

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mustapha Stambouli de MASCARA



Faculté des Sciences et de la
Technologie



Département de Génie Civil

Laboratoire de Matériaux de construction

Laboratoire de chimie

.....||| *Polycopié* |||.....

MANUEL DE TRAVAUX PRATIQUES DE DURABILITE DES MATERIAUX

Destinés aux étudiants de 2ème année Master matériaux en génie civil

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie civil



Élaboré par : Dr. BENAOU M Fatima

Année Universitaire 2024-2025



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

DÉDICACES

En guise de reconnaissance, Je dédie humblement ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide, leur soutien ou leurs encouragements tout au long de ce parcours.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

CANEVAS DE TRAVAUX PRATIQUES DE DURABILITE DES MATERIAUX

Contenu de la matière :

TP 1 : Absorption par immersion et capillarité

TP 2 : Perméabilité du béton

TP 3 : Porosité de béton

TP 4 : Attaque du béton par les sulfates

TP 5 : Attaque du béton par les acides

TP 6 : Attaque par les ions de chlore



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Sommaire

Avant propose	08
Introduction générale	09
Présentation d'un rapport de travaux pratiques	10
I/ Essais physiques	13
1. Fiche d'évaluation de TP n°1 Essai d'absorption capillaire (sorptivité) du béton	14
1.1. Objectif du TP	14
1.2. Principe de l'essai	14
1.3. Matériel nécessaire	14
1.4. Préparation des échantillons	15
1.5. Procédure d'essai	15
1.6. Calculs	16
1.7. Résultats à noter	16
1.7.1 Tableau de mesure 1	16
1.8. Le travail demandé	17
1.9. Remarques	17
2. Compte rendu de TP N° 1 : Essais d'absorption capillaire (sorptivité)	18
2.1 Objectif du TP	18
2.2. Principe de l'essai	18
2.3 Protocole expérimental	19
2.4 Résultats expérimentaux	21
2.5 Analyse des résultats expérimentaux	22
3. Fiche TP N° 2 Perméabilité du béton	23
3.1 Objectif de l'essai	23
3.2. Principe de l'essai	23
3.3. Matériel utilisé	23
3.4 Appareil d'Essai	23
3.5. Mode opératoire	24
3.6 Résultats et Observations	25
3.7 Questions de calcul	25
3.8 Questions d'analyse critique	25
4. Compte rendu TP N° 2 Perméabilité du béton	26
4.1 But de manipulation	26
4.2. Principe de l'essai selon XP P18-463	26
4.2.1. Éprouvette	26
4.2.2. Mise en pression	26
4.2.3. Observation	26
4.2.4. Mesure	26
4.3. Intérêt pratique	26
4.4. Type des éprouvettes	27
4.5. Conditions de l'essai	27
4.6. Résultats expérimentaux	27



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

4.7. Analyse des résultats expérimentaux	29
4.8. Valeurs Usuelles de Référence (Profondeur max en mm selon qualité du béton)	29
4.9. Comparatif avec Autres Normes	30
4.10. Conseils Pratiques pour Améliorer la Perméabilité du Béton	30
5. Fiche d'évaluation TP N° 3 Mesure de la porosité d'un béton	31
5.1 Objectif du TP	31
5.2 Matériel nécessaire	31
5.2.1 Description de l'appareillage et des éprouvettes	31
5.3. Principe de la méthode	33
5.4. Protocole expérimental	33
5.5. Le travail demandé	34
5.6. Exploitation des résultats	34
5.7. Remarques et précautions	35
6. Compte Rendu de TP N°3 ; Mesure de la porosité d'un Béton	36
6.1. Objectif du TP	36
6.2 Matériel utilisé	36
6.3 Méthodologie	36
6.4 Résultats expérimentaux	37
6.5 Analyse des résultats	37
6.6 Conclusion	38
II/ Essais chimiques	39
1. Fiche d'évaluation de TP N° 4 Attaque de béton par les sulfates	40
1.1 Objectif du TP	40
1.2 Principe	40
1.3 Matériel utilisé	40
1.4 Échantillons	40
1.5 Protocole expérimental	41
1.5.1 Pesée initiale des éprouvettes	41
1.5.2 Immersion dans la solution sulfatée	41
1.5.3 Suivi régulier	41
1.5.4 Comparaison avec témoin	41
1.6 Exploitation des résultats	42
2 Compte Rendu de TP n°4 ; Attaque du Béton par les sulfates	42
2.1. Objectif du TP	43
2.2. Principe	43
2.3. Matériel utilisé	43
2.4. Procédure expérimentale	43
2.5. Résultats expérimentaux	44
2.6 Analyse des résultats expérimentaux	44
2.7. Conclusion	45
3. Fiche d'évaluation de TP n°5 Attaque du béton par les acides	46
3.1 Objectifs du TP	46
3.2 Matériel nécessaire	46
3.3 Mode opératoire	46



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

3.3.1 Préparation des éprouvettes	47
3.3.2 Préparations des solutions acides :	47
3.4 Résumé de protocole expérimental :	47
3.5 Réactions chimiques attendues	47
3.6 Calcul de la perte de masse	48
3.7 Résultats à noter	48
3.7.1 Tableau de mesure 1	50
3.7.2 Tableau de mesure 2	50
3.8 Le travail demandé	51
3.9 Sécurité	51
4 Compte rendu de TP n° 5 ;Attaque du béton par les acides	52
4.1. Objectif du TP	52
4.2. Protocole résumé	52
4.3. Observation	52
4.4 Analyse de résultats expérimentaux	53
4.4.1. Données générale	53
4.5 Commentaire des graphes	56
5. Fiche d'évaluation de TP N° 6 ; Attaque du béton par les chlorures	58
5.1 Objectifs	58
5.2 Matériel nécessaire	58
5.3. Protocole expérimental	59
5.3.1 Préparation des éprouvettes	59
5 3.2 Exposition aux chlorures	59
5.4. Phénomènes attendus	61
5.5. Résultats à noter	62
5.6 Analyse des résultats	62
5.7 Sécurité	62
6 .Compte rendu de TP N°6 Attaque du béton par les chlorures	63
6.1. Objectif du TP	63
6.2. Protocole résumé	63
6.3. Résultats expérimentaux	63
6.4 Analyse de résultats expérimentaux	65
6.5. Conclusion partielle	66
7. Conclusion général	67
8. Bibliographie et références	68
9. Annexes	69



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Liste d'abréviation

Abréviation	Terme / Définition
R_c	Résistance à la compression
D_{app}	Coefficient de diffusion apparent des chlorures
P_w	Porosité accessible à l'eau
$V_{béton}$	Volume de béton
V_{sol}	Volume de la solution (ex. : acide ou chlorures)
τ	Taux de saturation
HR	Humidité relative
M_{air}	Masse de l'éprouvette saturée pesée dans l'air
M_{eau}	Masse de l'éprouvette saturée pesée dans l'eau
M_{sec}	Masse sèche de l'éprouvette dans l'air
m_{init}	Masse initiale (béton sain)
m_{final}	Masse finale (béton dégradé)
d	Diamètre de la carotte
L	Longueur initiale de la carotte (mesurée à 0,1 mm)
L_0	Longueur initiale après immersion à 20 °C pendant 60 min
t_0	Instant initial de l'essai
m_{Ti}	Masse après séchage du i ^e cycle
m_{Si}	Masse après i ^e cycle de séchage/immersion
L_i	Longueur après i ^e cycle de séchage/immersion
m_{Sj}	Masse à la j ^e mesure après immersion permanente
L_j	Longueur à la j ^e mesure après immersion
V_0	Volume initial de la carotte
d_{Ln}	Variation de longueur à l'échéance n
d_{Msn}	Variation de masse à l'échéance n
d_{ms}	Variation de masse finale $(m_{s12} - m_{s4}) / V_0$
NaCl	Chlorure de sodium
HCl	Acide chlorhydrique
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
CH ₃ COOH	Acide acétique (vinaigre)



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

SO ₄ ²⁻	Ion sulfate
Cl ⁻	Ion chlorure
E/C	Eau / Ciment.
G/S	Rapport Gravillon par sable
CSH	Silicate de calcium hydrate
CH = (Ca(OH) ₂)	Hydroxyde de calcium (Ca(OH) ₂)
E/C	Eau/Ciment
μS/cm	microsiemens par centimètre
UV	ultraviolet/visible
TP	Travaux Pratiques
XP P18-458	Recommandation expérimentale pour l'attaque acide du béton
EN 12390-11	Norme pour la pénétration des chlorures dans le béton
ASTM C 267 (2001).	Méthodes d'essai standard pour la résistance chimique des mortiers, coulis et revêtements monolithiques
EN 206	Norme pour le béton ; Spécification et performance.
NF EN 206/CN	Norme française qui régit la formulation, la production et la mise en œuvre du béton.
XP P18-463	Norme expérimentale française, relevant du béton et traitant de l'essai de perméabilité à l'eau sous pression.
NF EN 772-21]	Méthodes d'essai pour les éléments de maçonnerie /Partie 21 ; Détermination de la perméabilité à l'eau des produits en maçonnerie
NF P18-429 / XP P18-590	Utilisées dans le domaine des matériaux cimentaires, en particulier le béton - Mesure de la porosité ouverte et de la masse volumique apparente.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Avant propose

La durabilité des matériaux de construction est un enjeu majeur dans le domaine du génie civil, notamment dans un contexte où les infrastructures sont soumises à des conditions environnementales de plus en plus agressives. Comprendre et évaluer la résistance des matériaux à ces agressions est essentiel pour assurer la longévité, la sécurité et la performance des ouvrages.

Les Travaux Pratiques réalisés dans le cadre de cette unité portent sur l'étude de plusieurs essais de caractérisation de la durabilité des matériaux cimentaires, en particulier le béton. Ces essais incluent :

- La perméabilité à l'eau.
- L'absorption d'eau par immersion ou capillarité,
- La porosité ouverte,
- L'attaque chimique (acide)
- L'attaque par sulfates
- L'attaque par les chlorures.

Ces essais ont pour objectif d'évaluer la capacité du matériau à résister à la pénétration de fluides et d'agents agressifs, ce qui est directement lié à son état de compacité, sa microstructure et sa formulation initiale.

La mise en œuvre de ces protocoles expérimentaux nous a permis d'acquérir une meilleure compréhension des paramètres influençant la durabilité des bétons, et de manipuler différents équipements normalisés. Elle constitue une étape essentielle dans la formation de futurs ingénieurs ou techniciens appelés à concevoir, contrôler et réhabiliter des ouvrages durables.



Introduction générale

La construction est l'une des plus anciennes préoccupations de l'humanité. Depuis les premières civilisations jusqu'à nos jours, elle occupe une place centrale dans le développement des sociétés. Aujourd'hui encore, le secteur du bâtiment et des travaux publics connaît un essor considérable dans la majorité des pays.

Cependant, si l'acte de construire est fondamental, la durabilité des ouvrages demeure une exigence cruciale dans la conception, la réalisation et l'entretien des infrastructures. En effet, les structures en béton, en béton armé ou en bois sont conçues pour résister au temps, aux charges et aux agressions de leur environnement. C'est pourquoi la durabilité est considérée comme une propriété essentielle des matériaux de construction tels que le béton, l'acier ou le bois, déterminant la longévité en service des ouvrages.

Traditionnellement, la capacité du béton à résister aux agressions était évaluée essentiellement à travers sa résistance à la compression. Or, bien que cette propriété soit importante, elle ne suffit pas à garantir la durabilité. D'autres caractéristiques telles que la porosité, la perméabilité et la diffusivité jouent un rôle clé dans la résistance du béton aux agents agressifs (acides, chlorures, sulfates, etc.), car elles conditionnent son aptitude à limiter leur intrusion.

Dans ce contexte, les différents TP réalisés portant sur l'attaque acide, les sulfates, l'eau de mer, la carbonatation, la pénétration des ions chlorure, la corrosion des armatures, ainsi que les mesures de perméabilité et d'absorption ont permis d'approfondir la compréhension des mécanismes de dégradation des matériaux cimentaires. Ils mettent en évidence l'impact de l'environnement sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.

À travers ce travail, nous avons ainsi tenté d'appréhender de manière globale le concept de durée de vie des matériaux de construction, en abordant les facteurs de dégradation les plus courants. Ce rapport vise ainsi à apporter, modestement, une contribution à l'introduction de cette problématique essentielle auprès des futurs ingénieurs et professionnels du génie civil.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

PRÉSENTATION D'UN RAPPORT DE TRAVAUX PRATIQUES

Le compte rendu de chaque T.P devra comporter les parties suivantes :

1. Un sommaire
2. Une description succincte du matériel et des matériaux utilisés.
3. Le mode opératoire des essais.
4. Fiche technique détaillée des résultats.
5. Les problèmes rencontrés et les observations constatées durant les essais.
6. L'exploitation des mesures (tableaux de résultats, détails de calculs et courbes avec échelle adaptée (*l'utilisation d'un tableur est conseillée*)).
7. Analyse des résultats, commentaires et conclusion.

REMARQUE :

Le système utilisé dans ce polycopié est le système CGS (Centimètre, Gramme, Seconde)

NOTA :

Il est demandé à chaque groupe de nettoyer le matériel d'essai et l'espace du travail à la fin de chaque manipulation



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

La sécurité dans un laboratoire de chimie

La chimie est une discipline fascinante qui nous permet d'explorer la composition et les transformations de la matière.

Cependant, elle comporte également des risques potentiels, notamment l'exposition à des produits chimiques dangereux, des réactions exothermiques et des équipements sophistiqués.

Afin de garantir la sécurité de tous dans le laboratoire, il est essentiel de respecter certaines consignes de sécurité.

Ces mesures préventives sont mises en place pour minimiser les accidents et créer un environnement de travail sûr et efficace.

Dans ce contexte, il est crucial de connaître et d'appliquer ces règles pour protéger non seulement sa propre sécurité, mais aussi celle de ses collègues. Et donc il est indispensable de suivre les consignes suivantes

I. Ce qui doit être utilisé :

1. Porter des lunettes de sécurité pour protéger les yeux des projections chimiques.
2. Utiliser des gants en nitrile ou en latex pour protéger les mains lors de la manipulation de produits dangereux.
3. Mettre une blouse de laboratoire en tissu résistant (100% coton) pour éviter les éclaboussures sur les vêtements.
4. Consulter les fiches de données de sécurité (FDS) pour connaître les risques des produits chimiques utilisés.
5. Utiliser des pipettes, béchers et flacons appropriés pour éviter les déversements accidentels.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

6. S'assurer que les douches de sécurité et les lave-yeux sont accessibles en cas de contact avec des produits chimiques.
7. Utiliser des extincteurs appropriés pour lutter contre les incendies.
8. Étiqueter tous les récipients contenant des produits chimiques avec leur nom et leurs dangers.
9. Les étudiants doivent toujours manipuler debout.

II. Ce qui doit être évité :

1. Ne pas manger ni boire dans le laboratoire pour éviter toute contamination.
2. Ne pas manipuler des produits chimiques sans les protections appropriées pour éviter les blessures.
3. Le pipetage à la bouche est interdit. Utiliser les pro-pipettes.
4. Éviter de stocker des produits chimiques non étiquetés pour prévenir les confusions.
5. Éviter de mélanger des produits chimiques sans savoir s'ils sont compatibles pour prévenir les réactions dangereuses.
6. Ne pas effectuer de manipulations dans un espace encombré pour réduire le risque d'accidents.
7. Éviter de courir ou de se précipiter dans le laboratoire pour prévenir les chutes et les collisions.
8. Ne pas respirer le contenu d'un récipient pour l'identifier à son odeur. Reboucher tout flacon immédiatement après usage.

III. Les pictogrammes de sécurité

Les pictogrammes de sécurité sont des symboles visuels normalisés et universels qui servent à signaler rapidement et efficacement les dangers liés à une substance chimique. Ils aident à reconnaître les risques potentiels et à appliquer les mesures de sécurité appropriées, en conformité avec la réglementation en vigueur.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

I/ Essais physiques



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

1.Fiche d'évaluation des Travaux Pratiques de TP n°1 Essai d'absorption capillaire (sorptivité) du béton [Norme NF EN 13057]

1.1. Objectif du TP

Déterminer la sorptivité du béton, c'est-à-dire sa capacité à absorber l'eau par capillarité, afin d'évaluer sa porosité capillaire et, indirectement, sa durabilité face aux agents agressifs.

1.2. Principe de l'essai

Un échantillon de béton, préalablement séché, est placé en contact avec de l'eau sur une surface donnée (généralement la base cylindrique). On mesure la prise de masse au cours du temps. L'évolution de cette masse permet de calculer la sorptivité.

1.3. Matériel nécessaire

- Échantillons de béton (généralement cylindres ou cubes)
- Balance de précision ($\pm 0,01$ g)
- Chronomètre
- Récipient avec de l'eau (profondeur contrôlée)
- Papier absorbant
- Règle ou pied à coulisse
- Chambre de séchage (étuve)



Master II MGC

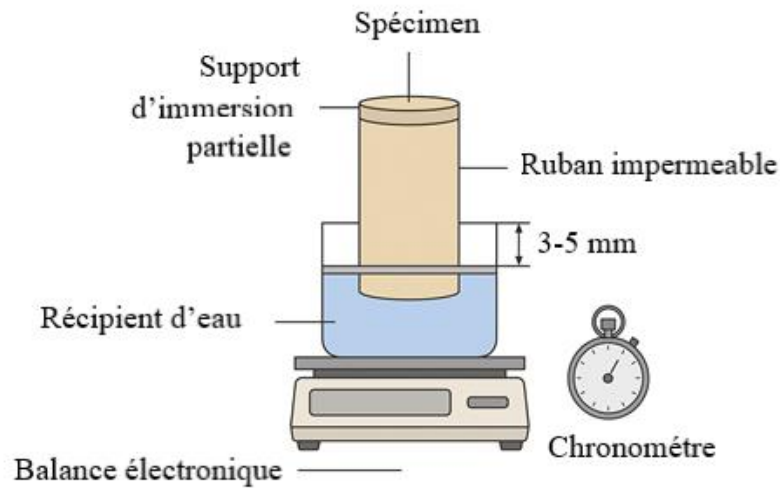
Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Figure 1.1 Dispositif expérimental pour mesurer l'absorption d'eau par immersion partielle.

[Norme NF EN 13057]

1.4. Preparation des échantillons

- Sécher les échantillons à 105°C pendant 24 à 72 h jusqu'à masse constante.
- Refroidir à température ambiante dans un dessiccateur.
- Étanchéifier les faces latérales et supérieures (avec cire ou ruban imperméable), ne laisser qu'une seule face exposée à l'eau.
- Noter la surface d'absorption S (cm²).

1.5. Procédure d'essai

- Remplir un récipient avec de l'eau à température ambiante.
- Immerger la face inférieure de l'échantillon sur une profondeur de 3 à 5 mm.
- Lancer le chronomètre.
- À des intervalles de temps réguliers (ex. : 1 min, 2 min, 4 min, 9 min, 16 min, 25 min, etc), retirer brièvement l'échantillon, éponger rapidement la surface, peser et remettre immédiatement dans l'eau.
- Répéter jusqu'à 60 minutes ou plus, selon les normes.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**1.6. Calculs**

$M_{ech}(g)$: masse d'échantillon Masse d'eau absorbée :

$$\Delta m(t) = m(t) - m_0 \text{ (en grammes)}$$

$$M_{eau}(t) = A_c \cdot S t^{\frac{1}{2}}$$

Où: M_{eau} : masse d'eau adsorbée,

A_c : coefficient d'adsorption en $[g/cm^2 \cdot s^{1/2}]$,

S : section en contact avec l'eau.

t : le temps écoulé (min)

Le coefficient d'adsorption d'eau par capillarité w est calculé d'après l'eau adsorbée entre 1 et 48 heures, sur la base d'une régression linéaire (tableau au-dessous).

1.7 Résultats à noter**1.7.1 Tableau de mesure 1 :**

T(min)	Echantillon1			Echantillon2			Echantillon3		
	$M_{ech}(g)$	$m_{eau}(g)$	A_c $[g/cm^2 \cdot s^{1/2}]$	$M_{ech}(g)$	m_{eau}	A_c $[g/cm^2 \cdot s^{1/2}]$	$M_{ech}(g)$	m_{eau}	A_c $[g/m^2 \cdot s^{1/2}]$
0	129(initial)	0	0	128(initial)	0	0	135(initial)	0	0
5									
15									
30									
60									
120									
240									
450									
1440									
2880									



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

1.8. Le travail demandé :

- Calculer le coefficient d'adsorption mesuré pour les recettes de mortier en fonction de temps ?
- Tracer le graphe de variation d'adsorption du mortier en fonction de temps (durée \sqrt{t}) pour les différents mortiers ?
- Comparer les résultats des différents mortiers ?
- Interpréter les résultats (faible, moyenne ou forte absorption) ?

1.9. Remarques

- L'essai est sensible à la température, à l'humidité ambiante et à la préparation des échantillons.
- Un béton à faible sorptivité est généralement plus durable.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

2. Compte rendu de TP N° 1 Essais d'absorption capillaire (sorptivité)

2.1 Objectif du TP

Ce travail pratique vise à évaluer la sorptivité d'un matériau cimentaire, en quantifiant l'absorption capillaire d'eau. Ce paramètre traduit la facilité avec laquelle l'eau migre à travers le réseau de pores du matériau. Une sorptivité élevée révèle une porosité capillaire importante, facteur de vulnérabilité face à la carbonatation, à la corrosion des armatures ou à certaines agressions chimiques. Cet essai est couramment utilisé pour comparer des formulations de béton intégrant différents liants, adjuvants ou additions (fumée de silice, cendres volantes, etc.). Il constitue un indicateur de durabilité indispensable dans le cadre du contrôle qualité des bétons, tant en laboratoire que sur chantier

2.2 Principe de l'essai

L'essai d'absorption capillaire consiste à mettre en contact la base d'une éprouvette sèche avec de l'eau et à mesurer l'augmentation de sa masse à différents intervalles de temps. L'eau est absorbée par capillarité, et la masse absorbée est directement liée à la sorptivité du matériau.

Formule utilisée pour la sorptivité : A_c

$$M_{eau}(t) = A_c \cdot S t^{\frac{1}{2}}$$

$M_{ech}(g)$: masse d'échantillon Masse d'eau absorbée :

$$\Delta m(t) = m(t) - m_0 \text{ (en grammes)}$$

Où:

M_{eau} : masse d'eau adsorbée,

A_c : coefficient d'adsorption en $[g/cm^2 \cdot s^{1/2}]$,



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

S : section en contact avec l'eau.

t : le temps écoulé (min)

Le coefficient d'adsorption d'eau par capillarité w est calculé d'après l'eau adsorbée entre 1 et 48 heures, sur la base d'une régression linéaire (tableau 2.1).

2.3 Protocole expérimental

- Séchage préalable des éprouvettes à température constante.
- Pesée initiale de chaque éprouvette.
- Mise en contact de la base des éprouvettes avec une hauteur d'eau contrôlée (3-5 mm).
- Pesées successives à différents temps (1, 2, 4, 8, 16, 32 min).
- Calcul de la masse d'eau absorbée à chaque étape.
- Tracé de la courbe : coefficient d'adsorption (Ac) [$\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$], en fonction de temps(s).



Figure 2.1 Séchage des éprouvettes en étuve à 105 °C avant l'essai d'absorption capillaire.
[Labo de G.C.UNIV. MASCARA]



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Figure 2.2 Méthodologie d'immersion des éprouvettes en mortier. [Labo de G.C.UNIV. MASCARA]

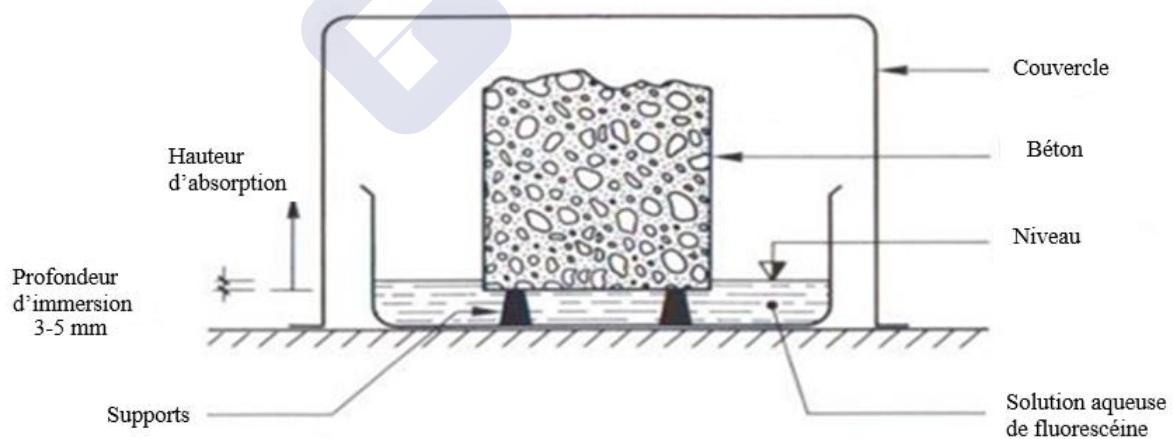


Figure 2.3 Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire des éprouvettes. [Norme NF EN 13057]



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

2.4 Résultats expérimentaux

Les mesures ont été faites sur une période de 24H.

Tableau 2.1 Mesure d'absorption d'eau par capillarite.

T(min)	Echantillon1			Echantillon2			Echantillon3		
	M _{ech} (g)	m _{eau} (g)	Ac [g/cm ² . s ^{1/2}]	M _{ech} (g)	m _{eau}	Ac [g/cm ² . s ^{1/2}]	M _{ech} (g)	m _{eau}	Ac [g/m ² . s ^{1/2}]
0	129	0	0	128	0	0	135	0	0
5	129.3	0.3	10	129	1	36.10	136	1	36.10
15	129.9	0.9	60	129.5	1.5	31.25	137	2	41.66
30	131	2	40	131	3	44.24	139	4	58.99
60	132	3	42.8	133	5	52.08	141	6	62.5
120	136	7	51.85	134	6	44.44	144	9	66.66
240	137	8	40.40	135	7	36.45	146	10	52.08
450	137	8	30.53	136	8	30.76	148	13	50
1440	138	9	19.14	136	8	17.02	148	13	27.65
2880	139	10	15.15	136	8	12.12	148	13	19.69

Exemple de calcul d'Ac ;

$$Ac = \frac{m_{eau}}{s\sqrt{t}} = \frac{0.3}{0.0016\sqrt{300}} = 10 \text{ [g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}\text{]}$$

D'où

$$t = 5 \times 60 = 300s$$

Graphe obtenu :

Voici la courbe représentant la variation d'adsorption du mortier en fonction de temps (durée \sqrt{t}) pour les différents mortiers.

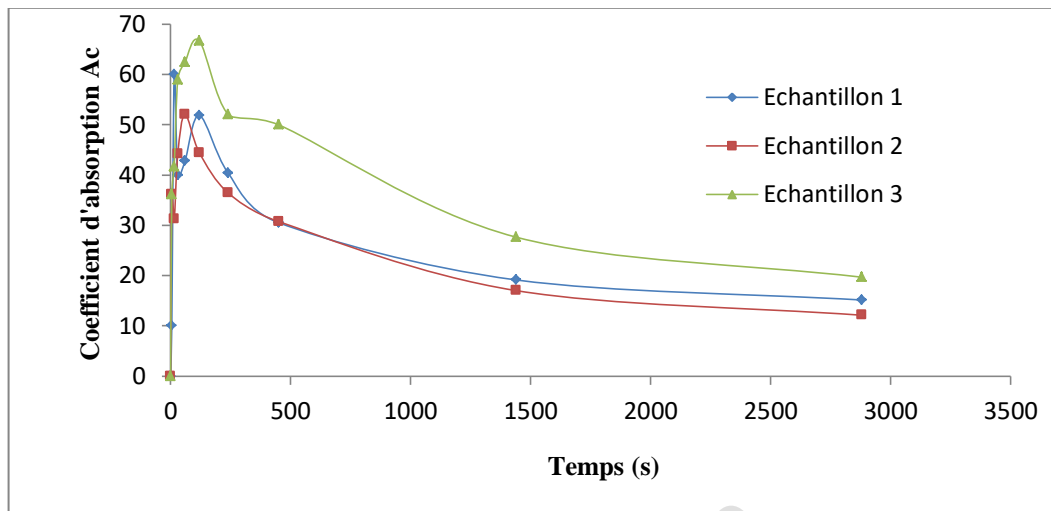


Figure 2.4. La variation d'adsorption du mortier en fonction de temps (durée \sqrt{t}) pour les différents mortiers.

Sachant que ;

L'échantillon 1 : mortier ordinaire (sable + ciment + eau)

L'échantillon 2 : mortier pouzzolanique (substitution de 20% de ciment par pouzzolane)

L'échantillon 3 : mortier avec perlite (substitution de 20% de ciment par perlite)

2.5 Analyse des résultats expérimentaux

Enfin, on peut écrire que le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est élevé, ce qui peut engendrer, à long terme, des effets néfastes sur la résistance mécanique et chimique des mortiers. Les résultats obtenus pour les trois échantillons suivent une tendance similaire. Toutefois, l'échantillon 3, contenant 20 % de pouzzolane, présente de meilleures performances que l'échantillon 1 (mortier ordinaire) et l'échantillon 2 (20 % de perlite). Ce dernier se révèle d'ailleurs comme le moins performant des trois.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

3. Fiche d'évaluation de TP N° 2 Perméabilité du béton

(Essai de perméabilité à l'eau sous pression – Norme XP P18-463)

3.1. Objectif de l'essai

Déterminer la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton soumis à une pression constante de 5 bars pendant 72 heures.

Évaluer la perméabilité du béton et vérifier sa conformité par rapport aux normes.

3.2. Principe de l'essai

- L'éprouvette est soumise à une pression d'eau de 5 bars pendant 72 heures sur une seule face.
- Après l'essai, l'éprouvette est sciée perpendiculairement à la face exposée.
- On mesure la profondeur maximale de pénétration de l'eau en millimètres.

3.3. Matériel utilisé

- Appareil d'essai de perméabilité à l'eau sous pression
- Pompe et manomètre
- Réservoir d'eau sous pression
- Éprouvettes cylindriques en béton (160 mm de diamètre / 200 mm hauteur, par exemple)
- Outils de sciage des éprouvettes

3.3.1 Appareil d'Essai :

Dispositif constitué de chambres pressurisées dans lesquelles sont insérées les éprouvettes de béton. Une pression d'eau contrôlée est appliquée pendant 72 heures. Le système comprend :

- Des chambres en acier étanche,
- Un manomètre de contrôle,



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

- Un circuit d'alimentation en eau,
- Une pompe permettant d'atteindre 5 bars.



Figure 3.1 Appareil pour l'essai de perméabilité du béton. [la norme XP P18-463]

3.4. Mode opératoire

- Préparer et sécher les éprouvettes.
- Installer l'éprouvette dans la chambre d'essai, serrer hermétiquement.
- Appliquer la pression d'eau (5 bars) via la pompe.
- Maintenir la pression pendant 72 heures.
- Sciage des éprouvettes après essai.
- Observer le front de pénétration de l'eau et mesurer la profondeur maximale.

3.5 Résultats et Observations (Tableau de mesure)

Numéro d'éprouvette	Type d'éprouvette	Profondeur max de pénétration (mm)	Aspect observé
Éprouvette n°1			
Éprouvette n°2			
Éprouvette n°3			



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

3.6 Questions de calcul :

- Calcule la moyenne des profondeurs de pénétration pour chaque éprouvette.
- Comparer les résultats des différentes éprouvettes ?
- Si la norme impose une profondeur maximale de 20 mm sous 5 bars après 72 h, quel béton respecte cette norme ?

3.7 Questions d'analyse critique :

- Comment la qualité de la cure peut-elle influencer la perméabilité du béton ?
- Si l'éprouvette avait des microfissures invisibles à l'œil nu, comment cela influencerait-il le résultat ?
- Peux-tu proposer d'autres méthodes pour mesurer l'imperméabilité d'un béton ?

(Exemples : essai de perméabilité au gaz, essai à l'air...)

- conclusion ?



4. Compte rendu TP N° 2 Perméabilité du béton

4.1 But de manipulation

L'objectif principal est de mesurer la profondeur de pénétration de l'eau sous une pression donnée à travers un échantillon de béton. Cela permet d'évaluer la résistance du béton à la pénétration de l'eau, critère important pour la durabilité des ouvrages en béton (ouvrages hydrauliques, réservoirs, stations d'épuration, ouvrages souterrains, etc.).

4.2 Principe de l'essai selon XP P18-463 :

4.2.1 Éprouvette : On utilise généralement une dalle ou un cylindre de béton, avec une surface exposée à l'eau sous pression.

4.2.2 Mise en pression : L'eau est appliquée sous une pression de 5 bars pendant une durée de **72 heures**.

4.2.3 Observation : Après l'essai, l'éprouvette est rompue (généralement fendue ou sciée en deux).

4.2.4 Mesure : On mesure la profondeur maximale de pénétration de l'eau à partir de la face exposée.

4.3 Intérêt pratique :

- Cette norme est souvent utilisée pour vérifier la qualité d'un béton vis-à-vis des exigences de durabilité.
- Elle sert à comparer des formulations de béton dans une démarche d'optimisation (choix des adjuvants, dosage en ciment, granulométrie...).
- Bien qu'expérimentale, cette norme est largement utilisée en France dans les marchés publics ou privés pour valider les performances d'étanchéité des bétons.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

4.4 Type des éprouvettes :

D'après la norme XP P18-463, les éprouvettes utilisées pour l'essai de perméabilité à l'eau sous pression sont généralement des prismes ou des cylindres en béton. Toutefois, dans la majorité des cas en laboratoire, et surtout pour ce type d'essai, les éprouvettes sont des cylindres standards.

Cylindres en béton de dimensions normalisées :

- **Diamètre : 150 mm**
- **Hauteur : 300 mm**

Ces dimensions sont conformes aux pratiques courantes dans le domaine des essais de durabilité. Elles permettent une bonne représentativité du béton en termes de compacité et de porosité. Le sciage après l'essai est plus facile et offre une lecture claire de la profondeur de pénétration. Trois éprouvettes cylindriques de béton, numérotées n°1, n°2 et n°3, de dimensions $\text{Ø}150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, ont été soumises à l'essai de perméabilité à l'eau sous pression conformément à la norme XP P18-463. Après sciage perpendiculairement à la face exposée à l'eau, la profondeur maximale de pénétration a été mesurée sur chacune d'elles.

Ces numéros permettent de suivre précisément les résultats, l'observation des faces sciées et la traçabilité de chaque essai.

4.5 Conditions de l'essai :

- Face exposée à l'eau : 150x300 mm
- Pression d'eau appliquée : 5 bars
- Durée de l'application : 72 heures

4.6 Résultats expérimentaux :

Après sciage des éprouvettes suivant un plan perpendiculaire à la face exposée :



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Tableau 4.1 Tableau des mesures de la profondeur de pénétration et des observations après sciage des éprouvettes

Numéro d'éprouvette	Type d'éprouvette	Profondeur max de pénétration (mm)	Aspect observé
Éprouvette n°1	Cylindre 150x300 mm	13 mm	Front de pénétration régulier
Éprouvette n°2	Cylindre 150x300 mm	12 mm	Front de pénétration régulier
Éprouvette n°3	Cylindre 150x300 mm	14 mm	Front de pénétration régulier

Ces valeurs sont indicatives et peuvent varier légèrement selon la formulation et la cure.

Graphe obtenu

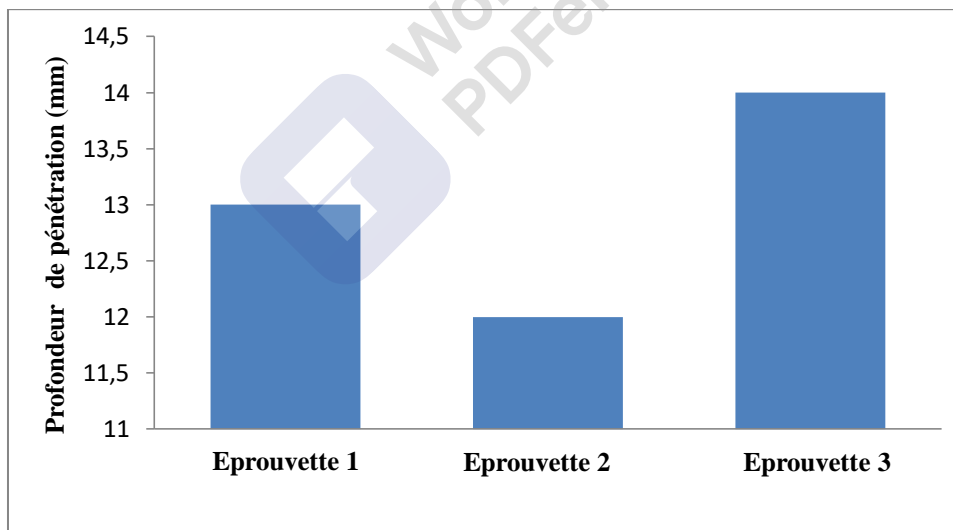


Figure 4.1. Profondeur de pénétration de l'eau.



4.7 Analyse des résultats expérimentaux : Le graphique ci-dessus présente les profondeurs maximales de pénétration d'eau mesurées sur trois éprouvettes de béton, après une exposition à une pression d'eau de 5 bars pendant 72 heures conformément à la norme XP P18-463. Les profondeurs relevées sont de 13 mm pour l'éprouvette 1, 12 mm pour l'éprouvette 2 et 14 mm pour l'éprouvette 3. Ces valeurs se situent toutes dans l'intervalle de 10 à 20 mm, ce qui correspond à un béton considéré comme faiblement perméable selon les critères de la norme. Ces résultats traduisent une bonne compacité du béton ainsi qu'une faible porosité, garantissant une durabilité satisfaisante et une protection efficace des armatures contre les risques de corrosion. L'homogénéité des profondeurs mesurées, avec un écart maximum de 2 mm, témoigne également de la régularité et de la qualité de la formulation ainsi que de la mise en œuvre du béton. Ce béton est donc adapté pour des ouvrages exposés à l'humidité tels que les fondations, les structures enterrées ou les ouvrages hydrauliques.

4.8 Valeurs Usuelles de Référence (Profondeur max en mm selon qualité du béton)

Tableau 4.2 Valeurs Usuelles de Référence de la Perméabilité à l'Eau selon la Qualité du Béton (Profondeur maximale en mm)

Type de béton	Profondeur \leq (mm)	Appréciation de la perméabilité
Béton courant (C25/30)	25 à 35 mm	Perméabilité modérée à forte
Béton courant (C30/37)	20 à 30 mm	Perméabilité modérée
Béton performant (C35/45)	10 à 20 mm	Perméabilité faible
Béton très performant (BHP)	\leq 10 mm	Très faible perméabilité



4.9 Comparatif avec Autres Normes

Tableau 4.3 Comparaison des Méthodes Normalisées d'Évaluation de la Perméabilité et de l'Imperméabilité du Béton.

Norme	Principe	Indicateur mesuré
XP P18-463 (France)	Eau sous 5 bars / 72h	Profondeur en mm
DIN 1048-5 (Allemagne)	Eau sous 5 bars / 72h (similaire)	Profondeur en mm
EN 12390-8 (Europe)	Essai d'imperméabilité (pression variable)	Profondeur en mm
ASTM C1202 (USA)	Migration ions chlorures (cellule électrique)	Coulomb (charge transférée)

4.10 Conseils Pratiques pour Améliorer la Perméabilité du Béton

- Réduire le rapport E/C (eau/ciment) : viser $\leq 0,45$
- Employer des liants complémentaires (filler, cendres volantes, laitier)
- Choisir des granulats bien gradués, bien compactés
- Utiliser des adjuvants réducteurs d'eau / plastifiants
- Bien vibrer le béton pour limiter les bulles d'air
- Éviter toute ségrégation (granulats mal répartis)
- Protéger efficacement en cure humide ou membrane (minimum 7 jours)
- Éviter toute dessiccation précoce (surtout en été)
- Utiliser des revêtements hydrofuges si nécessaire (en complément)



5. Fiche d'évaluation de TP N° 3 : Mesure de la porosité d'un béton

5.1 Objectif du TP :

Déterminer la porosité ouverte d'un échantillon de béton à l'aide de la méthode gravimétrique (essai d'absorption d'eau après immersion et ébullition). Cette mesure permet d'évaluer la perméabilité potentielle et la durabilité du béton. [**NF P18-429 / XP P18-590**]

5.2 Matériel nécessaire :

- Échantillons de béton durci (cube ou cylindre)
- Balance de précision ($\pm 0,1$ g)
- Étuve (105 °C)
- Cuve d'immersion ou bac d'eau
- Support pour suspension dans l'eau
- Chronomètre
- Chiffon absorbant
- Pince ou gant thermique

5.2.1 Description de l'appareillage et des éprouvettes

a. Éprouvettes de béton

- Forme : Cylindrique
- Dimensions : 11 cm de diamètre \times 22 cm de hauteur (ou selon les normes locales, parfois 10 \times 20 cm)
- Âge du béton : 28 jours (béton durci, après conservation en chambre humide)



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

- Type de béton : Béton ordinaire ou modifié (à préciser selon le TP ; ex. avec pouzzolane, perlite, etc.)

Ces éprouvettes ont été fabriquées selon les normes de confection et de cure, puis laissées en cure humide jusqu'au jour du test.

b. Appareillage utilisé

- Étuve de séchage

Permet de sécher l'échantillon à une température constante de 105 ± 5 °C, afin d'éliminer l'eau contenue dans les pores ouverts et fermés.

- Balance électronique de précision

Capacité ≥ 5 kg, précision de 0,1 g, utilisée pour toutes les pesées (à sec, humide, immergée).

- Bac d'immersion

Récipient rempli d'eau propre, utilisé pour saturer les échantillons (immersion de 24 à 48 h).

- Dispositif de pesée hydrostatique

Support métallique ou fil suspendu permettant de peser l'éprouvette lorsqu'elle est immergée dans l'eau (application du principe d'Archimède).

- Chiffon non absorbant / papier absorbant

Utilisé pour essuyer rapidement la surface de l'échantillon après immersion, sans retirer l'eau des pores.

- Les échantillons sont plongés complètement dans l'eau durant 24 h; peser



Master II MGC

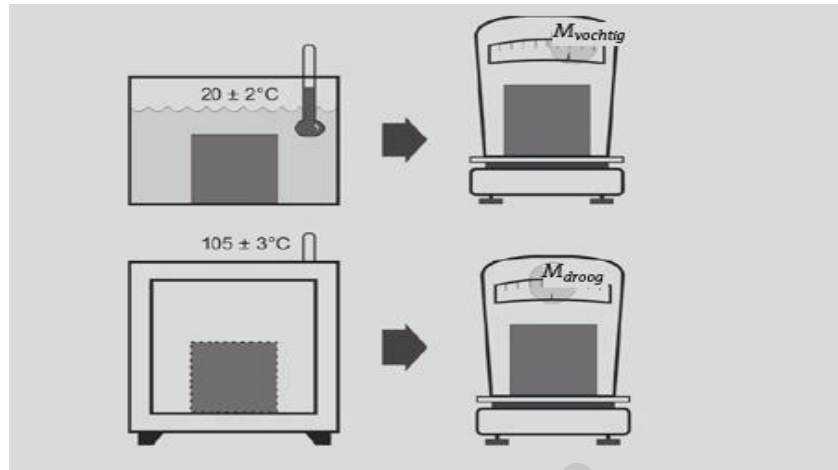
Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Figure 5.1 Essai Absorption d'eau par immersion. [NF P18-429 / XP P18-590]

5.3 Principe de la méthode :

La porosité ouverte est déterminée en comparant la masse d'un échantillon sec à l'étuve, à sa masse après immersion prolongée. L'eau pénètre uniquement dans les pores ouverts accessibles. On peut ainsi calculer :

- **Masse sèche (M_s)** : masse après séchage à 105 °C jusqu'à masse constante.
- **Masse saturée (M_h)** : masse après immersion dans l'eau pendant 24 à 48 h.
- **Masse immergée (M_i)** : masse dans l'eau (poussée d'Archimède → volume déplacé).

5.4 Protocole expérimental :

a. Séchage à l'étuve :

Mettre l'échantillon dans l'étuve à 105 ± 5 °C jusqu'à stabilisation de masse (variation < 0,1 % entre deux pesées successives).

➤ Noter M_s .

b. Refroidissement et pesée à sec :

Laisser refroidir dans un dessiccateur pour éviter l'absorption d'humidité. Peser.

➤ Confirmer M_s .



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

c. Immersion dans l'eau :

Immerger l'échantillon pendant 24 à 48 heures à température ambiante.

- Sortir, essuyer légèrement la surface sans retirer l'eau dans les pores. Peser.
- Noter M_h .

d. Pesée immergée (Archimède) :

Peser l'échantillon suspendu dans l'eau pour obtenir M_i (masse immergée = masse apparente dans l'eau).**Calculs :**

1. Volume apparent de l'échantillon :

$$V = M_h - M_i \quad (\text{en cm}^3, \text{ car } 1 \text{ g} = 1 \text{ cm}^3 \text{ d'eau})$$

2. Porosité ouverte (en %) :

$$P_w = \frac{M_h - M_s}{V} \times 100$$

5.5 Le travail demandé :

- a. Calculer la porosité mesurée pour les recettes de (béton ou mortier) à 24h ?
- b. Comparer les résultats des différents béton ?
- c. Conclusion

5.6 Exploitation des résultats :

- Comparer les porosités des différents échantillons (béton ordinaire, béton avec ajouts, béton recyclé...).
- Discuter les conséquences d'une porosité élevée (durabilité, absorption, résistance).
- Analyser l'influence de certains paramètres (rapport E/C, types d'ajouts, adjuvants).



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

5.7 Remarques et précautions :

- Bien sécher l'échantillon sans l'endommager (éviter fissuration).
- Ne pas confondre l'eau en surface et l'eau contenue dans les pores ouverts.
- Laisser refroidir avant de peser pour éviter la recondensation d'eau.





6. Compte Rendu de TP N°3 : Mesure de la porosité d'un Béton

6.1 Objectif du TP

Ce TP a pour but de déterminer la porosité ouverte d'un béton durci à l'aide de la méthode gravimétrique. La porosité est un indicateur important de la durabilité et de la performance mécanique d'un béton, notamment face à l'eau, aux agents agressifs ou au gel/dégel.

6.2 Matériel utilisé

- Échantillon de béton durci (cylindrique ou cubique)
- Balance de précision ($\pm 0,1$ g)
- Étuve (105 °C)
- Bac d'immersion rempli d'eau
- Fil de suspension / support de pesée immergée
- Chiffon absorbant
- Chronomètre

6.3 Méthodologie

a. Séchage à l'étuve

L'échantillon a été séché à 105 °C jusqu'à stabilisation de sa masse (masse constante). Cela permet d'éliminer toute l'eau contenue dans les pores.

b. Refroidissement et pesée à sec

Après séchage, l'échantillon a été refroidi dans un dessiccateur, puis pesé :

→ Masse sèche (M_s)



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**c. Immersion dans l'eau**

L'échantillon a été immergé dans de l'eau à température ambiante pendant 48 h pour assurer la saturation des pores. Après immersion :

→ Échantillon essuyé délicatement, puis pesé : **Masse humide (M_h)**

d. Pesée immergée

L'échantillon a ensuite été suspendu dans l'eau pour mesurer sa masse immergée : **Masse immergée (M_i)**

6.4 Résultats expérimentaux

Mesure	Valeur (en g)
Masse sèche (M_s)	1450
Masse humide (M_h)	1580
Masse immergée (M_i)	850

Volume apparent du béton :

$$V = M_h - M_i = 1580 - 850 = 730 \text{ cm}^3 \quad V = M_h - M_i = 1580 - 850 = 730 \text{ cm}^3$$

Porosité ouverte :

$$P = \frac{M_h - M_s}{V} \times 100 = \frac{1580 - 1450}{730} \times 100 \approx 17.8\%$$

6.5 Analyse des résultats

La porosité ouverte mesurée de l'échantillon est d'environ **17,8 %**. Cette valeur indique que le béton présente une porosité significative, ce qui peut affecter sa durabilité à long terme, notamment en cas d'exposition à l'humidité, aux cycles de gel/dégel, ou aux agents chimiques. Une porosité élevée facilite également la pénétration de substances nocives, comme les chlorures ou les sulfates, ce qui peut accélérer la dégradation du béton et de son armature (corrosion).



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

6.6 Conclusion

Ce TP a permis de mettre en œuvre une méthode simple et fiable pour évaluer la porosité ouverte d'un béton. Les résultats montrent une porosité relativement élevée, ce qui pourrait être réduit par l'optimisation de la formulation du béton (rapport eau/ciment, ajout de pouzzolane, etc.). La porosité est un facteur clé à surveiller pour garantir la durabilité des structures en béton.





Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Wondershare
PDFelement

II/ Essais chimiques



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

1. Fiche d'évaluation de TP N° 4 Attaque de béton par les sulfates (NF P18-429 / XP P18-590)

1.1 Objectif du TP

Étudier l'effet des ions sulfates sur la durabilité du béton. L'objectif est d'observer les altérations physiques ou chimiques provoquées par une exposition prolongée à une solution sulfatée, et d'évaluer la résistance du béton face à cette agression chimique.

1.2 Principe

Les ions sulfates (SO_4^{2-}), présents dans les sols ou eaux agressives (eaux usées, marais, eaux de mer, etc.), peuvent réagir avec les composants du ciment hydraté, notamment l'aluminate tricalcique (C_3A), formant de l'ettringite ou de la thaumasite. Cela peut provoquer des fissurations, gonflements et pertes de résistance.

1.3 Matériel utilisé

- Éprouvettes de béton durci (âgées de 28 jours)
- Bain contenant une solution sulfatée (par ex. Na_2SO_4 à 5 % en masse)
- Étuve (facultative pour accélération)
- Récipients de trempage en plastique ou verre
- Règle ou pied à coulisse (mesure de gonflement)
- Balance électronique (pour suivi de masse)
- Chronomètre ou calendrier de suivi

1.4 Échantillons

- Éprouvettes cubiques ou cylindriques de béton normalisé
- Formulations variables si comparaison (ex. béton riche en C_3A vs. béton résistant aux sulfates)



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

1.5 Protocole expérimental

1.5.1 Pesée initiale des éprouvettes

- Noter la **masse initiale** (M_0) de chaque échantillon.

1.5.2 Immersion dans la solution sulfatée

- Plonger les échantillons dans un bac contenant la solution Na_2SO_4 à 5 %.
- Laisser immergé durant une période définie (ex. 7, 14, 28 jours).
- Température : ambiante ou contrôlée.

1.5.3 Suivi régulier

À intervalles réguliers (chaque semaine) :

- Observer les **changements visuels** (fissuration, gonflement, décoloration).
- Mesurer la **masse** ($M_1, M_2...$) après égouttage.
- (Optionnel) Mesurer la **longueur ou diamètre** si gonflement visible.

1.5.4 Comparaison avec témoins

- Comparer les échantillons exposés aux sulfates avec ceux conservés dans l'eau distillée (témoin non agressé).



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**Résultats à relever**

Durée (jours)	Masse (g)	Variation de masse (%)	Altérations visuelles	Dimensions (mm)
0				
7				
14				
21				
28				

1.6 Exploitation des résultats

- Un **gain de masse** peut indiquer une absorption d'eau ou des réactions chimiques internes.
- La **formation de fissures**, le **gonflement**, ou une **perte d'intégrité** montrent la progression de l'attaque.
- Comparer le comportement de différents bétons (type de ciment, teneur en C₃A).



2. Compte Rendu de TP n°4 : Attaque du Béton par les Sulfates

Norme NF P18-429 / XP P18-590

2.1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est d'étudier l'effet d'une solution sulfatée sur la durabilité du béton. En exposant des éprouvettes à une solution contenant des ions sulfates, on observe les éventuelles dégradations (gonflements, fissurations, perte de masse), afin de mieux comprendre le mécanisme d'agression chimique et son impact sur la structure du béton.

2.2. Principe

Le béton est sensible à l'attaque chimique par les sulfates, notamment via la formation d'ettringite secondaire ou de thaumasite, qui entraîne des réactions d'expansion et de dégradation de la pâte cimentaire. Ce phénomène peut causer des fissures, des pertes de cohésion, voire la désintégration complète du béton à long terme.

2.3. Matériel utilisé

- Éprouvettes de béton durci (28 jours)
- Solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4 à 5 % en masse)
- Récipients d'immersion
- Balance électronique ($\pm 0,1$ g)
- Règle ou pied à coulisse
- Gants, lunettes de sécurité

2.4. Procédure expérimentale

- a. Pesée initiale des éprouvettes (M_0)
- b. Immersion dans la solution sulfatée pendant 28 jours



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

c. Observation régulière (7j, 14j, 21j, 28j)

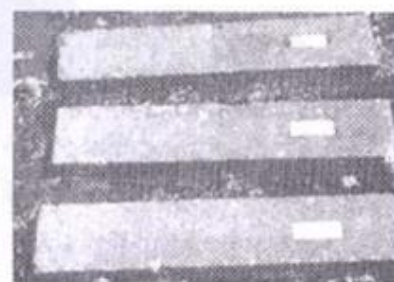
d. À chaque étape : -Pesée après égouttage (M_1 , M_2 ...)

- Observation de fissures, changements de couleur ou gonflement

- Mesure des dimensions (longueur ou diamètre)

2.5. Résultats expérimentaux :**Tableau 2.1** Les résultats de variation des caractéristiques physique.

Durée (jours)	Masse (g)	Variation de masse (%)	Altérations visuelles	Dimensions (mm)
0	1450	0 %	Aucune	100
7	1470	+1.38 %	Léger gonflement, surface rugueuse	101
14	1492	+2.90 %	Début de microfissures	102
21	1510	+4.14 %	Fissures plus visibles	103
28	1528	+5.38 %	Fissures nettes, pertes de matière	104

**Après immersion****Avant immersion****Figure 2.1** Eprouvette de béton dégradée par l'attaque sulfatique. [Labo de G.C.UNIV. MASCARA]**2.6 Analyse des résultats expérimentaux :**

- On observe une augmentation progressive de la masse, liée à la pénétration de la solution sulfatée dans les pores du béton.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

- Des fissures superficielles apparaissent dès la deuxième semaine, s'accroissant au fil du temps.
- Le gonflement dimensionnel confirme la formation de produits d'expansion comme l'ettringite secondaire.
- Ces signes sont typiques d'une attaque sulfatée, plus marquée sur les bétons riches en aluminates (C_3A).

2.7. Conclusion

Ce TP démontre la sensibilité du béton à l'attaque par les sulfates. L'exposition prolongée à un milieu sulfaté provoque des réactions chimiques expansives, entraînant des fissurations, gonflements et perte de masse. Ces dégradations compromettent la durabilité des structures en béton.

Pour améliorer la résistance aux sulfates, il est conseillé :

- d'utiliser des ciments résistants aux sulfates (type CEM III ou CEM V),
- de limiter le rapport E/C,
- et d'améliorer la compacité du béton pour réduire la pénétration des agents agressifs.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

3. Fiche d'évaluation de TP n°5 Attaque du béton par les acides (ASTM C 267 (2001)).

3.1 Objectifs du TP

- Observer les effets de différents acides sur un matériau basique : le béton.
- Comprendre les réactions chimiques impliquées dans l'attaque acide du béton.
- Identifier les acides les plus agressifs vis-à-vis du béton.

3.2 Matériel nécessaire

- Échantillons de béton (petits cubes ou fragments)
- Acide sulfurique (H_2SO_4) dilué
- Acide nitrique (HNO_3) dilué
- Eau distillée (témoin)
- Bêchers
- Balance
- Chronomètre
- Gants, lunettes et blouse de protection
- Pipettes graduées
- Sortir les échantillons, les rincer à l'eau distillée, les sécher légèrement et les repeser.
- Calculer la perte de masse.



3.3 Mode opératoire

3.3.1 Préparation des éprouvettes : Les éprouvettes seront nettoyées 3 fois avec l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite elles seront pesées avec une balance de précision de 0.01g pour déterminer leurs masses, après l'attaque chimique, désignées par m^2 , puis en l'immergeant dans une solution acide et en suivre la variation de la masse.

3.3.2 Préparations des solutions acides :

Pour avoir une solution acide de concentration de 5%. On a utilisé la méthode chimique suivante : $C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$

Par exemple : pour avoir une solution de 5% d'acide Sulfurique (H_2SO_4) de degré pureté de 95% dans 2 litres de l'eau distillée, on a : $5 \times 2000 = 95 \times V_2$.

Donc : **105, 26 ml** d'acide Sulfurique (H_2SO_4).

Dans notre cas, on a stocké chaque 3 éprouvette des mortiers dans 2 litres de la solution de 5% H_2SO_4 (figure 1 et 2) et chaque 3 éprouvette des mortiers dans 2 litres de la solution 5% HNO_3 . Cette opération de mesure de poids sera effectuée à différents âges 0, 7, 14, 21 et 28 jours après immersion dans les solutions. Les solutions d'attaque seront renouvelées chaque 7jours de telle façon à maintenir un pH constant. Le volume de chaque solution est au moins égal à 4 fois le volume total des éprouvettes immergées.

3.4 Résumé de protocole expérimental :

1. Peser chaque échantillon de béton et noter sa masse initiale.
2. Placer chaque échantillon dans un bécher distinct.
3. Ajouter 105.26 mL de chaque solution acide dans les béchers respectifs (HNO_3 , H_2SO_4 et compléter 2 litre par l'eau distillé).
4. Laisser réagir pendant 7,14,21et 28 jours.
5. Observer et noter les effets visibles (effervescence, changement de couleur, dissolution, etc.).



Master II MGC

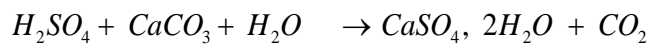
Travaux pratique de
durabilité des matériaux

3.5 Réactions chimiques attendues

Exemple avec l'acide sulfurique :

Le béton contient du calcaire (CaCO_3).

Réaction :



On observe un dégagement gazeux (CO_2).

3.6 Calcul de la perte de masse :

$$\text{Perte de masse (\%)} : P(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100 ; \text{ avec}$$

M_1 : masse des éprouvettes avant immersion.

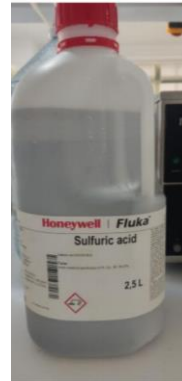
M_2 : masse des éprouvettes après immersion.



Figure 3.1 Préparation des solutions acides [Labo de G.C.UNIV. MASCARA]



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**Figure 3.2** Acide sulfurique (H_2SO_4)**Figure 3.3** Acide nitrique (HNO_3)**Figure 3.4** Conservation des échantillons dans les solutions (acides + l'eau distillée). [Labo de G.C.UNIV. MASCARA]

Une fois la solution d'acide préparée le jour même, elle est mise dans les récipients en vérifiant son pH (qui est égal à 1). Ensuite on introduit les éprouvettes de mortier dans les récipients. Les récipients sont couverts pour empêcher l'évaporation d'eau. La température de la solution est maintenue à 23 C°.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**3.7 Résultats à noter****3.7.1 Tableau de mesure 1 :**

Résultats a relevé

Temps (jours)	Les propriétés physiques	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Etat initiale				
7 jours				
14 jours				
21 jours				
28 jours				

3.7.2 Tableau de mesure 2 :

Résultats a relevé

Temps (jours)	Les propriétés physiques	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Etat initiale				
7 jours				
14 jours				
21 jours				
28 jours				



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

3.8 Le travail demandé :

a. Calculer la perte de masse à différents âges 0, 7, 14, 21 et 28 jours pour tous les échantillons ?

b. tracer les graphes de la variation de la perte de masse à différents âge pour les différents échantillons. Vis-à-vis des milieux agressifs (acide sulfurique H_2SO_4)

c. Commenter les résultats ?

3.9 Sécurité

- Toujours manipuler les acides avec précaution.
- Porter des équipements de protection.
- Neutraliser les solutions usées avant rejet.



4. Compte rendu de TP n° 5 : Attaque du béton par les acides

4.1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est d'observer l'effet de différents acides (HNO_3 , H_2SO_4) sur le béton, d'identifier les réactions chimiques responsables de la dégradation du matériau, et de comparer l'agressivité de ces acides vis-à-vis du béton.

4.2. Protocole résumé

Des échantillons de béton de masse connue ont été plongés pendant (7j ,14j ,21j, 28j) dans différentes solutions : eau distillée (témoin), acide nitrique et acide sulfurique. Après réaction, les échantillons ont été rincés, séchés puis repesés pour mesurer la perte de masse.

4.3. Observations

Tableau 4.1 Tableau des observations visuelles.

Acide utilisé	Observation visuelle
Eau distillée	Aucun changement
HNO_3	Fort dégagement gazeux, effervescence rapide
H_2SO_4	Effervescence modérée, dépôt blanc observé

4.3.1 Interprétation des observations

- Une perte de masse élevée indique une forte réaction chimique entre l'acide et le béton (décomposition du CaCO_3).
- Le béton exposé à HNO_3 est le plus endommagé dans cet exemple (perte de masse 100% pour l'échantillon 3).
- Le béton dans l'eau distillée ne perd presque pas de masse, ce qui confirme que ce n'est pas une attaque acide.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Figure 4.1 Evolutions de dégradation des éprouvettes en mortier de ciment dans des milieux acides. [Labo de G.C.UNIV. MASCARA]

4.4 Analyse des résultats expérimentaux

4.4.1. Données générales

L'échantillon 1 : mortier ordinaire (sable + ciment + eau)

L'échantillon 2 : mortier pouzzolanique (substitution de 20% de ciment par pouzzolane)

L'échantillon 3 : mortier avec perlite (substitution de 20% de ciment par perlite)

Les trois échantillons de béton ont été soumis à un environnement agressif (5% des acides), et leur masse a été mesurée régulièrement pour déterminer l'évolution de la perte de matière, donc de leur dégradation.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**Tableau de mesure 1 :****Tableau 4.2.** Les résultats de variation des caractéristiques physiques des éprouvettes immergées dans la solution d'acide sulfurique (5% H₂SO₄).

Temps (jours)	Les propriétés physiques	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Etat initiale	La masse (g)	133.26	138.44	114.8
	Volume (cm ³)	57.79	60.68	56.27
	Perte de masse (%)	/	/	/
7 jours	La masse (g)	120	126	108.98
	Perte de masse (%)	9.95	8.97	5.12
14 jours	La masse (g)	106.08	98.98	112.91
	Perte de masse (%)	11.6	21.45	15.27
21 jours	La masse (g)	95.24	92.73	104.14
	Perte de masse (%)	28.53	30.41	21.85
28 jours	La masse (g)	89	92	96
	Perte de masse (%)	33.21	30.96	27.96

Tableau de mesure 2 :**Tableau 4.3** Les résultats de variation des caractéristiques physiques des éprouvettes immergées dans la solution d'acide nitrique (5% HNO₃).

Temps (jours)	Les propriétés physiques	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Etat initiale	La masse (g)	125.26	125.12	117.99
	Volume (cm ³)	41.51	42.73	56.16
	Perte de masse (%)	/	/	/
7 jours	La masse (g)	115.6	116.65	77.91
	Perte de masse (%)	7.71	6.68	33.96
14 jours	La masse (g)	91.99	108.88	30.29
	Perte de masse (%)	20.42	6.4	61.12
21 jours	La masse (g)	60.06	94.36	0
	Perte de masse (%)	34.71	13.33	100
28 jours	La masse (g)	65	29	0
	Perte de masse (%)	92.30	69.26	100



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Les graphes obtenus :

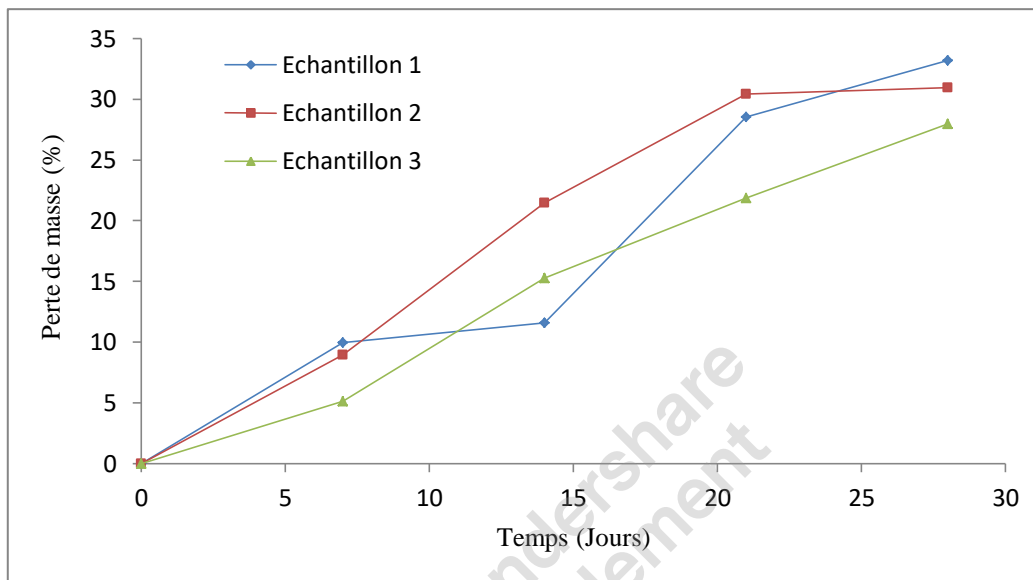


Figure 4.2 La variation de la perte de masse à différents âge pour les différents échantillons.

vis-à-vis des milieux agressifs (acide sulfurique H_2SO_4)

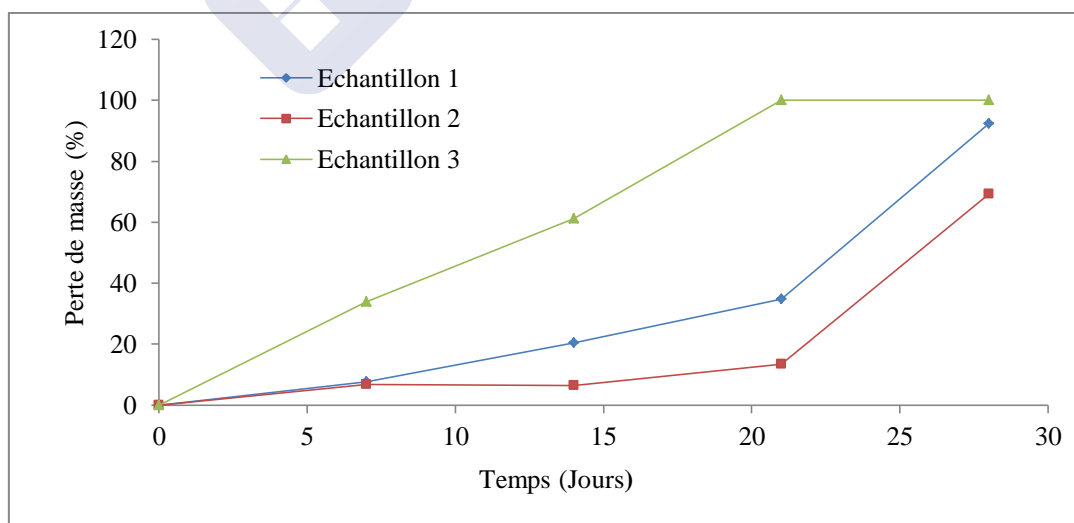


Figure 4.3 La variation de la perte de masse à différents âge pour les différents échantillons

vis-à-vis des milieux agressifs (acide nitrique)



4.5 Commentaire des graphes :

En vue d'étudier la durabilité des mortiers on a évalué l'influence des ajouts minéraux (la pouzzolane naturelle et perlite) sur les caractéristiques du mortier vis-à-vis des milieux agressifs (acide sulfurique H_2SO_4 et acide nitrique HNO_3) additionné par 5% dans l'eau.

D'après les figures (4.2 et 4.3) on remarque qu'en générale qu'il y a une augmentation de la perte de masse à différents âge pour les différents échantillons émerger en ce qui concerne les deux milieux (la solution d'acide nitrique et sulfurique).

On remarque aussi qu'en générale que la perte de masse à différents âge pour les différents échantillons émergés dans la solution d'acide nitrique est plus importante que ceux émerger dans la solution d'acide sulfurique.

Ce phénomène est d'autant plus important que le temps d'immersion est élevé. Cela prouve bien que la solution d'acide nitrique à 5% agit de manière très agressive et peut pénétrer plus facilement de façon abondante par les espaces de porosité au sein des éprouvettes du béton. Ceci explique l'augmentation de la perte de masse pour l'échantillon 3 (mortier perlite) figure 4.3.

Pour le mortier de pouzzolane, la perte de masse est plus grande d'environ 100% des (21 et 28j) d'immersion dans la solution de 5% HNO_3 (figure 4.2) que ceux émerger dans la solution de 5% H_2SO_4 ; Où la perte de masse est égal à 30.96 % à (21 et 28j).

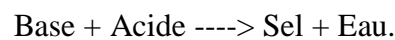
Pour l'échantillon 3 (mortier perlite) ; une évolution de la perte de masse a été remarqué dans la (figure 4.3) qui présente l'influence d'acide nitrique sur les différents échantillons. Notamment l'échantillon 2. L'inverse a été montré dans la figure 4.2 ; Où il y a une diminution de la perte de masse du même échantillon 2. Ce ci montre l'influence de type d'acide sur la perte de masse.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Pour le mortier ordinaire, la variation est différente ; la perte de masse est plus grande d'environ 92.30% à (28j) d'immersion dans la solution de 5% HNO₃ que ceux émerger dans la solution de 5% H₂SO₄ % ; Où la perte de masse est égale à 33,21 % à (28j d'immersion). Les échantillons 2 et 3 présentent des résistances chimiques légèrement plus grandes que l'échantillon 1 (mortier ordinaire) ceci est montrée dans la figure 4.2. On constat que la basicité de mortier et béton, est très sensible aux milieux acides avec lesquels il réagit suivant la réaction bien connue :



La nocivité d'un acide dépend de la solubilité du sel qu'il forme lors de la réaction avec les hydrates du ciment.

Les solides ainsi formés possèdent deux volumes beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance ; il en résulte donc une expansion qui conduira à la détérioration. Donc l'attaque du béton par les (H₂SO₄ et HNO₃) peut engendrer une lixiviation du béton et une dépassivation des armatures en réduisant le PH de la solution interstitielle.



5. Fiche d'évaluation de TP N° 6 : Attaque du béton par les chlorures

[Norme EN 12390-11]

5.1 Objectifs

- Étudier l'effet des ions chlorure (Cl^-) sur les propriétés du béton.
- Comprendre les mécanismes de corrosion des armatures métalliques dans le béton armé en présence de chlorures.
- Identifier les conséquences à long terme d'une exposition du béton aux milieux chlorurés (sels de déneigement, milieux marins...).

5.2 Matériel nécessaire

- Échantillons de béton (avec ou sans armatures métalliques)
- Solution de chlorure de sodium (NaCl) à différentes concentrations (ex. : 3%, 5%)
- Eau distillée (témoin)
- Bêchers ou bacs de trempage
- Balance électronique
- Chronomètre ou calendrier de suivi
- Papier pH
- Gants, lunettes, blouse
- (Optionnel) Réactif de Mohr ou nitrate d'argent pour test de pénétration des chlorures
- Loupe binoculaire
- Microscope électronique à balayage (MEB)



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

5.3. Protocole expérimental

5.3.1. Préparation des éprouvettes

- Préparer plusieurs échantillons en béton armé de différentes compositions (rapport eau / ciment, type de ciment, adjuvant).
- Couler les éprouvettes et les démouler après 24 heures.
- conserver les éprouvettes dans un environnement contrôlé (température, humidité) pendant 28 jours.
- Mesurer leur masse initiale.

5.3.2. Exposition aux chlorures

- Immerger chaque échantillon dans :
 - o De l'eau distillée (témoin)
 - o Une solution de NaCl à 3 %
 - o Une solution de NaCl à 5 %
- Laisser agir pendant plusieurs jours (7, 14, 21, 28 jours).
- À chaque étape :
 - o Sortir les échantillons, les sécher et mesurer leur masse.
 - o Observer tout signe de dégradation (fissures, efflorescences, corrosion visible).
 - o Noter la perte de masse éventuelle.
- (Si armature présente) : Observer les signes de corrosion (rouille).
- laisser les éprouvettes immergées pendant une période déterminée (3 mois, 6 mois, 1 an).
- Mesurer le PH et la conductivité de la solution de NaCl à intervalles régulier.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux



Figure 5.1. Cure agressive 10% de (NaCl). [Labo de G.C.UNIV. MASCARA]



Figure 5.2. Appareil de mesure de pénétration des ions de chlorures dans le béton.



Master II MGC

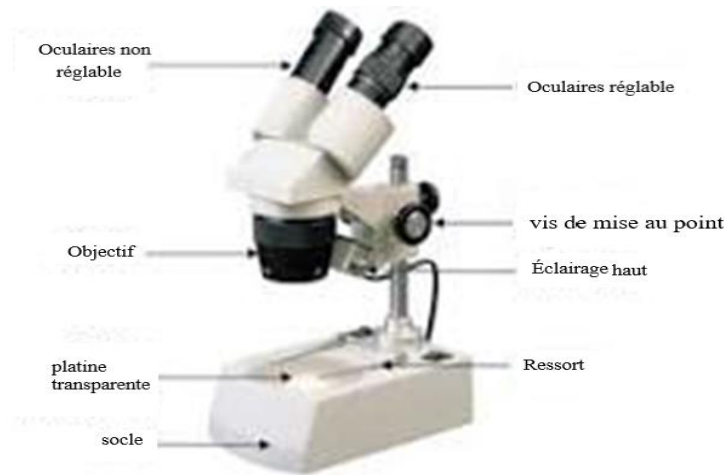
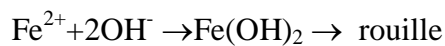
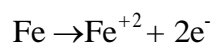
Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Figure 5.3. Loupe binoculaire.

[<https://www.laboandco.com/c/loupe-binoculaire-steremicroscope>]

5.4. Phénomènes attendus

- Les ions chlorure pénètrent le béton et atteignent les armatures.
- En présence d'oxygène et d'humidité, ils provoquent la corrosion de l'acier :



Le béton peut éclater autour de l'armature à cause de la rouille (expansion).

Calcul :

Mesure de la perte de masse réalisée selon le mode opératoire recommandé par l'AFPCAFREM

$$P(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

5.5. Résultats à noter

Temps (jours)	Solution	Masse (g)	Changement visible	Odeur / corrosion	Autres remarques
0 (initial)	NaCl 3%				
	NaCl 5%				
	Eau				
7 jours					
14 jours					
21 jours					
28 jours					

5.6 Analyse des résultats

1. Observer les éprouvettes à l'aide d'une loupe binoculaire pour détecter des signes de dégradation (fissures, éclats).
2. Réaliser des analyses MEB pour observer la surface du béton
3. Calculer la perte de masse à différents âges 0, 7, 14, 21 et 28 jours pour tous les échantillons ?
4. Tracer les graphes de l'évolution **de la masse** à différents âge pour les différents échantillons. Vis-à-vis des milieux agressifs (eau, NaCl 3% et NaCl 5%)
5. Commenter les résultats ?

5.7 Sécurité

- Manipuler les solutions de chlorure avec précaution.
- Ne pas jeter les solutions salines dans l'évier sans dilution.
- Bien se laver les mains après manipulation.



6. Compte rendu de TP N°6 Attaque du béton par les chlorures

6.1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est d'étudier les effets des chlorures (Cl^-), en particulier ceux du chlorure de sodium (NaCl), sur la dégradation du béton (perte de masse), en particulier sur la corrosion des armatures métalliques présentes dans le béton armé.

6.2. Protocole résumé

Des échantillons de béton ont été immergés dans :

- de l'eau distillée (témoin),
- une solution de NaCl à 3 %,
- une solution de NaCl à 5 %.

Les observations ont été faites sur une période de 28 jours, avec des relevés à 7, 14, 21 et 28 jours. Les échantillons ont été examinés pour détecter les pertes de masse, changements visuels, et signes éventuels de corrosion des armatures.

6.3. Résultats expérimentaux

Tableau 6.1. Les résultats de variation des caractéristiques physiques des éprouvettes immergées dans des milieux agressifs (eau, NaCl 3% et NaCl 5%)

Temps (jours)	Solution	Masse (g)	Observations visuelles	Corrosion observé
0 (initial)	Eau distillée	138.44	Aucun changement visible	Non
	NaCl 3%	133.26	/	Non
	NaCl 5%	114.80	/	Non



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

7 jours	Eau distillée	126	Aucun changement visible	Non
	NaCl 3%	120	Traces blanches en surface	Léger
	NaCl 5%	108.98	Début d'efflorescence	Début de corrosion
14 jours	Eau distillée	98.98	Légère porosité	Non
	NaCl 3%	106.08	Fissures fines, efflorescences salines	Oui,
	NaCl 5%	112.91	Rouille apparente autour des armatures	Oui, avancée
21 jours	Eau distillée	92.73	Aucun changement significatif	Non
	NaCl 3%	95.24	Fissures plus marquées	Corrosion visible
		104.14	Béton éclaté par endroits	Forte corrosion
28 jours	Eau distillée	92	Stable	Non
	NaCl 3%	89	Détérioration visible	Importante
	NaCl 5%	96	Béton cassant, rouille prononcée	Très avancée

Voici la courbe représentant l'évolution de la masse des échantillons de béton immergés dans différents milieux (eau distillée, NaCl 3 %, NaCl 5 %) au fil du temps.



Master II MGC

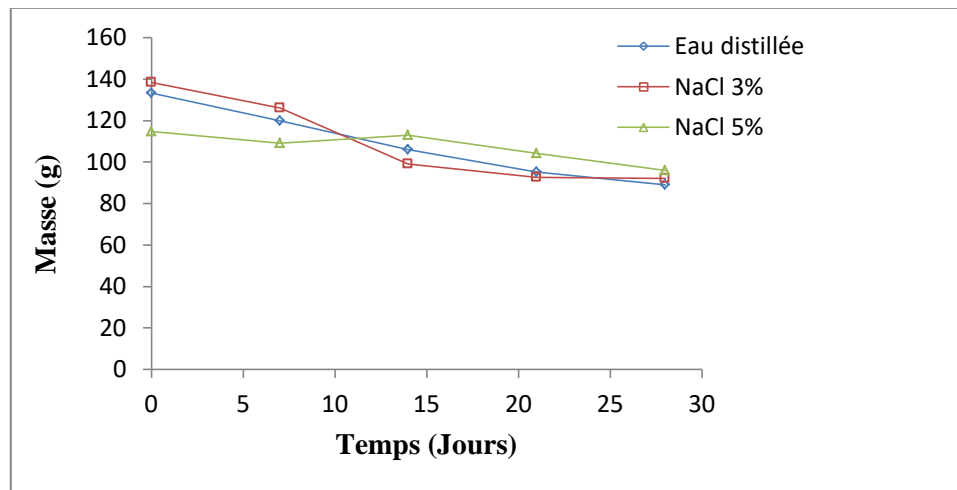
Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Figure 6.1. L'évolution de la masse des échantillons selon le milieu et le temps.

6.4 Analyse de résultats expérimentaux

La courbe met en évidence une diminution progressive de la masse des échantillons de béton au fil des 28 jours, avec des variations significatives selon le milieu d'exposition.

-Eau distillée :

L'échantillon immergé dans l'eau distillée présente une baisse modérée de masse, ce qui indique une dégradation très limitée. Aucun signe de corrosion n'a été observé. Ce comportement est attendu, car l'eau distillée est chimiquement neutre et peu agressive vis-à-vis du béton.

- NaCl 3 % :

L'échantillon exposé à une solution de chlorure de sodium à 3 % montre une perte de masse plus marquée dès la première semaine. Des signes de fissuration et d'efflorescences salines apparaissent dès le 14e jour, traduisant l'initiation du processus de corrosion. Cette corrosion est amplifiée par la pénétration des ions chlorure, qui perturbent la couche passive autour des armatures.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux**- NaCl 5 % :**

L'effet est encore plus prononcé pour l'échantillon immergé dans la solution à 5 %. La perte de masse est rapide, accompagnée de phénomènes visibles comme des éclatements du béton, une rouille avancée, et une cassure du matériau dès le 21e jour. Cela montre une attaque sévère du béton par les chlorures à concentration élevée.

6.5. Conclusion partielle

Ces résultats confirment que les chlorures ont un effet accélérateur sur la corrosion des armatures et la dégradation du béton. Plus la concentration en NaCl est élevée, plus la corrosion est rapide et destructrice. Le béton exposé à l'eau distillée, quant à lui, conserve ses propriétés structurelles sur la durée de l'essai.

Le béton exposé aux milieux riches en chlorures, comme les environnements marins ou les zones soumises au salage hivernal, est fortement vulnérable à la corrosion des armatures. Cette attaque n'est pas visible immédiatement, mais s'aggrave au fil des semaines. Il est crucial d'utiliser des bétons formulés avec des adjuvants spécifiques ou des enrobages protecteurs des armatures pour résister à ces environnements.

Remarque :

Ces TP sont des propositions et peut être adapté en fonction des ressources disponibles.

Il est important de respecter les normes de sécurité lors de la manipulation des produits chimiques.

L'analyse des résultats nécessite des connaissances en chimie et en science des matériaux.



Conclusion général

Les différents travaux pratiques réalisés au cours de cette étude ont permis d'approfondir la compréhension du comportement du béton face à des conditions environnementales agressives. À travers les essais de perméabilité, d'absorption et de porosité, il a été mis en évidence que la microstructure du béton et notamment la quantité et la connectivité de ses pores joue un rôle déterminant dans sa durabilité.

En effet, un béton peu poreux et faiblement perméable limite la pénétration des agents agressifs tels que l'eau, les acides, les sulfates et surtout les ions chlorure, principaux responsables de la corrosion des armatures. L'absorption capillaire est également un indicateur clé de la facilité avec laquelle ces agents peuvent s'introduire dans la matrice cimentaire. Plus cette absorption est élevée, plus le béton est vulnérable.

Les TP sur les attaques chimiques (par les acides, les sulfates ou l'eau de mer) ont démontré que ces milieux altèrent progressivement les propriétés physiques et mécaniques du béton. Ces dégradations se traduisent par une perte de masse, l'apparition de fissures, d'efflorescences, voire de désagrégation superficielle, en fonction de l'agressivité du milieu.

Concernant l'attaque par les chlorures, les résultats confirment que ceux-ci pénètrent facilement dans les bétons poreux ou mal protégés, atteignant rapidement les armatures et provoquant leur corrosion. Ce phénomène fragilise la structure interne, réduit la durée de vie de l'ouvrage et peut conduire à des pathologies structurelles graves.

En conclusion, ces TP mettent en lumière l'importance de choisir un béton formulé et mis en œuvre de manière adaptée aux contraintes d'usage et d'environnement. La maîtrise des propriétés intrinsèques du matériau, en particulier sa porosité, sa perméabilité et son taux d'absorption, est essentielle pour garantir la durabilité des structures en béton armé face aux agressions chimiques et climatiques.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

Espérons que ce modeste travail sera un guide et une référence pour l'ensemble des étudiants durant les séances des travaux pratiques.

Reference :

1. A. BETRON ; « Durabilité des matériaux cimentaires soumis aux acides organiques : cas particulier des effluents d'élevage » Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2004, 256 p.
2. E. ROZIERE , « Concept de Performance Equivalente appliqué aux bétons exposés à la lixiviation et aux attaques sulfatiques externes » ; (Thèse de doctorat -Ecole Centrale de Nantes -2007)
3. F.GHOMARI et A. Bendi-Ouis, « Travaux pratiques de matériaux de Construction » 2008 ; <http://fsi.univ-tlemcen.dz/cours-GHOMARI2.htm>
4. J. P OLIVIER : livre de " Durabilité des bétons " ; (A.NONAT :chapitre2 ; V. BAROGHELBOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A.CARLES-GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre 12). (Edition :Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
5. M. FABRICE DEBY « Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin » ; (Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier-2008).
6. N. AKONGO Grégoire et S. TCHOUMI « Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures » (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2ème grade -Université de Douala).
7. S.KASRI et R.MEFTAH ; « Etude de la diffusivité des ions chlorures comme indicateur de durabilité », Du diplôme de Master Académique 2019/2020, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA
8. Y. SENHADJI ; « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) » ; (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2006).

<http://www.ecocem.fr/index.php?p=technical&q=durability>.

<https://www.laboandco.com/c/loupe-binoculaire-stereomicroscope>



Annexe

I. Confection des éprouvettes :

Toutes les éprouvettes testées dans ce travail sont confectionnées en béton ordinaire, elles sont de différentes formes, soit cubique soit cylindriques, selon les appareils utilisées, les normes appliquées et le type d'essai.

I.1 Définition du béton ordinaire

Le béton ordinaire est un béton traditionnel utilisé pour les ouvrages en béton armé ou non armé ne présentant pas de conditions d'exposition extrêmes. Il est formulé pour satisfaire aux exigences usuelles de résistance mécanique, de mise en œuvre et de durabilité.

I.2 Objectifs de performance

- Classe de résistance : C25/30
- Consistance : S2 ou S3 (ouvrabilité moyenne à fluide)
- Durée d'ouvrabilité : ≥ 1 heure
- Durabilité : conforme aux exigences des normes NF EN 206/CN

I.3 Constituants du béton ordinaire

- Ciment : CEM II/A 42.5 N (couramment utilisé)
- Sable : 0/4 mm
- Gravillons : 4/12.5 mm ou 8/16 mm
- Eau : eau potable (conforme EN 1008)
- Adjuvant (*facultatif mais recommandé*) : plastifiant (pour améliorer la mise en œuvre sans excès d'eau)



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériauxI.4 Formulation indicative (par m³)

Constituants	Dosage (kg/m ³)
Ciment (CEM II/A)	300 à 350
Eau	150 à 180
Sable 0/4	700 à 800
Gravillons 8/16	1000 à 1100
Plastifiant	1 % du poids du ciment (environ 3 kg)
Rapport E/C	0.45 à 0.55

I.5 Propriétés du béton frais

- Affaissement (cône d'Abrams) : 5 à 9 cm (classe S2/S3)
- Masse volumique : 2 350 à 2 450 kg/m³
- Temps de prise initiale : 2 à 4 heures selon température ambiante

I.6 Propriétés du béton durci (à 28 jours)

- Résistance caractéristique en compression : ≥ 30 MPa
- Résistance à la traction : 2.5 à 3.5 MPa
- Module d'élasticité : 30 GPa
- Durabilité : adaptée aux environnements courants (intérieurs secs ou abrités)

I.7 Recommandations d'usage

- Mélange mécanique recommandé pour homogénéité optimale
- Vibrage ou talochage pour éviter la ségrégation et garantir la compacité
- Cure du béton : maintenir humide au moins 7 jours après coulage
- Contrôles : essais d'éprouvettes à 7 et 28 jours pour vérifier la résistance



II. La verrerie en laboratoire

Voici une présentation des principaux types de verrerie de laboratoire, classés par fonction :

II.1. Verrerie de mesure

Utilisée pour mesurer précisément des volumes de liquides.

- Éprouvette graduée : cylindre vertical avec graduations, pour mesurer des volumes (précision moyenne).
- Pipette graduée ou jaugée : mesure précise de petits volumes, souvent utilisée avec une poire.
- Burette : utilisée dans les titrations pour délivrer avec précision des volumes variables.
- Fioles jaugées : pour préparer des solutions de concentration précise (volumes fixes).
- Tube à vide, tube de lavage, ampoule à décanter : pour manipuler et séparer des gaz ou des liquides non miscibles

II.2 Entretien

La verrerie doit être :

- Nettoyée rigoureusement après chaque utilisation.
- Manipulée avec précaution (sensible à la casse et aux chocs thermiques).
- Parfois chauffée doucement pour éviter les bris dus à une dilatation rapide.



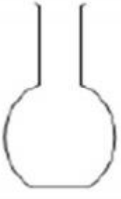



II.3 Matériaux

- Verre borosilicaté (type Pyrex) : résistant à la chaleur et aux produits chimiques.
- Quartz : résistant aux très hautes températures et aux UV.
- Plastique (polypropylène, PTFE) : utilisé pour les substances corrosives ou les besoins spécifiques.



Master II MGC

Travaux pratique de
durabilité des matériaux

					
Ballon à fond rond	Ballon à fond plat	Chauffe-ballon			
<i>Même utilisation que le ballon à fond plat mais peut, en plus, être intégré dans un chauffe-ballon. On ne peut les faire tenir droit sur un plan de travail à moins de les placer sur un support spécifique appelé "valet"</i>	<i>Le ballon est très utilisé pour conduire des réactions chimiques notamment en chimie organique. Il peut recevoir sur les différents cols d'autres équipements.</i>	<i>Appareil électrique qui permet de chauffer les ballons.</i>			

				
Mortier et pilon	Eprouvette graduée	Fliale jaugée		
<i>Pour faciliter le broyage de certains végétaux (feuilles de menthe par exemple) on peut ajouter des pincées de sable que l'on retirera ensuite par filtration.</i>	<i>Elle est utilisée pour mesurer des volumes de liquides avec une précision peu importante.</i>	<i>La fliale jaugée permet de mesurer un volume avec une bonne précision.</i>		
				
Tube à essais	Coupelle (verre de montre)	Cristallisateur		

Figure 1. La verrerie en laboratoire.