

# Sommaire

- **1. Introduction**
  - 1.1. Le contexte
  - 1.2. Les bétons dans la gestion des déchets radioactifs
    - 1.2.1. Rappel
    - 1.2.2. Les applications dans les bétons
    - 1.2.3. Les besoins en connaissances sur le couplage entre les propriétés chimiques, les propriétés de transport et les propriétés mécaniques des bétons
  - 1.3. Le programme du projet
  - 1.4. Les acteurs du projet
  - 1.5. Références
- **2. Etat de l'art**
- Frederic ADENOT - Bruno GERARD - Jean Michel TORRENTI
  - 2.1. La dégradation du béton : mécanismes mis en jeu
    - lors de l'altération d'un béton par l'eau
      - 2.1.1. Généralités
        - 2.1.2. Quelques résultats expérimentaux de dégradation dans une solution maintenue quasi-déminéralisée à pH 7
          - 2.1.2.1. Dégradation d'un pâte de ciment CPA-CEM 1
          - 2.1.2.2. Dégradation d'un mortier a base de ciment
        - 2.1.3. Action du pH en l'absence d'ions agressifs
        - 2.1.4. Action des différents ions et de la température de la solution agressive sur la cinétique d'altération
        - 2.1.5. Essais accélérés
          - 2.1.5.1. Altération par le nitrate d'ammonium
          - 2.1.5.2. Altération par application d'un champ électrique : l'essai LIFT
          - 2.1.5.3. Dégradation accélérée par perméation
      - 2.2. Modélisation de l'altération chimique des matrices cimentaires
        - 2.2.1. Les approches complètes de type géochimie
        - 2.2.2. Les approches simplifiées
      - 2.3. Influence de la fissuration sur la diffusion
        - 2.3.1. Fissuration et diffusion, résultats expérimentaux
        - 2.3.2. Un début de modélisation
      - 2.4. References
- **3. Construction du plan d'expériences**
- Bruno SOULIER
  - 3.1. Problématique
  - 3.2. Description du problème expérimental
    - 3.2.1. Lixiviation du matériau
    - 3.2.2. Fissuration du matériau

- 3.2.3. Formalisation du problème expérimental
- 3.3. Introduction à la méthode des plans d'expériences
  - 3.3.1. Modélisation de l'expérimentation
  - 3.3.2. Choix des expériences
- 3.4. Construction du plan d'expériences
  - 3.4.1. Option 1 dite " minimale "
  - 3.4.2. Option 2 dite " nominale "
- 3.5. Estimation des coefficients du modèle
- 3.6. Conclusion
- 3.7. Références
- **4. Expériences de fissuration**
- 4.1. Fissuration en compression
- Jean Michel TORRENTI - Claire TOGNAZZI
- 4.2. Fissuration en traction
- Bruno GERARD - Olivier DIDRY
  - 4.2.1. Description de la procédure d'essai
  - 4.2.2. Résultats
  - 4.2.3. Conclusion
- 4.3. Synthèse comparative des essais de fissuration
- 4.4. Références
- **5. Caractérisation de la fissuration et de ses effets**
- 5.1. Caractérisation par analyse d'images multi-échelles de la fissuration d'éprouvettes de mortier et de béton soumises à un chargement mécanique
- Abdelkrim AMMOUCHE - Denis BREYSSE
  - 5.1.1. Introduction
  - 5.1.2. Algorithme de traitement de la microfissuration
  - 5.1.3. Application a des éprouvettes soumises a un chargement mécanique
    - 5.1.3.1. Essais mécaniques - identification des échantillons
    - 5.1.3.2. Caractérisation de la microfissuration
    - 5.1.3.3. Caractérisation de la macrofissuration
  - 5.1.4. Conclusion
- 5.2. Perméabilité au gaz
- Claire TOGNAZZI - Myriam CARCASSES
  - 5.2.1. Méthode expérimentale
  - 5.2.2. Résultats et analyse
  - 5.2.3. Définition d'une ouverture de fissure équivalente
- 5.3. Remontées capillaires
- Daniel QUENARD - Dominique BERNARD
  - 5.3.1. Procédure expérimentale
  - 5.3.2. Résultats
  - 5.3.4. Modélisation de la remontée capillaire

- 5.3.4.1. Modèle classique d'interprétation des données expérimentales
  - 5.3.4.2. Analyse critique du modèle classique
  - 5.3.4.3. Propositions pour la construction d'un modèle interprétatif
  - 5.3.5. Conclusion
- 5.4. Variations de la perméabilité et comportement sous chargement déviatorique
- Frédéric SKOCZYLAS
  - 5.4.1. Introduction
  - 5.4.2. Principe des essais
  - 5.4.3. Résultats expérimentaux
    - 5.4.3.1. Comportement mécanique seul
    - 5.4.3.2. Comportement mécanique et hydraulique
  - 5.4.4. Conclusion et commentaires
- 5.5. Références
- **6. Expériences de dégradation et de diffusion**
- Claire TOGNAZZI - Olivier DIDRY - Myriam CARCASSES - Jean Pierre OLLIVIER - Frédéric ADENOT - Jean Michel TORRENTI
- 6.1. Expériences de dégradation
  - 6.1.1. Protocole de lixiviation simple
    - 6.1.2. Dégradation chimique dans une solution de nitrate d'ammonium 6 molaire
    - 6.1.3. Dégradation LIFT
    - 6.1.4. Comparaison des trois essais de dégradation
    - 6.1.5. Influence de la fissuration sur la dégradation
    - 6.1.6. Essais supplémentaires de dégradation au nitrate d'ammonium sur des pates de ciment entaillées
- 6.2. Résultats de diffusion
  - 6.2.1. Influence de la fissuration sur la diffusion
  - 6.2.2. Influence de la dégradation sur la diffusion
  - 6.2.3. Influences couplées de la fissuration et de la dégradation sur la diffusion
- 6.3. Références
- **7. Modélisation**
  - 7.1. Analyse du plan d'expériences
  - Bruno SOULIER
    - 7.1.1. Réponses mesurées
    - 7.1.2. Estimation des coefficients du modèle
      - 7.1.2.1. Modèle matriciel
      - 7.1.2.2. Estimation des effets moyens des facteurs et des interactions
      - 7.1.2.3. Répartition du plan

- 7.1.3. Précision sur l'estimation des coefficients du modèle
    - 7.1.3.1. Normalité du coefficient de diffusion
    - 7.1.3.2. Tests d'hypothèse sur l'estimation des coefficients du modèle
    - 7.1.3.3. Classification des actions
    - 7.1.4. Estimation de la précision du modèle
    - 7.1.4.1. Coefficient de corrélation
    - 7.1.4.2. Analyse de la variance
    - 7.1.4.3. Adéquation du modèle
    - 7.1.5. Conclusion
  - 7.2. Modélisation de la dégradation chimique
  - Claire TOGNAZZI - Marc MAINGUY - Frédéric ADENOT
  - Jean Michel TORRENTI
    - 7.2.1. Détermination des paramètres du modèle
    - 7.2.1.1. Détermination de la concentration de calcium en phase solide  $C_{ca}$  en fonction de la concentration de calcium en solution  $C_{ca}$
    - 7.2.1.2. Détermination de la porosité totale en fonction de la concentration en calcium en solution
    - 7.2.1.3. Détermination du coefficient de diffusion
    - 7.2.2. Résolution numérique par une méthode de volumes finis
    - 7.2.2.1. Application à la lixiviation simple de la pâte de ciment de rapport  $E/C=0,4$
    - 7.2.2.2. Application à la lixiviation accélérée de la pâte de ciment de rapport  $E/C=0,4$
  - 7.3. Modélisations de la diffusion dans des milieux poreux fissures et/ou dégradés chimiquement
    - Claire TOGNAZZI - Frédéric ADENOT - Bruno GERARD
    - Frédéric SAULIN - Jean Michel TORRENTI
    - 7.3.1. Modélisation de la diffusion à travers des milieux fissures
    - 7.3.3. Modélisation des influences couplées de la fissuration et de la dégradation sur la diffusion
    - 7.3.4. Etude de l'influence des granulats sur l'attaque par l'eau pure d'une pâte cimentaire fissurée
    - 7.3.4.1. Introduction
    - 7.3.4.2. Géométrie des éléments étudiés
    - 7.3.4.3. Résultats
    - 7.3.4.4. Conclusion
  - 7.4. Références
- **8. Couplage dégradation - diffusion**

- Alain SELLIER - Claire TOGNAZZI - Stéphane POYET - Bruno CAPRA  
- Jean Michel TORRENTI
  - 8.1. Modélisation de la dégradation mécanique du mortier et de ses effets sur les coefficients de diffusion
  - 8.2. Essais réalisés
  - 8.3. Loi de comportement mécanique : relations contraintes - déformations
    - 8.3.1. Relations contraintes - déformations élastiques
    - 8.3.2. Méthode de régularisation
    - 8.3.3. Expression des endommagements
    - 8.3.4. Expression des probabilités de fissuration
    - 8.3.5. Identification des paramètres
    - 8.3.6. Expression des déformations anélastiques dues aux compressions
      - 8.3.6.1. Fissuration diffuse
      - 8.3.6.2. Fissuration localisée
    - 8.3.7. Expressions des déformations anélastiques dues aux tractions
      - 8.3.7.1. Fissuration diffuse
      - 8.3.7.2. Fissuration localisée
  - 8.4. Déformations totales
  - 8.5. Loi d'évolution du coefficient de diffusion : relation diffusion - déformation
  - 8.6. Simulations numériques
    - 8.6.1. Récapitulatif des données numériques issues des essais de compression
    - 8.6.2. Simulations numériques des essais réalisés
    - 8.6.3. Autres simulations numériques
      - 8.6.3.1. Simulation d'un essai biaxial
      - 8.6.3.2. Objectivité de la méthode de régularisation et effet d'échelle
      - 8.6.3.3. Localisation mécanique en présence d'une dégradation par lixiviation
  - 8.7. Conclusion
  - 8.8. Références