

APPROCHE PERFORMANTIELLE ET PREDICTIVE DU BETON DES OUVRAGES D'ART SUR LA BASE D'INDICATEURS DE DURABILITE

Par L. KASSOUMI ⁽²⁾, M. AIT ELAAL ⁽¹⁾, A. OUALI ⁽¹⁾, R. ESSAMOUD ⁽²⁾, A. GHAFIRI ⁽²⁾

⁽¹⁾ Département de Géologie, Faculté des sciences Ben M'sik, Université Hassan II – Mohammadia

⁽²⁾ Centre Expérimental des Grands Travaux, Laboratoire Public des Essais et des Etudes (LPEE)

INTRODUCTION :

Les routes et les autoroutes par leur caractère linéaire traversent des zones géographiques et géologiques très diverses. Ces zones sont susceptibles de conditionner le choix des matériaux et la composition des bétons destinés aux ouvrages d'arts. Ces derniers ont une importance capitale dans le réseau routier et autoroutier, compte tenu du coût d'investissement qu'ils représentent et du coût économique qu'entraînerait une interruption de trafic pour les travaux de réparation.

Actuellement, dans différents pays, des travaux importants de recherche sont consacrés au développement de nouvelles approches de la durabilité, afin d'accroître la durée de vie des ouvrages en béton armé au coût le plus bas. Ces nouvelles approches sont basées sur la sélection des indicateurs de durabilité, la définition de critères performantielles adéquats relatifs à ces indicateurs et l'évaluation de la durée de vie de l'ouvrage moyennant des modèles prédictifs.

L'objectif de cette approche est de concevoir des bétons résistants aux agressions internes (alcali-réaction, corrosion des armatures,...) et externes (environnements sulfaté, marin, ...), pour une durée de vie donnée.

De point de vue pratique l'approche prédictive peut être appliquée, d'une part en phase de conception des ouvrages et d'autre part pendant le suivi de structures existantes (dégradées ou non). Elle est aussi envisagée pour compléter ou éventuellement remplacer les exigences du CPS et pour mettre au point des formules des bétons régionaux.

L'approche performantielle nécessite l'utilisation de modèles plus au moins sophistiqués. Elle offre à l'ingénieur et au concepteur une méthodologie complète, pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité des ouvrages d'Art, avec une plus grande liberté et des avantages techniques et économiques.

I. DEROULEMENT DE LA DEMARCHE PERFORMANTIELLE [1]. :

La démarche performantielle se déroule en générale de la manière suivante :

- Définition de la catégorie de l'ouvrage en déterminant son importance économique et stratégique et en particulier en sélectionnant la durée de vie exigée ;
- Définition des conditions environnementales incluant par exemple le type d'agressivité, les variations de l'humidité,... ;

- Définition des risques de dégradation ; corrosion des armatures, alcali réaction,... ;
- Choix des indicateurs de durabilité et des caractéristiques du matériau en fonction des caractéristiques de l'ouvrage, de son environnement et des dispositions constructives ;
- Sélection des spécifications relatives aux indicateurs de durabilité en fonction de l'importance de l'ouvrage, du type d'environnement, de la durée de vie exigée et des dispositions constructives ;
- Réalisation des essais de laboratoire sur béton au moyen des essais décrits au niveau du guide AFGC 2004, sur des éprouvettes conservées dans les conditions et pour la durée préconisée dans ce guide ;
- Choix d'un modèle prédictif de durée de vie où les indicateurs de durabilité paraissent comme des données d'entrée.

II. LES INDICATEURS DE DURABILITE :

1- Définition et sélection des indicateurs de durabilités :

L'application de la démarche performantielle en phase de conception nécessite, en premier temps, un recensement des indicateurs de durabilité. Ces derniers sont choisis en fonction de leur importance vis-à-vis de la durabilité, des caractéristiques de l'ouvrage et de son environnement et des choix des dispositions constructives (enrobage, ...). Se sont des paramètres simple mais pertinent pour quantifier les phénomènes et pour élaborer les outils prédictifs.

1.1. Indicateurs de durabilité généraux :

Les indicateurs de durabilité généraux, cités ci-après sont des paramètres de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. Ils sont indispensables pour la prévention vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali réaction. Le nombre de ces paramètres est très petit et ils sont complémentaires et ne sont pas systématiquement nécessaires pour chaque cas pratique. Ces indicateurs sont les suivants :

- Porosité accessible à l'eau [6],
- Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures [6] et [8],
- Perméabilité à l'eau liquide et au gaz [7] et [10],
- Teneur en portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [1].

Dans le cas de la prévention vis-à-vis de l'attaque sulfatique, d'autres indicateurs de durabilité sont à définir.

1.2. Indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction :

Les indicateurs de durabilité généraux sont complétés le plus souvent par des indicateurs spécifiques au processus de dégradation auquel l'ouvrage sera exposé. Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques retenus sont classés en deux catégories qui sont les suivant :

- Indicateurs chimiques (constituants du béton) :
 - Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique) [1],
 - Bilan des alcalins équivalents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) actifs de la solution interstitielle [1] ;
- Indicateur global et macroscopique (béton durci) : Expansion d'éprouvette en béton [1], [5] et [11].

1.3. Indicateurs de durabilité spécifiques à l'attaque sulfatique :

Les indicateurs de durabilité spécifiques à l'attaque sulfatique sont en cours d'établissement. Plusieurs. Plusieurs programmes de recherche sont en cours. Ils seront probablement de deux types différents :

- Indicateurs chimiques (constituants du béton) :
 - Bilan des sulfates équivalents ;
 - Nature des hydrates,
- Indicateur global et macroscopique (béton durci) : Stabilité dimensionnelle des éprouvettes de béton.

1.4. Indicateurs de substitution :

Les indicateurs généraux peuvent être substitués, après accord du maître d'ouvrage, par des paramètres qui sont plus faciles à déterminer, plus spécifique aux problèmes posés ou plus adaptés aux modèles mis en oeuvre. Ces paramètres sont comme suit :

- Porosité accessible au mercure [1],
- Résistivité électrique [1],
- Quantité d'électricité [3],
- Coefficient de diffusion du CO₂ ou de l'O₂ [1],
- Coefficient de diffusion de l'eau tritiée [1],
- Coefficient d'absorption capillaire [7].

1.5. Paramètres complémentaires :

Les paramètres complémentaires aux indicateurs précédemment définis sont requis lorsque le modèle prédictif les utilise comme donnée d'entrée ou pour aider à l'interprétation de la durabilité. Le choix de ces paramètres est souvent soumis au préalable à la probation du MO.

- Paramètres complémentaires généraux :
 - Caractéristiques de la structure poreuse,
 - Caractéristiques du réseau de fissures initial,
 - Degré d'hydratation du ciment,
 - Natures des hydrates,
 - Teneur en C-S-H,
 - Taux de saturation en eau,
 - Isothermes d'adsorption-désorption de vapeur d'eau ou capacité de sorption,
 - Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,
 - Chaleur d'hydratation,
 - Déformations endogènes,
 - Résistance mécanique à la traction,
- Paramètres complémentaires spécifiques à la corrosion des armatures initiée par les chlorures :
 - Isothermes d'interaction chlorures-matrice, ou capacité de fixation,
 - Concentration en chlorure à la surface exposée.

- Paramètres complémentaires spécifiques à l'alcali-réaction :
 - Caractéristiques pétrographiques des granulats,
 - Variations dimensionnelles d'éprouvettes de mortier ou de béton mesurées lors des essais de qualification des granulats [1], [5], [11] et [12].

2. Classes et valeurs limites relatives aux indicateurs de durabilité :

Les indicateurs de durabilité (généraux et de substitution) servent en premier lieu pour la définition des classes en fonction de la durabilité potentielle, du niveau « très faible » au niveau « très élevés ». Ces classes serviront pour une évaluation qualitative ou quantitative de la durabilité "potentielle", du point de vue du matériau. Les valeurs limites associées aux indicateurs (Tableau 1 et 2) sont relatives à des mesures réalisées en laboratoires, selon des méthodes décrites au niveau du guide de la AFGC 2004 (conception des béton pour une durée de vie donnée des ouvrages) appliquée sur des éprouvettes moulées ou des carottes de béton conservées en laboratoires pendant 3 mois après le coulage.

L'évaluation des performances d'un béton donné, peut être réalisée en comparant les valeurs des indicateurs de durabilité qui auront été obtenus pour la formule considérée aux classes correspondantes proposées (Tableau 1). Ce tableau est un outil simple qui peut être utilisé par le concepteur pour sélectionner les bétons sur la base de critères prédéfinis, et/ou pour optimiser la formulation ou encore pour contrôler la qualité du matériau.

3. Spécifications relatives aux indicateurs de durabilité :

Les spécifications performantielles sont fondées sur les indicateurs de durabilité généraux, les classes précédemment définies et le type d'environnement.

Les spécifications types, vis-à-vis de la prévention de la corrosion des armatures et l'alcali-réaction, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, sont proposées dans le tableau 5.

3.1. Types d'environnement :

Les différents environnements ont été définis à partir des classes d'exposition figurant dans la norme Européenne EN 206-1 [9] relatives au béton, mais seuls les environnements influençant la corrosion des armatures, l'alcali-réaction et l'attaque sulfatique sont considérés. Ces environnements sont récapitulés dans les tableaux 3, 4 et 5.

3.2. Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures :

Pour chaque durée de vie exigée et pour chaque type d'environnement considéré, un certain nombre d'indicateurs doivent être quantifiés et différents critères de conformité doivent être vérifiés. Le nombre des indicateurs choisis varie de 1 à 4 selon le cas considéré. Quand le niveau d'exigence et l'agressivité du milieu environnant augmentent, le nombre d'indicateur de durabilité à quantifier croît également et les critères de conformité (seuils) deviennent plus sévères (Tableau 6).

Les indicateurs de durabilité généraux proposés peuvent être remplacés par des indicateurs de substitution mentionnés au cf. I.1.3. Ces modifications doivent être réalisées sous réserve de justification et/ou de validation préalables, et en se basant

Tableau 1 : Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution (S) : porosité, résistivité électrique, coefficient de diffusion et perméabilité. Le type de béton est donné à titre indicatif [1]

	Durabilité potentielle	Classes et valeurs limites				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau}	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure (%) P_{hg}		13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique (Ohm.m) ρ	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion effectif des chlorures ($10^{-12} m^2 ; s^{-1}$) D_{eff}	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de migration) ($10^{-12} m^2 ; s^{-1}$) $D_{app(mig)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ($10^{-12} m^2 ; s^{-1}$) $D_{app(diff)}$				< 5	
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{entrée}=2$ MPa et après séchage à $T = 105^{\circ}C$) ($10^{-18} m^2$) K_{gaz}	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
G	Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} par mesure directe de flux, après saturation) ($10^{-18} m^2$) K_{liq} (*)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
	Type de béton (indicatif)		B25 à B35	B30 à B60	B55 à B80	> B80

(*) : On notera la relation qui existe entre K_{liq} et le coefficient de perméabilité (K_{liq}) qui est souvent utilisé et qui exprime en $\frac{m^3}{m^2.s} = \frac{\rho_{eau} \cdot g}{\eta_{eau}} \cdot k_{liq} \approx 107 \cdot k_{liq}$

 Durabilité potentielle faible

 Durabilité potentielle moyenne

 Durabilité potentielle élevée

 Durabilité potentielle très élevée

Tableau 2 : Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives à la teneur en portlandite Ca(OH)_2 [1]

	Classes et valeurs limites				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures					
Teneur en Ca(OH)_2 (% par rapport au ciment)	< 10	10 - 13	13 - 20	22 - 25	≥ 25
Durabilité potentielle vis-à-vis de l'alcali-réaction					
Teneur en Ca(OH)_2 (% par rapport au ciment)	≥ 20	13 - 17	8 - 12	5 - 8	< 5

Tableau 3 : Type d'environnement influençant la corrosion des armatures [1] et [9].

	N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1 ou de la Pr EN 1992-1
Carbonatation	1	- Sec et très sec ($\text{HR} < 65 \%$) - Humide en permanence (y compris immersion en eau douce)	X0 et XC1 (limités au climat sec)
	2	Humide, rarement sec ($\text{HR} > 80 \%$)	XC2
	3	Humidité modérée ($65 < \text{HR} < 80 \%$)	XC3
	4	Périodes d'humidité alternant avec des périodes sèches sans chlorure (sels de déverglaçage, embruns, ...)	XC4
Pénétration des chlorures	5	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage, mais pas en contact direct avec l'eau de mer . 5.1 : [Cl] faible : concentration en chlorures libres à la surface $c_s \leq 10 \text{ g.L}^{-1}$. 5.2 : [Cl] forte : concentration en chlorures libres à la surface $c_s \geq 100 \text{ g.L}^{-1}$	XSI, XDI et XD3 ⁽¹⁾
	6	Immersion dans l'eau contenant des chlorures	XS2 et XD2
	7	Zone de marnage	XS3

(1) dans le cas XD3, les cycles de gel-dégel peuvent constituer un facteur aggravant pour le "béton d'enrobage" et de là pour la corrosion des armatures- Dans ce dernier cas, la classe XD3 correspondra au type d'environnement 5.2, ou éventuellement au type d'environnement 7.

Tableau 4 : Type d'environnement influençant l'alcali réaction [1] et [9].

N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1 ou de la Pr EN 1992-1
1	- Sec et très sec - Humidité modérée avec peu d'alternances	X0 et XC1 (limités au climat sec)
2	Périodes d'humidité alternant avec des périodes sèches	X0 XC1, XC3, XC4 XD1, XD3, XS1, XS3 XF1, XF3
3	Immersion en eau douce ou de mer ou fortes doses de sels de déverglaçage	XO XCI, XC2, XD2, XS2, XS3 XF2, XF4

Tableau 5 : Type d'environnement influençant l'attaque sulfatique [1] et [9].

N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1
1	- Environnement à faible agressivité chimique	XA1
2	- Environnement d'agressivité chimique modérée	XA2
3	- Environnement à forte agressivité chimique	XA3

Tableau 6 : Indicateurs de durabilité sélectionnés et valeurs limites proposées en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, dans le cas où l'enrobage satisfait aux valeurs réglementaires. P_{eau} est donnée en %, $D_{\text{app(mig)}}$ est donné en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, K_{gaz} est donnée en 10^{-18} m^2 et K_{liq} est donnée en 10^{-18} m^2 . Les valeurs correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans le guide AFGC 2004 sur des éprouvettes conservées dans l'eau vendant 3 mois après le coulage (moyennes sur au moins 3 éprouvettes) [1].

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence	Corrosion induite par carbonatation (e = 30 mm)				Corrosion induite par les chlorures (e = 50 mm)			
	1	2	3	4	5		6	7
	Sec et très sec (HR<65%) ou humide en permanence	Humide (HR>80%)	Modérément humide (60<HR<80%)	Cycles fréquents d'humidification-séchage	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage		Immersion dans l'eau contenant de chlorures	Zone de marnage
					[CL] faible ⁽¹⁾	[CL] forte ⁽²⁾		
< 30 ans Niveau 1	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 15$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 14$	• $P_{\text{eau}} < 15$	• $P_{\text{eau}} < 14$
De 30 à 50 ans Bâtiment Niveau 2	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(5)}$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 15$	• $P_{\text{eau}} < 11$	• $P_{\text{eau}} < 13$	• $P_{\text{eau}} < 11$
De 50 à 100 ans Bâtiment et Ouvrage d'art Niveau 3	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 12^{(7)}$ • $K_{\text{gaz}} < 100^{(8)}$	• $P_{\text{eau}} < 12^{(7)}$ • $K_{\text{liq}} < 0.1^{(9)}$	• $P_{\text{eau}} < 14$	• $P_{\text{eau}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{liq}} < 0.1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 13$ • $D_{\text{app(mig)}} < 7$	• $P_{\text{eau}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 3$ • $K_{\text{liq}} < 0.1^{(3)}$
De 100 à 120 ans	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} <$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} <$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} <$	• $P_{\text{eau}} < 9$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} <$	• $P_{\text{eau}} < 9$	• $P_{\text{eau}} < 12$	• $P_{\text{eau}} < 10$

Grands ouvrages Niveau 4	100	100	$10^{(4)}$	• $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	20 • $K_{\text{liq}} < 0.1$ ⁽³⁾	• $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	• $D_{\text{app(mig)}} < 5$	• $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{gaz}} < 100$ • $K_{\text{liq}} < 0.05$
> 120 ans Ouvrages dites exceptionnels Niveau 5	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 10$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0.01$

⁽¹⁾ : Concentration en chlorures libres à la surface $C_S \leq 10$ g/l

⁽²⁾ : Concentration en chlorures libres à la surface $C_S \geq 100$ g/l

⁽³⁾ : alternative : $K_{\text{gaz}} < 100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

⁽⁴⁾ : alternative : $K_{\text{liq}} < 0.01 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

⁽⁵⁾ : alternative : $P < 15 \%$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25 \%$

⁽⁶⁾ : alternative : $P < 16 \%$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25 \%$

⁽⁷⁾ : alternative : $P < 14 \%$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25 \%$

⁽⁸⁾ : alternative : $K_{\text{gaz}} < 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

⁽⁹⁾ : alternative : 1) $K_{\text{gaz}} < 100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

2) $K_{\text{gaz}} < 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25$

 Durabilité potentielle faible

 Durabilité potentielle élevée

 Durabilité potentielle moyenne

 Durabilité potentielle très élevée

sur les classes et les valeurs limites indiquées aux tableaux 1 et 2 ou dans d'autre système de classement disponibles. A titre d'exemple, les spécification sur le coefficient de diffusion des ions chlorures pourraient être remplacées par des spécifications sur la quantité d'électricité selon l'essai AASHTO [3], qui est un essai simple et plus utilisé et pour lequel un système de classement est déjà établi.

Dans la pratique, les critères proposés peuvent être adaptés ou complétés pour tenir compte des spécificités du projet, de l'enrobage des armatures, de critère économiques, etc. Par exemple, des critères moins restrictifs peuvent être spécifiés dans le cas d'un enrobage supérieur à la valeur réglementaire. De même les limites peuvent être redéfinies pour des bétons particuliers du fait de leur constituant ou de leur process de fabrication [1].

3.3. Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de l'alcali réaction [1] et [2] :

La quantification des indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction a pour objectif de faire la prédiction lors de la phase de conception ou pendant l'expertise d'un ouvrage existant pour se prononcer sur sa durabilité résiduelle.

La démarche préventive définie au niveau du document des recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (LCPC 1994) [5], repose sur la détermination du niveau de prévention en fonction de la catégorie de l'ouvrage et de l'environnement auquel l'ouvrage est exposé. Les niveaux de prévention A, B et C sont reliés à des durées de vie et donc à des niveaux d'exigences en termes de spécifications vis-à-vis de la durabilité.

Il est à signaler que plus le niveau de prévention sera élevé plus la durée de vie exigée sera augmentée (Tableau 7).

Tableau 7 : Détermination du niveau de prévention en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée [1] et [5].

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence ↓	1 (sec ou humidité modérée)	2 (cycles d'humidité séchage)	3 (immersion ou Présence de sels)
de 5 à 50 ans Ouvrages provisoires + la plupart des produits préfabriqués à l'exception des éléments de structure et des produits destinés à être utilisés dans des ambiances agressives comme les canalisations d'assainissement, les corniches d'OA, ... Niveau 1 (risque faible ou acceptable)	A	A	A
de 50 à 100 ans La plupart des bâtiments et ouvrages de génie civil Niveau 2 (risque peu tolérable)	A	B	B
> 120 ans (ou bien exigence d'absence de fissuration, même en cas de durée de vie plus courte, pour des raisons de	C	C	C

sécurité ou d'esthétique: barrages, tunnels, ponts ou viaducs exceptionnels, monuments ou bâtiments de prestige) Ouvrages dits exceptionnels Niveau 3 (risque inacceptable)			
---	--	--	--

Pour le niveau de prévention A, qui correspond au niveau de prévention le plus faible et par conséquence à la durée de vie exigée la moins importante, aucune spécification supplémentaire aux recommandations LCPC 1994 n'est requise vis-à-vis de la durabilité. Par contre, pour les niveaux de prévention B et C interviennent des indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali réaction notamment la qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction conformément aux normes NF P18-594 [12], N et NF P18-545 [11] et les recommandations du LCPC 1994 [5].

En fonction de la qualité des granulats et du type d'environnement d'autres essais complémentaires sont nécessaires pour définir les indicateurs de durabilité, notamment :

a. Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (essai cinétique)

Dans le cas où les granulats étudiés sont PR l'essai cinétique est nécessaire pour définir les valeurs limites admissibles relativement à la quantité de silice libérée. Le mode opératoire consiste à une attaque avec la soude de 120g d'un échantillon à 60 °C.

b. Teneur en alcalins :

Dans le cas d'un niveau d'exigence 2 (durée de vie de 50 à 100 ans) et en niveau de prévention B et que les granulats sont qualifiés PR, on effectue généralement un bilan des alcalins, conformément à l'organigramme de la figure 1.

Des valeurs limites sont données selon les recommandations LCPC 1994 [5] et ont été confirmées expérimentalement (Guide AFGC 2004 [1]) :

- En absence des données statistiques sur les teneurs en alcalins équivalents du ciment, on applique la règle suivante :

$[Na_2O_{eq.} \text{ Actifs du béton}]_{moy} < 3 \text{ kg.m}^{-3}$ de béton et $[Na_2O_{eq.} \text{ Actifs du béton}]_{max} < 3,3 \text{ kg.m}^{-3}$ de béton ;

- Dans le cas où la dispersion V_c des teneurs en alcalins équivalents du ciment est connue, on applique la règle suivante :

$$T_m < \frac{3,5}{1 + 2V_c} \text{ kg / m}^3 \quad \text{et} \quad T_{max} < 3,5 \text{ kg / m}^3$$

T_m : Teneur moyenne effective qui tient compte de la dispersion des teneurs en alcalins

T_{max} : Teneur maximale effective des résultats d'essai à ne pas dépasser

V_c : Coefficient de variation de la teneur en alcalins du ciment

c. Valeurs limites relatives aux déformations de gonflement d'éprouvettes en béton :

Les valeurs limites admissibles pour les déformations de gonflement unidimensionnelles mesurées lors de l'essai de performance selon la norme NF P 18-454 [11] sont les suivantes :

- Cas des formules de béton de CPA sans additions minérales :

Déformation < 0,02 % (200 $\mu\text{m/m}$) à 3 mois ou 5 mois selon les types des granulats utilisés ;

- Cas des autres formules de béton :

Déformation < 0,02 % (200 $\mu\text{m/m}$) à 5 mois, et les évolutions mensuelles de la déformation mesurée aux cours des 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} mois respectent les conditions suivantes :

- Deux de ces trois valeurs sont < 25 $\mu\text{m/m}$ (0,0025 %) ;

– La somme de ces trois valeurs est $< 100 \mu\text{m}/\text{m}$ (0,01 %).

Les formules de béton non conformes à 5 mois peuvent cependant convenir à l'emploi si la déformation $< 0,03 \%$ ($300 \mu\text{m}/\text{m}$) à 12 mois.

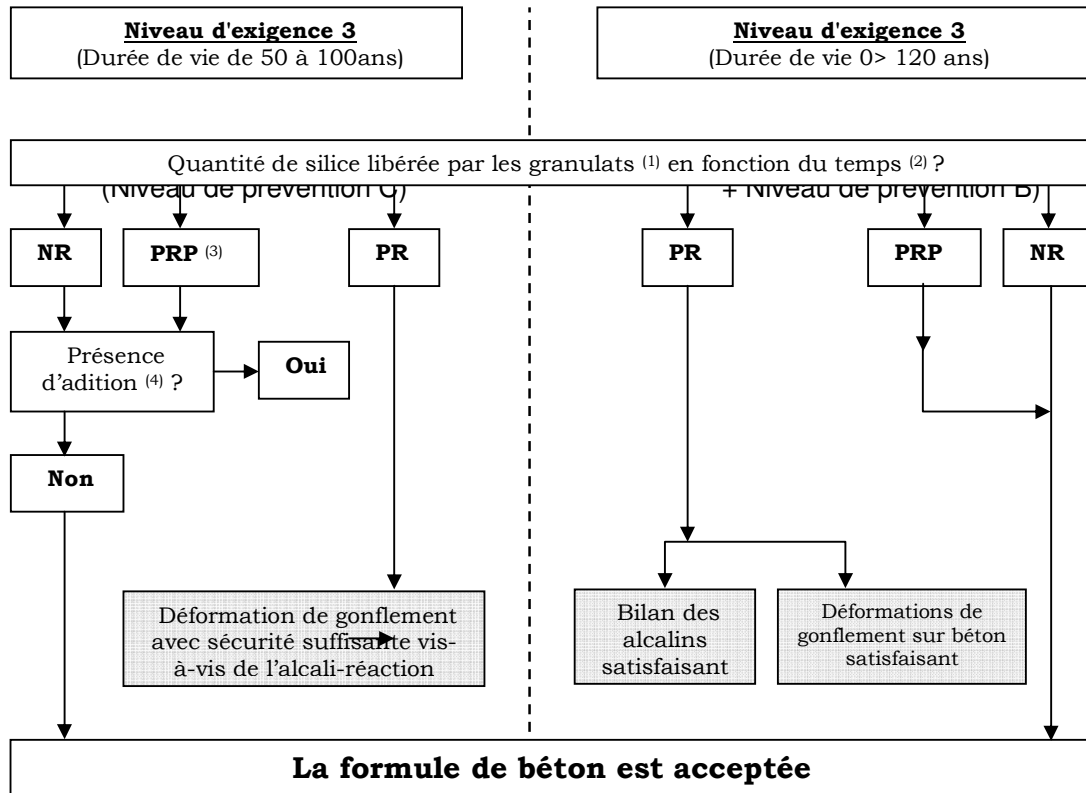


Figure 1 : Organigramme d'utilisation des indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction : sélection ou qualification d'une formule de béton pour un ouvrage donné [1].

(1) : un seul type de granulat ou un mélange granulaire, conformément au document P 18-542 décrivant la conduite des opérations à effectuer pour procéder à une qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction.

(2) : méthode basée sur le test cinétique : méthode chimique de la norme d'essai NF P 18-589 (ou l'essai cinétique modifié du projet de norme P 18-594).

(3) : l'utilisation de granulats PRP suppose que les deux conditions particulières figurant au chapitre 9 des Recommandations soient vérifiées.

(4) : il s'agit de fillers siliceux susceptibles de libérer de la silice réactive, tels que le sable de quartz broyé.

(5) : on utilise un ciment à bas taux d'alcalins, on augmente progressivement le taux d'alcalins par ajout de soude NaOH (on ajoute 1, 2, 3 ou 4 kg d'alcalins) jusqu'au dépassement de la valeur limite de gonflement, puis on prend une sécurité d'environ 1 ou 2 kg par rapport au seuil de déclenchement.

(6) : essai de performance sur béton (légèrement dopé en alcalins) selon NF P 18-454.

4. Prédiction de la durée de vie et suivi des bétons armés en phase de conception ou évaluation de la durabilité :

Pour la prédiction de la durée de vie des structures en béton, un panel de modèles prédictifs ont été élaborés (Guide AFGC 2004 [1]) pour chaque processus de dégradation envisageable (corrosion des armatures, carbonatation et alcali-réaction). Les modèles sélectionnés sont aisément accessibles et utilisent les indicateurs de durabilité comme données d'entrée avec des niveaux de sophistication différents pour résoudre des problèmes différents.

Ces modèles prédictifs pourront être utilisés en phase de conception d'un ouvrage neuf ou lors du suivi d'un ouvrage existant pour la prédiction de la durabilité résiduelle tout en tenant en compte du vieillissement du matériau in situ.

En ce qui concerne la corrosion des armatures, des modèles très pertinents et bien adaptés à la quantification des risques de corrosion des armatures induite par carbonatation ou par les chlorures, sont établis. Parmi lesquels on peut citer les approches probabilistes et multifacteurs du type de celles proposées par le projet BRITE « DURACRETE » ou par Vesikari. On manque, toutefois de valeurs obtenues expérimentalement pour les nombreux paramètres apparaissant dans les relations empiriques de ce type de modèle. Ceci peut rendre difficile la mise en œuvre de ce type de modèle.

D'autres modèles plus simples pour l'ingénieur sont également utilisés pour prédire la durée de vie vis-à-vis de la corrosion des armatures. A titre d'exemple, on peut citer le modèle basé principalement sur la mesure de résistivité. Ce modèle permet de prédire la durée de vie en prenant en compte la période de la propagation, lorsque l'on fait intervenir la relation existant entre la vitesse de corrosion et la résistivité.

Pour l'alcali-réaction, il existe de nombreux modèles qui sont soit des modèles explicatifs ou prédictifs « matériaux » ou des modèles prédictifs « structures ». Les premiers sont des modèles multi-échelles plus ou moins sophistiqués destinés à l'étude du comportement du matériau et se sont des modèles très consommateurs de paramètres d'entrées (indicateurs chimiques) (modèle proposé par Capra et Sellier). Dans ces modèles la courbe de gonflement est observée, elle joue le rôle de témoins de la durée de vie de la structure « éprouvette » et donc c'est une sortie du modèle à comparer directement avec des résultats expérimentaux obtenus sur éprouvettes ou sur carottes prélevées in situ.

Les derniers sont des modèles établis à l'échelle macroscopique et ne nécessitent que peu de paramètres d'entrée. Ils sont destinés au diagnostic des ouvrages. Dans ces modèles, la courbe de gonflement est observée, elle intervient en tant qu'indicateur du matériau constitutif de la structure et par conséquent comme donnée d'entrée (approche de Li et Coussy).

III - APPLICATION DE LA DEMARCHE PERFORMANTIELLE :

IV. CAS D'UN GRAND OUVRAGE MARITIME.

Le travail de recherche mené au LPEE consiste en la détermination de la formulation d'un béton pour un grand ouvrage classé en niveau 4, soit un ouvrage en zone de marnage et pour une durée de vie exigée de 100 à 120 ans. L'évaluation qualitative ou quantitative de la durabilité potentielle du point de vue matériau, consiste à comparer les valeurs de chaque indicateur de durabilité, obtenues au moyen d'essais de laboratoire à la classe correspondante.

1. Déroulement de la démarche performantielle adoptée :

La démarche adoptée a comporté les étapes suivantes :

- **Détermination de la catégorie de l'ouvrage :**

Grand ouvrage de prestige, ayant un rôle stratégique important ;

- **Détermination des conditions d'exposition :**

L'environnement de l'ouvrage est un environnement marin (Zone de marnage), où les bétons sont soumis à deux actions majeurs qui sont la diffusion des ions chlorures et à la carbonatation (environnement XS3) ;

- **Détermination de la durée de vie :**

La durée de vie a été fixée par le maître d'ouvrage ; elle est de 100 à 120 ans ;

- **Choix des indicateurs de durabilité et des caractéristiques du matériau (Tableau 8) :**

Tableau 8 : indicateurs de durabilité et caractéristiques de base à mesurer

Indicateurs de durabilité	Type d'indicateur	Désignation des essais
Caractéristiques de base	Mécaniques	Résistance à la compression à 90 jours
	Béton frais	Slump
		Air occlus
		Densité
Indicateurs généraux	Durabilité	Coefficient de diffusion des ions chlorures en régime non stationnaire
		Porosité accessible à l'eau
		Perméabilité à l'oxygène
Indicateurs de substitution		Quantité d'électricité AASHTO
		Absorption d'eau par capillarité
		Résistivité
Indicateurs relatifs à l'alcali réaction	Qualification des granulats	Classes de réactivité par rapport à l'alcali-réaction

- **Sélection des spécifications relatives aux indicateurs de durabilité (Tableau 9) :**

Les spécifications relatives à la diffusion des chlorures, exigée par le CPS, ont été complétées par d'autres essais. Les spécifications retenues pour ces essais sont tirées du guide de la AFGC 2004.

Tableau 9 : Spécification relatives aux indicateurs de durabilité retenus

Paramètres à mesurer	Méthode	Spécifications (Guide AFGC 2004)	CPS
Coefficient de diffusion des ions chlorures en régime non stationnaire	NTB 492	$< 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$< 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Porosité accessible à l'eau	AFPC-AFREM	10 %	-
Perméabilité à l'oxygène	appareillage CEMBUREAU	100 m^2	-
Perméabilité à l'eau	NF EN 12390-8	0,05 m^2	-
Quantité d'électricité (en C)	ASTM C1202	Très faible pénétrabilité des chlorures)	-
Teneur en silice	XRF	$< 4 \%$	$< 4 \%$

Les granulats utilisés pour la confection des bétons testés, sont qualifiés de NR sur la base des résultats des analyses chimiques. Ces derniers ont montré que la teneur en silice est inférieure à la limite de 4 % (Recommandations LCPC 1994 et P18-542). Par conséquent, les matériaux produits à partir de la formation carbonatée sont qualifiés de **Non Réactifs** vis-à-vis du risque d'alcali-réaction.

▪ **Formulations et tests en laboratoire de béton satisfaisant les critères retenus :**

Les bétons étudiés sont de deux types ; un béton ordinaire et un BHP. Pour chaque type de béton 5 formules ont été testées.

Les matériaux utilisés pour la confection des deux types de béton présentent les caractéristiques suivantes :

- Les granulats utilisés proviennent d'une carrière de roche calcaire ;
- Les ciments utilisés sont : un ciment prise mer pour le béton ordinaire et un ciment prise mer à ajouts de cendres volantes pour le béton haute performance (BHP) ;
- La fumée de silice est utilisée comme ajout dans le béton étudié ;
- L'eau de gâchage utilisée est l'eau du réseau urbain ;
- L'adjuvant testé est un adjuvant de nouvelle génération.

Les exigences du CPS sont les suivantes :

- Béton ordinaire :
 - Un E/C doit être inférieur à 0,42 ;
 - Un dosage en ciment compris entre 350 et 380 ;
- Béton haute performance BHP :
 - Un E/C doit être inférieur 0,35 ;

- Un dosage en ciment qui doit être compris entre 400 et 450 avec 15 % du poids de ciment est substitué par des cendres volantes et 5 % par de la fumée de silice.

Les dix compositions testées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 10 : compositions des bétons testés

Constituants	BETON ORDINAIRE					BHP				
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Ciment CPJ 45 Prise mer avec 5% de FS et 15% de CV	355	380	380	380	405	400	425	425	425	450
E/C	0,41					0,34				
E/L	-					0,35				
G/S	1,4	1,4	1,6	1,2	1,4	1,4	1,4	1,6	1,2	1,4

(1) : en pourcentage du poids du ciment

▪ **Résultats et interprétation :**

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Résultats récapitulatif des essais réalisés sur les bétons testés à 90 j

Constituants	BETON AMELIORE					BHP				
	F5	F1	F3	F2	F4	F6	F7	F8	F9	F10
Slump (Cm)	5	13	17	19	22	18	18	18	18	22
Densité (t/m ³)	2,46	2,5	2,47	2,47	2,48	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5
Air occlus (%)	1,0	0,7	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8	1,2	1,0	0,9
Compression simple	61	58	60	56	55	84	77	90	85	79
Mesure du coefficient de la diffusion du chlorure (10 ⁻¹² m ² /s)	10,7	8,4	8,3	12,0	8,6	0,6	1,0	0,5	0,6	0,8
Mesure de porosité accessible à l'eau (%)	11	10	11	11	10	8	8	8	7	9
Perméabilité au Chlorures ASHTO (C)	2397	2059	2361	1917	2209	160	261	168	172	231
Mesure de résistivité (Ohm.m)	275	357	270	233	380	1269	724	-	-	1018
Absorption capillaire (kg/m ²)	4,2	3,9	3,3	-	2,9	1,6	1,6	0,1	1,0	1,3

Ces résultats montrent que les formules des bétons ordinaires n'ont pas respectées les critères sur les indicateurs de durabilité choisis. Les valeurs ainsi obtenues sont supérieures aux seuils exigés pour ce type d'ouvrage.

- Les coefficients de diffusion sont de l'ordre de $8 \text{ à } 12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Les valeurs de porosité sont de l'ordre de 11 % ;
- Les quantités d'électricité sont comprises entre 2000 à 2400 C ces quantités nous permettent de classer les bétons étudiés en perméable.

Par contre pour le béton BHP ces indicateurs sont tous respectés, avec :

- Des coefficients de diffusion de l'ordre de $0,5 \text{ à } 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ont été obtenus.
- Des valeurs de porosité de l'ordre de 8 % ;
- Des quantités d'électricité comprises entre 160 à 308 C Ces quantités nous permettent de classer le béton étudié en béton très faiblement perméable.

Ces résultats montrent que pour des E/C > 0,4 et des dosages en ciment < 380 kg/m³, les indicateurs de durabilité choisis pour les ouvrages marins de durée > 100 ans ne sont pas respectés.

Le ciment utilisé pour la formulation du BHP est substitué en partie par des additions minérales qui sont les cendres volantes et la fumée de silice. L'utilisation de ces additions dans un béton présentant un rapport E/L de 0,35 a permis de diminuer le volume poreux en remplaçant les grands pores par des pores de dimensions plus faibles ce qui a permis d'améliorer les coefficients de transfert et, par conséquent, d'augmenter la durabilité du matériau [1].

2 - Cas des ouvrages a risque d'alcali réaction :

La démarche préventive définie au niveau du document des recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction du LCPC 1994 [5] et le fascicule de documentation NF P 18-542 [4], repose sur la qualification des entités géologiques susceptibles d'être exploités sur la base des :

- Études bibliographiques et géologiques des sites potentiels (documentation, reconnaissance des sites,...) ;
- Analyses Pétrologiques (analyses pétrographiques et chimiques) ;
- Essai rapide de stabilité dimensionnelle à l'autoclave (essai crible) ;
- Essai de performance long sur le béton.

Les analyses pétrographiques et l'essai crible sont des paramètres spécifiques à l'alcali réaction, réalisés pour tester la réactivité des granulats. Ces paramètres ne constituent pas des indicateurs de durabilité car ils ne quantifient pas les performances du béton et ne constituent pas des données d'entrée des modèles prédictifs à la différence du bilan des alcalin et de l'essai de performance.

Le bilan des alcalins actifs dans le béton associé à la quantité de la silice libérable sont définis par le Guide de l'AFGC 2004 [1] comme des indicateurs chimiques spécifiques à l'alcali réaction. Ces indicateurs permettent de modéliser la réaction alcali-silice.

L'essai de performance quant à lui permet de quantifier le comportement macroscopique du béton durci vis-à-vis de l'alcali-réaction. En plus, les résultats de cet essai sont utilisés pour alimenter les modèles de prédiction de la durée de vie pour les ouvrages nouveaux et les ouvrages atteints d'alcali-réaction.

2.1. Résultats des analyses pétrologiques :

a. Examens pétrographiques :

Pour la plupart des gisements marocains étudiés (alluvionnaires et roches massives silicatées ou silico-calcaires), on a pu identifier la présence, en proportion importante, des phases minérales actives chimiquement tel que la silice fibreuse, la calcédoine, le quartz de recristallisation (microquartz), le verre volcanique, le quartz à extension diffuse ...

b. Analyses chimiques :

Les analyses chimiques permettent de qualifier les roches carbonatées en NR si la teneur en silice totale est inférieure à 4 %. Si non, ces roches doivent faire l'objet des essais complémentaires nécessaires pour leur qualification.

Les résultats des analyses chimiques réalisées sur les roches carbonatées affleurant au niveau du territoire marocain montrent l'existence de deux types de roches carbonatées. Les roches qui présentent une faible teneur en silice ($\text{SiO}_2 < 4 \%$) et les roches relativement plus riches en silicium sous forme de quartz, de silice amorphe ou cryptocristalline.

2.2. Résultats de l'essai crible (essai de stabilité dimensionnelle sur mortier à l'autoclave) :

L'essai de stabilité dimensionnelle sur mortier à l'autoclave est un essai rapide capable de diagnostiquer la réactivité aux alcalins des granulats. Selon le résultat de cet essai on peut classer les entités géologiques étudiées en non réactifs (**NR**), potentiellement réactifs (**PR**) et potentiellement réactives à effet de pessimum (**PRP**). En cas de désaccord entre l'analyse pétrologique et l'essai crible, on a recours à l'essai cinétique chimique.

La qualification d'une soixantaine de gisements de roches massifs et alluvionnaires, réparties sur l'ensemble du royaume (Figure 2), nous a permis de constater que la plupart des roches massives exploitables, dominées par les calcaires, sont qualifiées de non réactives par contre les alluvions des oueds qui sont, par nature, des matériaux hétérogènes sont le plus souvent qualifiées de potentiellement réactives.

Les entités non réactives peuvent être utilisées dans les différents types de béton sans se préoccuper de problèmes liés à l'alcali-réaction contrairement aux entités potentiellement réactives dont l'utilisation est tributaire des résultats des critères de performance (bilan des alcalins et/ou essais de performance).

2.3. Critère de performance :

L'étude du critère de performance met en œuvre le critère analytique du bilan des alcalins et/ou un essai de gonflement sur éprouvette de béton suralcalinisé exécuté selon le mode opératoire LCPC (1994).

En effet, les ouvrages dont le niveau de prévention est B et pour lesquels on recommande une durée de vie de 50 à 100 ans, les granulats potentiellement réactifs peuvent être souvent utilisés, mais sur la base des résultats du bilan analytique.

Par contre, pour les ouvrages de niveau de prévention C et les ouvrages d'art routier et autoroutier ; compte tenu de leur importance stratégique et leur impact sur la sécurité des usagers, les granulats potentiellement sont à proscrire à condition de vérifier les critères de performances basés sur le bilan des alcalins et l'essai de performance.

Les granulats potentiellement réactifs, qui sont les plus dominants au Maroc, sont souvent utilisés, pour la construction des ouvrages classés en niveau de prévention B, sur la base du bilan des alcalins. A l'exception de certaines compositions de béton caractérisée par un dosage en ciment élevé ($> 400 \text{ kg/m}^3$) qui nécessite soit l'utilisation d'un ciment Low alkali ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}} < 0,6 \%$) et /ou contenant des ajouts minéraux, soit la qualification de la formule du béton retenue sur la base d'un essai de performance.

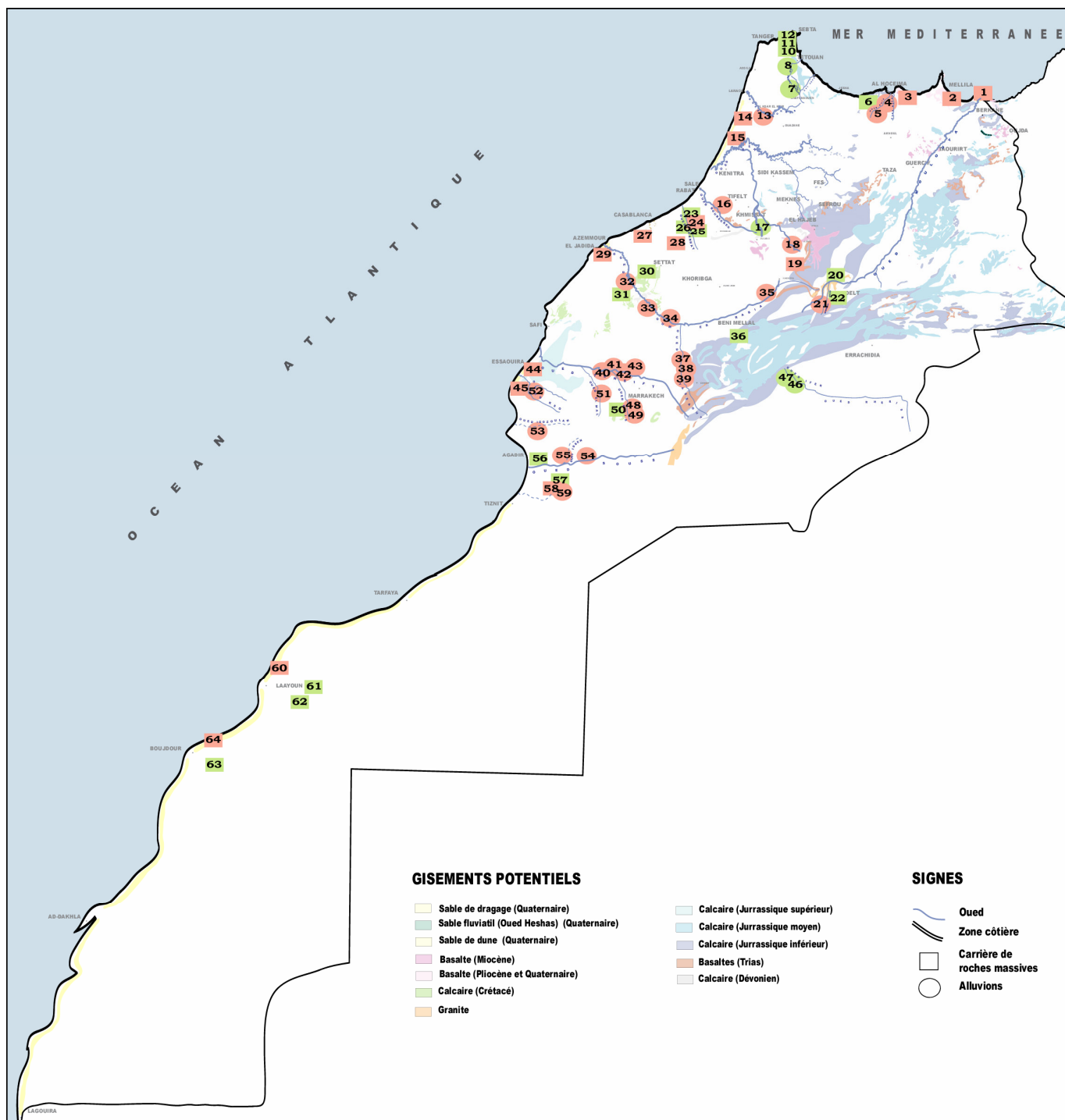


Figure 2 : Carte de localisation des matériaux qualifiés vis-à-vis de l'alcali-réaction (rouge = PR, vert = NR)

Des formules de béton ont été testées en utilisant des matériaux alluvionnaires potentiellement réactifs et deux types de ciment ; un Low alcali et l'autre riche en alcalin. Les résultats obtenus montrent que les granulats potentiellement réactif **(PR)** peuvent être utilisés comme granulats à béton, pour la construction des ouvrages d'art (Classe C) avec une durée de vie supérieure à 120 ans, à condition de que le béton testé soit formulé avec un ciment Low Alcali.

CONCLUSION :

L'approche performantielle constitue actuellement un outil indispensable. Elle permet de spécifier dès la phase de conception, notamment pour les projets importants, des critères performantielles très pertinents et objectifs en matière de durabilité.

La détermination des indicateurs de durabilité, nécessite la réalisation des études relativement longues du fait de l'importance de la durée des essais recommandés. Ces durées doivent être prises en compte par les maître d'ouvrage lors des études d'APD.

L'application de cette démarche performantielle permettra de disposer des formules de références régionales en tenant compte des indicateurs de durabilité. Ces derniers sont déterminés en fonction des caractéristiques des matériaux locaux, du taux d'agressivité du milieu et de la durée de vie exigée.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1]. BAROGHEL-BOUNY V., Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – Etat de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Document scientifique et technique de l'association Française de Génie Civile (AFGC, Bagneux, Juillet 2004), 252 p.
- [2]. BAROGHEL-BOUNY V., Nouvelle approche performantielle et prédictive fondée sur les indicateurs de durabilité (Club Régional ouvrages d'Art, 08 déc. 2005, les sables d'Olonne, France), 4 p.
- [3]. ASTM C 1202-94, Standard Test Method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1994.
- [4]. P 18-542, Fascicule de documentation : Granulats courants pour béton hydraulique – critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction, AFNOR, mai 1994.
- [5]. Recommandations pour la prévention dus à l'alcali-réaction, LCPC, juin 1994, 51p.
- [6]. NT BUILD 443 Concrete, hardened : accelerated chloride penetration, nov. 1995.
- [7]. Méthodes recommandés pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM "Durabilité des bétons", 11-12 déc. 1997, Toulouse, France (LMDC, Toulouse, 1998), 283 p.
- [8]. NT BUILD 492 : Concrete, mortar and cement-based repair materials – Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, nov. 1999
- [9]. EN 206-1, Norme européenne : béton – partie 1 : Spécifications, performances, production et conformité, AFNOR, jan. 2000.
- [10]. NF EN 12390-8 : Norme : Essai pour béton durci – partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression, AFNOR, oct. 2001.
- [11]. NF P 18-545, Norme française homologuée : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction. Essai de performance, 2004.
- [12]. P 18-594, Norme : Granulats - Détermination de la stabilité dimensionnelle en milieu alcalin – Essai crible et essai long terme, 2004.