie moyenne de l'eau sur une section donnée.

En revanche, il est indispensable d'effectuer différents prélèvements dans l'espace et dans le temps et de les traiter séparément pour étudier le fonctionnement d'une mare.

A4 - Mesures in situ

La température, le pH, la conductivité, l'alcalinité doivent être mesurés in situ. En effet, ces paramètres sont très sensibles aux conditions de milieu et susceptible de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur site.

L'idéal est d'effectuer les mesures en continu (sauf l'alcalinité qui se mesure par titration), en plein courant s'il s'agit d'une rivière, ou dans un seau placé au refoulement de la pompe s'il s'agit d'eau souterraine. Il faut veiller à ne pas aérer l'eau (risque de précipitation d'éléments en solution, oxygénation...).

Le pH et l'alcalinité sont des indicateurs du CO₂ agressif, paramètres importants pour la classification des environnements de la norme NF EN 206/CN.