

Résumé

Le patrimoine bâti est confronté à d'importants défis dans une société et un climat en évolution rapide. Les sels sont l'une des principales causes de l'altération de la pierre et sont sous-étudiés, bien qu'ils soient critiques pour les stratégies de gestion de la conservation. Les concentrations d'ions dans les matériaux poreux résultent de diverses sources telles que les eaux souterraines, les eaux de pluie, l'atmosphère, les contaminations biologiques ou internes du matériau. Au fil du temps, ces ions sont transportés vers la surface et déposés au front de séchage, où ils peuvent cristalliser sous diverses formes solides, se dilatant en volume et exerçant une pression sur leur environnement. Les cycles de cristallisation et de dissolution, ainsi que les (dé)hydrations, peuvent entraîner une détérioration du matériau. De plus, les mélanges de sels jouent un rôle significatif dans les processus exogènes en géomorphologie, en recherche planétaire et dans les processus industriels. Pourtant, la plupart des études se sont concentrées sur des systèmes binaires. Pour combler cette lacune de connaissances, cette thèse explore des mélanges d'ions représentatifs couramment identifiés dans les matériaux de pierre altérée, y compris le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le chlorure (Cl^-), le nitrate (NO_3^-) et le sulfate (SO_4^{2-}). Ces ions ont été analysés dans 11 412 échantillons de forage provenant de 338 sites historiques avec des matériaux de construction montrant des signes de dégradation par les sels. Cet ensemble de données étendu a permis un calcul plus précis de l'équilibre ionique, permettant l'identification correcte de la teneur en sel et une enquête plus approfondie sur le comportement des mélanges de sels courants grâce à la modélisation et à la vérification expérimentale.

L'un des principaux problèmes dans l'analyse des mélanges d'ions est l'interprétation du bilan ionique dérivé en raison des incertitudes analytiques et des ions non détectés, conduisant à un déséquilibre entre les anions et les cations. Ainsi, des corrections sont nécessaires pour atteindre la neutralité électrique pour une évaluation scientifiquement précise. Cette thèse a introduit des améliorations méthodologiques dans les calculs de bilan ionique, permettant une interprétation plus précise des mélanges de sels disponibles. L'ensemble complet des données et la méthode optimisée de calcul du bilan des charges ont été mis à disposition en open source pour promouvoir l'implication de la communauté scientifique. De plus, sur la base de cet ensemble de données, des compositions de mélanges couramment rencontrées ont été identifiées, améliorant notre compréhension des ions qui influencent le comportement des mélanges. Les données ioniques corrigées servent également d'entrée pour la modélisation thermodynamique, fournissant des insights sur le comportement des sels en utilisant le modèle ECOS/Runsalt, un outil pour analyser le comportement de cristallisation et de dissolution des mélanges de sels sous différentes conditions climatiques. Une terminologie spécifique a été recommandée, et des directives sur la façon d'utiliser le modèle et d'interpréter ses résultats ont été détaillées, en soulignant les limitations du modèle et en fournissant des solutions.

La recherche a identifié des mélanges de sels couramment présents dans le patrimoine architectural belge, améliorant ainsi la compréhension de leur comportement et de leur contribution à la détérioration des matériaux. Les résultats ont révélé que 92 % des échantillons contenaient au moins cinq ions, dont le sodium, le potassium, le nitrate, le chlorure, le magnésium et le calcium ou le sulfate. De plus, 14 sels communs ont été identifiés ainsi que quatre mélanges de sels fréquemment rencontrés. Leurs valeurs d'humidité relative critique pour la cristallisation/dissolution ont été identifiées, fournissant des informations importantes pour la recherche expérimentale sur l'altération de la pierre et la compréhension de la modélisation et des processus d'altération par les sels dans des conditions climatiques changeantes. De plus, des techniques analytiques combinées innovantes telles que la microscopie électronique à balayage environnemental (ESEM), la sorption de vapeur dynamique (DVS), la spectroscopie Raman, la diffraction des rayons X (XRD) et des micrographies en accéléré

ont permis une analyse détaillée des cinétiques de cristallisation des sels sous une humidité relative changeante. Les cinétiques de cristallisation des mélanges de sels dans diverses conditions ont été analysées au fil du temps, montrant les effets de l'humidité relative et de la composition du mélange sur le comportement de cristallisation et de dissolution, et établissant une corrélation entre les cinétiques et le taux de changement de l'humidité relative. Ces découvertes ont été liées aux résultats du modèle thermodynamique et ont été confirmées en utilisant diverses techniques analytiques.

La combinaison des résultats et des nouvelles techniques apporte des contributions significatives pour déterminer les changements de phase au fil du temps sous différentes conditions climatiques réalistes et pour la compréhension globale des processus de cristallisation des sels. De plus, une comparaison entre les prédictions modélisées et les résultats expérimentaux a validé l'efficacité du modèle ECOS/Runsalt et a mis en évidence des écueils qui améliorent la fiabilité dans la prédiction du comportement des sels. Les résultats globaux ont fourni de nouvelles perspectives sur les processus d'altération liés aux sels, y compris l'identification des valeurs d'humidité relative critique et des temps de cristallisation/dissolution pour les sels et mélanges fréquemment rencontrés, informant les efforts de conservation. La recherche fournit des implications spécifiques pour la conservation du patrimoine bâti en suggérant des stratégies de gestion ciblées basées sur des conditions environnementales et matérielles spécifiques. Les découvertes sont cruciales pour la préservation du patrimoine bâti et la compréhension des mécanismes de dépôt et de dissolution des sels en général.