



Carte du gel Maroc : Apport à la durabilité du béton

Khaoula LAGRINI¹

Abdellah OUALI²

Abdessamad GHAFIRI¹

Rhizlane Feddoul³

Khalid Elraz³

Saida Elmoutaki¹

1 : Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'sik

2 : Laboratoire Public des Essais et des Etudes

3 : Direction de Météo Nationale

PLAN DE L'EXPOSÉ

Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton

Cartes du gel au Maroc

Vulnérabilité du Maroc par rapport à l'effet de la température sur le béton

Les essais de durabilité

Résultats et discussion

Introduction : APPROCHE PERFORMANTIÈLE DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES D'ART EN BETON

Action

- Prise en compte du contexte local de l'ouvrage:
 - utilisation des matériaux locaux
 - meilleure adaptation des formules de béton aux conditions environnementales

Objectifs

- Adaptation aux exigences du développement durable
- Démarche favorisant l'innovation

Résultats

- Maîtrise la «durée de vie» d'un ouvrage en béton

Résout le problème des limites de
l'Approche Prescriptive
- qui multiplie les référentiels
prescriptifs
- et peut aboutir à des exigences de
moyens difficiles à concilier
(par exemple, le conflit Gel – RSI)

La durabilité du béton

- ✓ Un béton est dit durable s'il garde l'intégralité de ces performances mécaniques et esthétique pendant sa durée de vie.
- ✓ Le développement des réactions de dégradation du béton est étroitement lié aux conditions environnementales de l'ouvrage.

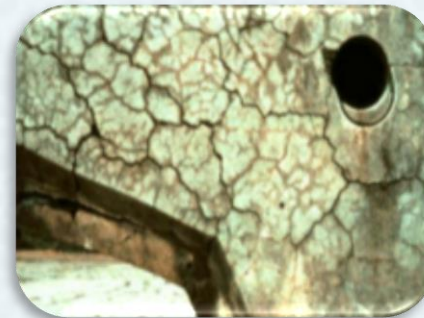
La corrosion des armatures



L'attaque des sulfates



L'alcali-réaction



L'effet du gel-dégel



Les indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité qui sont fondamentaux et qui donnent une vision claire sur la durabilité du béton sont :

La perméabilité
aux gaz

Le coefficient de
diffusion des ions
chlorures

La porosité accessible à
l'eau

La résistivité
électrique

Le gel/dégel

La perméabilité aux gaz

La perméabilité définit la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous un gradient de pression.

Paramètres influençant la perméabilité :



● La porosité

● Les différents paramètres du réseau poreux

● L'effet de la température

Le coefficient de diffusion des ions chlorures

Le coefficient de diffusion est défini comme étant le taux de transfert des ions chlorures à travers une section de béton.

Paramètres influençant le coefficient de diffusion :



Les indicateurs de durabilité

La porosité

La porosité représente le volume des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés.

Paramètres influençant la porosité :



Les indicateurs de durabilité

La résistivité électrique

La résistivité électrique est la capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique.

Paramètres influençant la résistivité :

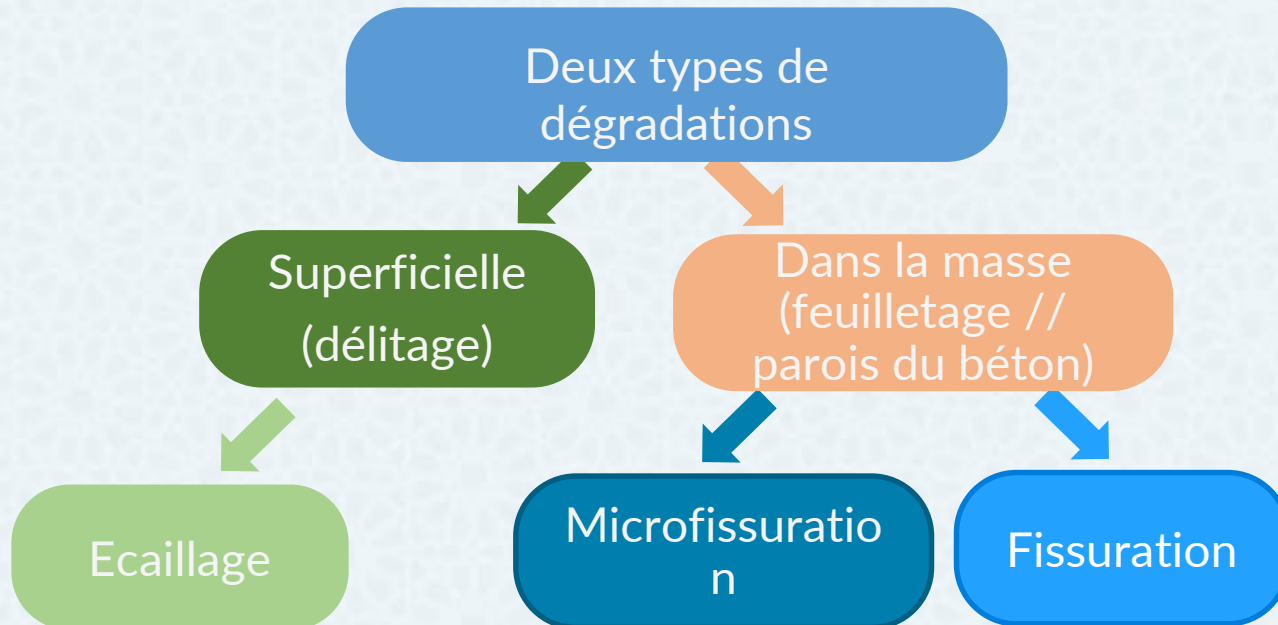


Mécanismes développés par le gel et les sel de déverglaçage

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel.

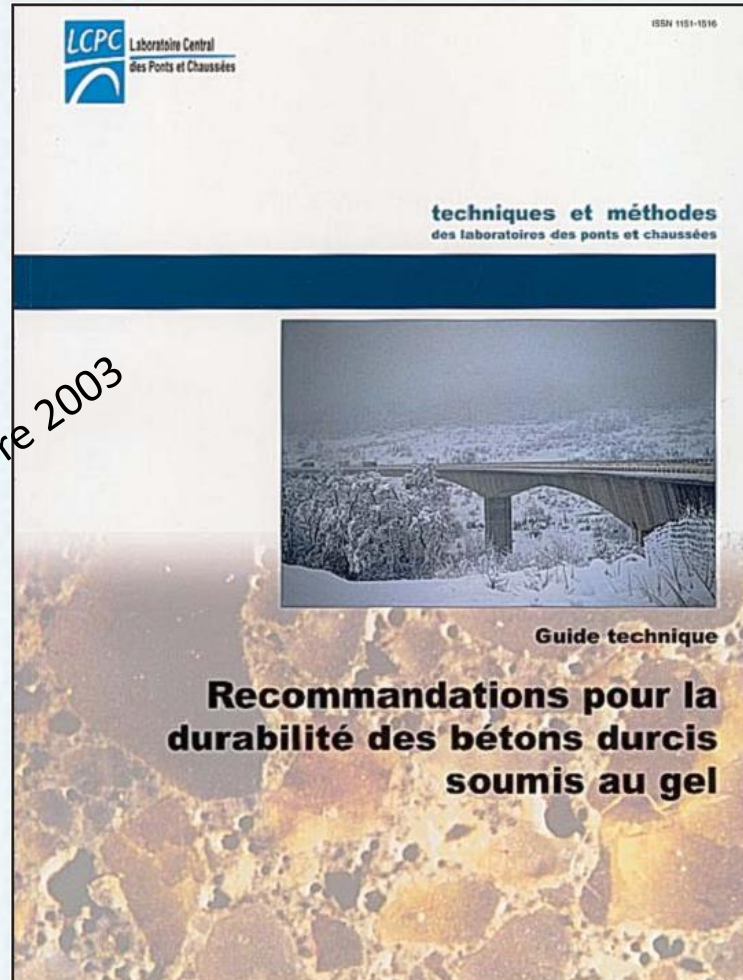
Facteurs aggravants :

- Saturation en eau du béton
- Parties d'ouvrages non protégées des intempéries et des sels de déverglaçage
- Formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton
- Application des sels de déverglaçage (Gradients de concentration et thermique)



Documents de référence

Décembre 2003



Fascicules 65 A et 65 B

Normes sur les granulats :

XP P 18-540

NF EN 12620 et XP P 18-545

NF EN 1367-1 pour la sensibilité au gel des granulats

Norme sur les bétons :

EN 206-1 (2004)

Principes de prévention

Les principes de prévention permettant d'assurer la durabilité des bétons durcis en ambiance hivernale reposent sur les constatations suivantes :

- Le béton résiste d'autant mieux,
 - que sa compacité et sa résistance mécanique, en particulier en traction, sont élevées ;
 - que son degré de saturation en eau est faible ;
 - qu'il est imperméable et ne se laisse pas saturer par les sels de déverglaçage ;
 - que le réseau de bulles d'air est adapté à la quantité d'eau gelable.
- Le béton doit être compact (rapport E/C faible et dosage en ciment élevé), présenter lorsque nécessaire un réseau de bulles d'air approprié, et être formulé en utilisant des granulats non gélifs.

Classe d'exposition 5 : Attaque gel/dégel avec ou sans sel

NM 10.1.008 (2009)

5. Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage		
Lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé, les différentes classes d'exposition sont :		
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.
XF3	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces horizontales de bétons exposées à la pluie et au gel.
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage et surfaces de bétons verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.

EN 206-1 (2004)

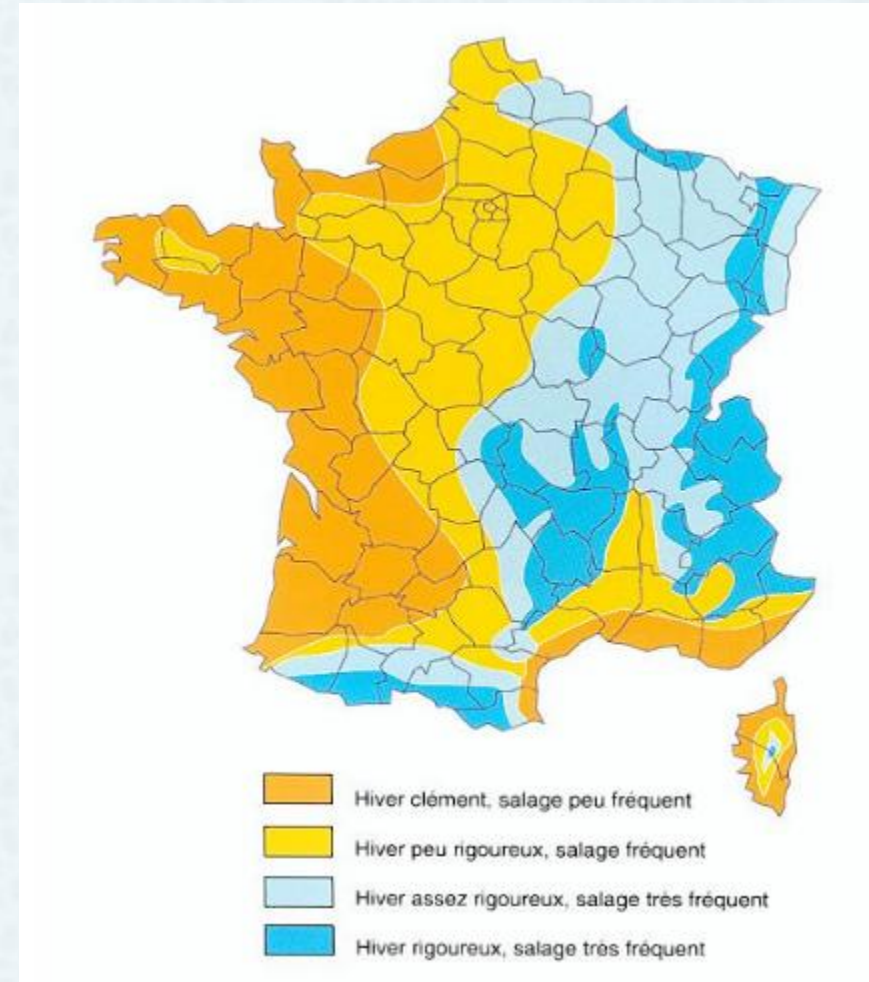
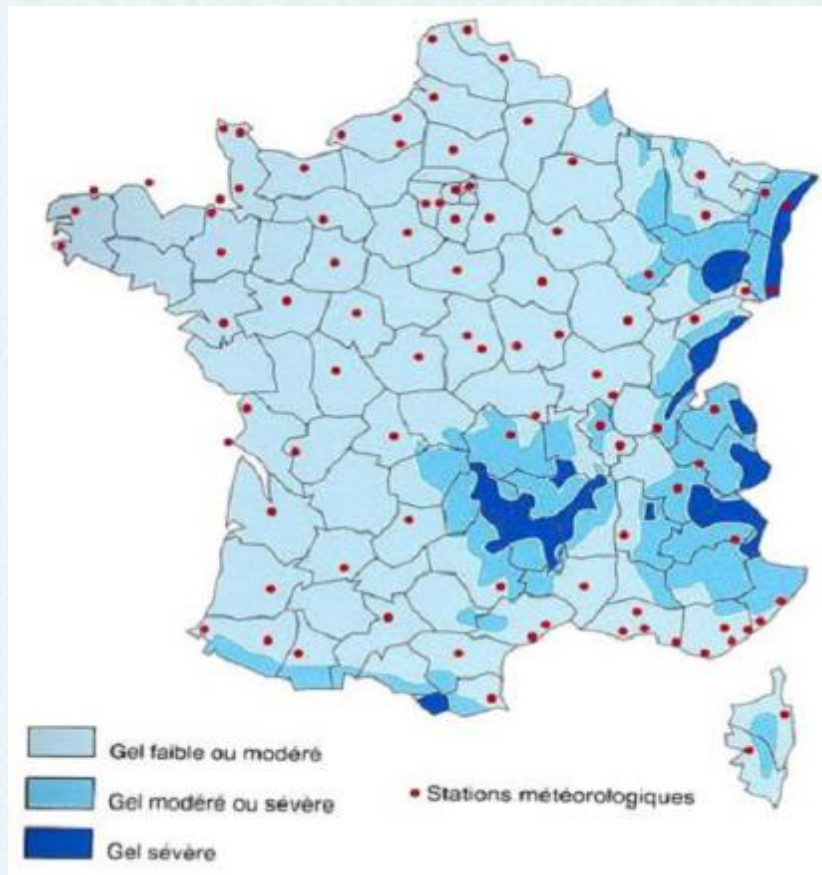
XG1

XG2

Critères : nombre de cycles et niveau des températures froides atteintes
Effet aggravant des stagnations d'eau (surfaces horizontales)

Critères associés à la moyenne annuel du nombre de jours de gel (carte) et aux effets du salage

Classe d'exposition 5 : Carte de gel et salage



XP-P-18-305

Indicateur de durabilité vis-à-vis des dégradations dues au gel et aux sels de déverglaçage

	Zone de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	XF 1 Pas de spécifications propres au gel (se reporter au tableau corrosion – classe XC4)	XF3 (G) $L_{\text{bar}} \leq 250 \mu\text{m}$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 30 \text{ MPa}$
Salage fréquent	XD3 (se reporter au tableau corrosion) XD3 + XF2 pour les éléments très exposés (teneur en air $\geq 4\%$)	XF4 (G+S) $L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2 / f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}$
Salage très fréquent	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

Carte du gel du Maroc

L'élaboration de la carte de gel du Maroc est passé par différentes étapes principalement dépendantes de la précision des données météorologiques disponibles:

- Une carte de gel selon la classification française.
- Une carte de gel selon une classification inspirée de la classification française et adapté au contexte national.
- Une carte de gel selon une classification ne prenant compte que la moyenne des Températures minimales annuelles.
- Une carte de gel selon une classification plus précise moyennant des données qui représentent le résultat d'une modélisation climatique et d'une interpolation spatiale en fonction de l'altitude.

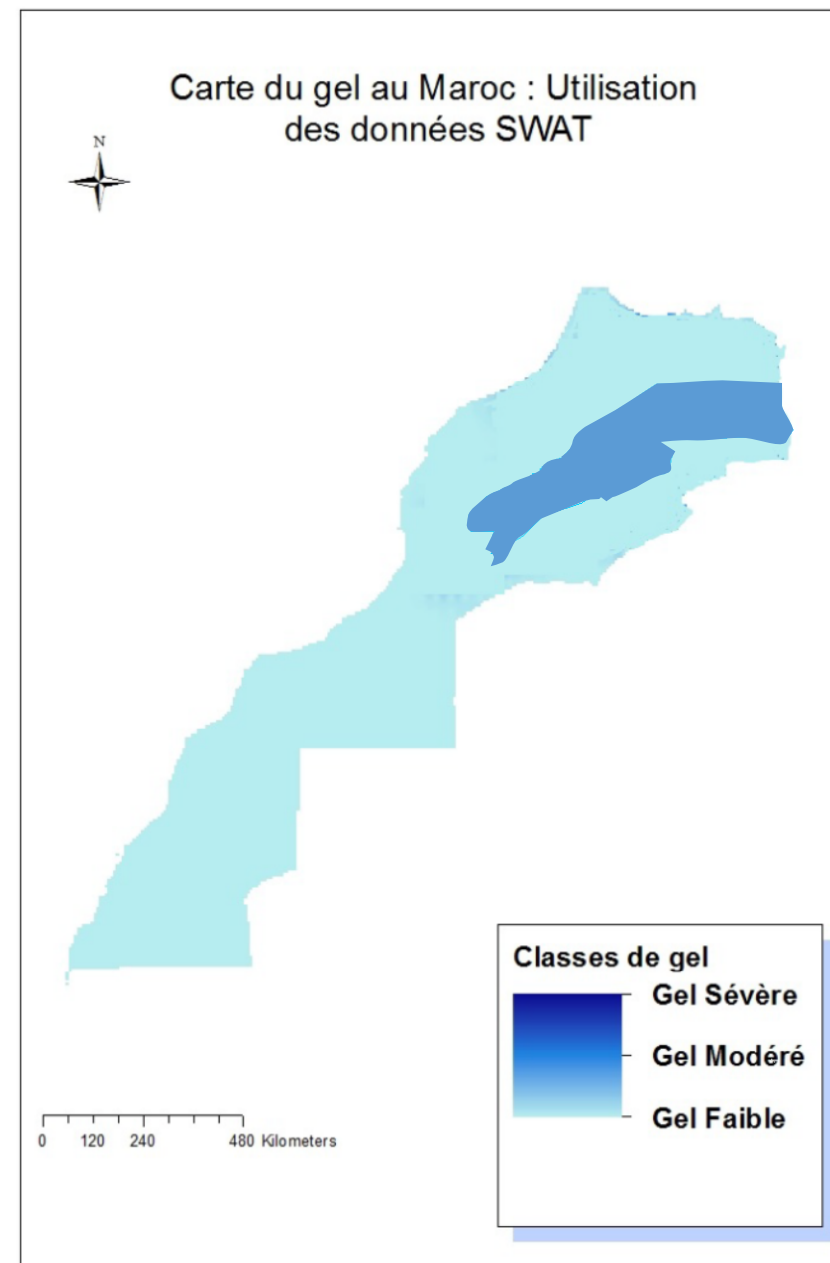
Carte du gel du Maroc

Carte de gel dégel selon la classification française :

La qualification de gel faible, sévère ou modéré répond aux conditions suivantes, mesurées en moyenne annuelle sur les trente dernières années :

- gel faible : pas plus de deux jours où la température atteint des valeurs inférieures à -5°C ;
- gel sévère : plus de dix jours où la température atteint des valeurs inférieures à -10°C ;
- gel modéré : entre gel faible et gel sévère.

Source des données utilisées : le site Global Weather Data for SWAT

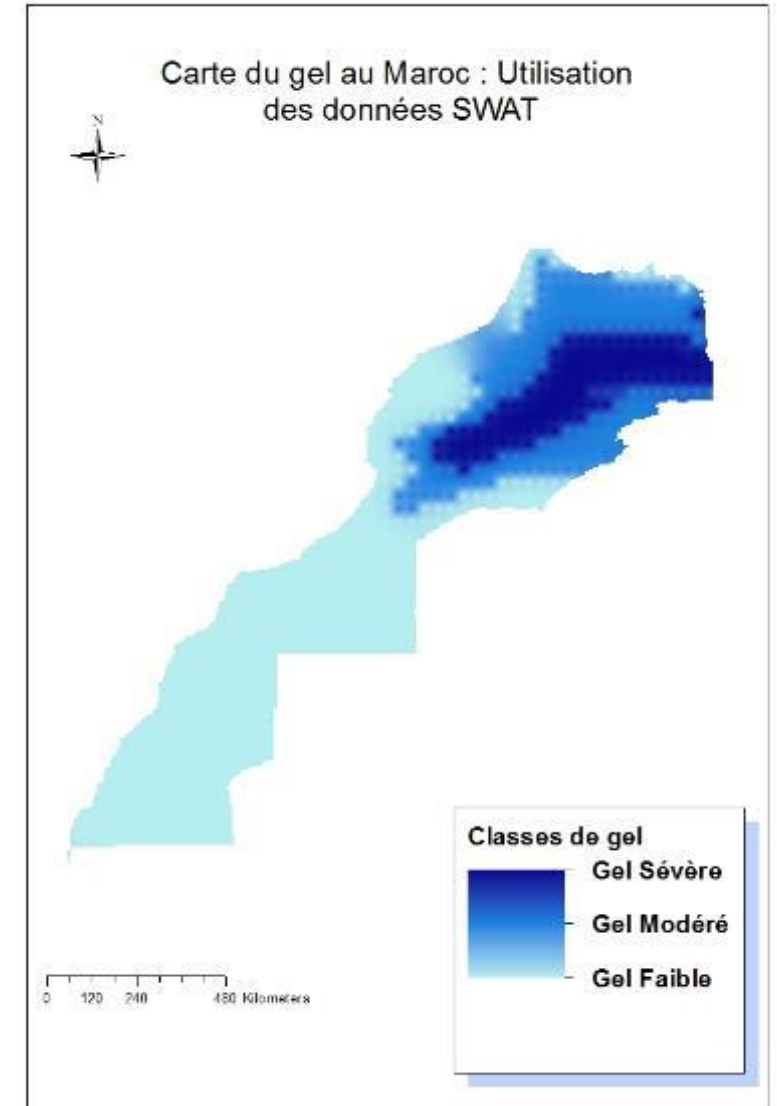


Carte du gel du Maroc

La qualification de gel faible, sévère ou modéré répond aux conditions suivantes, mesurées en moyenne annuelle sur les trente dernières années :

- Gel faible : pas plus de deux jours où la température atteint des valeurs inférieures à 0°C ;
- Gel sévère : plus de dix jours où la température atteint des valeurs inférieures à -2 °C ;
- Gel modéré : entre gel faible et gel sévère.

Source des données utilisées : le site Global Weather Data for SWAT

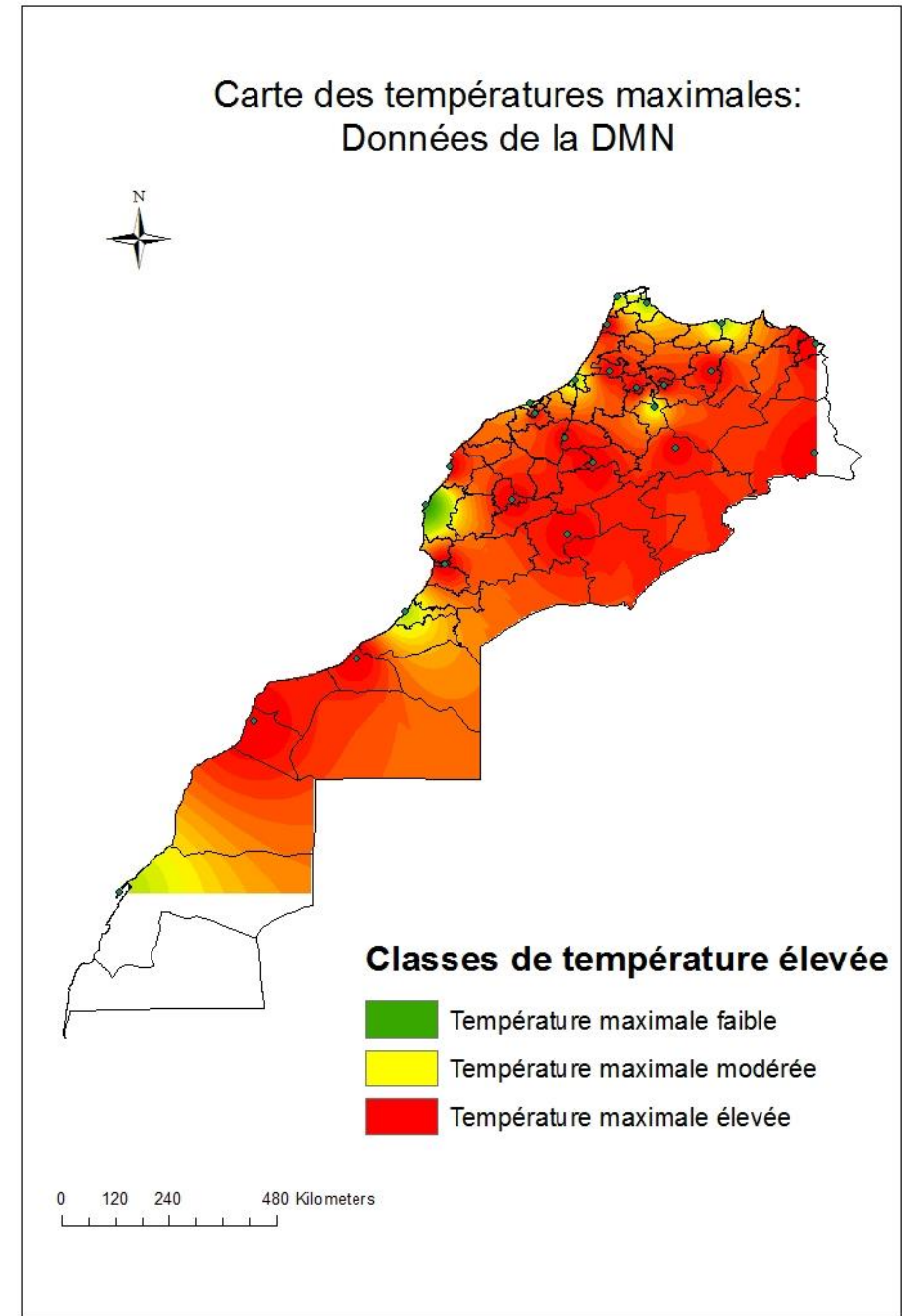


Carte des températures extrêmes

Classification par rapport aux hautes températures proposée

- Température maximale élevée : Plus que 5 jours par an avec une température maximale journalière supérieure à 35°C
- Température maximale faible : Moins de 5 jours par an avec une température maximale journalière supérieure à 30°C
- Température maximale modérée : Entre les deux

Source des données utilisées : site de la DMN



Carte des températures extrêmes

- Pour pouvoir établir une carte de classification des températures extrêmes il faut prendre en considération aussi l'effet des gradients de température :
 - ❑ Gradient en jour et nuit : $T_{\max}$ et $T_{\min}$ journalière pendant les 30 dernières années (1984-2014)
 - ❑ Gradient entre les saisons : $T_{\max}$ et $T_{\min}$ annuelles pendant les 30 dernières années (1984-2014)

Pour déterminer les zones les plus sensibles par rapport aux effets de température sur le béton, il faut déterminer les zones où :

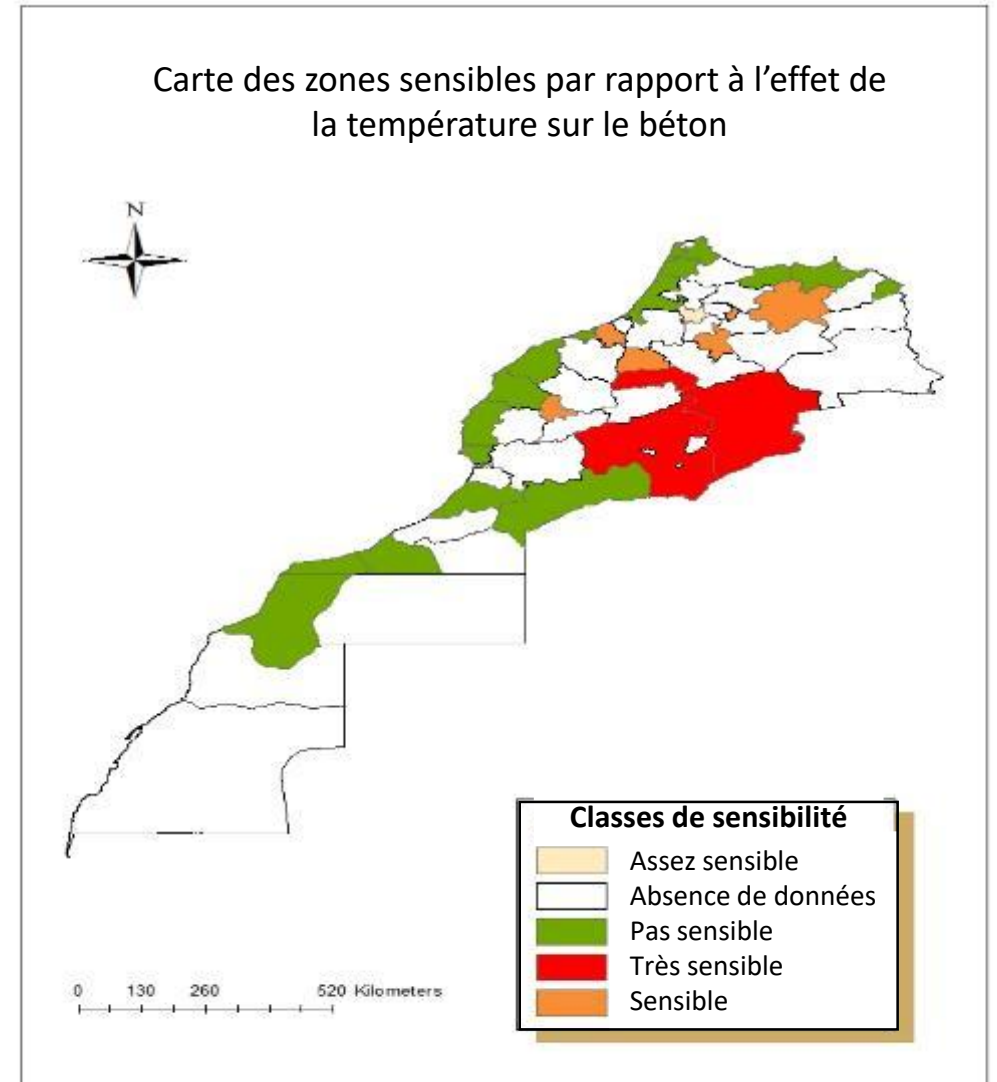
- La température prend des valeurs assez élevées (35 °C à 40 °C) : *
- Le gradient de température (entre jour et nuit) et entre les saisons est assez important (dépassant 15°C) : *
- La température prend des valeurs très faibles < à 5 ° C : *

***		Très sensible
**		Sensible
*		Assez sensible
		Pas sensible

Carte des températures extrêmes

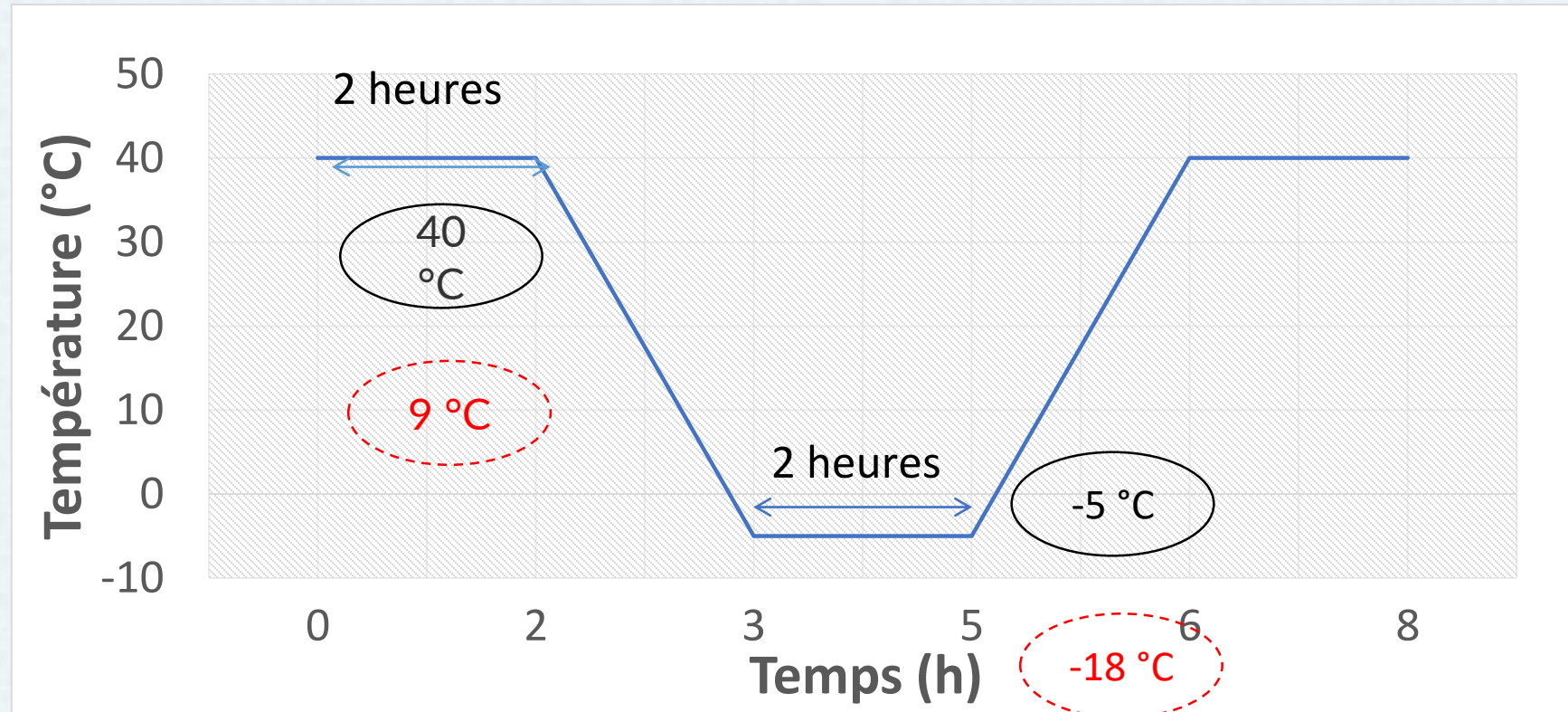
On trouve que les zones les plus sensibles se trouvent à l'intérieur du royaume (Ouarzazate, Errachidia, Marrakech, khouribga,)

Une carte similaire moyennant les données de modélisation climatique disponibles sur le site Global weather data for SWAT est en cours d'élaboration.



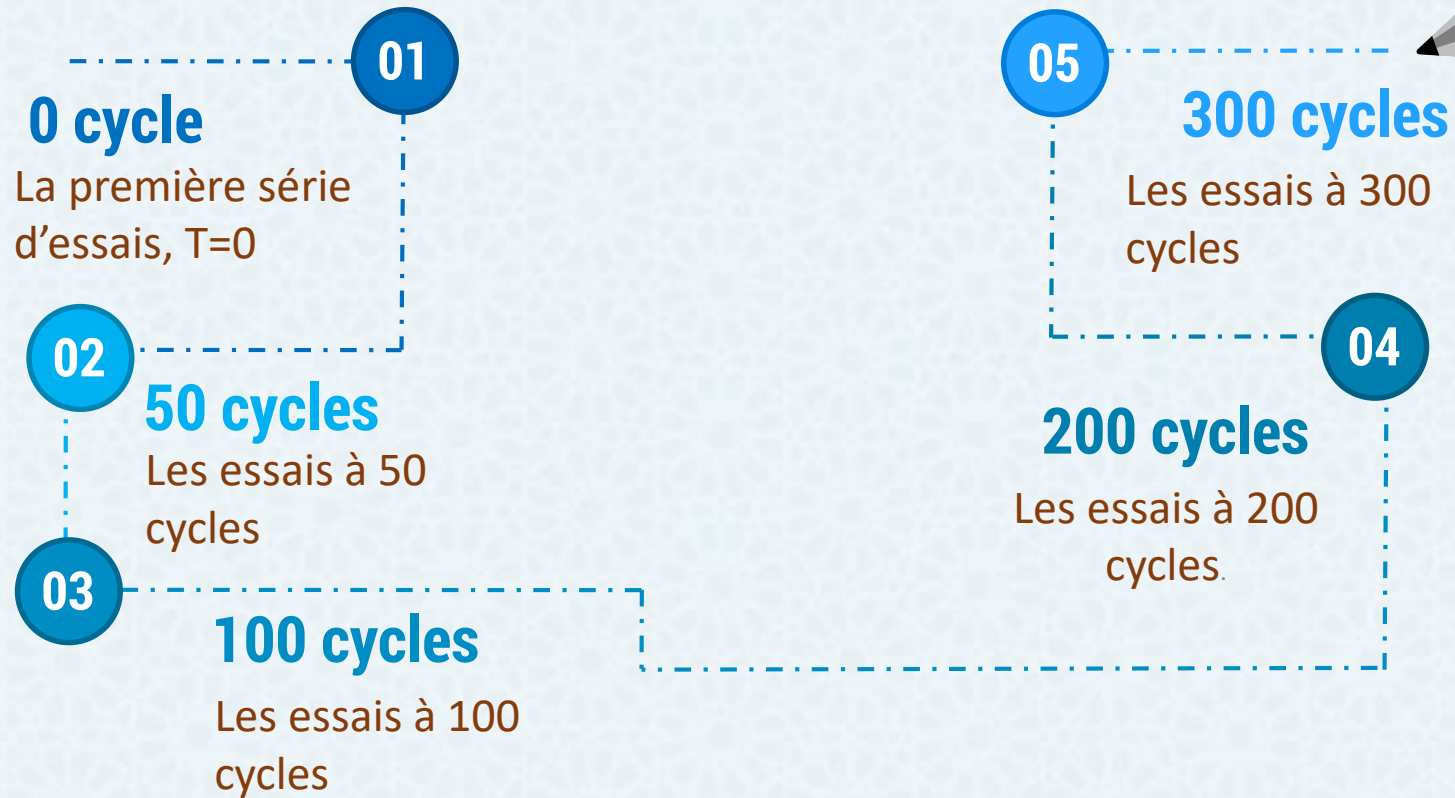
Protocole expérimental

- La définition des classes de sensibilité par rapport à l'effet de la température sur le béton nous a permis de définir un cycle de température adapté au contexte national tout en s'inspirant de la norme P 18_424 et P 18_425 sur l'essai de gel sur béton durci ;
- Faire subir à des éprouvettes de béton à des cycles de température répétitifs à l'aide d'une enceinte thermique ;
- Le cycle adopté est présenté comme suit :



Protocole expérimental

Chronologie des essais pour les éprouvettes ayant subi les cycles de température

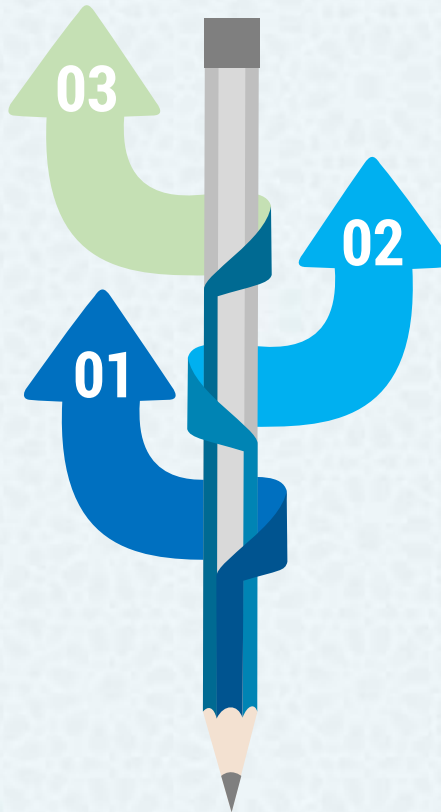


Objectifs du protocole expérimental

Interpréter l'évolution des différents indicateurs de durabilité

Faire subir des éprouvettes de béton des cycles de température

Evaluer l'effet des cycles de température sur les indicateurs de durabilité du béton



Démarche du protocole expérimental



```
graph LR; A[Formulation du béton] --> B[Confection des éprouvettes]; B --> C[Conservation des éprouvettes]; C --> D[Essais de durabilité]; D --> E[ ]; style E fill:none,stroke:none
```

Formulation du
béton

Confection des
éprouvettes

Conservation
des éprouvettes

Essais de
durabilité

Formulation d'un béton ordinaire B30

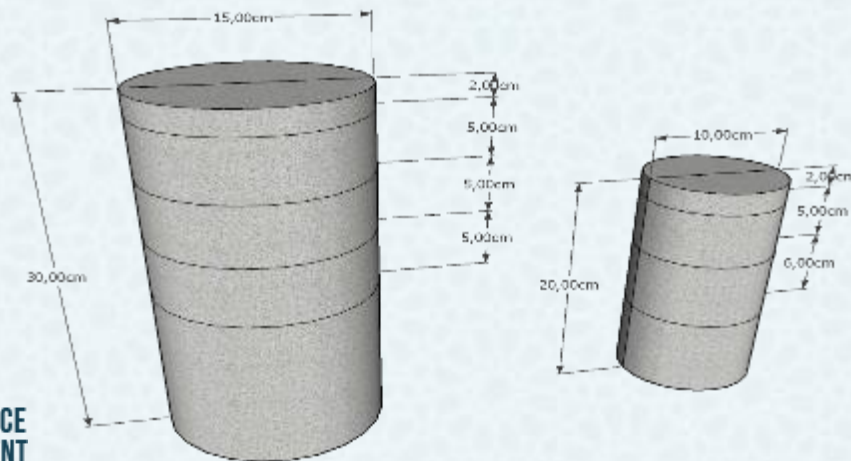
C'est le béton adoptée sur la plus parts des chantiers des projets d'ouvrages d'arts

Matériau	Dosage (kg/m ³)
G1	980
Sable dune	320
Sable concassé lavé	600
Ciment CPJ55	380
Eau	164
Adjuvant	5,7

Préparation des éprouvettes

Confection des éprouvettes :

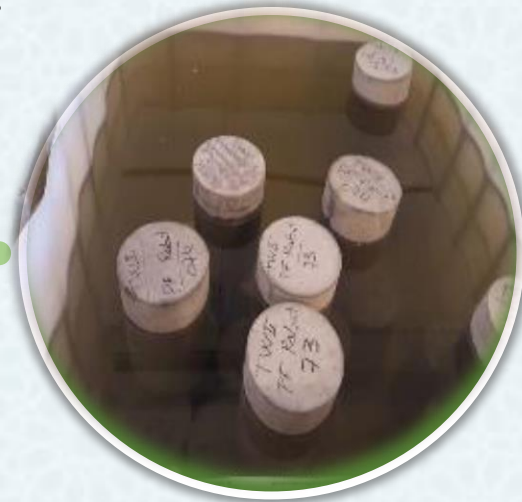
- 7 éprouvettes de 15*30, pour l'essai de la perméabilité au gaz ;
- 21 éprouvettes de 10*20, pour les autres essais à savoir l'essai de porosité accessible à l'eau, l'essai de la migration des ions chlorures et l'essai de la résistivité électrique ;
- 18 éprouvettes de 7*7*28, avec des plot de mesure, pour l'essai de la variation dimensionnelles et l'essais ultrasonique ;
- 19 éprouvettes de 7*7*28, sans plot de mesure, pour l'essai de la résistance à la compression.



Modes de conservation

Conservation des éprouvettes selon deux modes:

Eprouvettes
témoins



Conservation dans l'eau
à 20°C

Eprouvettes
subissant les
cycles



Conservation dans
l'enceinte thermique

Les essais réalisés

Les essais physico-mécaniques et de durabilités réalisés sont :

**La résistivité
électrique**

**La diffusion des
ions chlorures**

**La perméabilité
apparente aux
gaz**

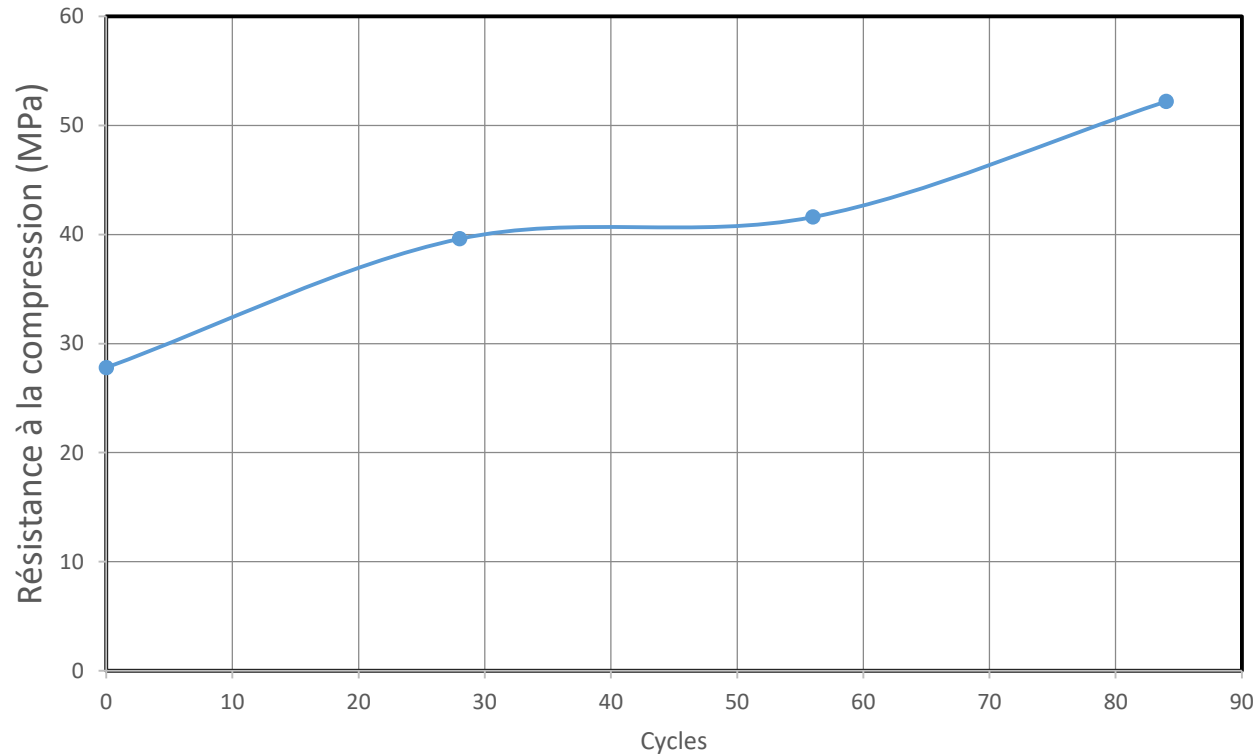
**La porosité
accessible à
l'eau**

**La variation
dimensionnelle**

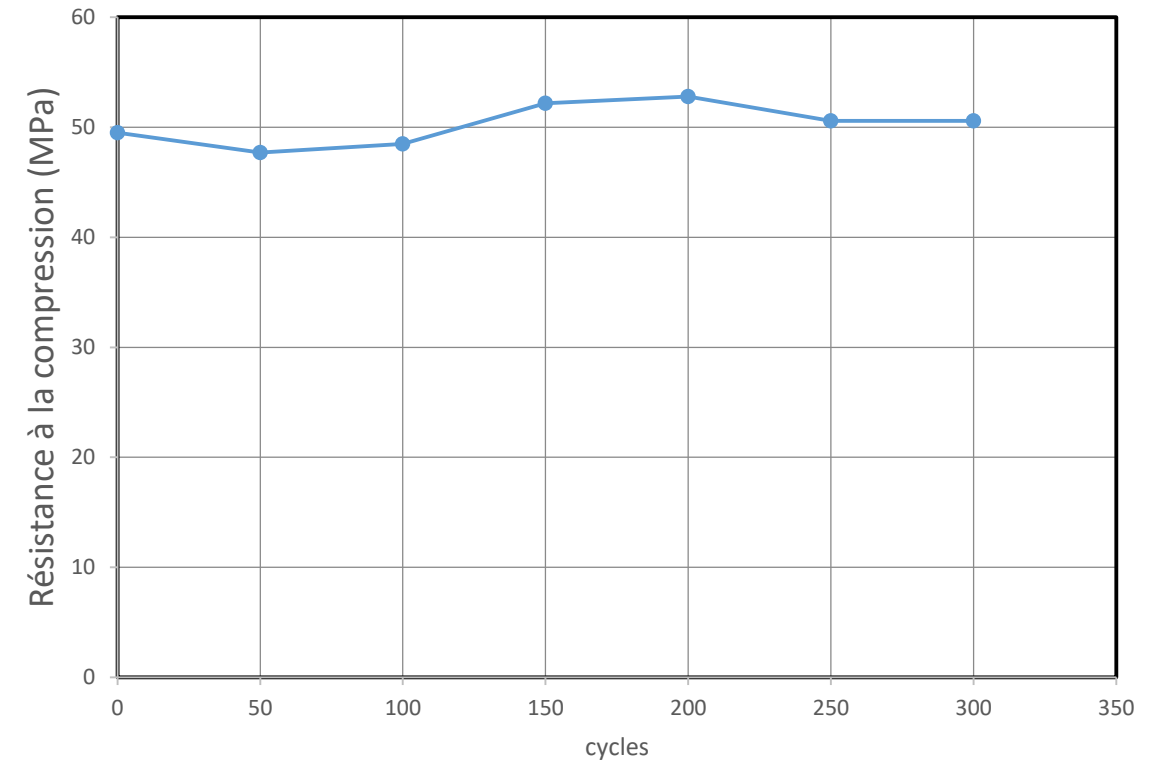
**La vitesse de
propagation du
son**

**La résistance à
la compression**

Résistance à la compression

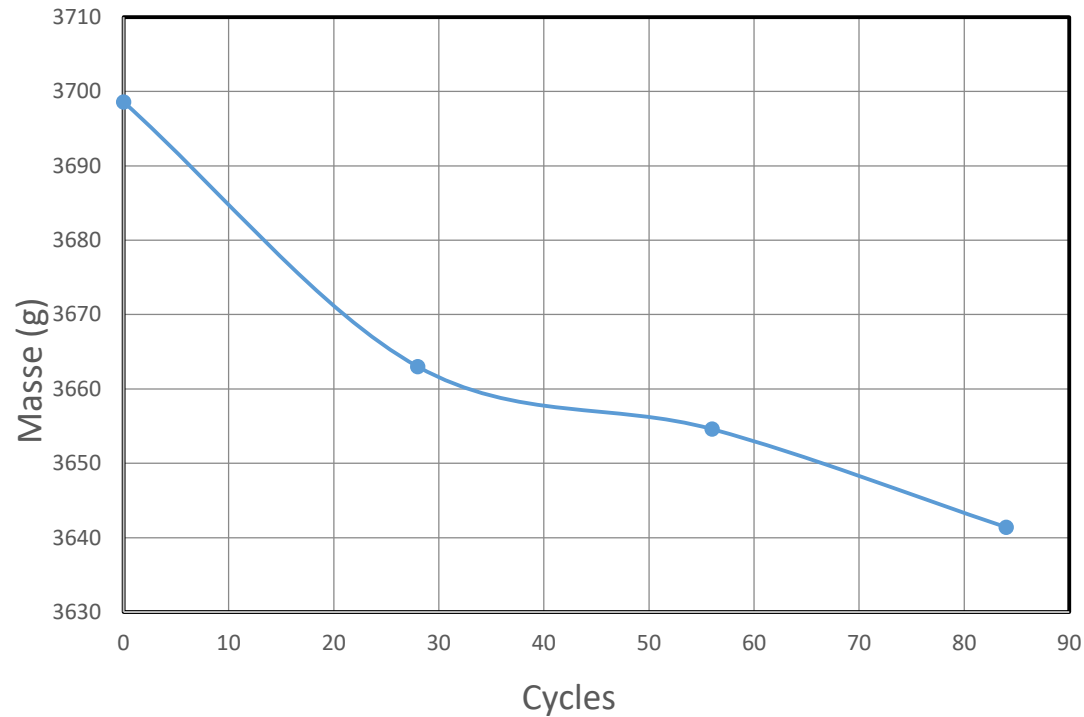


Cycles après 7j de cure de béton

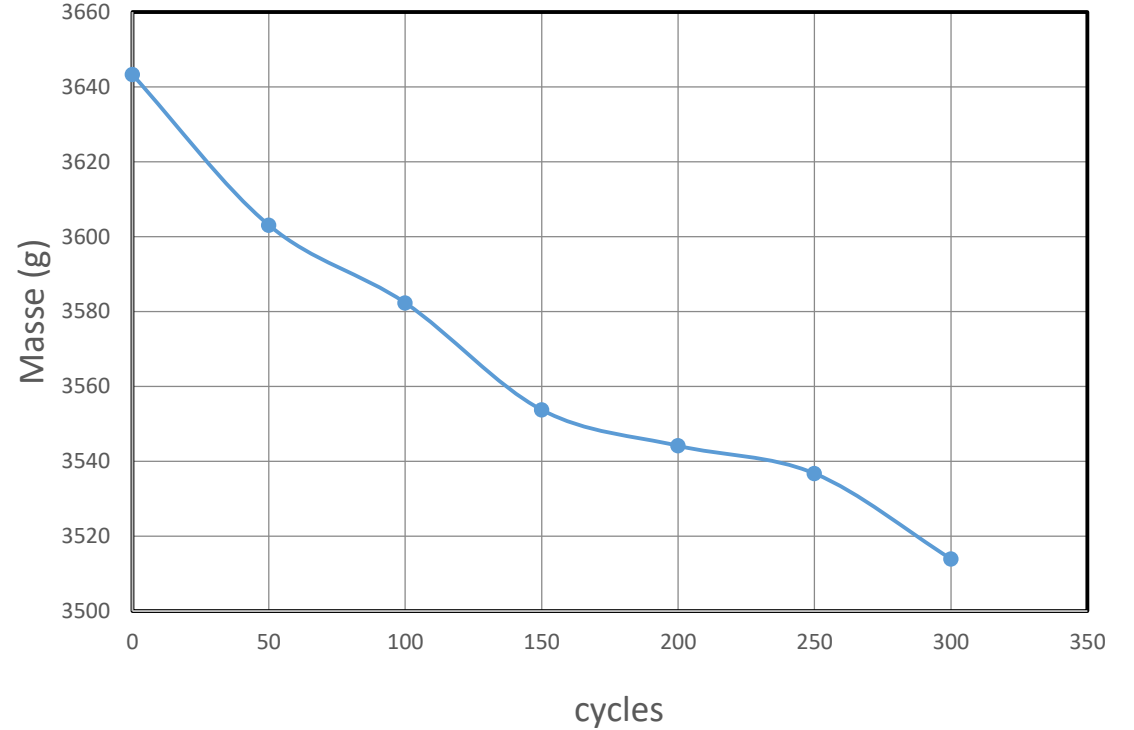


Cycles après 28 j de cure de béton

Variation de la masse

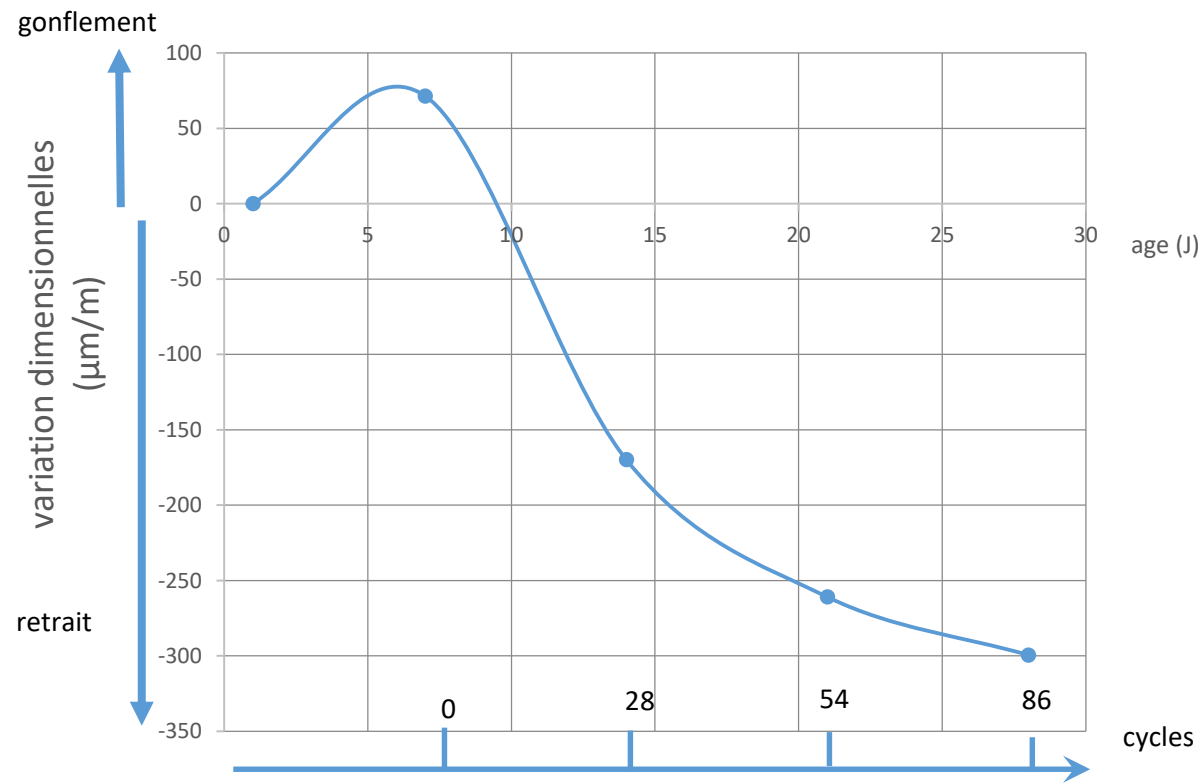


Cycles après 7 j de cure de béton

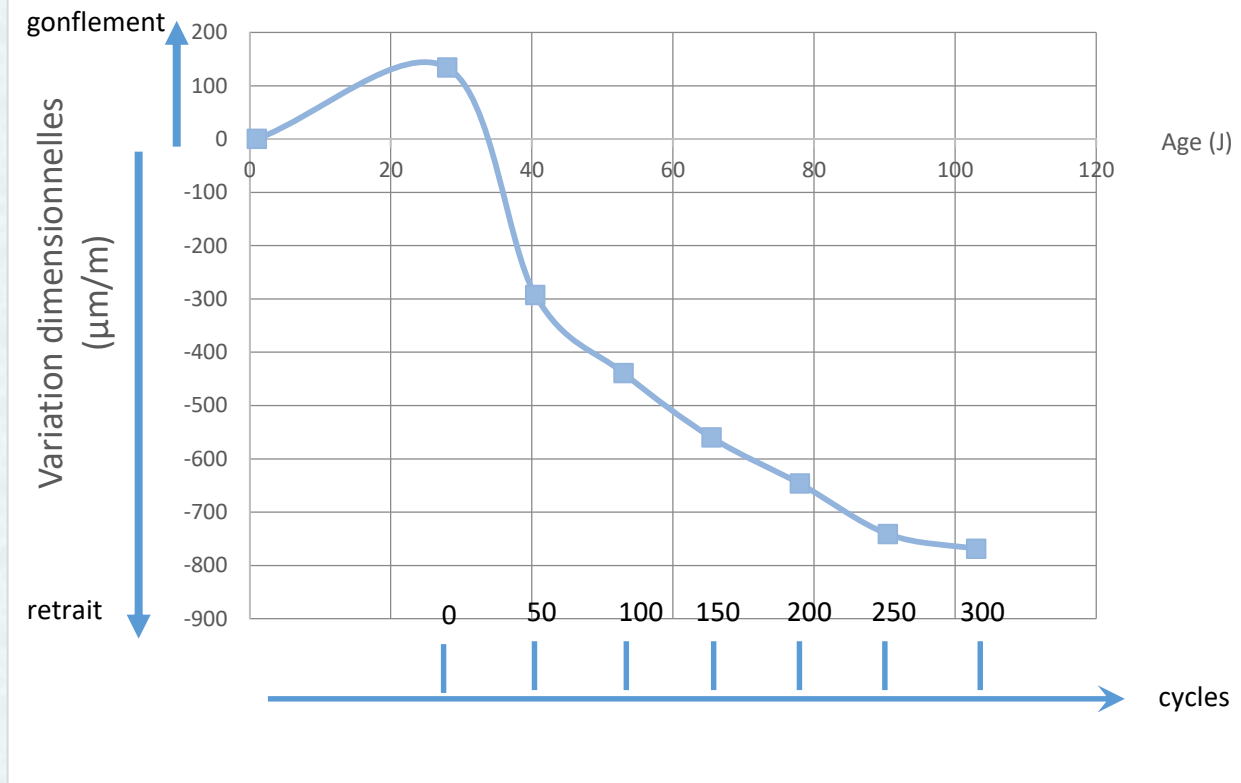


Cycles après 28 j de cure de béton

Variation dimensionnelle

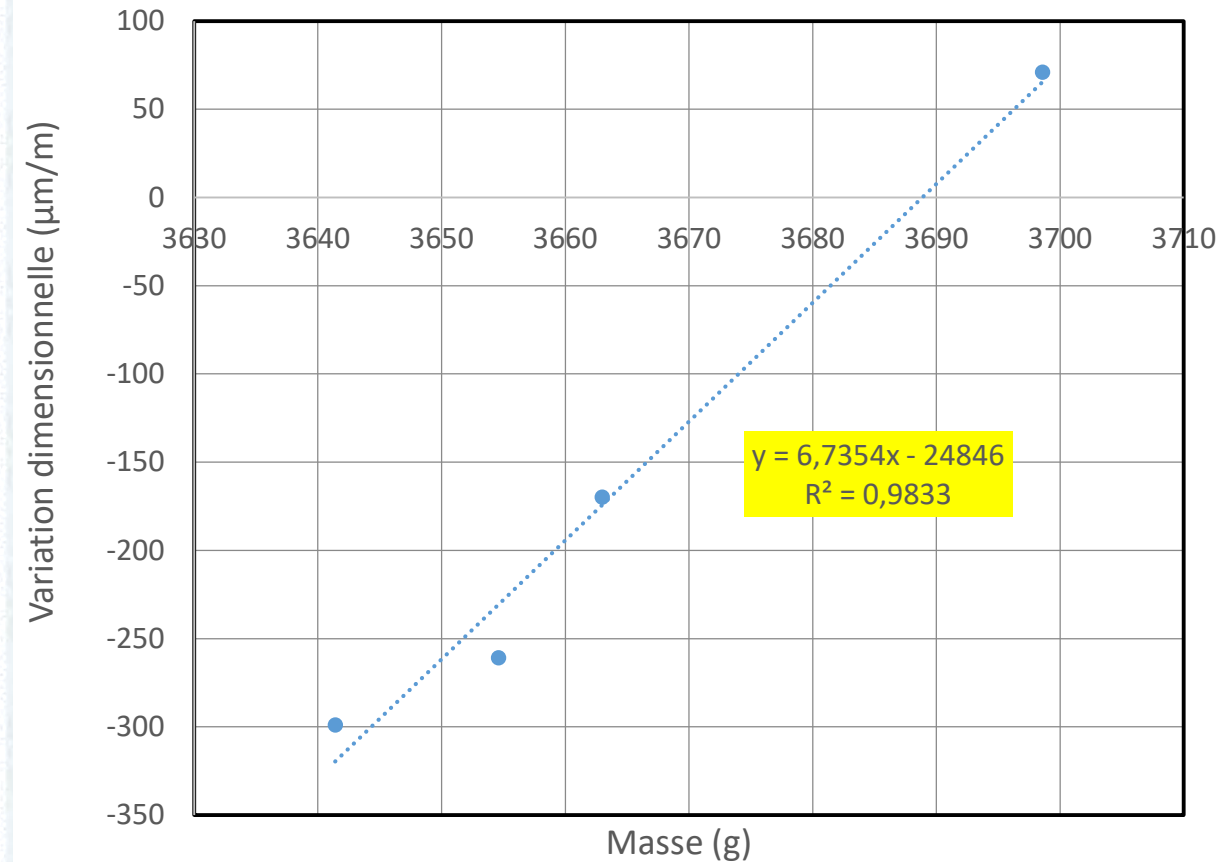


Cycles après 7 j de cure de béton

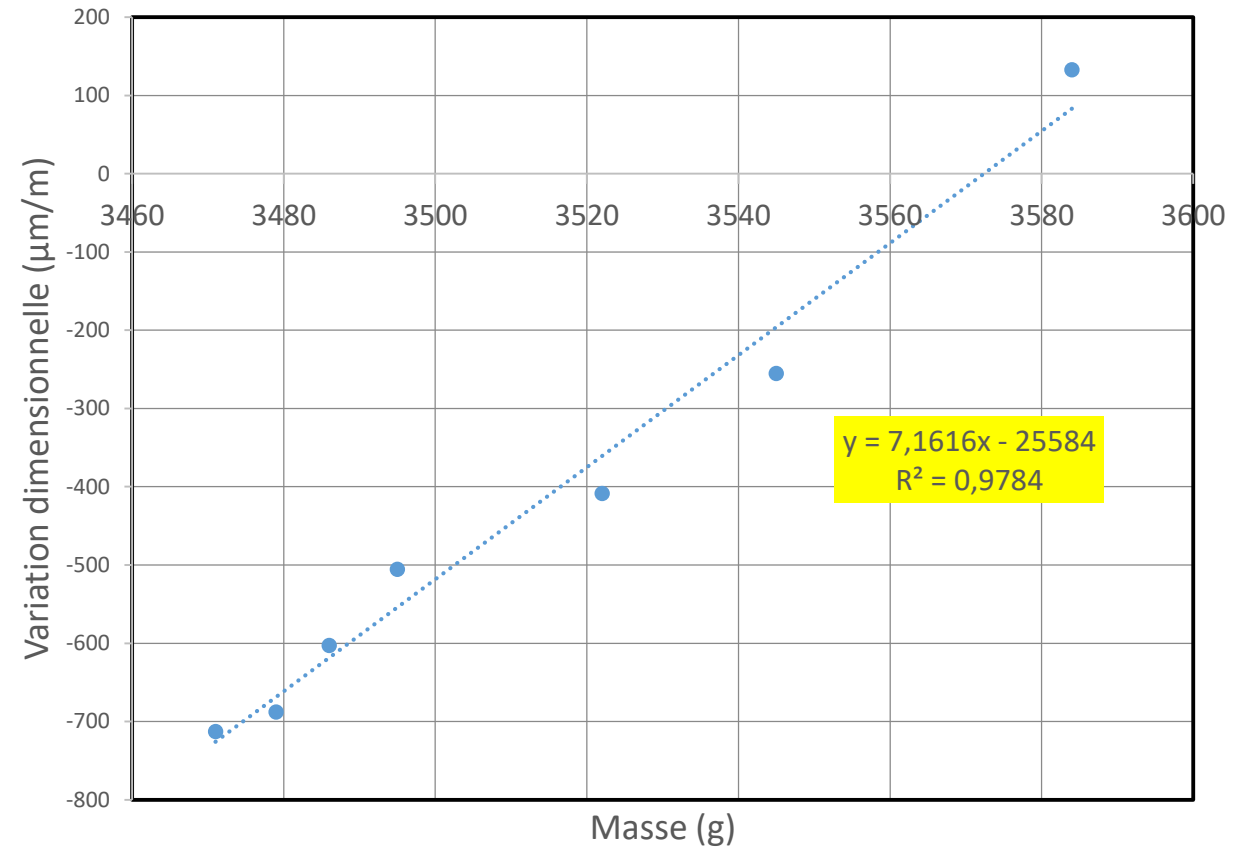


Cycles après 28 j de cure de béton

Corrélation entre la masse et la variation dimensionnelle



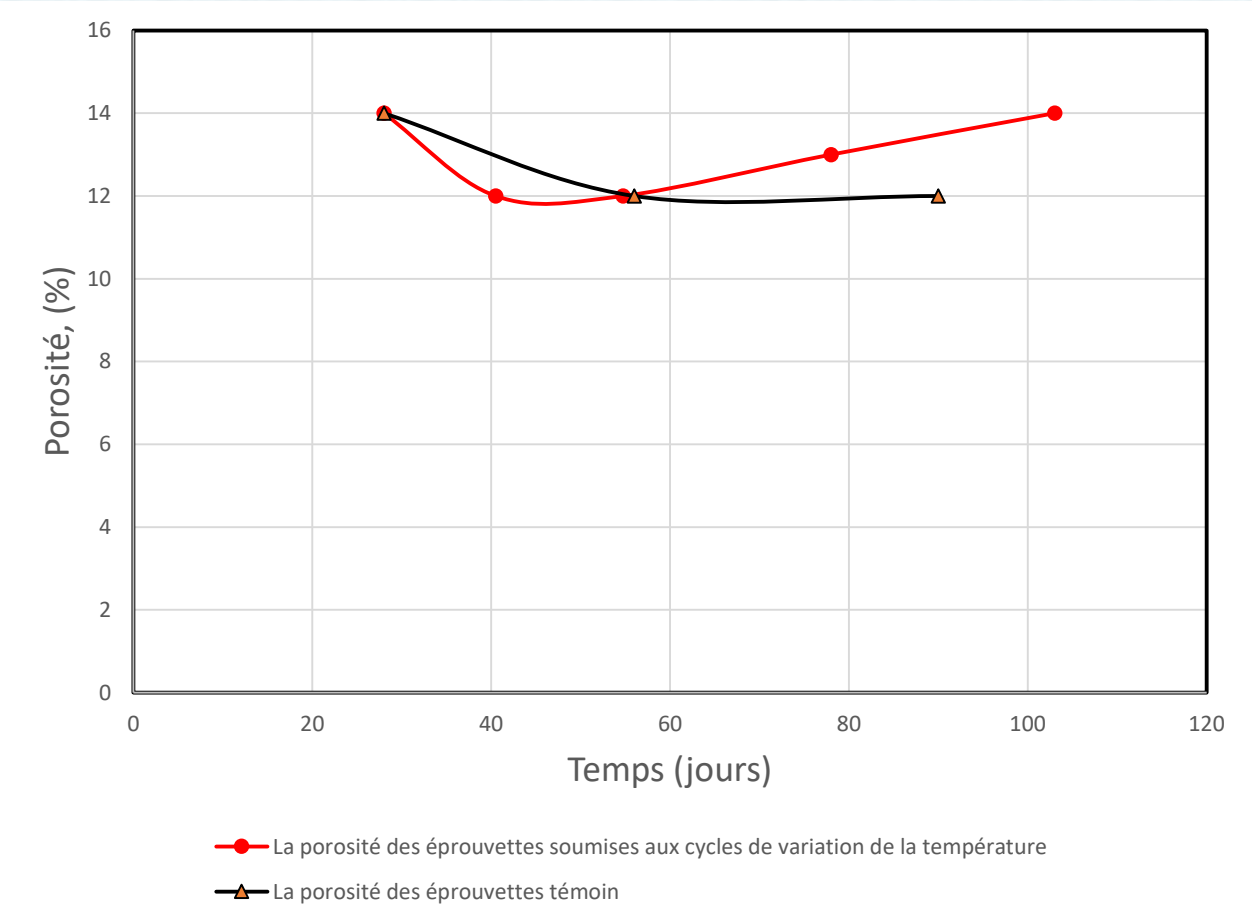
Cycles après 7 j de cure de béton



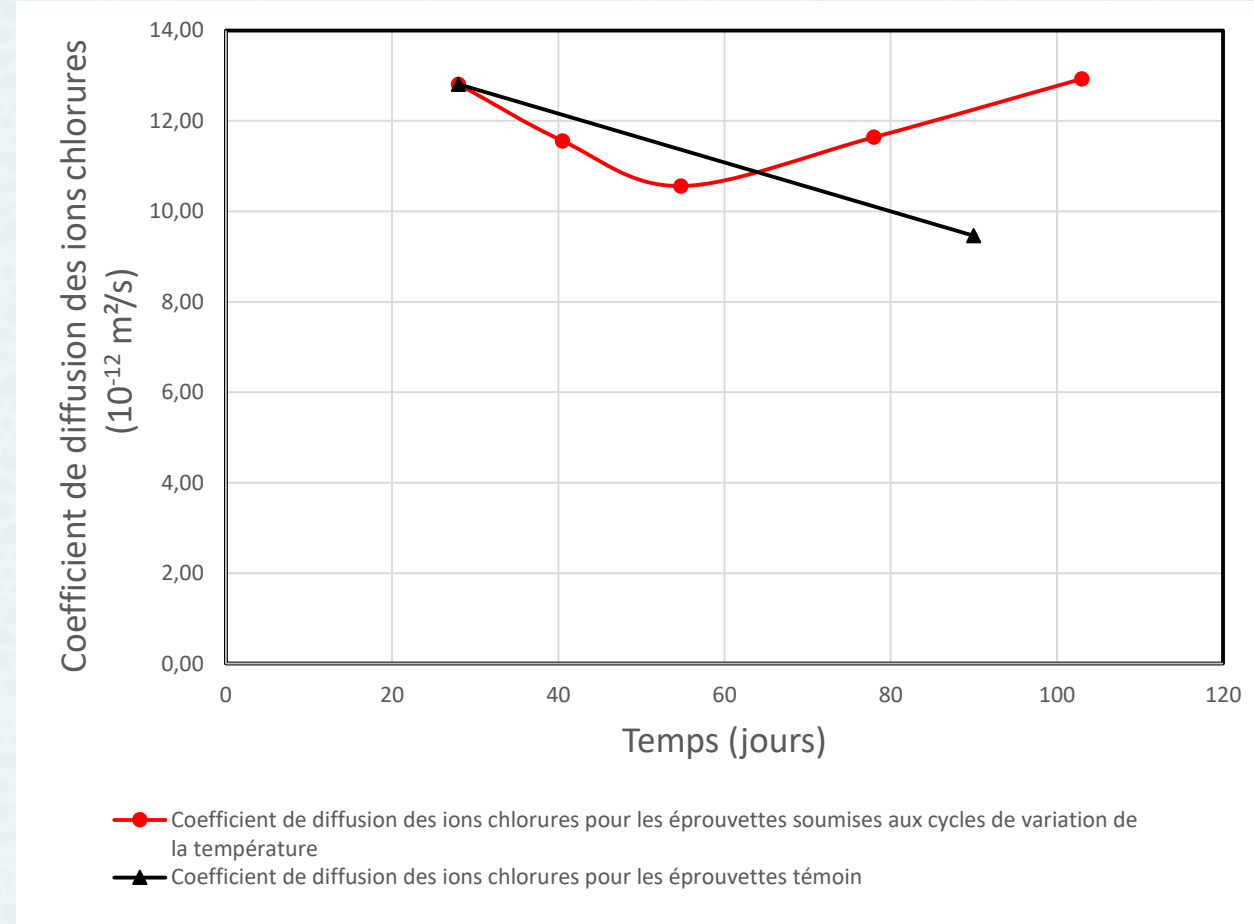
Cycles après 28 j de cure de béton

Résultats et discussions

Porosité

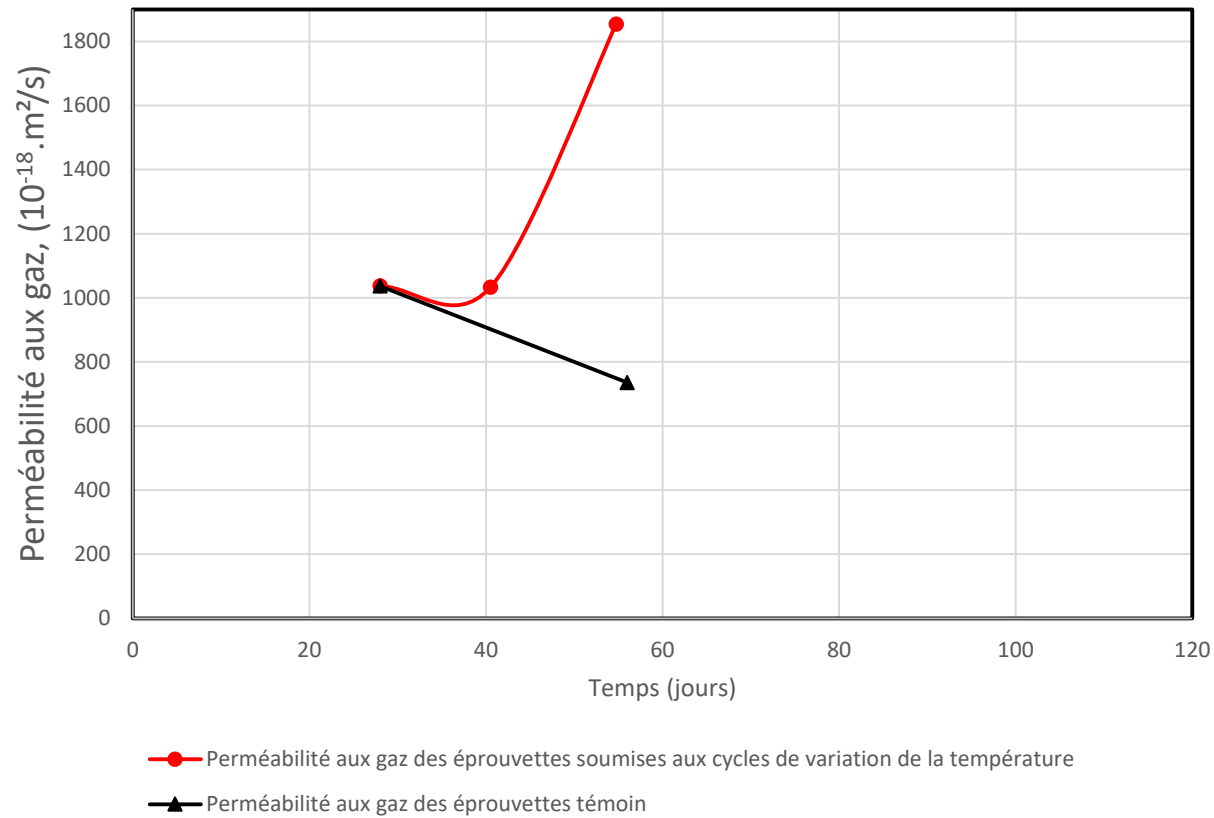


Coefficient de diffusion des chlorures

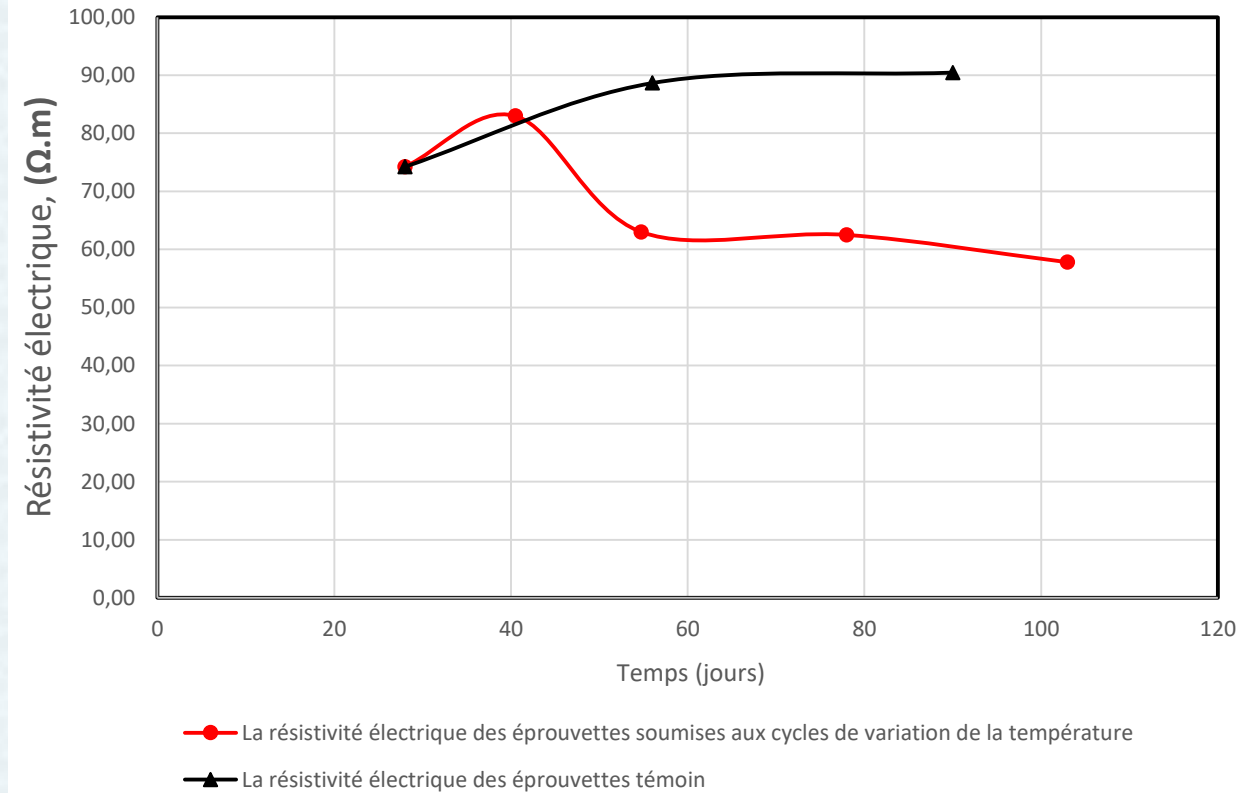


Résultats et discussions

Perméabilité au gaz



Résistivité



Conclusions

Malgré que le traitement des données n'est pas fini, les premières résultats convergent vers ce qui suit :

- ☐ Le Maroc ne dispose que d'un gel faible à modéré selon la classification française ;
- ☐ La carte de sensibilité thermique est plus adaptée aux conditions climatiques du Maroc ;
- ☐ L'essai de variation de température de – 5 à 40°C a montré une dégradation des critères de durabilité du béton testé.

Les perspectives de développement est de :

- ☐ Finaliser la carte de gel et la valider par les relevés des 26 stations de météo national ;
- ☐ Continuer les essais de sensibilité sur d'autres classes de bétons ;
- ☐ Proposer une carte de sensibilité thermique à partir des données du site Global Weather Data for SWAT et la valider par les relevés des 26 stations de météo national.

Merci pour votre attention