



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Résistance à l'altération des granulats et des roches

**Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen und
Gesteinen**

Résistance to weathering of aggregates and rocks

Bureau d'expertises minéralogiques et pétrographiques
François Röthlisberger, Dr. rer. nat. minéralogiste- pétrographe

**Ecole polytechnique fédérale de Lausanne – Laboratoire de
Mécanique des Roches LMR.**
Jean-François Mathier, géologue diplômé

**Mandat de recherche VSS 2005/401 sur demande de l'Association
Suisse des Professionnels de la Route (VSS)**

Octobre 2013

1425

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Résistance à l'altération des granulats et des roches

**Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen und
Gesteinen**

Resistance to Weathering of Aggregates and Rocks

Bureau d'expertises minéralogiques et pétrographiques
Bureau d'expertises minéralogiques et pétrographiques
François Röthlisberger, Dr. rer. nat. minéralogiste- pétrographe

**Ecole polytechnique fédérale de Lausanne – Laboratoire de Mécanique
des Roches LMR.**
Jean-François Mathier, géologue diplômé

**Mandat de recherche VSS 2005/401 sur demande de l'Association
Suisse des Professionnels de la Route (VSS)**
Aaa bbb ccc ddd

Impressum

Service de recherche et équipe de projet

Direction du projet
François Röthlisberger

Membres
Jean-François Mathier

Commission d'experts responsable

Commissions d'experts 4.01 : Granulats minéraux

Commission de suivi

Président
Bernard Streiff, Carrières d'Arvel S.A.

Membres
Jürg Daepfen, SBB Infrastruktur - Ingenieurbau - Geotechnik
Jean-Louis Amiguet, Geotest S.A.
Guido Frenzer, Marti AG Solothurn
Jean-Gabriel Hammerschlag, Holcim S.A.
Jean-Louis Cuénoud, Colas Suisse S.A.
Christoph Bürgi, IMP Bautest AG

Cofinancement du mandat de recherche

Chemins de fer fédéraux - CFF

Auteur de la demande

Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4	
Résumé	7	
Zusammenfassung	8	
Summary	9	
1	Introduction	10
1.1	Problématique	10
1.1.1	Utilité de l'essai de durabilité	10
1.1.2	Base de la normalisation suisse	10
1.2	Normalisation CEN	11
1.2.1	Domaines d'applications	11
1.2.2	Normes CEN concernant la durabilité	12
1.2.3	Essais de durabilité	12
1.2.4	Modes opératoires des essais CEN de durabilité	13
1.2.5	Méthodes d'interprétation des essais de durabilité CEN	14
1.3	Lacunes des différentes méthodes	15
1.3.1	Absorption d'eau	15
1.3.2	Cycles de gel-dégel	15
1.3.3	Sulfate de magnésium	15
1.3.4	Essai de cristallisation au sulfate de sodium selon TC 246	16
1.4	Justification de la recherche	16
2	Méthodologie	18
2.1	Objectif du projet de recherche	18
2.2	Mandat	18
2.3	Programme	18
2.4	Description de l'essai de Quervain	19
3	Résultats	22
3.1	Recherche d'une méthode	22
3.1.1	Considérations théoriques	22
3.1.2	Choix du sel	22
3.1.3	Principes théoriques de l'essai	24
3.1.4	Propriétés des sels de sulfate de sodium	25
3.1.5	Phénoménologie de l'essai	25
4	Essais exploratoires	27
5	Recherche d'une méthode d'automatisation	28
5.1	Recherche d'une méthode d'automatisation de l'essai	28
5.2	Dispositif final	30
5.3	Développement de portes-éprouvettes	31
6	Essais préliminaires	33
6.1	Cycles de température	33
6.2	Paramètre de température maximale	35
6.3	Paramètre de température minimale	35
6.4	Courbes de solubilité	35
6.5	Concentration en Na ₂ SO ₄	36
6.6	Pression induite par la cristallisation	36
6.7	Conditions d'essai	36
7	Critères pour une base de corrélation	37
7.1	Résumé des résultats de la recherche de 1951	37
7.2	Lithologies examinées	38

8	Essai de gel-dégel.....	39
9	Essais de cristallisation selon de Quervain	40
10	Essai de cristallisation selon EN 12370.....	47
11	Nouvelle méthode	48
11.1	Essais sur éprouvettes cylindriques	48
11.1.1	Conditions d'essai	48
11.2	Effet de la concentration	48
11.3	Effets sur différentes lithologies	48
11.4	Adaptation des paramètres à la phase métastable	50
11.4.1	Conditions d'essai	50
12	Tests sur granulats avec la nouvelle méthode	53
12.1	Gravillons	53
12.2	Ballasts	54
13	Exemples d'altération in situ	57
13.1	Gravillons	60
13.2	Ballast pour voies ferrées	60
14	Interprétation.....	62
14.1	Comparaison des trois méthodes sur la molasse bernoise	62
14.2	Adéquation entre nouvelle méthode et essai de Quervain.....	63
14.2.1	Adaptation des conditions d'essai à la phase métastable	65
14.3	Origine probable des divergences	66
14.4	Comparaisons des méthodes.....	66
15	Conclusions	67
15.1	Problème rencontré	67
15.2	Méthodes d'essais	67
15.3	Uniformisation des méthodes d'essais	67
15.4	Contrôle des paramètres d'essais	67
16	Propositions	68
16.1	Normalisation CEN	68
16.2	Essai de cristallisation	68
16.3	Nouvelle méthode	68
16.4	Considérations générales.....	69
16.5	Méthodique envisageable pour une norme suisse.....	69
	Annexes.....	70
	Abréviations	76
	Bibliographie	77
	Clôture du projet.....	79
	Index des rapports de recherche en matière de route	82
	Remerciements	84

Résumé

Les essais de résistance à l'altération ne sont pas les mêmes pour les roches ornementales et les granulats dans la normalisation européenne. Les essais de résistance à l'altération nécessitent beaucoup de temps et de travail. C'est particulièrement le cas pour l'essai de gel-dégel qui avec 240 cycles peut durer environ une année.

Le premier but de cette recherche était de trouver une méthode automatisée pour tester la durabilité des roches et des granulats. Le second objectif était de mettre au point la méthode pour les roches ornementales, les granulats ainsi que les enrochements. Le troisième but était d'établir une corrélation avec l'essai suisse selon F. de Quervain. Le quatrième et dernier but était de proposer une méthode uniforme pour tester les granulats et les roches ornementales. Les travaux préliminaires permettaient de concevoir une méthode automatisée.

Une méthode automatisée basée sur la solubilité du sulfate de sodium a été développée dans cette recherche. La présence d'une phase instable a fortement compliqué l'essai. Une phase métastable composée de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ a été découverte par Hamilton et al en 2008 qui correspond à la phase instable observée dans cette étude. Les conditions d'essai ont été adaptées à cette phase métastable. Il s'agit surtout des conditions de plage de température qui doit se situer entre -4°C et $+30^\circ\text{C}$. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner la méthode.

Le principe fondamental de ce nouvel essai repose sur la variation de solubilité du sulfate de sodium en fonction de la température.

La méthode automatisée développée au cours de cette étude est composée d'un thermocryostat, d'un réacteur externe, d'un mélangeur ainsi que de portes-éprouvettes spécifiques aux différents types d'éprouvettes.

Les essais réalisés dans cette étude ont montré qu'une corrélation entre l'essai de gel-dégel et cette nouvelle méthode pouvait être possible, mais des divergences importantes ont été constatées avec l'essai de cristallisation selon F. de Quervain. Une corrélation simple avec l'essai selon F. de Quervain n'apparaît pas possible avec cette nouvelle méthode.

Des essais de résistance à la compression uniaxiale sur des éprouvettes cylindriques ayant subi des cycles de gel-dégel, des cycles de cristallisation de sulfate de sodium et de cycles selon cette nouvelle méthode ont montré une perte de résistance linéaire en fonction du nombre de cycles. Aucune perte significative de résistance n'a été constatée pour les roches durables.

Des essais de cristallisation selon le mode opératoire de l'EN 12370 ont montré que cet essai n'était pas adapté à pour certains grès molassiques utilisés comme roches ornementales en Suisse.

Des tests ont été effectués sur des gravillons et des ballasts de différentes compositions pétrographiques. Les roches gélives ont montré de fortes dégradations avec la nouvelle méthode après avoir subi l'essai.

En résumé, la méthode développée dans cette recherche permet une automatisation de l'essai de résistance aux intempéries et permet un gain de temps très significatif par rapport aux méthodes traditionnelles.

Zusammenfassung

Die Bestimmung der Beständigkeit wird mit unterschiedlichen Prüfungen für Natursteine und Gesteinskörnungen in der europäischen Normung durchgeführt. Die Verfahren für die Untersuchung der Witterungsbeständigkeit erfordern sehr viel Zeit und Arbeit. Dies ist insbesondere der Fall für die Frost-Tau-Prüfung, die mit 240 Zyklen bis zu einem Jahr dauern kann.

Das erste Ziel dieser Forschung bestand darin, eine automatisierte Methode zu finden, um die Dauerhaftigkeit von Gesteinen und Gesteinskörnungen zu prüfen. Die zweite Zielsetzung bestand darin, die Methode für die Ornamentsteine, die Gesteinskörnungen und die Wasserbausteine zu entwickeln. Das dritte Ziel bestand darin, eine Korrelation mit dem Schweizer Verfahren nach F. de Quervain aufzustellen. Das vierte und letzte Ziel bestand darin, eine einheitliche Methode vorzuschlagen, um die Gesteinskörnungen und die Ornamentsteine zu testen. Die Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass die Entwicklung einer automatisierten Methode denkbar wäre.

In dieser Forschung ist eine automatisierte Prüfmethode entwickelt worden, die auf der Löslichkeit des Natriumsulfates basiert ist. Das Auftreten einer instabilen Phase hat die Methode viel komplexer gemacht. Eine aus $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ zusammengesetzte metastabile Phase ist durch Hamilton und Al im Jahre 2008 bestimmt worden. Diese metastabile Phase entspricht der unbeständigen Phase, welche in dieser Studie beobachtet wurde. Die Versuchsbedingungen sind an diese metastabile Phase angepasst worden. Es handelt sich vor allem um die Temperaturbedingungen, welche zwischen -4°C und $+30^\circ\text{C}$ liegen müssen. Zusätzliche Forschungsarbeiten sind allerdings notwendig, um die Methode zu verfeinern.

Das Grundprinzip dieses neuen Versuchs beruht auf der temperaturabhängigen Löslichkeit des Natriumsulfates.

Die neu entwickelte automatisierte Methode besteht aus einem Thermokryostat, aus einem externen Reaktor, aus einem Mischer sowie aus spezifischen Prüfkörperträgern und Behältern für Gesteinskörnungen und für zylindrische Prüfkörper.

Die in dieser Studie durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass eine Korrelation zwischen Frost-Tau und dieser neuen Methode möglich sein konnte. Signifikante Diskrepanzen mit dem Kristallisationsversuch nach F. de Quervain wurden festgestellt. Eine einfache Korrelation zwischen dem Kristallisierversuch nach F. de Quervain und dieser neuen Methode erscheint nicht möglich.

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit an zylindrischen Prüfkörpern, die Frost-Tau-Zyklen, Kristallisierzyklen mit dem Natriumsulfat und mit dieser neuen Methode unterzogen wurden, hat gezeigt, dass ein linearer Widerstandsverlust mit der Anzahl Zyklen auftritt. Kein signifikanter Widerstandsverlust ist für die beständigen Lithologien festgestellt worden.

Kristallisierversuche an Schweizer Ornamentsteinen gemäss der EN 12370 haben gezeigt, dass dieser Versuch für Molassesandsteine nicht geeignet ist.

Versuche mit dieser neuen Methode an Gesteinskörnern und an Gleisschotter unterschiedlicher petrographischer Zusammensetzungen wurden durchgeführt. Die unbeständigen Lithologien haben starke Zersetzungserscheinungen nach dem Test gezeigt.

Die in dieser Forschung entwickelte Methode ermöglicht eine automatisierte Prüfung der Beständigkeit und einen signifikanten Zeitgewinn im Vergleich zu den üblichen Tests.

Summary

Tests for resistance to weathering are not the same for ornamental rocks and aggregates in European standardization. Weathering resistance tests require much time and work. This is particularly the case for the freeze-thaw-test, which consists of 240 cycles and can last about a year

The first goal of this research was to find an automated method to test the durability of rocks and aggregates. The second objective was to develop the method for ornamental rocks, aggregates and armourstones. The third goal was to establish a correlation with the Swiss test according to F. de Quervain. The fourth and final purpose was to propose a uniform method to test aggregates and ornamental rocks. Preliminary work suggested that the development of an automated method was possible.

An automated method based on the solubility of sodium sulfate was developed in this research. The presence of an unstable phase was a key difficulty to establish the testing method. A metastable phase composed of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ was discovered by Hamilton et al in 2008 that corresponds to the unstable phase observed in this study. The test conditions were adapted to this metastable phase. It is especially the conditions for temperature range which must be between $-4\text{ }^\circ\text{C}$ and $+30\text{ }^\circ\text{C}$. Additional research and further developments are needed to refine the method.

The fundamental principle of this new testing method is based on the variation of solubility of sodium sulfate as a function of the temperature.

The automated method developed in this study uses a thermocryostat, an external reactor, a mixer as well as racks to support the different types of samples and containers for small aggregates.

The tests conducted in this study showed that a correlation between the freeze-thaw test and this new method could be possible. On the other hand, significant differences were observed with the test according to F. de Quervain. An easy or simple correlation with the test according to F. de Quervain does not appear to be possible with this new method.

Uniaxial compression tests on cylindrical samples subjected to freeze-thaw cycles, cycles of crystallization of sodium sulfate according to F. de Quervain and of cycles of crystallization with this new method showed linear strength loss depending on the number of cycles. No significant loss of mechanical resistance is observed for inalterable rocks.

Test of crystallization according to EN 12370 showed that this test was not suitable for testing some molassic sandstone used as ornamental rocks in Switzerland. Tests were conducted on grit and ballasts of different petrographic composition.

Aggregates and railway ballasts composed of frost-sensitive rocks showed strong damages after being tested with the new method.

In summary, this new procedure for testing the weathering resistance developed in this work provides a fully automated testing method of resistance to weathering and saves a very significant time compared to traditional methods.

1 Introduction

1.1 Problématique

1.1.1 Utilité de l'essai de durabilité

La durabilité des roches et des granulats utilisés en génie civil est un facteur important dans les conditions climatiques de la Suisse pour les matériaux exposés aux intempéries tels que les enrobés bitumineux, les bétons hydrauliques, les ballasts pour voies ferrées, les enrochements ainsi que les roches ornementales. La disponibilité des réseaux routiers et ferrés dépend de la durée de vie des infrastructures. Les dégâts prématurés dus aux effets des intempéries ont généralement des conséquences techniques et logistiques importantes avec des répercussions financières considérables.

La résistance à l'action des intempéries est en outre un paramètre de stabilité en géotechnique. La susceptibilité aux effets des intempéries peut être un facteur de risque.

1.1.2 Base de la normalisation suisse

Avant l'introduction des normes CEN, la normalisation suisse était essentiellement basée sur les travaux de Francis de Quervain publiés par la commission géotechnique Suisse. Il s'agit d'une part d'observations réalisées sur des objets construits (De Quervain, F., 1945 : Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie: - Teil 1: Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz) et d'autre part d'essais de laboratoire (De Quervain, F., 1951 : Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie: - Teil 2: - Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethodik über die Wetterbeständigkeit).

La méthode d'essai mise au point par F. De Quervain pour les roches ornementales a été testée sur les ballasts pour voies ferrées lors de plusieurs études, dont (De Quervain, F. und Jenny, 1953 : schweizerische geotechnische Kommission. Untersuchungen zum Verhalten von Schottersteinen gegenüber Witterungseinflüssen. Beurteilung der Beständigkeit von Kieselkalkproben anhand von Tränkversuchen in Natriumsulfatlösung) et (De Quervain, F. und Jenny, 1953 : schweizerische geotechnische Kommission. Untersuchungen zum Verhalten von Schottersteinen gegenüber Witterungseinflüssen. Beurteilung der Beständigkeit von Glaukonitsandstein der Gamserschichten vom Rheintal anhand von Tränkversuchen in Natriumsulfatlösung).

Ces essais étaient appliqués systématiquement aux ballasts et ont fait l'objet d'un rapport final pour les Chemins de Fer Fédéraux (De Quervain, F., 1955 : zusammenfassender Bericht über die geologische und petrographische Untersuchung der Gesteinsmaterialien für Bahnschotter. Schweizerische Bundesbahnen. Bauabteilung der Generaldirektion. Sektion für Oberbau. Bericht EMPA Nr. 9922).

Normalisation suisse avant l'introduction des normes CEN

La méthode d'essai au sulfate de sodium pour les ballasts a été normalisée par les Chemins de fer fédéraux Suisses (CFF) en 1963 (Chemins de fer Fédéraux Suisses. Spécification technique pour la fourniture de ballast et de gravillon de carrière). Cette méthode a fait l'objet d'une révision dans le règlement CFF R 211.1 "infrastructure et ballast" de 1993 et de 1997).

L'essai au sulfate de sodium n'a jamais été normalisé en Suisse pour les matériaux utilisés dans la construction routière. Pour les granulats pour revêtements bitumineux, c'est l'examen pétrographique de la norme SN 670 130 (VSS : 1998, Sables, graviers, gravillons et pierres concassées pour revêtements. Exigences de qualité) qui a été utilisé pour estimer la durabilité des granulats.

L'essai selon F. de Quervain est le seul essai qui propose une grille d'interprétation basée sur des observations effectuées in situ.

1.2 Normalisation CEN

1.2.1 Domaines d'applications

La résistance aux effets des intempéries concerne les granulats et les pierres ornementales (produits en pierre naturelle, éléments de maçonnerie en pierre naturelle, unités de pavage et bordures de trottoir en pierre naturelle).

Les exigences et normes d'essais dépendent du CEN/TC 125 pour les éléments de maçonnerie en pierre naturelle, du CEN/TC 154 pour les granulats, du CEN/TC 178 pour les unités de pavage et bordures de trottoir et du CEN/TC 246 pour les produits en pierre naturelle.

En Suisse les normes granulats sont sous l'égide de l'association suisse des professionnels de la route (VSS) et les normes qui concernent les pierres ornementales sous l'égide de la société suisse des ingénieurs et architectes (SIA).

Les normes potentiellement concernées par la durabilité sont en fonction des CEN/TC, du numéro et de l'année d'introduction :

CEN/TC 125 “Maçonnerie” - SIA

EN 771-6 : 2005. SIA 266.016. Spécification pour éléments de maçonnerie - Partie 6: Éléments de maçonnerie en pierre naturelle.

CEN/TC 154 “Granulats” - VSS

EN 12620 : 2008. SN 670102. Granulats pour béton.

EN 13043 : 2004. SN 670103. Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aéroports et d'autres zones de circulation.

EN 13139 : 2002. SN 670101. Granulats pour mortiers.

EN 13242 : 2007. SN 670119. Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et la construction routière.

EN 13450 : 2002. SN 670110. Granulats pour ballasts de voies ferrées.

EN 13383-1 : 2002. Enrochements Partie 1 : Spécifications.

CEN/TC 178 “Unités de pavage et bordures de trottoir” - VSS et SIA

EN 1341 : 2001. VSS SN 640 484-1 et SIA 246.501. Si sel SIA 262/1. Dalles de pierre naturelles pour le pavage extérieur. Exigences et méthodes d'essai.

EN 1342 : 2000. VSS SN 640484-2 et SIA 246.502. Pavés de pierre naturelle pour le pavage extérieur – Exigences et méthodes d'essai.

EN 1343 : 2000. VSS SN 640484-3 et SIA 246.503. Bordures de pierre naturelle pour le pavage extérieur – Exigences et méthodes d'essai.

CEN/TC 246 “Pierres naturelles” - SIA

EN 1469 : 2004. SIA 246.303. Produits en pierre naturelle - Revêtement mural – Exigences.

EN 12057 : 2004. SIA 246.304. Produits en pierre naturelle - Plaquettes modulaires - Exigences.

EN 12058 : 2004. SIA 246.305. Produits en pierre naturelle - Dalles de revêtement de sols et d'escaliers – Exigences.

EN 12059 : 2008. SIA 246.306. Produits en pierre naturelle - Pierre de taille – Exigences.

1.2.2 Normes CEN concernant la durabilité

Normes d'essai en vigueur pour les granulats lors du lancement du projet :

- EN 1097-6 : 2000. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. Annexe B.
- EN 1367-1 : 1999. Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats. Partie 1 : Détermination de la résistance au gel-dégel.
- EN 1367-2 : 1997. Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats. Partie 2 : Essai au sulfate de magnésium.
- EN 13383-2 : 2004. Enrochements Partie 2 : Méthodes d'essais.

Normes d'essai en vigueur pour les pierres naturelles et les éléments de maçonnerie:

- EN 12370 : 1999. Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance par un essai de cristallisation des sels.
- EN 12371 : 2001. Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au gel.

Normes d'essai en vigueur pour les pierres naturelles :

- EN 1341 à 1343 : 2001. Dalles, pavés et bordures pour le pavage extérieur.

Nouvelles normes d'essais CEN depuis le lancement du projet

Deux normes ont été révisées depuis le lancement du projet :

- EN 1367-1 (2007) : Détermination de la résistance au gel-dégel.
- EN 12371 (2010) : Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au gel

Une nouvelle norme a été publiée :

- EN 1367-6 (2008) : Essai pour déterminer les propriétés thermiques des granulats – Résistance au gel-dégel au contact du sel.

1.2.3 Essais de durabilité

La normalisation CEN pour les granulats (TC 154) comporte cinq types d'essais indicatifs pour évaluer la durabilité :

- Essai d'absorption d'eau par immersion dans l'eau
- Essai pétrographique
- Essai de gel-dégel
- Essai de gel-dégel en présence de sel (NaCl)
- Essai de cristallisation au sulfate de magnésium (MgSO₄)

La normalisation CEN pour la maçonnerie (TC 125), les unités de pavage et bordures de trottoir (TC 178) et les pierres naturelles (TC 246) comporte deux types d'essais indicatifs pour évaluer la durabilité :

- Essai de gel-dégel
- Essai de cristallisation au sulfate de sodium (Na₂SO₄)

1.2.4 Modes opératoires des essais CEN de durabilité

Les modes opératoires ne sont pas équivalents entre les différents TC du CEN.

Absorption d'eau selon TC 154

L'essai est décrit dans l'EN 1097-6, Annexe B et l'EN 13383-2. Il se pratique sur un fragment de roche de 150g au minimum et de 450g au maximum pour les enrochements ou sur 10 grains de ballast homogènes. L'absorption d'eau correspond à la différence de masse après immersion complète dans l'eau jusqu'à masse constante et la masse après séchage à 110°C mesurée après immersion.

Le mode opératoire comporte une erreur fondamentale : le fait d'immerger complètement et immédiatement les éprouvettes dans l'eau peut emprisonner l'air contenu dans les pores au centre des éprouvettes et fausser les résultats. L'immersion doit impérativement être effectuée lentement et par paliers successifs tels que décrits dans les normes EN 1341 à 1343 et EN 12371.

Absorption d'eau selon TC 178

L'essai décrit dans la norme se pratique sur des cylindres, des cubes ou des prismes dont le volume minimal doit être au moins de 25 cm³. L'absorption d'eau correspond à la différence de masse entre les éprouvettes préalablement séchées à (70 ±5) °C jusqu'à masse constante et les éprouvettes immergées progressivement par paliers jusqu'à immersion complète et masse constante. Ce mode opératoire est correct et correspond au niveau des connaissances.

Essai pétrographique selon TC 154,

L'examen pétrographique est insuffisant voire erroné dans les EN. Il n'est que partiellement, voire pas applicable en Suisse pour certaines roches.

Essai de gel-dégel selon TC 154

L'essai est décrit dans l'EN 1367-1 et l'EN 13383. Il consiste à imbiber d'eau à la pression atmosphérique, des éprouvettes (classe granulaire, grains de ballast, fragments d'enrochements, etc.) puis de les soumettre à des cycles de gel-dégel (10 cycles pour les granulats, 20 cycles pour le ballast pour chemins de fer et 25 cycles pour les enrochements). Chaque cycle comporte un refroidissement à -17.5 °C sous l'eau puis un dégel dans l'eau à une température de 20°C. A la fin des cycles de gel-dégel, les granulats sont examinés pour rechercher d'éventuels changements (formations de fissures, désagrégation, etc.) et les pertes de masse sont déterminées en pourcentage de la masse initiale. Les éprouvettes peuvent être soumises à des essais de modification de résistance.

Essai de gel-dégel selon TC 178

L'essai est décrit dans les normes EN 1341 à 1343. Le mode opératoire est relativement similaire à l'essai de gel-dégel selon le TC 154. Il diffère toutefois en ce qui concerne les phases de gel et de dégel ainsi que dans la méthode d'évaluation. Deux critères sont retenus pour évaluer l'action des cycles de gel-dégel sur les éprouvettes : le contrôle visuel (fissuration, cassure, écaillage, copeaux) et la différence entre le volume apparent avant et après l'essai pour déterminer les pertes en matériau dues aux détériorations subies par les éprouvettes. Le nombre de cycles n'est pas fixé.

Essai de gel-dégel selon TC 125 et TC 246

L'essai de gel-dégel s'effectue selon l'EN 12371. Le mode opératoire est similaire à celui du TC 178. Il ne diffère que par les phases de gel-dégel et la température minimale de l'essai qui est de -12°C. Deux critères sont utilisés pour évaluer l'action des cycles de gel-dégel sur les éprouvettes : - l'examen visuel (fissuration, cassure, écaillage, copeaux) et la différence entre le volume apparent avant et après l'essai pour déterminer les pertes en matériau dues aux détériorations subies par les éprouvettes. Le nombre de cycles n'est pas fixé (14, 56, 84, 140, 168, etc.).

Essai de gel-dégel au contact du sel selon TC 154

L'essai est décrit dans la norme EN 1367-6. Il diffère de l'essai de gel-dégel de l'EN 1367-1 par l'adjonction de 1% de Chlorure de Sodium pour obtenir une solution saline.

Essai au sulfate de magnésium selon TC 154

Les éprouvettes sont soumises à des cycles (5 pour les granulats, 10 pour le ballast CFF) d'immersion dans une solution saturée de sulfate de magnésium suivi d'un étuvage à (110 ± 5) °C. L'échantillon de laboratoire est ainsi soumis aux contraintes de la cristallisation et de la réhydratation du sulfate de magnésium dans les pores du granulat. La dégradation provoquée par les effets d'éclatement est mesurée par les pertes de masse en pourcentage de la masse sèche initiale.

Détermination de la résistance par un essai de cristallisation selon TC 246

Les éprouvettes sont soumises à 15 cycles d'immersion dans une solution à 14% de sulfate de sodium suivi d'un étuvage à (105 ± 5) °C. Les résultats sont exprimés en variation de masse en pourcentage de la masse sèche initiale.

1.2.5 Méthodes d'interprétation des essais de durabilité CEN

L'expérience est limitée pour l'utilisation de ces essais d'évaluation de durabilité. Des limites générales précises ne sont pas données, car ils n'ont pas fait leurs preuves.

Pour les types pétrographiques : les schiste, micaschiste, phyllite, craie, marne, argile schisteuse, basalte poreux frais ou grains faiblement cimentés par des matériaux argileux sont considérés comme potentiellement gélifs.

Pour le coefficient d'absorption d'eau : si l'absorption d'eau est ≤ 0.5 % le matériel doit être considéré comme résistant aux attaques du gel-dégel.

Catégories pour les granulats

Gel-dégel Pourcentage de perte de masse ^a	Catégorie <i>F</i>
≤ 1	F_1
≤ 2	F_2
≤ 4	F_4
> 4	$F_{\text{Déclaré}}$
Non requis	F_{NR}

Valeur de sulfate de magnésium Pourcentage de perte de masse	Catégorie <i>MS</i>
≤ 18	MS_{18}
≤ 25	MS_{25}
≤ 35	MS_{35}
> 35	$MS_{\text{Déclaré}}$
Non requis	MS_{NR}

Catégories pour les enrochements

Gel – dégel Perte de masse ou formation de fissure ouverte	Catégorie <i>FT</i>
Au plus un des morceaux d'enrochement initialement testés présente une perte de masse supérieure à 0.5% ou des fissures ouvertes, et aucun des morceaux testés en complément.	FT_A
Autre valeur déclarée par le producteur	$FT_{\text{déclarée}}$
Non requis	FT_{NR}

Résultats du test au sulfate de magnésium Pourcentage de perte de masse	Catégorie <i>MS</i>
≤ 25	MS_{25}
Autre valeur déclarée par le producteur	$MS_{\text{déclarée}}$
Non requis	MS_{NR}

Recommandations pour l'utilisation des granulats

Conditions environnementales	Climat		
	Méditerranéen	Atlantique	Continental ^a
Situation sans gel ou sèche	NR	NR	NR
Saturation partielle, pas de sel	NR	F_4 ou MS_{35}	F_2 ou MS_{25}
Saturation, pas de sel	NR	F_2 ou MS_{25}	F_1 ou MS_{18}
Sel (eau de mer ou couche de surface routière)	F_4 ou MS_{35}	F_2 ou MS_{25}	F_1 ou MS_{18}
Enduit superficiel sur aérodrome	F_2 ou MS_{25}	F_1 ou MS_{18}	F_1 ou MS_{18}

^a La catégorie Continentale pourrait également s'appliquer à l'Islande, certaines parties de la Scandinavie et aux régions montagneuses où les conditions météorologiques hivernales sont rudes.

1.3 Lacunes des différentes méthodes

1.3.1 Absorption d'eau

L'essai d'absorption d'eau est problématique pour certains types de roches telles que les sédiments présentant de fines couches ou lits marneux. L'absorption d'eau peut être très inférieure à 0.5% alors que ces roches sont fortement sensibles au gel-dégel. De telles roches se rencontrent dans plusieurs gisements en Suisse.

1.3.2 Cycles de gel-dégel

Granulats

Le nombre de cycles de gel-dégel proposé dans l'essai de gel-dégel pour les granulats est beaucoup trop faible pour les conditions climatiques de la Suisse (entre 10 et 20 cycles).

L'essai Los Angeles est trop imprécis pour mesurer des pertes de résistance aux contraintes mécaniques. La valeur mesurée de l'essai Los Angeles peut dépendre de la machine utilisée, de la forme du grain ainsi que de la composition pétrographique des échantillons. Ces paramètres ne sont pas pris en compte dans les normes granulats correspondantes.

Pierres naturelles

L'essai de gel-dégel pour les pierres ornementales apparaît plus réaliste. Le principal problème réside dans la durée de l'essai qui peut atteindre une année.

1.3.3 Sulfate de magnésium

L'essai au sulfate de magnésium défini dans la norme CEN est très problématique pour différentes raisons telles que :

L'heptahydrate du sulfate de magnésium (minéral Epsomite) n'est pas déshydraté à la température de 110°C. La déshydratation complète n'a lieu qu'à 200°C [Handbook of Chemistry and Physics].

L'état de déshydratation du sulfate de sodium n'est pas contrôlé dans la procédure de la norme, ce qui peut être une source d'erreur. Le $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ fond à 48.1°C en formant du $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ et une solution saturée. Entre 48.1 et 150°C différentes formes hydratées (tétrahydrate, pentahydrate) se forment, dépendant de la température et de l'humidité relative. C'est seulement à la température de 150°C qu'il se transforme en $MgSO_4 \cdot 1H_2O$ (Kieserite) [Handbook of Chemistry and Physics].

Le sulfate de magnésium anhydre (MgSO_4) ainsi que les formes partiellement hydratées sont instables et plus ou moins fortement hygroscopiques, ce qui implique une sensibilité aux variations de température et d'humidité relative. Ces paramètres ne sont pas contrôlés avec la procédure de la norme et peuvent être des sources d'erreurs. Il serait par exemple nécessaire de répartir les 10 kg de ballast dans plusieurs dessiccateurs dès la sortie de l'étuve pour assurer le contrôle de ce paramètre.

La durée de préparation pour la solution d'essai est d'environ 3 à 4 jours selon la norme. Dès que du matériel est en suspension, ce qui est très souvent le cas, la solution doit être remplacée ce qui prend à nouveau trois jours de préparation. La norme recommande de préparer une solution de réserve.

L'état de saturation peut dépendre de paramètres tels que la pression, la température, la présence de substances solubles et de particules en suspension. La saturation de la solution est donc difficile à réaliser et à contrôler.

Il est problématique de vérifier qu'il ne reste pas de très fins cristaux de sel solide en suspension dans la solution.

La densité de la solution doit être maintenue durant tout l'essai. Des particules détachées des éprouvettes peuvent modifier la densité de la solution.

L'essai est indifférencié. Par exemple pour le ballast pour voies ferrées 10 kg sont examinés sans distinction pétrographique. Si l'examen n'est pas réussi, il faut rechercher les raisons par un examen pétrographique détaillé, voire par un essai au sulfate de sodium selon la méthode de F. de Quervain, ce qui peut facilement durer une ½ année.

La quantité de sulfate de magnésium nécessaire aux deux examens prescrits pour chaque provenance de ballast est de presque 100 kg, car les solutions ne peuvent pas être utilisées plus d'une fois. Environ deux tonnes d'heptahydrate de magnésium seraient nécessaires pour tester la production de ballast CFF chaque année.

1.3.4 Essai de cristallisation au sulfate de sodium selon TC 246

L'essai est assez comparable à l'essai selon F. de Quervain. La solution est plus concentrée et le nombre de cycles est limité à 15 cycles. Seules les pertes de masse sont prises en considération. Les principales lacunes résident dans le fait que les types de dégradations ne sont pas pris en considération pour évaluer la résistance aux effets des intempéries et qu'aucune méthode d'interprétation des résultats n'est indiquée.

1.4 Justification de la recherche

Tous les essais actuellement disponibles pour déterminer la résistance aux intempéries des granulats et des roches présentent plusieurs problèmes majeurs :

La durée qui varie entre environ 1 mois et 1 année selon l'essai n'est pas en adéquation avec la pratique, en particulier pour le contrôle de la production de granulats. Des résultats en l'espace d'une semaine au maximum sont nécessaires pour permettre une intervention dans des délais acceptables en carrière, dans le dépôt ou sur le chantier. Il existe très peu de résultats, même pour les carrières qui sont en exploitation depuis longtemps, car la durée d'essai reste un handicap important.

Les travaux de manutention sont importants. Ils nécessitent la présence d'un opérateur durant les différentes phases du processus.

Complexité. L'essai au sulfate de magnésium est particulièrement délicat à réaliser.

Les essais européens n'indiquent pas de valeur de référence ou de modèle d'utilisation tels que ceux définis par F. de Quervain. Les formes d'altération des roches jouent un rôle prépondérant (particulièrement pour les gisements de roches utilisées en Suisse) pour l'appréciation de la durabilité en fonction des applications spécifiques

Pour la plupart des essais CEN, le nombre de cycles est trop faible pour permettre une différenciation selon les types de dégradation définis par F. de Quervain.

L'essai au sulfate de magnésium ne permet pas de simuler les formes de dégradations les plus fréquentes observées en Suisse. La corrélation avec les données de F. de Quer-

vain et celles des CFF serait très problématique, voire probablement impossible à réaliser, sauf peut-être pour l'essai de cristallisation au sulfate de sodium selon TC 246. La longue expérience en Suisse pourrait être perdue.

Il n'existe pas d'essai équivalent à l'essai de cristallisation selon F. de Quervain dans la normalisation européenne.

Il n'y a pas d'adéquation avec les études concernant la résistance aux intempéries des roches Suisses et les essais européens. La corrélation avec les essais européens est impossible à établir puisque les types pétrographiques ne sont pas différenciés dans les normes européennes.

En ce qui concerne les carrières, une seule méthodologie pour toutes les applications serait judicieuse et souhaitable.

L'essai selon F. de Quervain est mieux différencié que les essais européens, car il est pratiqué sur chaque type pétrographique. Des classes de dégradations ainsi qu'une échelle d'appréciation en fonction des zones d'expositions sont données. Toutefois des problèmes de pertinence par exemple pour les grès de type "Berner Sandstein" sont présents dans l'essai de F. de Quervain.

Des dommages dus au manque de résistance aux intempéries des granulats se sont produits avec des matériaux de carrière importés (fig. 5) ainsi qu'avec des gravillons provenant de gravières suisses. C'est la méconnaissance des propriétés de durabilité de certaines lithologies qui est à l'origine des dégradations prématurées constatées.

En cas de doute sur la résistance aux intempéries du matériel, un essai pertinent selon une procédure rapide et si possible simple serait avantageux pour la Suisse.

2 Méthodologie

2.1 Objectif du projet de recherche

L'objectif principal du projet est de développer une méthode d'essai automatisée et rapide pour caractériser les formes d'altérations courantes des roches et des granulats telles que l'effritement, la fissuration, l'altération en pelure d'oignon, l'écaillage, etc..

L'objectif secondaire est d'établir l'adéquation entre les travaux de F. de Quervain concernant l'altérabilité des roches utilisées dans la construction en Suisse et la nouvelle méthode établie afin de conserver les données acquises.

En dernier lieu, il est prévu de faire des recommandations pour la normalisation applicables aux roches, aux enrochements, aux ballasts pour voies ferrées et aux granulats.

2.2 Mandat

L'office fédéral des routes a chargé par mandat du 11 octobre 2005 le bureau d'expertises minéralogiques et pétrographiques Dr. F. Röthlisberger de l'exécution du projet VSS 2005/401 et subséquemment le laboratoire de mécanique des roches LMR de l'EPFL.

Les Chemins de fer fédéraux ont mandaté le bureau d'expertises minéralogiques Dr. F. Röthlisberger pour développer une méthode d'essai rapide permettant de mesurer la résistance à l'altération du ballast de chemin de fer ainsi que des essais préliminaires de comparaison avec la méthode actuelle des CFF.

2.3 Programme

Le projet comporte les étapes suivantes:

1. Recherche d'une méthode en fonction des propriétés de sels minéraux simples.
2. Étude des critères de sélection des sels qui doivent être non toxiques, faciles à obtenir et réutilisables.
3. Essais préliminaires pour déterminer les choix élémentaires pour les paramètres d'essais (concentration, variations de température, choix des catalyseurs, stabilité, etc.).
4. Essais préliminaires de pertes de résistances mécaniques d'éprouvettes normalisées par le laboratoire de mécanique des roches.
5. Choix des critères de sélection en fonction des classes granulaires et comparaisons avec les méthodes européennes et l'essai selon F. de Quervain.
6. Optimisation et affinement de la méthode, automatisation, nombre de cycles, concentrations des sels, rampes de températures, durées des cycles, grandeur des éprouvettes, masse des éprouvettes, choix du ou des sels de réaction, etc.).
7. Optimisation des essais de pertes de résistance aux contraintes mécaniques sur éprouvettes normalisées. Conséquences pour la mécanique des roches en place (bancs de roches, enrochements).
8. Adéquation avec les travaux de F. de Quervain et les normes CFF.
9. Adéquation avec les observations in situ.
10. Essais d'adéquation avec des cycles de gel-dégel.
11. Dans la mesure du possible corrélation ou proposition de corrélation avec un modèle climatique.
12. Proposition de valeurs limites pour la résistance des granulats en fonction des applications en Suisse (couches de base, couches de roulement, etc.).
13. Compilation des données et synthèse des résultats.
14. Synthèse, préparation et rédaction du rapport final

2.4 Description de l'essai de Quervain

L'essai de cristallisation au sulfate de sodium est un essai qui a été développé par le Prof. F. de Quervain pour tester la résistance aux intempéries des roches utilisées en génie civil en Suisse. Il s'agit d'un essai très contraignant. Cet essai est basé sur une procédure ASTM (aujourd'hui ASTM C 88-05). Cet essai repose sur l'effet d'augmentation de volume lié à l'hydratation de la phase anhydre du Na_2SO_4 (thénardite) en $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (mirabilite). Cette réaction chimique étant réversible il est donc possible d'effectuer des cycles. Les éprouvettes sont alternativement séchées à 100°C au minimum, refroidies à température ambiante puis immergées dans une solution à 10% de sulfate de sodium. Cette procédure permet de simuler les effets combinés du gel-dégel, de la chaleur, de la dessiccation, de l'absorption d'eau et de la cristallisation de sels. L'essai se pratique de façon différenciée par type de lithologie et nécessite peu de matériel, soit 4 éprouvettes par type de roche. L'essai original utilisé lors du mandat de recherche effectué entre 1945 et 1950 comportait des cycles de 24h (24h dans la solution et 24h de séchage à 100°C suivis d'une phase de refroidissement jusqu'à température ambiante).

Évaluation des résultats

L'évaluation de l'essai de cristallisation tient compte des types d'altérations et de la différence de masse des éprouvettes avant et après l'essai après élimination du sel.

Tableau 2.1 Types d'altérations. L'échelle comporte 13 types de dégradation. Le plus sensible est le type d'altération A et le plus résistant est le type d'altération F

Type	Phénomène
A	Désagrégation et écaillage fort, augmentant progressivement en intensité avec arrondissement des arêtes et ameublissement interne de l'éprouvette.
A 1	Perte de 20% au 5 ^{ème} cycle
A 2	Perte de 20% survenant après le 5 ^{ème} cycle
B	Désagrégation ou écaillage considérable, n'augmentant que peu voire pas en intensité. Les arêtes restant relativement bien conservées. Les éprouvettes restent fermes au centre.
B 1	Perte de 15% au 10 ^{ème} cycle
B 2	Perte de 15% entre 10 et 30 cycles
C	Formation de pelures d'oignon typique sans désagrégation préalable.
C 1	Scission des écailles avant le 15 ^{ème} cycle
C 2	Scission des écailles après le 15 ^{ème} cycle
D	Apparition de fissurations avec effritement, la masse entre les fissures n'est que peu ou pas dégradée.
D 1	Perte de plus de 15% ou désagrégation en peu de morceaux, respectivement forte fissuration avant le 20 ^{ème} cycle
D 2	Perte de plus de 15% entre le 20 et le 50 ^{ème} cycle
D 3	Perte entre 5 et 15% au 50 ^{ème} cycle
E	Pertes de masse supérieures à 5% sous forme d'effritement apparaissant avant le 20^{ème} cycle. Effritements ou émiettements limités. La masse principale de l'éprouvette restant relativement intacte au minimum jusqu'au 30^{ème} cycle.
E 1	Perte de 5% avant le 20 ^{ème} cycle
E 2	Perte de plus de 5% entre le 20 et le 50 ^{ème} cycle
E 3	Perte de 1 à 5% au 50 ^{ème} cycle
F	Pas de perte significative (moins de 1%). Pas de fissuration jusqu'au 50^{ème} cycle.

Une grille d'évaluation du comportement aux intempéries a été établie en parallèle sur la base d'une adéquation entre les observations in situ et les types et formes d'altérations

observés lors de l'essai de cristallisation. Cette grille d'évaluation tient particulièrement compte des milieux d'exposition rencontrés en Suisse.

Les examens in situ du comportement à l'altération des roches ornementales effectués systématiquement en Suisse par le professeur F. de Quervain (travaux publiés en 1945, 1951 et 1967) ont montré que les sulfates et leurs hydrates (sulfate de calcium, de sodium, de magnésium) comptaient parmi les principaux facteurs de dégradation des roches ornementales. De façon schématique, l'origine des sulfates responsables des dégradations est due à la présence de soufre dans les combustibles qui lors du brûlage est oxydé en SO_2 qui se transforme ensuite en acide sulfurique en fonction du taux d'humidité relative et du taux d'ozone. Cet acide sulfurique précipite sous forme d'aérosol et réagit avec les roches pour produire des sulfates. La production de SO_2 est beaucoup plus importante en milieu urbain qu'en milieu rural, raison pour laquelle F. de Quervain a distingué des classes d'exposition entre le milieu rural et la taille des milieux urbains de l'époque.

Ces observations ont été confirmées par des études plus récentes de divers auteurs qui font encore une distinction supplémentaire entre le milieu urbain et le milieu urbain industriel (Winkler, Erhard M., 1994 : Stone in Architecture, Properties, Durability).

Les subdivisions utilisées pour l'évaluation du comportement aux intempéries sont schématiques et basées sur des travaux de recherche anciens en ce qui concerne l'étude de F. de Quervain. La taille des localités a augmenté, mais la teneur en soufre des combustibles de chauffage a diminué et le charbon n'est plus guère utilisé en Suisse aujourd'hui.

Il reste aussi évident, que les essais de laboratoire ne sont pas en mesure de reproduire toutes les conditions susceptibles d'être rencontrées in situ et que tous les facteurs d'exposition ne peuvent être quantifiés précisément par cette méthode. Ce sont les raisons pour lesquelles l'interprétation des résultats est donnée sous forme d'appréciation générale.

L'essai de cristallisation représente des sollicitations extrêmes. Pour une roche résistant à cet essai, le comportement in situ est généralement excellent. Certains artefacts sont toutefois inhérents à la méthodologie de l'essai de cristallisation. Il existe des roches qui ont un meilleur comportement in situ que ne le laissent présager les résultats de l'essai de cristallisation. Un des exemples typiques est représenté par la molasse bernoise (berner Sandstein).

Le point faible de l'essai réside dans le maintien de la concentration de sel dans la solution, car chaque cycle induit une perte d'eau par évaporation qu'il faut compenser au cours de l'essai.

Tableau 2.2 Types et milieux d'exposition et exemples d'utilisation

Exposition	Exemples
I Ouvrage soumis de façon continue ou répétée à l'imbibition d'eau	Enrochement, empierrement, ballast, pavé, bordure, escalier extérieur
II Partie d'ouvrage exposée par capillarité à l'humidité du sol ou de fond (1 à 2 m au-dessus du sol)	
a Zone régulièrement touchée par la pluie directe	Monument, poteau, pilier, mur
b Zone jamais ou seulement rarement touchée par la pluie directe	Socle, soubassement, fondation
III Élément de construction saillant situé au-dessus de la zone d'humidité et exposé à la pluie	
a Avec face inférieure proéminente	Corniche, rebord de fenêtre
b Sans face inférieure proéminente	Statue, ornement, enjolivure
IV Murs lisses situés au-dessus ou isolés de l'humidité du sol, soumis ou non à l'action de la pluie	
a Vertical	
b Oblique	

Tableau 2.3 Grille d'interprétation en fonction du milieu d'exposition

	I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IVa	IVb
A 1	1	s 1 k 2 l 2	s 1 k 1 l 2	s 1 k 1 l 2	s 1 k 2 l 3	s 2 k 2 l 3	s 1 k 2 l 3
A 2	s 1 k 1 l 2	s 1 k 2 l 3	s 1 k 1 l 2	s 1 k 2 l 3	s 2 k 2 l 3	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 4
B 1	s 1 k 1 l 2	s 2 k 3 l 4	s 1 k 1 l 3	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
B 2	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 4	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4
C 1	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 3	s 1 k 2 l 3	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
C 2	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 3	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
D 1	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 4	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 3
D 2	s 2 k 3 l 3	s 3 k 4 l 4	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 4
D 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	4	s 3 k 4 l 4
E 1	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 4	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	3
E 2	s 2 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	4	4	s 3 k 4 l 4
E 3	s 3 k 4 l 4	4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	4	4	4
F	4	4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	4	4	4
Exposition	Classe de résistance		Durée		Durabilité		
s = grande ville k = ville moyenne l = région rurale	1 faible à moyenne 2 moyenne 3 moyenne à bonne 4 bonne à très bonne		quelques années quelques décennies plusieurs décennies durable		généralement insuffisante peut souvent suffire généralement suffisante optimale		

3 Résultats

3.1 Recherche d'une méthode

Les critères qui ont été pris en considération pour le choix de la méthode d'essai sont la manutention minimale, l'automatisation maximale, la similitude avec les effets du gel-dégel et la cristallisation de sels dans les pores de la roche, une température inférieure à 50°C, une faible plage de température, un faible nombre de cycles et ainsi que dans la mesure du possible de faibles coûts.

Trois types de réactions physico-chimiques ont été évalués de façon théorique pour servir de base à une méthode d'essai automatisée :

1. Variation de volume due au gel-dégel.
2. Cristallisation par variation de solubilité du sel en fonction de la température.
3. Changement de volume par réaction réversible d'hydratation-déshydratation de sels.

3.1.1 Considérations théoriques

Le gel-dégel n'a pas été retenu, car des cycles rapides et automatisés sont problématiques sans déplacer les éprouvettes d'une enceinte de réfrigération à une unité de décongélation, typiquement un bac d'eau à 20°C. Une autre raison réside dans le grand nombre de cycles de gel-dégel qui sont généralement nécessaires pour induire des dégradations, ce qui implique de longues durées d'essais. C'est donc la cristallisation et l'hydratation de sels qui ont été retenus pour servir de base au développement de la méthode. Les méthodes traditionnelles par essais de cristallisation telles que celle selon F. de Quervain ou celles du CEN au sulfate de magnésium ou de sodium nécessitent une manutention importante difficile à automatiser, car les éprouvettes doivent être déplacées de bacs contenant la solution dans une enceinte thermique et vice-versa en passant par une phase de refroidissement. Pour cette raison, cette approche n'a pas été suivie.

Pour assurer le transport et la migration rapides du sel dans les pores des éprouvettes ainsi que par exemple dans les microfissures nouvellement formées au cours de l'essai, il est nécessaire de passer par une phase aqueuse (solution), ce qui exclut la possibilité d'employer une enceinte climatique.

La cristallisation par variation de solubilité en fonction de la température ainsi qu'une réaction réversible d'hydratation-déshydratation apparaissent les perspectives les plus prometteuses.

3.1.2 Choix du sel

De tous les sels communs et généralement observés dans les phénomènes d'altération des roches ornementales ou utilisés pour le service hivernal ou le déverglaçage des chaussées pouvant entrer en ligne de compte pour le développement de la méthode c'est le sulfate de sodium qui apparaît le plus prometteur. Les autres sels présentent des désavantages significatifs résumés dans le tableau ci-dessous.

Lors du choix de la méthode, les principaux avantages retenus pour le choix du sulfate de sodium étaient la stabilité chimique, la neutralité de son pH équivalent à 7 et ses propriétés physico-chimiques dont la variation de concentration en fonction de la température correspondant à un facteur d'environ 10 entre 4 et 35°C, la forte solubilité, la déshydratation complète à relativement basse température (32.4°C), et le fait qu'au début de cette recherche, il semblait que seul l'hydrate stable du Na_2SO_4 sous la forme de décahydrate $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ était à prendre en considération aux conditions normales.

Tableau 3.1 Désavantages des principaux sels non retenus

Sel	Désavantages
NaCl	Faible variation de solubilité avec la température
CaCl ₂	Fortement hygroscopique, température élevée nécessaire pour une variation significative de solubilité
CaSO ₄	Faible solubilité dans l'eau avec seulement 2.1g / 1000g.
MgSO ₄	Plage de température et température de déshydratation complète trop élevées pouvant induire des modifications des minéraux ou de la roche
KNO ₃	Plage de température relativement élevée nécessaire
Na ₂ CO ₃	Hygroscopique, plusieurs hydrates, température de déshydratation complète élevée

C'est d'une part l'effet d'hydratation-déshydratation ainsi que la solubilité qui ont été retenus comme offrant les meilleures chances de réussite pour l'élaboration d'une méthode automatisée pour évaluer la résistance des granulats et des roches aux effets des intempéries. La substance qui présente le meilleur potentiel est le sulfate de sodium.

La solubilité permettrait aussi de retenir le nitrate de potassium. Mais la plage de température efficace est relativement élevée ce qui peut provoquer des modifications des minéraux ou de la roche qui ne seraient pas nécessairement significatives pour la durabilité.

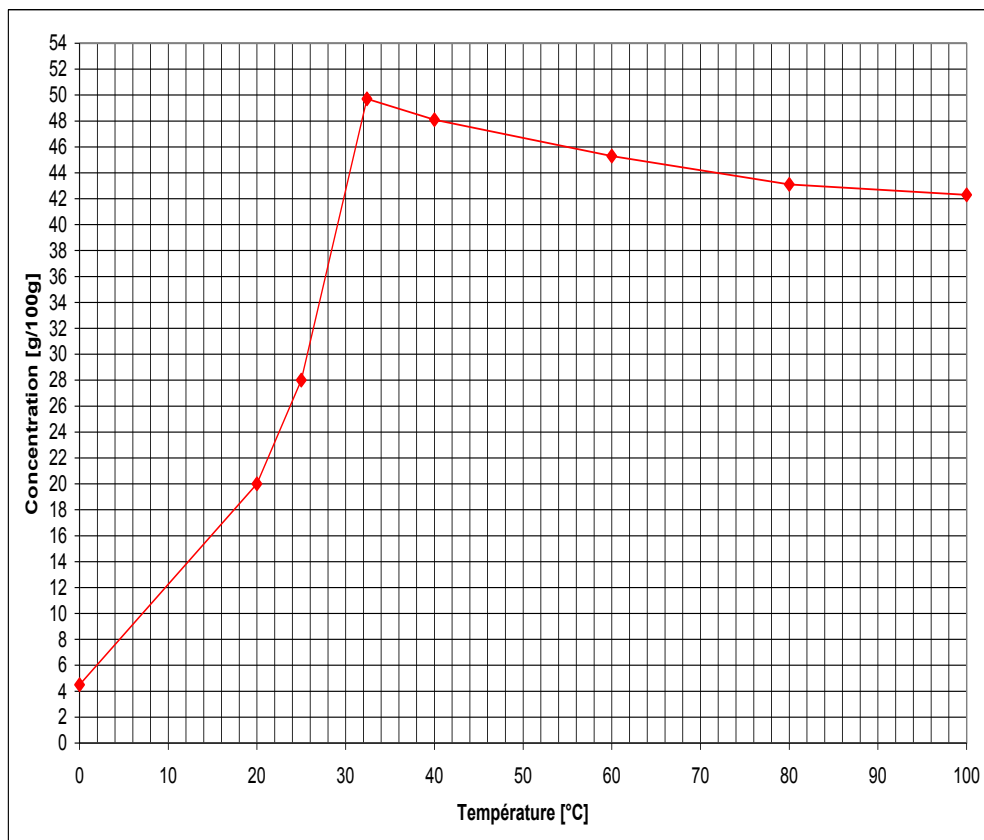


Fig. 3.1 Diagramme de solubilité du sulfate de sodium en fonction de la température. Entre environ 0 et 35°C la solubilité du sel varie entre environ 4% et près de 50%. Au-dessus de 35°C la solubilité du sulfate de sodium varie peu. Les données sont tirées des travaux de F. de Quervain et du Handbook of Chemistry and Physics.

3.1.3 Principes théoriques de l'essai

La solubilité du sulfate de sodium est fortement dépendante de la température entre 0°C et 35°C (fig. 3.1). Pour une température donnée, lorsque la solution est saturée, une baisse de température induit la précipitation du sulfate de sodium. A contrario, l'augmentation de température permet d'augmenter la teneur en sulfate de sodium de la solution aqueuse et d'induire la mise en solution de sulfate de sodium. Par des cycles d'abaissement et d'augmentation de la température, il est possible de faire cristalliser et remettre en solution du sulfate de sodium indéfiniment. La concentration en sulfate de sodium doit toutefois être suffisamment élevée (fig. 3.1) pour obtenir une précipitation significative de sulfate de sodium.

La transformation totalement réversible de phase entre la forme anhydre (Na_2SO_4) \rightleftharpoons et la forme hydratée ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) stable en dessous de 32.4 °C induisent une augmentation du volume du sel cristallisé.

Les mises en solution successives du sel sont susceptibles de faire pénétrer progressivement le sel dans les pores et les fissures des éprouvettes.

Ces propriétés du sulfate de sodium permettent de simuler certains phénomènes d'altération des roches comme pour l'essai de F. de Quervain ou l'EN 12 371.

La transformation entre la phase hydratée et anhydre, induisant une transformation de la structure cristalline, peut accélérer la mise en solution du fait que la structure cristalline du sel se désagrège. Pour ces raisons, le sulfate de sodium est apparu présenter le potentiel de succès le plus élevé parmi les sels solubles pouvant entrer en considération.

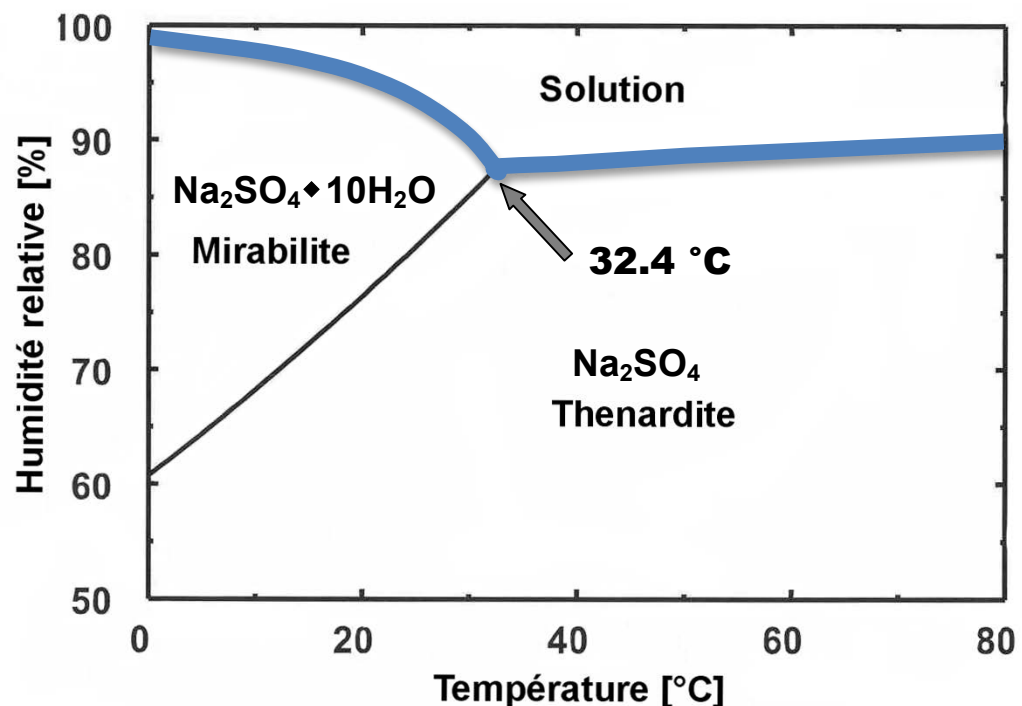
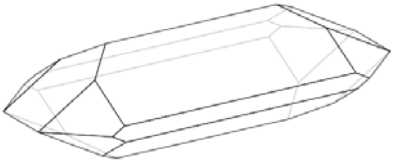
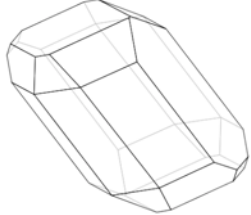


Fig. 3.2 Diagramme de stabilité du système $\text{H}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{SO}_4$, d'après Grunewald et al. (légèrement modifié et adapté). Deux phases existent qui sont la thenardite et la mirabilite en fonction de l'humidité relative et de la température. Au-dessus de 32.4 °C seule la forme anhydre est stable (flèche). A partir de 60% d'humidité relative et à fortiori en solution aqueuse en dessous de 32.4°C c'est la forme hydratée qui est stable. Les courbes supérieures (en traits épais) représentent les courbes de déliquescence.

3.1.4 Propriétés des sels de sulfate de sodium

<p> Na_2SO_4 Sulfate de sodium Minéral : Thénardite Système cristallin : orthorhombique, dipyramidal Masse molaire : 142.04 g/mol Densité : 2.664 g/cm³ </p>	
---	--

<p> $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Sulfate de sodium décahydrate Minéral : Mirabilite Système cristallin : monoclinique, prismatique Masse molaire : 322.20 g/mol Densité : 1.464 g/cm³ Stabilité : dissociation en eau et sulfate de sodium à 32.4°C </p>	
---	---

3.1.5 Phénoménologie de l'essai

L'essai est basé sur le phénomène d'hydratation du sulfate de sodium Na_2SO_4 en sulfate de sodium décahydrate $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Cette transformation est liée à une forte augmentation de volume du cristal de sulfate anhydre. Elle permet de simuler les effets de la transformation de l'eau en glace de manière très drastique. L'augmentation de volume étant beaucoup plus importante que celle de la transformation d'eau en glace, environ trente fois, une accélération du processus d'altération dû au gel/dégel peut être simulée.

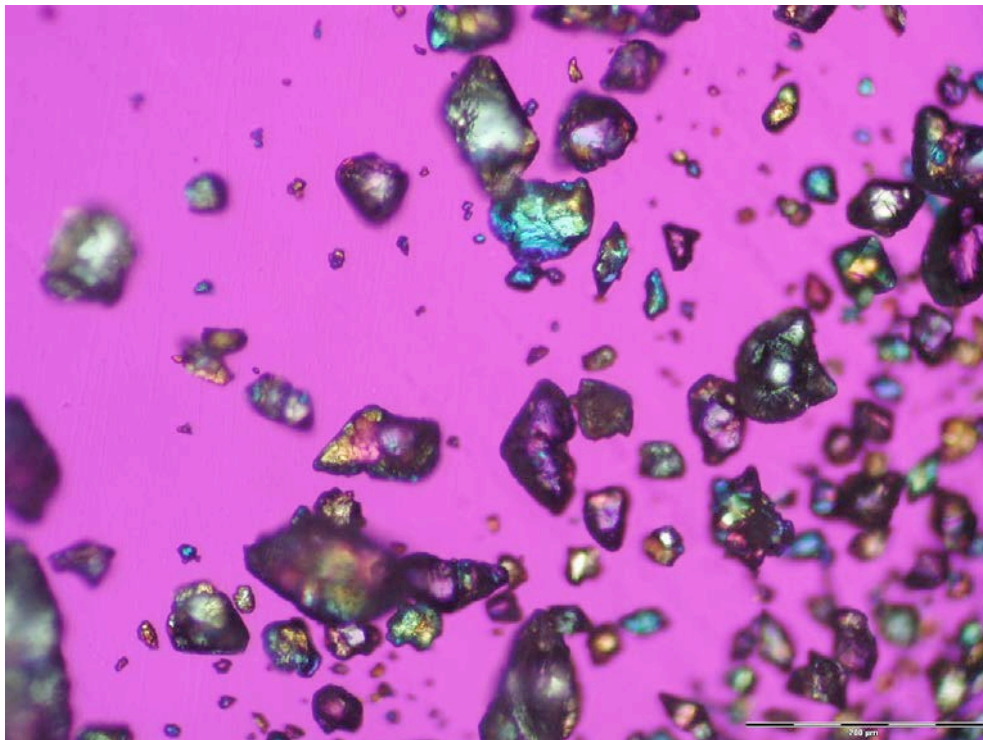


Fig. 3.3 Cristaux de sulfate de sodium Na_2SO_4 (phase anhydre) sous le microscope en lumière polarisée.

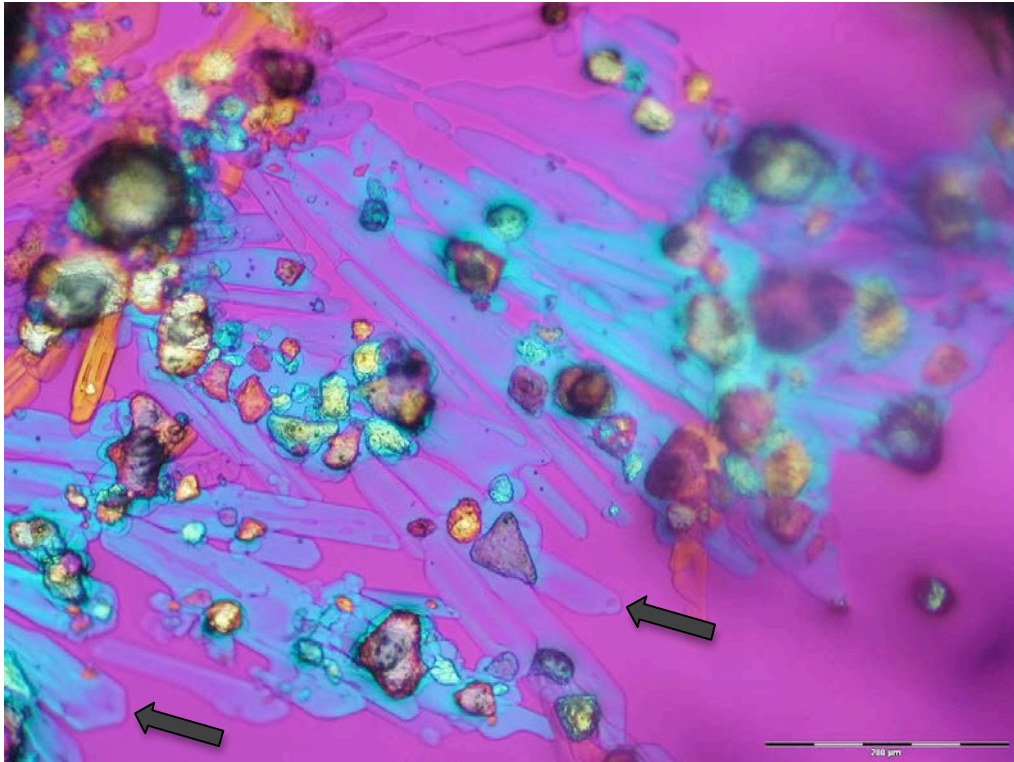


Fig. 3.4 Hydratation du sulfate de sodium sous le microscope en lumière polarisée. Des cristaux de sulfate de sodium décahydrate $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ et/ou de sodium heptahydrate $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ de forme aciculaire (exemples indiqués par des flèches) se développent aux dépens de la phase anhydre au contact de l'eau à température ambiante.

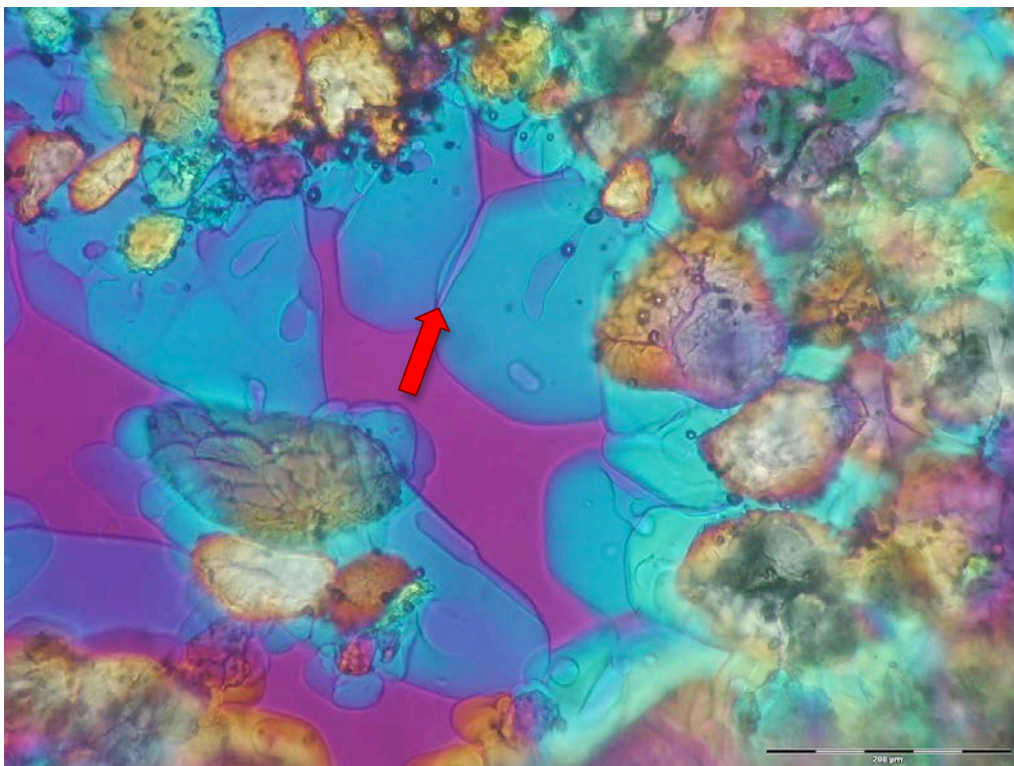


Fig. 3.5 Cristaux de sulfate de sodium décahydrate remplissant le volume de pores. Noter la forme prismatique des cristaux de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (exemple marqué par une flèche noire). Les contacts entre les cristaux montrent des zones de pression exercée lors de la croissance due à l'hydratation (exemple indiqué par une flèche rouge).

4 Essais exploratoires

Avant d'envisager le développement et l'acquisition d'un système automatisé, des essais exploratoires ont été effectués à l'aide d'une armoire frigorifique et de bains contenant de la glace sur des éprouvettes de molasse bernoise. Des éprouvettes de forme cubiques ont été plongées dans différentes solutions de sulfate de sodium qui ont été ensuite soumises à des cycles de variation de température. Des phénomènes d'altération comparables à ceux de l'essai de cristallisation selon F. de Quervain ont été systématiquement observés au cours des essais préliminaires.



Fig. 4.1 Essai exploratoire effectué sur des cubes de Molasse Bernoise. L'arête des cubes de molasse est de 7 cm. Les cristaux de forme aciculaire de sulfate de sodium décahydrate sont bien visibles dans la solution. Les dégradations sous forme de fissurations apparaissent sur le bord de l'éprouvette (exemple indiqué par une flèche) comme dans l'essai de Quervain.



Fig. 4.2 Éprouvette composée d'un cube de molasse bernoise de 7 cm d'arête. Essai exploratoire avec une solution de sulfate de sodium ayant été soumise à des cycles de variation de température induisant la cristallisation de cristaux hydratés de sulfate de sodium. Des cristaux de sulfate de sodium hydraté sont présents autour de l'éprouvette. Le reste de solution a été éliminé pour permettre la photographie. Les dégradations sous forme de pelure d'oignon (fissures concentriques) apparaissent similaires à celles observées lors de l'essai classique de F. de Quervain.

5 Recherche d'une méthode d'automatisation

Les essais préliminaires s'étant révélés positifs et prometteurs, une demande de crédit de recherche en accord avec le département de géotechnique des CFF a été soumise à la commission d'experts VSS EK 4.01 puis à l'OFROU. Le crédit de recherche ayant été accepté, un système permettant d'envisager une automatisation a été acquis, car le problème d'un bain d'eau glacée ou d'une armoire frigorifique ne permettait ni une automatisation suffisante, ni un contrôle suffisamment précis des paramètres et des conditions d'essai. Les travaux de manutention restaient en outre importants.

5.1 Recherche d'une méthode d'automatisation de l'essai

Le choix pour une méthode d'automatisation s'est porté sur un thermocryostat. Le modèle Proline RP 1845 de la firme allemande Lauda a été retenu. Le premier prototype utilisé était composé principalement d'un thermocryostat. Des bacs contenant les solutions de sulfate de sodium et les éprouvettes étaient directement placés dans la cuve de refroidissement du thermocryostat. Le contrôle de la température a été effectué à l'aide de deux thermomètres à thermoéléments placés à différents endroits directement dans les bacs contenant les éprouvettes. Les mesures de la température ont été collectées à l'aide d'un ordinateur.

Les premiers prototypes du système ont systématiquement révélé un problème de solubilité du sel de sulfate de sodium qui cristallise au fond des bacs. Le sulfate de sodium précipité au fond des bacs s'est révélé très difficile à remettre en solution, ce qui augmentait non seulement fortement la durée de l'essai, mais rendait aussi très problématique le contrôle des paramètres de l'essai. L'ajout d'un agitateur acquis en plus n'a pas permis d'améliorer suffisamment la situation malgré diverses modifications et essais d'hélices. Différents types de bacs n'ont pas permis d'améliorer suffisamment la rapidité de mise en solution du sulfate de sodium ayant précipité au fond des bacs.

Les essais avec les prototypes ont démontré qu'il était possible d'envisager une méthode quasiment automatisée.



Fig. 5.1 Dispositif permettant de plonger les bacs contenant la solution et les éprouvettes dans la cuvette du thermocryostat. Des emplacements pour les thermoéléments et l'agitateur ont été aménagés dans le couvercle.



Fig. 5.2 Cuvette contenant le liquide de refroidissement et de chauffage du thermocryostat.



Fig. 5.3 Type de bac en plastique utilisé pour placer les éprouvettes et la solution dans le thermocryostat.



Fig. 5.4 Type de bac métallique permettant un meilleur transfert entre le liquide du thermocryostat et la solution de sulfate de sodium. L'orifice dans le couvercle permet l'introduction d'un agitateur.

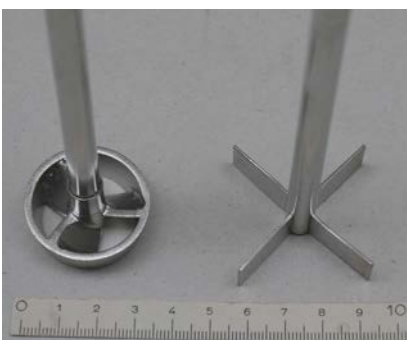


Fig. 5.5 Types d'agitateurs pouvant être plongés dans la solution pour assurer une dissolution du sel et une homogénéisation de la solution plus rapides.

5.2 Dispositif final

Les systèmes et prototypes utilisés pour les essais de mise au point ont été abandonnés. Les premiers prototypes présentaient comme principal défaut un problème de remise en solution du sel précipité. Sur les conseils du Dr. Thierry Meyer, spécialiste des fluides supercritiques à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, un appareillage avec réacteur externe a été retenu comme méthode définitive pour cette recherche. Le réacteur qui n'était pas prévu initialement a été acquis en plus. Le système se compose de deux entités principales comprenant le système de refroidissement et chauffage composé d'un cryothermostat ainsi que d'un réacteur avec agitateur (figure ci-dessous). Ce système présente les avantages de permettre l'homogénéisation rapide et constante de la solution de sulfate de sodium aussi bien du point de vue de la teneur en sel que de la température, le contrôle plus efficace de la température et la rapidité de la mise en solution du sel précipité.

Le cryothermostat équipé d'un contrôleur pilote automatiquement les paramètres d'essai tels que les rampes de chauffage et de refroidissement, les plateaux de température à maintenir durant le temps programmé, typiquement entre une et deux heures. La température est directement mesurée dans la solution à l'aide d'un thermomètre placé dans le réacteur. La vitesse de l'agitateur peut aussi être programmée. Ce système présente aussi l'avantage sur les prototypes de mieux contrôler les paramètres d'essai, car ceux-ci d'essai sont mesurés et pilotés directement à partir du réacteur.

Les essais réalisés avec ce système sur les conseils du Dr. Thierry Meyer ont montré qu'il était permis de remplir la condition consistant à réaliser l'essai dans une période de temps beaucoup plus courte que les essais traditionnels.

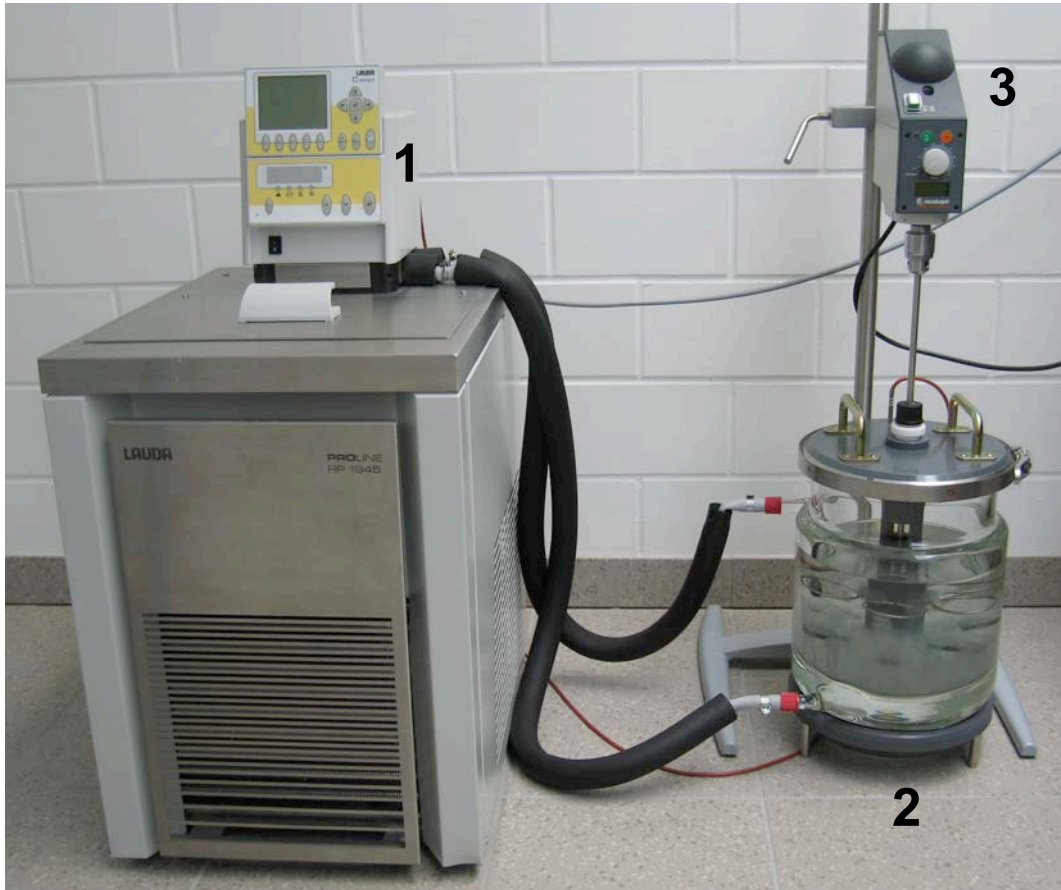


Fig. 5.6 Dispositif composé du cryothermostat [1], du réacteur [2] et du mélangeur [3].

5.3 Développement de portes-éprouvettes

Le dispositif retenu a nécessité la recherche et la mise au point de support pour les éprouvettes cylindriques et de conteneurs pour les grains de ballast ainsi que les gravillons.



Fig. 5.7 Système de support et de fixation pour les éprouvettes cylindriques dans le réacteur. Ce système de support a été développé et réalisé par M. Jean-Marc Terraz du département de mécanique de l'EPFL.



Fig. 5.8 Systèmes de conteneurs pour les éprouvettes composées de grains de ballast et de gravillons. Le type en métal est une ébauche, mais n'a pas été utilisé.

6 Essais préliminaires

Le système s'est avéré beaucoup plus complexe que les essais exploratoires ne le laissaient supposer. Des équipements supplémentaires ont dû être acquis ainsi que des systèmes de contrôle et de collecte des données ont dû être développés. Le système et les équipements électroniques de collectes des données ont été réalisés par M. Fabrice Bugnon, ingénieur EPFL en électronique.

6.1 Cycles de température

Plusieurs types de courbes de températures et de cycles de courbes de température ont été testés au cours des essais préliminaires de mise au point. Les types de courbes de température qui apparaissent optimaux se composent d'une phase d'échauffement rapide, du maintien de la température maximale à un plateau (ou d'un lent abaissement progressif de quelques degrés), d'une phase de refroidissement rapide jusqu'à la température minimale, suivi du maintien à de la température minimale à un plateau (ou d'un lent réchauffement progressif de quelques degrés) jusqu'au départ du prochain cycle. Ensuite le cycle recommence avec la phase d'échauffement rapide. Il est important que les phases de refroidissement et de réchauffement lents n'aient pas d'influence significative sur la quantité de sel dissous.

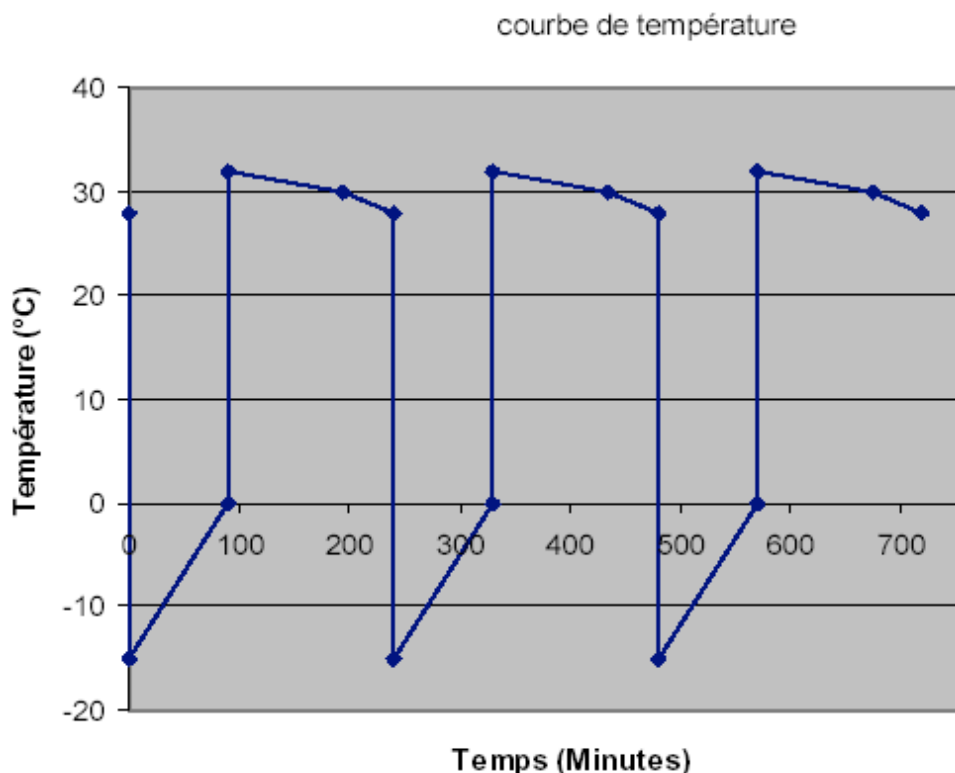


Fig. 6.1 Essai de type de courbe de température testée lors des essais de mise au point avec les bacs placés dans le cryothermostat. Plusieurs séries d'essais avec des solutions de différentes concentrations ont été réalisées afin de trouver une plage de température appropriée.

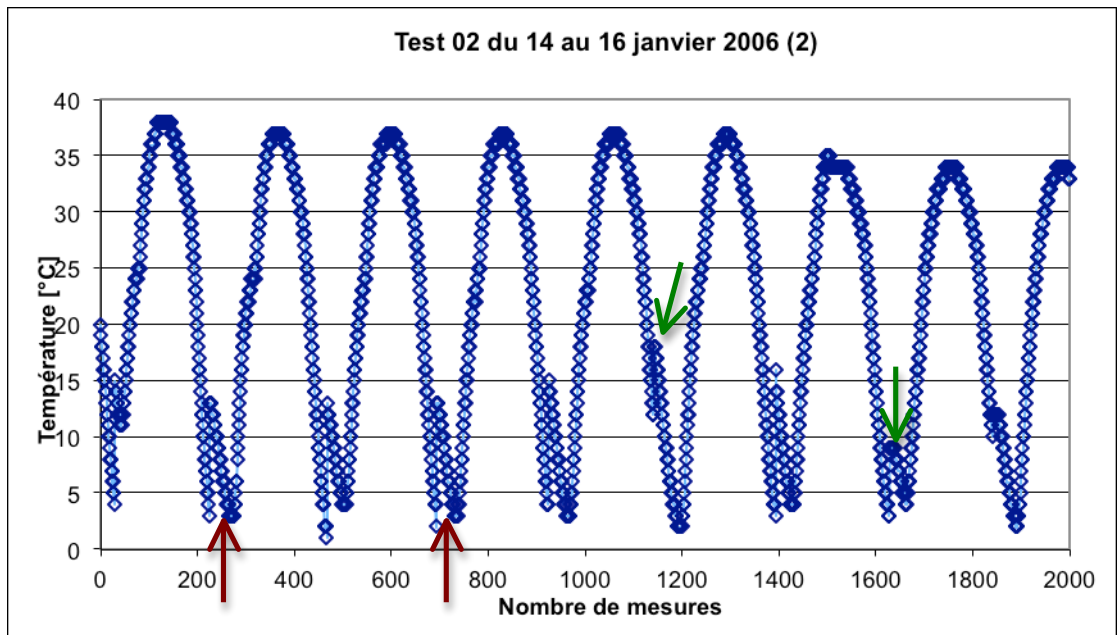


Fig. 6.2 Variation de la température d'une solution de Na_2SO_4 (à 20%) lors des essais de mise au point. Lorsque la température de la solution dépasse 32.4°C pendant la phase d'échauffement, une forte réaction exothermique a été observée systématiquement lors du refroidissement. Ce qui a pour effet d'augmenter brusquement la température (flèches rouges) qui induit une dissolution du Na_2SO_4 déjà cristallisé. En outre, cette réaction apparaît difficilement contrôlable, car les variations de température varient sous l'influence de la réaction exothermique (flèches vertes).

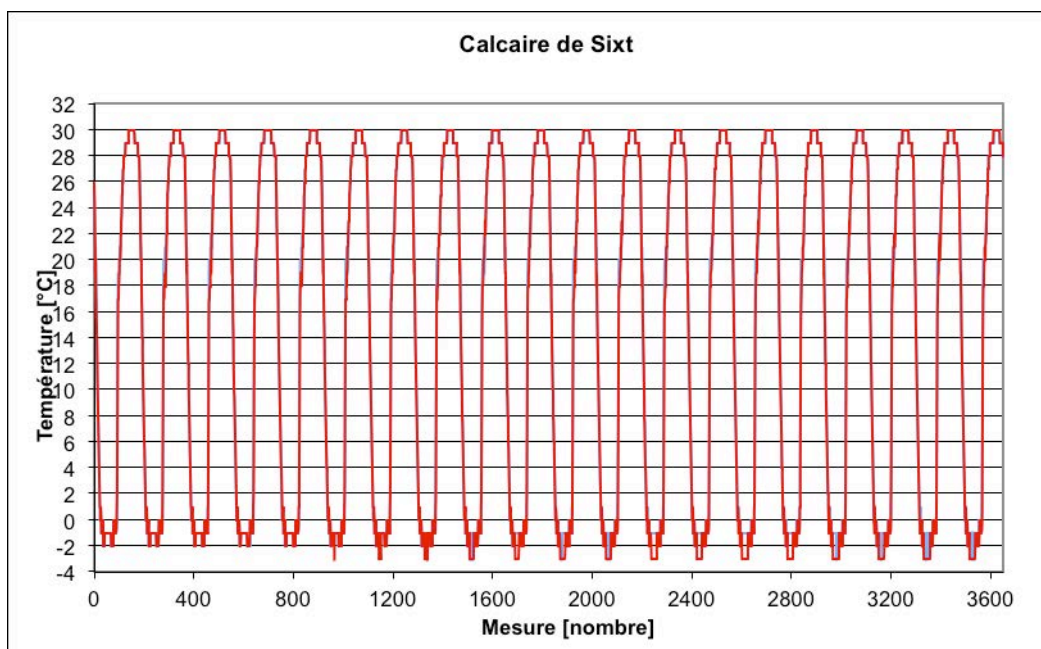


Fig. 6.3 Mesures de la température de la solution lors des essais de mise au point. Les éprouvettes étaient composées de calcaire de Sixt et 20 cycles ont été effectués à la suite dans une solution à 20% de Na_2SO_4 . Lorsque la température de la solution a été maintenue inférieure à 32.4°C pendant la phase d'échauffement, aucune réaction exothermique significative n'a été observée durant les essais réalisés à ces conditions et durant plusieurs cycles.

6.2 Paramètre de température maximale

Les mesures en continu de la température lors des essais de mise au point sur les premiers prototypes entièrement automatisés et composés du thermocryostat et de l'agitateur ont révélé une réaction exothermique très significative pendant les phases de refroidissement (fig. 6.2). Cette réaction exothermique représente un facteur d'incertitude important, car il s'est avéré très difficile, voire impossible d'en contrôler les paramètres. Cette réaction pourrait être due à la précipitation de sulfate de sodium anhydre, d'un noyau de phase anhydre dans un premier temps ou d'une phase métastable récemment mise en évidence par Hamilton, A., Hall, C., Pel, L. (2008) composée de sulfate de sodium heptahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Lorsque la température maximale a été maintenue inférieure à 32.4 °C la réaction exothermique lors de la phase de refroidissement n'a pas été observée (fig. 3.12). Les essais effectués par Hamilton et al. (2008) ont systématiquement été effectués à partir de 40°C, dans le domaine de stabilité de la thénardite (Na_2SO_4). La formation de la phase métastable $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dépend probablement de la température initiale de la solution lors de la cristallisation. Si la température de la solution lors de la cristallisation se trouve dans le domaine de stabilité de la thénardite, c'est le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ qui se forme alors que si la température initiale se trouve dans le domaine de stabilité de la mirabilite c'est probablement le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ qui cristallise. Ce phénomène n'a pas pu être examiné dans le cadre de cette recherche. Ces fortes réactions exothermiques lors des phases de refroidissement augmentent brusquement la température (flèches rouges dans la figure 3.11) de la solution, ce qui induit une dissolution du Na_2SO_4 – décahydrate, respectivement du heptahydrate déjà cristallisé. En outre, cette réaction apparaît très difficilement maîtrisable, car les variations de température dues à la mise en solution dépendent de facteurs difficiles à contrôler tels que la taille des cristaux ou la température atteinte lors de la réaction exothermique (fig. 3.11). La réaction exothermique augmente en outre la durée des phases de refroidissement de l'essai. Pour ces raisons, il est préférable que la température de 32.4°C ne soit pas dépassée en restant dans le domaine de stabilité de la mirabilite. La température maximale de 30°C apparaît être un choix présentant une marge de sécurité raisonnable.

6.3 Paramètre de température minimale

Hamilton, A., Hall, C., Pel, L. (2008) ont mis en évidence une forme métastable du sulfate de sodium hydraté lors de la cristallisation à partir d'une solution saturée de sulfate de sodium. Il s'agit du sulfate de sodium heptahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Cette phase métastable a été identifiée à l'aide de radiations aux rayons X produites par synchrotron. Ces auteurs ont montré qu'entre 40°C et 0°C c'est une forme métastable de sulfate de sodium heptahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) qui cristallise à partir de la solution saturée et qu'en dessous de 0°C la phase métastable ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) se transforme très rapidement en décahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Selon ces auteurs, aucune de formation de glace n'a été observée jusqu'à au moins -6°C. Cette observation a été vérifiée dans cette étude. Toute la littérature moderne est toujours partie du fait qu'il n'existait que deux phases, la mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et la thénardite (Na_2SO_4) qui entraient en considération dans les phénomènes d'altération dus au sulfate de sodium (Hamilton et al.). Toutefois, l'étude de Hamilton et al. reste basée sur des essais dont la température de départ était de 40°C (voir chap. 3.6). Afin d'éviter la présence éventuelle de deux phases dont une métastable pouvant modifier de manière significative les résultats, il est préférable de choisir la plage de température minimale inférieure de 0°C. Une température comprise entre -4°C et -6°C offre une marge de sécurité suffisante.

6.4 Courbes de solubilité

Les données concernant les courbes de solubilité du sulfate de sodium sont contradictoires dans la littérature. Les travaux récents de Hamilton et al (2008) montrent une différence notable entre la courbe de solubilité de la forme métastable ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) et celle de la forme stable ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). En refroidissant de 40°C à 10°C, la forme métastable (heptahydrate) cristallise jusque vers 10°C. En réchauffant la solution, la courbe de solubilité suit celle de la forme métastable de l'heptahydrate de sodium. En réchauffant à partir de la température de -4°C où la forme métastable est

complètement transformée en forme stable (décahydrate ou mirabilite), la courbe de solubilité suit celle de la mirabilite qui est la forme stable de l'hydrate de sodium. Pour cette raison supplémentaire, il est préférable d'éviter la formation de phase métastable plus difficile à contrôler et de rester dans le domaine de stabilité de la mirabilite.

6.5 Concentration en Na_2SO_4

Les paramètres de température compris entre 0°C et 30°C, permettent un large choix de concentrations en sulfate de sodium variant entre 4% à 0°C jusqu'à un maximum de 42% selon F. de Quervain et le Handbook of Chemistry and Physics à 40°C.

Toutefois divers paramètres imposent des restrictions et limitent les choix:

- Pour produire des pressions importantes dans les pores et les microfissures de la roche, il est nécessaire de générer de fortes supersaturations en sel. Il est donc nécessaire d'utiliser des concentrations très supérieures à 4% pour obtenir de fortes supersaturations lors des phases de refroidissement.
- Proches des limites, les paramètres deviennent de plus en plus difficiles à contrôler
- Les essais de mise au point ont révélé que la vitesse de solubilité diminuait très fortement lorsqu'on est proche de la courbe de saturation, ce qui a pour effet d'augmenter très significativement la durée des cycles et par là de la durée de l'essai en général. Ce qui est contraire au but recherché de la rapidité d'essai.
- La solubilité du sulfate de sodium aux conditions normales de température en laboratoire (comprises entre 20°C et max. 25°C) est de 20% à 28%. En utilisant des concentrations supérieures, il devient nécessaire d'utiliser un bain-marie pour les solutions et les éprouvettes ainsi que de maintenir les ustensiles de manutention à des températures suffisamment élevées pour éviter toute précipitation de sel.

Des concentrations comprises entre 16% et 24% de sulfate de sodium sont réalistes. Toutefois les concentrations supérieures à 20% peuvent nécessiter un contrôle de la température afin d'éviter tout risque de précipitation significative de sel. La concentration de 20% de sulfate de sodium est un bon compromis et permet une manutention des éprouvettes, de la solution et des ustensiles à la température de laboratoire normale sans que des précautions particulières soient à observer au niveau du contrôle de la température tout en assurant une rapide mise en solution après les phases de refroidissement et une forte supersaturation à basse température.

6.6 Pression induite par la cristallisation

Il est difficile de déterminer la pression de cristallisation et de transformation induite dans les pores de la roche. Hamilton et al ont essayé de déterminer les pressions par analyse des contraintes subies par les cristaux cristallisés dans les pores d'éprouvettes par diffraction aux rayons X (synchrotron) ainsi que par calculs théoriques. Les pressions estimées varient entre 9 et 19 MPa, ce qui excède la résistance à la tension des roches ornementales (Hamilton et al. 2008).

6.7 Conditions d'essai

Température maximale : $T = 30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$
 Température minimale : $T = -4^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$
 Concentration en sulfate de sodium : $C = 20\%$

Thermocryostat : marque Lauda Proline RP 1845
 Mélangeur : marque Heidolph RZR 2051 control
 Réacteur : verreries de Carouge type DIN 200 AMSI – Glas – 07-3255

7 Critères pour une base de corrélation

La corrélation de la méthode de F. de Quervain avec cette nouvelle méthode est problématique du fait que la méthode de F. de Quervain est basée en partie sur des observations macroscopiques effectuées sur les éprouvettes en plus de la détermination des pertes de masse. Il existe des transitions plutôt que des limites entre certaines formes d'altération définies dans la méthode de F. de Quervain. La résistance à la compression uniaxiale est probablement une méthode pertinente pour établir une corrélation entre les deux méthodes d'essai ainsi qu'avec l'essai de gel/dégel. La comparaison des variations de résistance à la compression des éprouvettes soumises à des cycles d'essais suivant les différentes méthodes permet une corrélation avec des grandeurs physiques en sus des observations macroscopiques et de la détermination des pertes de masse. Pour établir la corrélation entre les différentes méthodes d'essais il a aussi été tenu compte dans la mesure du possible des pertes de masse ainsi que des dégradations macroscopiques observées sur les éprouvettes. La corrélation entre la méthode de F. de Quervain, les cycles de gel-dégel et la nouvelle méthode n'est possible que pour certains types définis par F. de Quervain. Il s'agit essentiellement des types qui concernent les grès et les roches durables. Pour la plupart des autres lithologies, les échantillons utilisés par de Quervain ne sont pas représentatifs de ce qui est exploité actuellement, les gisements sont trop hétérogènes, la localisation des prélèvements n'est pas possible, les carrières n'existent plus et d'une façon plus générale, le nombre d'échantillons testés à l'époque n'était pas toujours suffisant pour assurer la représentativité de l'essai et plus encore de la roche. La nomenclature actuelle diverge aussi partiellement de celle utilisée à l'époque.

7.1 Résumé des résultats de la recherche de 1951

La température d'essai définie était de 100°C. Le sel utilisé était le sulfate de sodium. Le solvant était l'eau distillée. Toutefois, l'imbibition dans de l'eau potable calcaire ou distillée n'a pas montré de différence significative, même après 200 cycles sur les éprouvettes. Ce qui indique que de petites quantités de carbonates dissous n'influent pas les résultats de manière significative. Les éprouvettes étaient composées de cubes de sept centimètres d'arête. Différentes concentrations de sulfates de sodium ont été testées, mais c'est la concentration à 10% qui avait été retenue, car facile à contrôler et présentant l'avantage d'assurer une bonne différenciation de l'essai. De trop fortes concentrations induisant des dégradations trop rapides. 18 essais ont été réalisés avec la molasse bernoise, 12 essais avec les grès granitiques (granitische Sandsteine) de la Suisse de l'Est (Nuolen, Guntliweid, Neuhaus bei Schmerikon, Sankt Margrethen, et Ägeri), 5 essais avec les "Plattensandsteine" (Bäch, Staad, Echarlens-Bulle), 7 essais sur divers grès (Verrucano Mels, mais carrière inhomogène présentant des zones schisteuses), Glaukonitsandstein carrière fermée et inhomogène, Flyschsandstein n'ayant montré aucune transformation lors de l'essai et carrière fermée, kalkiger Sandstein fortement schisteux (localité inconnue, schistes lustrés des Grisons), grès allemand près de Hannover et un seul essai, 5 essais sur les grès coquilliers (Muschelkalksandsteine) de la molasse (Neuhof, Würenlos, Estavayer) et 3 essais sur des tufs, 9 essais sur des calcaires du Jura (matériaux hétérogènes) Dielsdorf, calcaire de Soleure, Laufon (hétérogène), Baden, Frick, Neuchâtel Hauterivien, 5 calcaires alpins (St-Triphon, Ragaz, Collombey, Arvel gris et rouge), 3 marbres (Carrara, Val Peccia, Castonione), 13 essais sur les roches cristallines (pertes de masse insignifiantes) dont granite de l'Aar (localité inconnue), granite du Mont Blanc provenant de blocs erratiques, gneiss col du Gotthard (localité non précisée), diorite quartzique de Brusio (carrière, lieu de prélèvement non retrouvé), divers gneiss tessinois difficiles à retrouver et une serpentine du Val Poschiavo. Des essais avec le sulfate de magnésium ainsi que du chlorure de sodium ont été réalisés, mais ont nécessité plus du double de cycles nécessaires que le sulfate de sodium ou se sont avérés peu concluants.

7.2 Lithologies examinées

Il est impératif de se concentrer autant que possible sur les mêmes lithologies que F. de Quervain qui a surtout utilisé des grès provenant de Suisse pour développer l'essai de cristallisation. Plus des $\frac{2}{3}$ des essais ont été réalisés sur des échantillons de grès et plus du $\frac{1}{5}$ sur la seule molasse bernoise. Il s'agit surtout des grès du plateau suisse aussi bien dans la partie ouest qu'est du plateau molassique. Ces grès offrent de multiples avantages du fait qu'ils montrent des réactions relativement rapidement. Le choix des lithologies pour cette recherche s'est avéré problématique. Une bonne partie des carrières qui ont servi à mettre au point la méthodologie de l'essai de cristallisation a disparu (par exemple Echarlens), n'est plus en activité (par exemple Mels) ou n'exploite plus les mêmes lithologies (par exemple Arvel). Un autre problème réside dans l'hétérogénéité de certains gisements (par exemple Mels, Arvel) ou les diverses zones d'extraction (par exemple Laufon) qui ne permettent plus de retrouver avec certitude les roches correspondantes. L'imprécision de certains prélèvements (par exemple col du Gotthard, blocs erratiques du granite du Mont Blanc) ne permet plus de retrouver les localités. Une bonne partie des essais, surtout ceux effectués sur les roches cristallines ainsi que les calcaires du Jura, ne sont statistiquement pas représentatifs (souvent 1 seul échantillon examiné). D'autre part il manquait à l'époque de F. de Quervain le recul pour évaluer le comportement des roches cristallines au nord des Alpes (De Quervain, F., 1945 : Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz Teil 1). Ces raisons ont limité les essais pour la corrélation aux grès du plateau molassique.

En outre, le choix des grès du plateau molassique suisse offre de multiples avantages. Ces grès présentent généralement une homogénéité relativement bonne, une porosité suffisante pour réagir à l'essai de cristallisation ainsi que des variations significatives de la résistance à la compression uniaxiale allant de 35 [MN/m²] pour la molasse bernoise à 110 [MN/m²] pour les grès granitiques.

Tableau. 7.6 principales lithologies utilisées pour l'étude réalisée par F. de Quervain

Type de dégradation et lithologie	Carrières provenance, localité	Corrélation
A1 Molasse bernoise variété normale	Ostermundigen, Krauchtal, Fribourg	Possible
A2 Molasse bernoise à grain très fin	Wabern am Gurten	Problématique
Grès granitique à grain grossier	Sankt Margrethen, Aegeri	Possible
B1 Grès de Waelden	Allemagne	Problématique
B2 Calcaires du Jura	Istein, Neuchâtel Hauterivien	Impossible
C1 Plattensandsteine	Staad, Bäch	Problématique
	Echarlens	Impossible
C2 Grès granitique à grain fin	Guntliweid bei Nuolen, Bolligen, Lehholz	Possible
D1 Grès coquillier	Würenlos-Mägenwil	Possible
D2 Grès coquillier	Estavayer	Problématique
D3 Tuff calcaire	Corpataux	Impossible
Calcaires alpins et du Jura	Dielsdorf, Neuchâtel, Soleure, Frick, Kornberg, Collombey, Arvel brèches, St-Triphon	Problématique ou impossible
E1 Marbre, Arvel rouge	Val Peccia	Problématique
E2 Kalksilikatfels, granites	Castione, granites alpins	Très problématique
E3 Gneiss du Tessin et autres	Provenances imprécises	Problématique
F Verrucano, grès et conglomérat fin	Mels	Problématique
Serpentine de Poschiavo	Selva près de Poschiavo	Possible
Gneiss du Tessin, granophyre	Verzasca	Problématique

8 Essai de gel-dégel

L'essai de gel-dégel a été réalisé avec des éprouvettes cylindriques composées de molasse bernoise. Les essais de gel-dégel ont été réalisés selon une procédure basée sur la norme DIN 12371.

La résistance à la compression a été déterminée selon la norme VSS (2003) SN 670 353 (Essais sur roche. Résistance à la compression uniaxiale d'éprouvettes cylindriques). La résistance à la compression des éprouvettes a été déterminée à l'état initial et à un nombre croissant de cycles de gel-dégel.

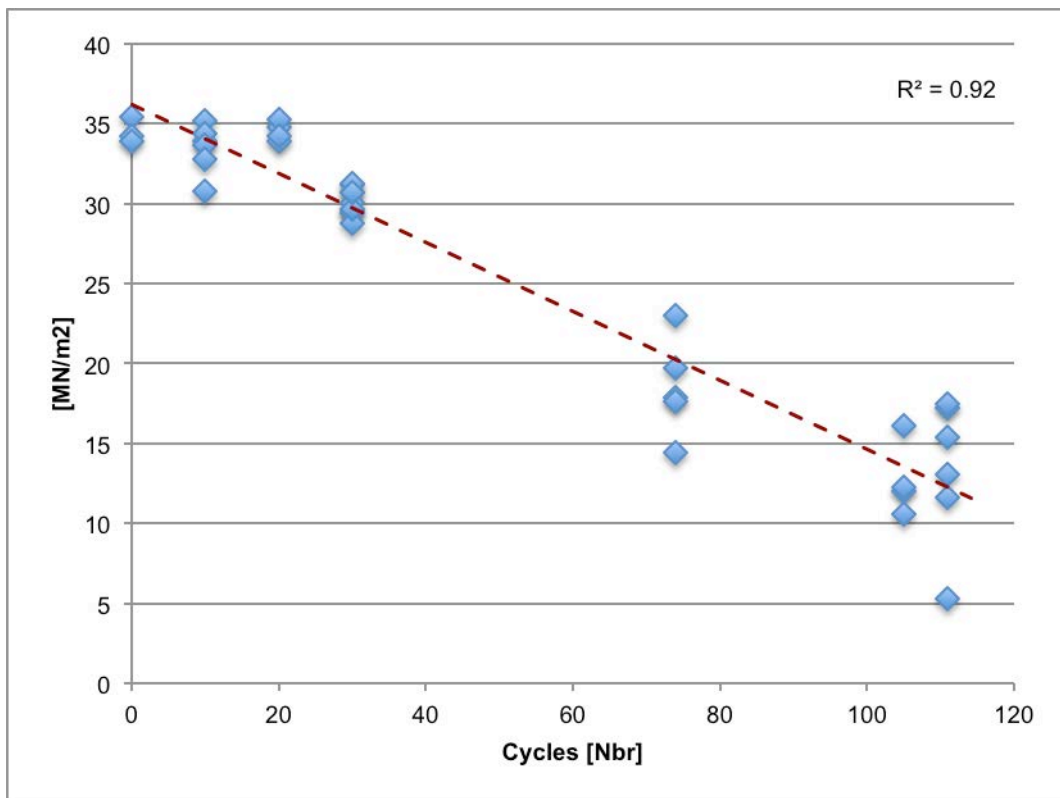


Fig. 8.7 : représentation graphique de la variation de la résistance à la compression uniaxiale d'éprouvettes soumises à un nombre croissant de cycles de gel-dégel. La résistance à la compression diminue de manière linéaire avec le nombre croissant de cycles de gel-dégel. La dispersion augmente sensiblement avec le nombre de cycles de gel-dégel, ce qui est une indication de relative hétérogénéité de la molasse bernoise aux effets du gel-dégel.

9 Essais de cristallisation selon de Quervain

Les essais de cristallisation selon la méthode définie par F. de Quervain ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques carottées dans des blocs de roches ornementales.

La mesure de la résistance à la compression uniaxiale a été déterminée sur des éprouvettes à l'état initial et après avoir subi un nombre croissant de cycles de l'essai de cristallisation selon F. de Quervain.

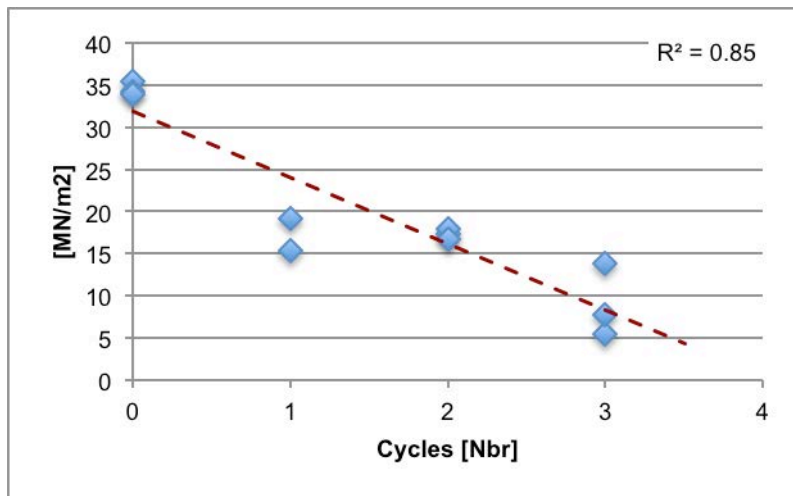


Fig. 9.8 : variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour la molasse bernoise.

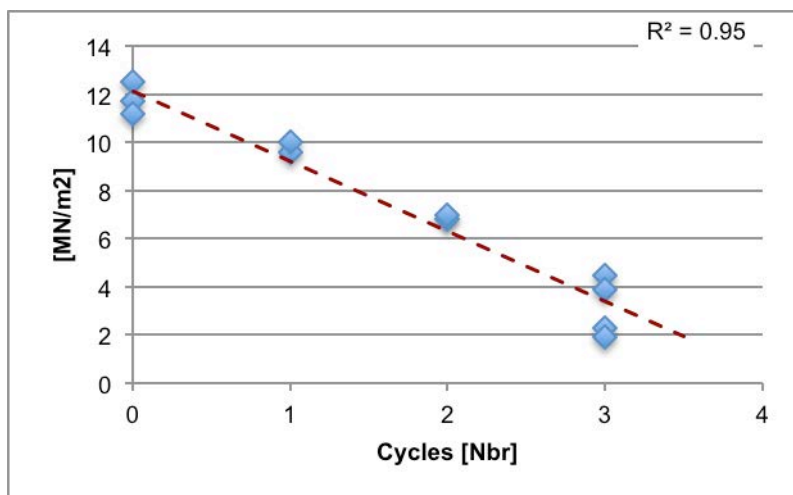


Fig. 9.2 : variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour un grès molassique fribourgeois.

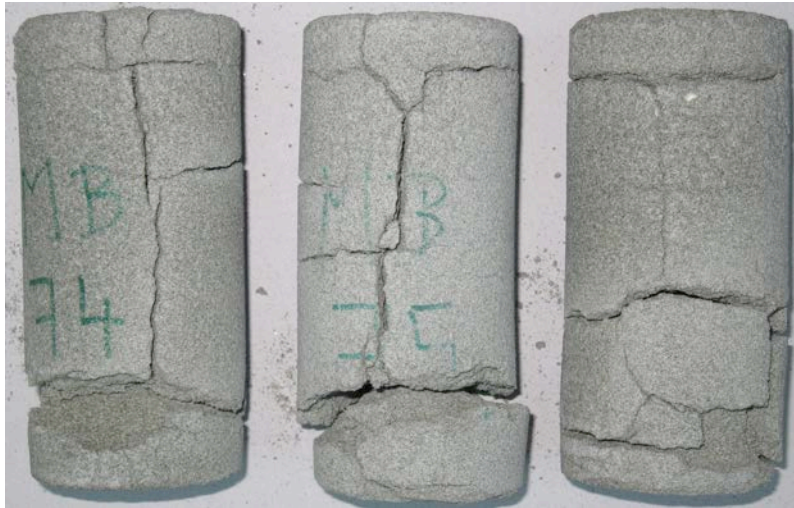


Fig. 9.3 Grès molassique bernois (MB) après 3 cycles de cristallisation. Les éprouvettes sont très fortement dégradées.



Fig. 9.4 Grès molassique fribourgeois (MA) après 2 cycles.



Fig. 9.5 Grès granitique à grain moyen (GBO) après 6, 7, 8 et 9 cycles.

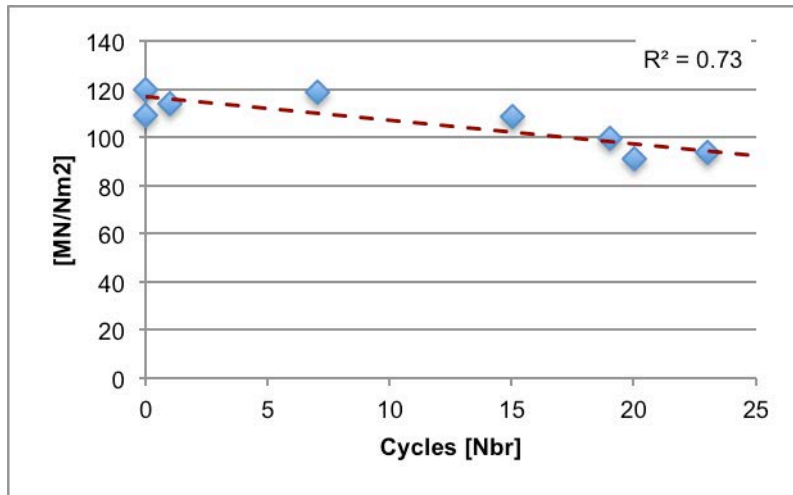


Fig. 9.6 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour le grès granitique à grain fin (GGU).

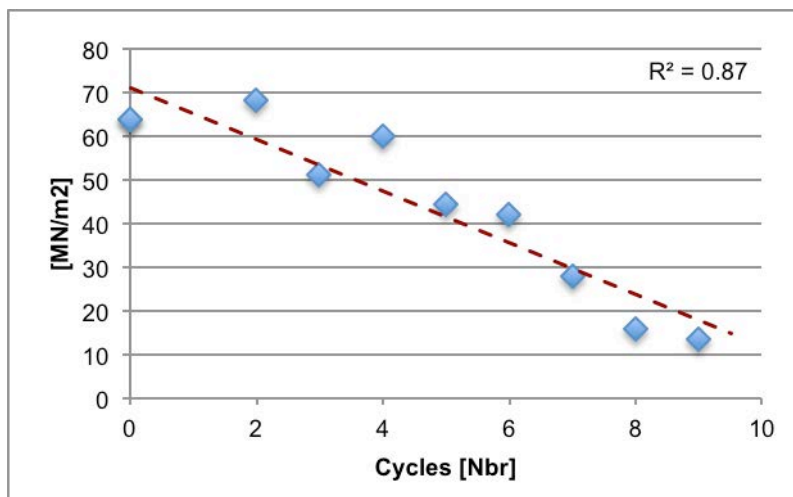


Fig. 9.7 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour le grès granitiques à grain moyen (GBO).

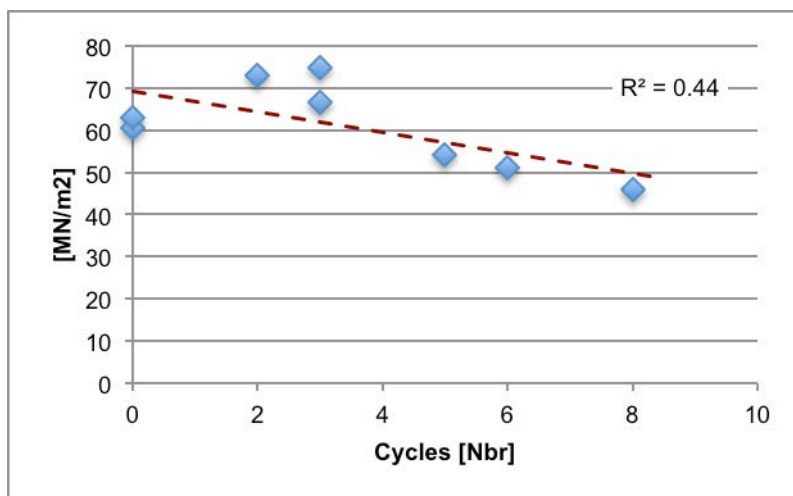


Fig. 9.8 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour le grès granitiques à grain grossier (GBU).

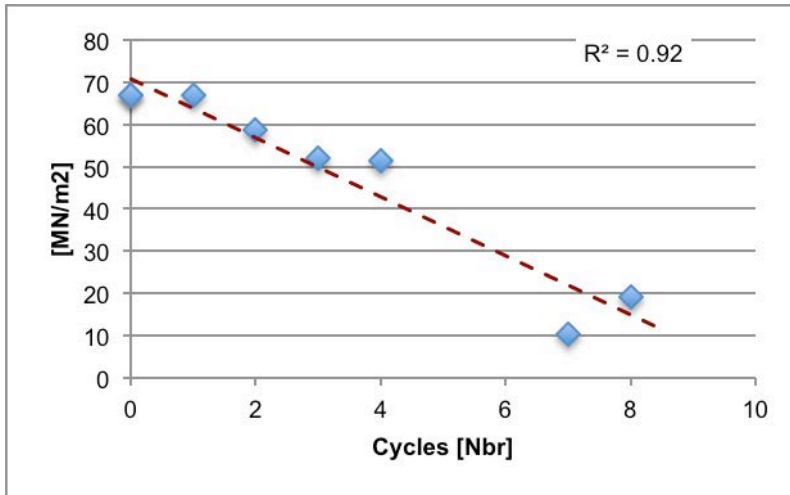


Fig. 9.9 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour le grès de type "Plattensandstein" non gélif (GPLNG).

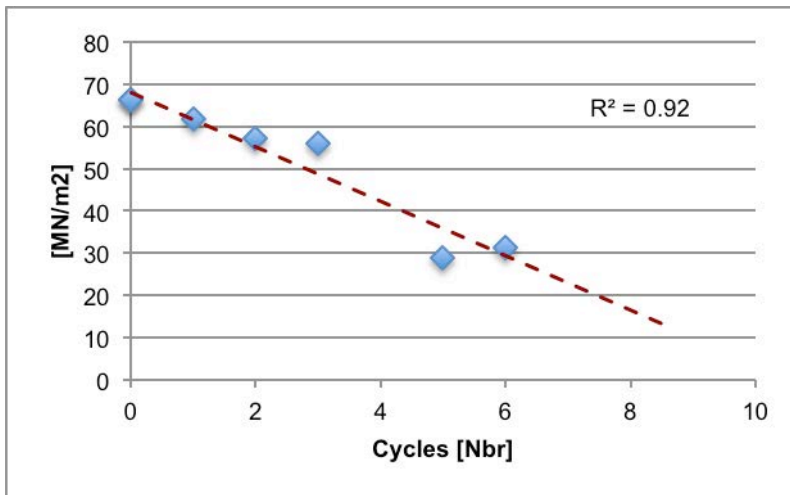


Fig. 9.10 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour le grès de type Plattensandstein sensible au gel (GPLG).

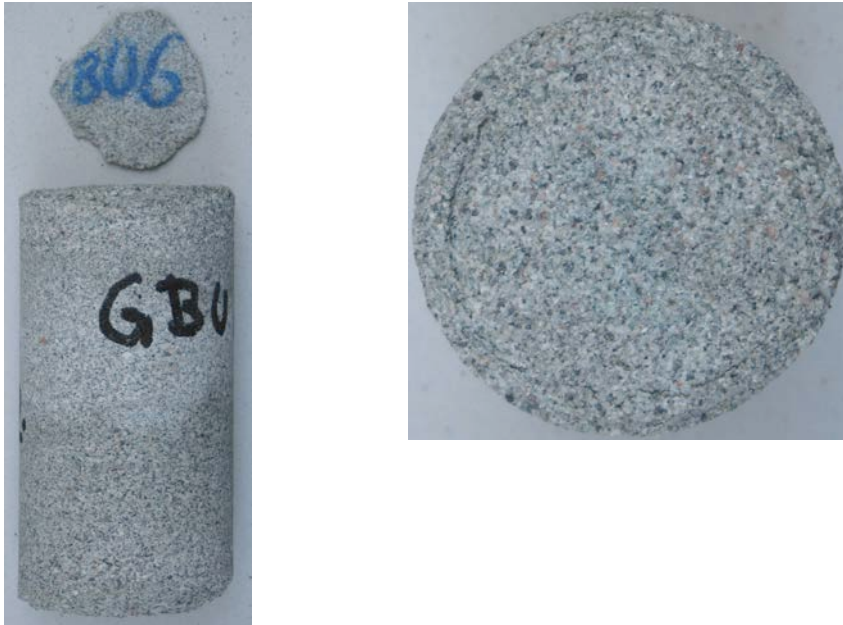


Fig. 9.11 Grès granitique à grain grossier (GBU).

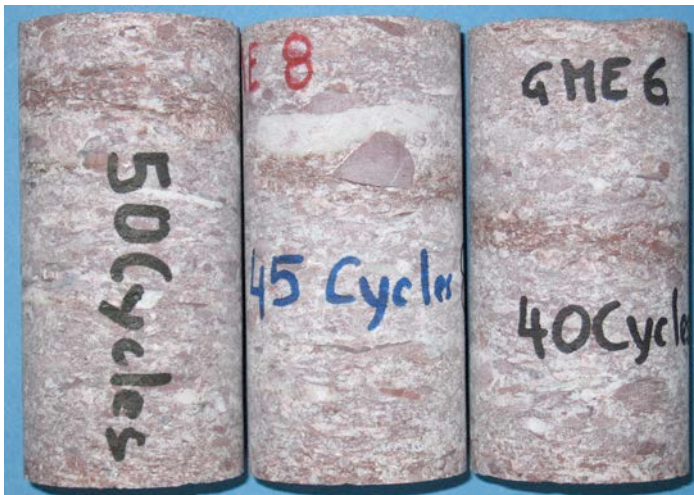


Fig. 9.12 Grès conglomératique de Mels ou grès du Verrucano (GME).



Fig. 9.13 Grès granitique à grain grossier (GBU) après 7, 8 et 12 cycles.

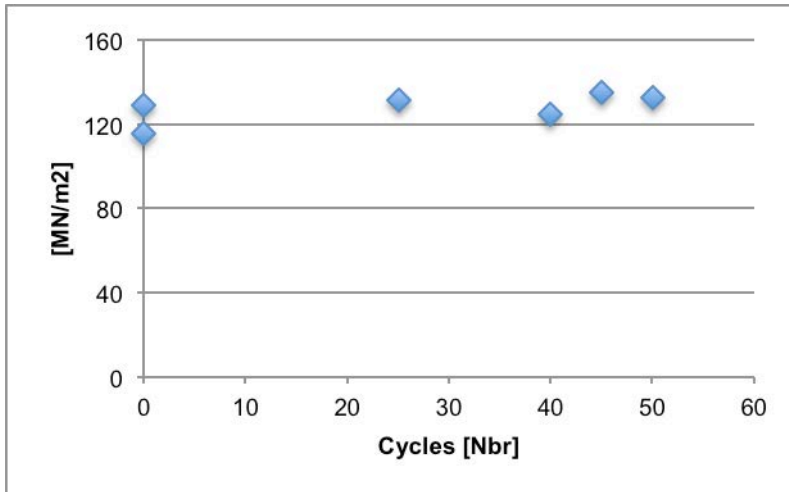


Fig. 9.14 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour le grès conglomératique de Mels.

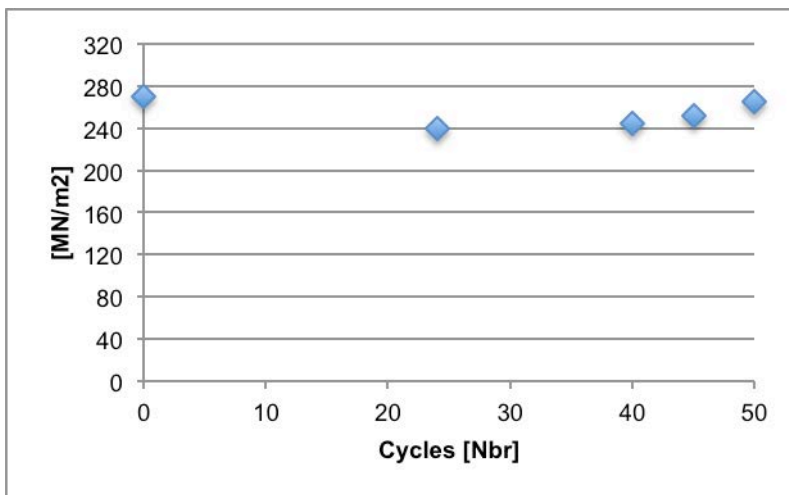


Fig. 9.15 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour un granite à grain fin.

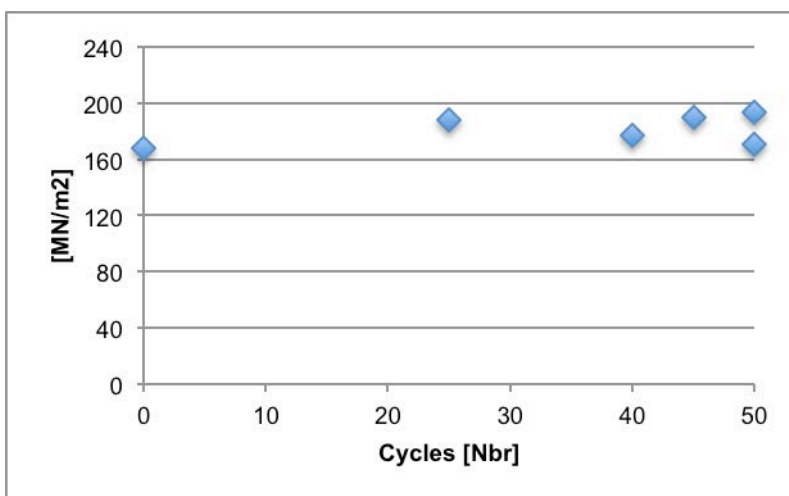


Fig. 9.16 Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de cristallisation pour une péridotite partiellement serpentinisée.



Fig. 9.17 Tuffeau blanc ou pierre de Bourré après 1 cycle de l'essai de cristallisation. Les dégradations sous forme de pelure d'oignon apparaissent similaires à celles observées sur les monuments historiques.



Fig. 9.18 : tuffeau blanc ou pierre de Bourré après 2 cycles de l'essai de cristallisation. Imbibé d'eau et seulement après deux cycles, le tuffeau ne présente plus de résistance significative aux contraintes mécaniques. Ce comportement particulier permet d'expliquer certaines formes de dégradation observées sur les parties exposées aux intempéries des ouvrages historiques. Ce type de dégradation n'avait pas été examiné lors de l'étude réalisée par F. de Quervain. Ce comportement particulier du tuffeau blanc montre l'importance d'un essai de résistance pour la roche humide pour certaines lithologies.

10 Essai de cristallisation selon EN 12370

La comparaison entre l'essai de cristallisation selon la norme européenne EN 12370 et celui selon F. de Quervain a été effectuée sur des éprouvettes de molasse bernoise. Les deux essais sont comparables au niveau du mode opératoire. La différence significative se trouve au niveau de la concentration en sulfate de sodium qui est de 14% pour l'essai européen et de 10% pour l'essai suisse.



Fig. 10.9 Cubes de molasse bernoise après 2 cycles de l'essai de cristallisation selon la méthode de F. de Quervain avec 10% de sulfate de sodium. Les dégradations sont importantes, mais les cubes sont encore relativement intacts.



Fig. 10.2 Cubes de molasse bernoise après 2 cycles de l'essai de cristallisation selon la norme EN 12 371 avec 14% de sulfate de sodium. Les cubes sont totalement détruits et aucune mesure mécanique ne peut plus être réalisée.

11 Nouvelle méthode

11.1 Essais sur éprouvettes cylindriques

11.2 Conditions d'essai

Température de départ +26°C
 Rampe de refroidissement jusqu'à +4°C
 Plateau maintenu à +4°C durant 1 heure
 Rampe de chauffage jusqu'à +30°C
 Phase de refroidissement entre +30°C et +26°C durant 1 heure

11.3 Effet de la concentration

L'effet de la concentration en sulfate de sodium a été examiné sur des éprouvettes de molasse bernoise. Pour un nombre de cycles constant, l'augmentation de la concentration en sel induit une réduction plus importante de la résistance à la compression uniaxiale.

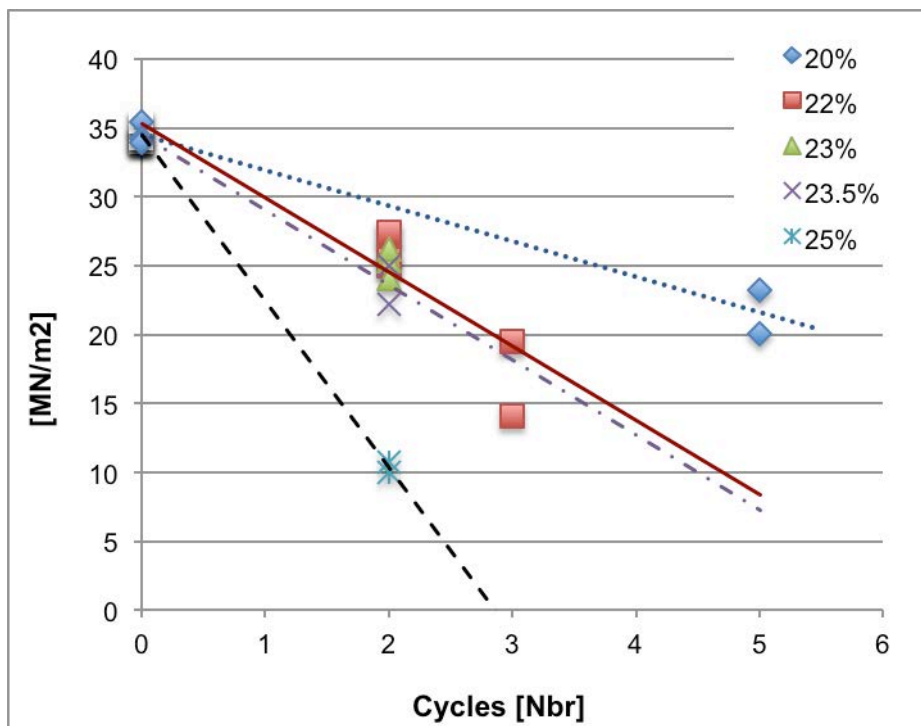


Fig. 11.10 Essais sur molasse bernoise avec diverses concentrations en sulfate de sodium. L'augmentation de la teneur en sulfate de sodium induit de plus fortes réductions de la résistance à la compression.

11.4 Effets sur différentes lithologies

Différentes lithologies ont été examinées à l'aide de la nouvelle méthode. La plupart des roches testées font partie des lithologies examinées par F. de Quervain. Les résultats sont présentés dans les diagrammes suivants.

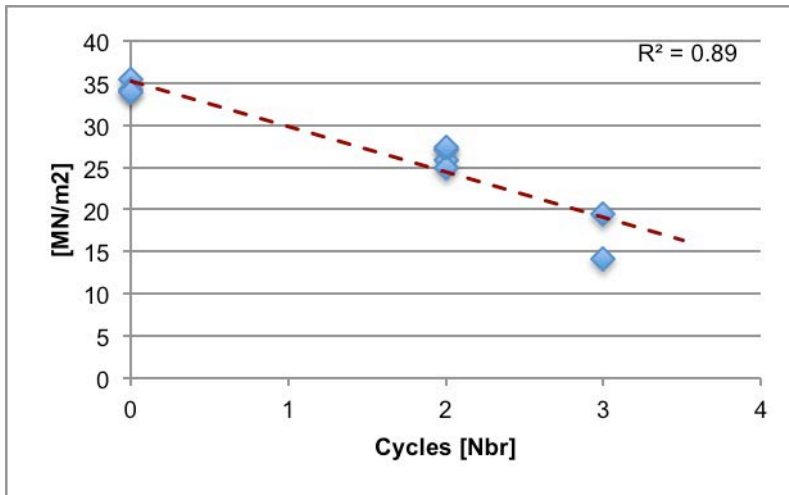


Fig. 11.11 Molasse bernoise (MB). Concentration en sulfate de sodium 22%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

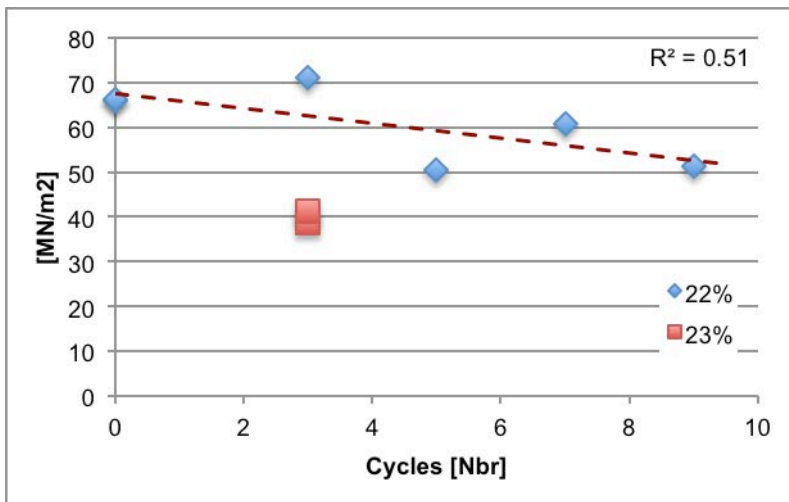


Fig. 11.3 Plattensandstein de type gélif (GPLG). Concentration en sulfate de sodium 22 et de 23%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

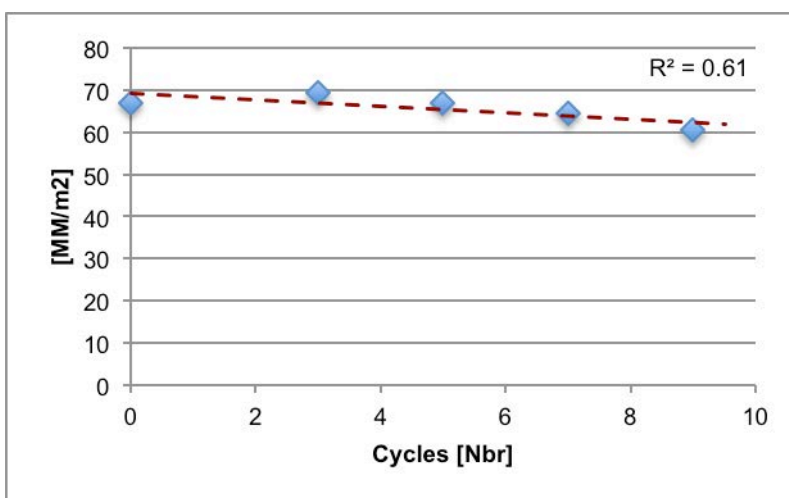


Fig. 11.4 Plattensandstein de type non gélif (GPLNG). Concentration en sulfate de sodium 22%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

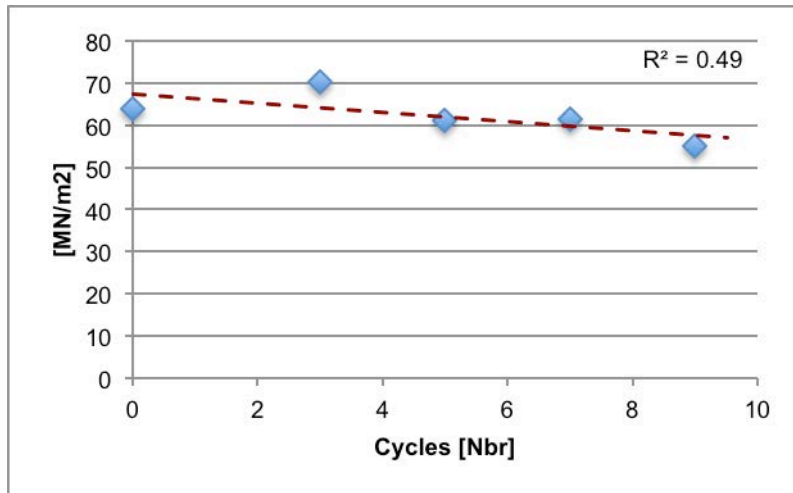


Fig. 11.5 Grès granitique (GBO). Concentration en sulfate de sodium 22%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

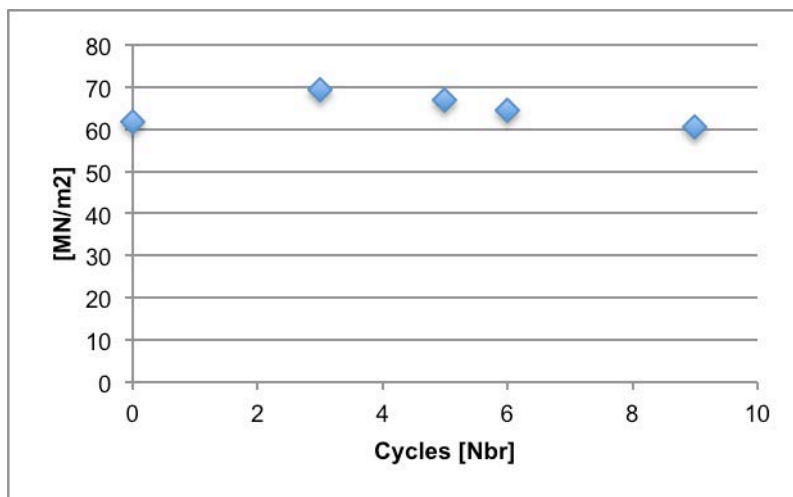


Fig. 11.6 Grès granitique à grain moyen (GBU). Concentration en sulfate de sodium 22%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles. Il n'y a pas de diminution significative au moins jusqu'à 9 cycles.

11.5 Adaptation des paramètres à la phase métastable

Des essais en dehors du domaine de stabilité de la phase métastable à basse température ont été conduits. Les autres paramètres sont comparables à ceux utilisés précédemment.

11.5.1 Conditions d'essai

Température de départ = +22°C

Rampe de refroidissement maximale jusqu'à -6°C

Plateau maintenu à -4°C durant 1 heure

Rampe de chauffage maximale jusqu'à +30 à +34°C

Phase de refroidissement entre +34°C et +22°C pendant 0.5 à 1 heure

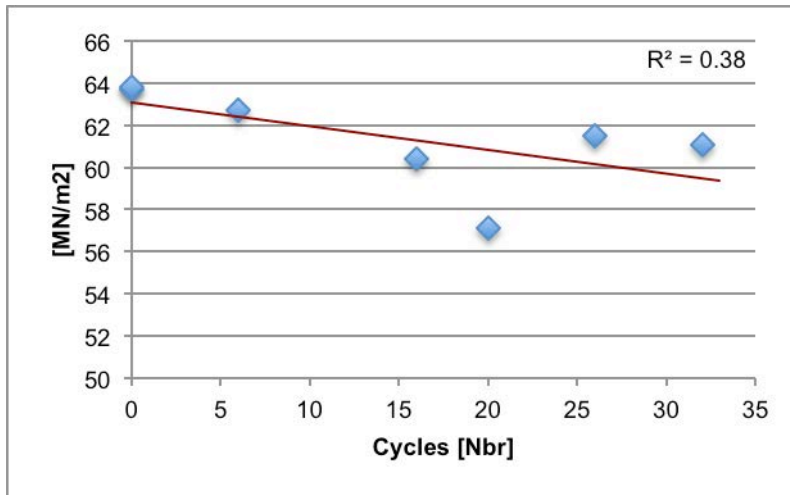


Fig. 11.7 Grès granitique (GBO). Concentration en sulfate de sodium 20%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

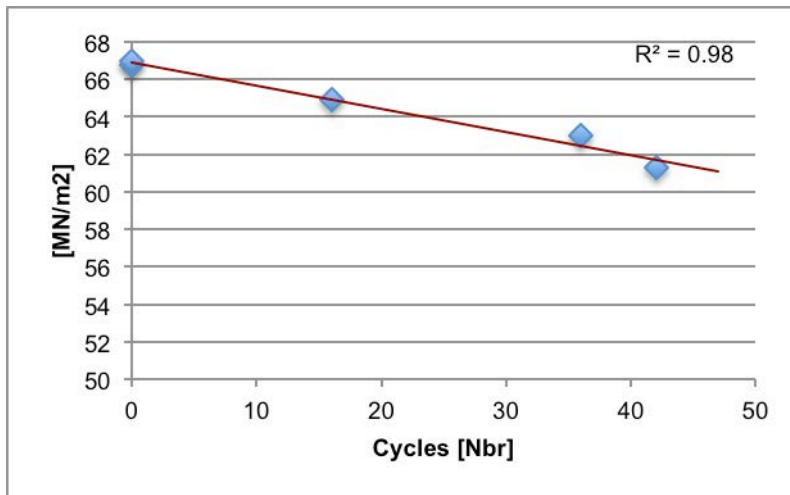


Fig. 11.8 Plattensandstein de non gélif (GPLNG). Concentration en sulfate de sodium 20%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

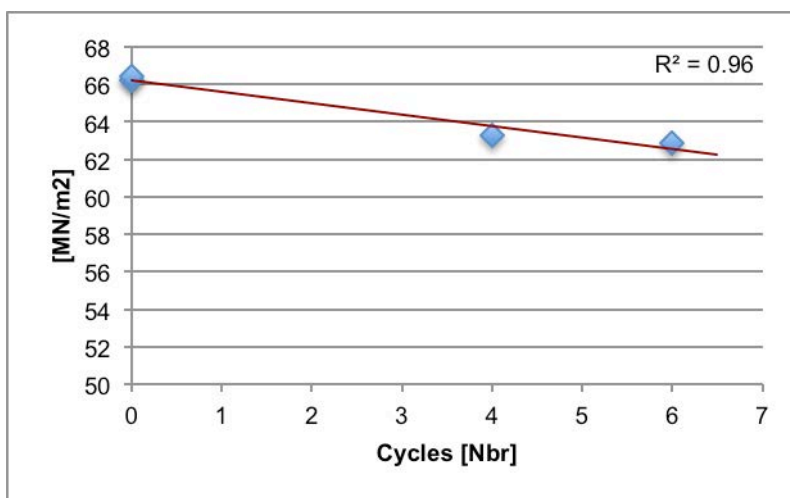


Fig. 11.9 Plattensandstein de non gélif (GPLNG). Concentration en sulfate de sodium 20%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

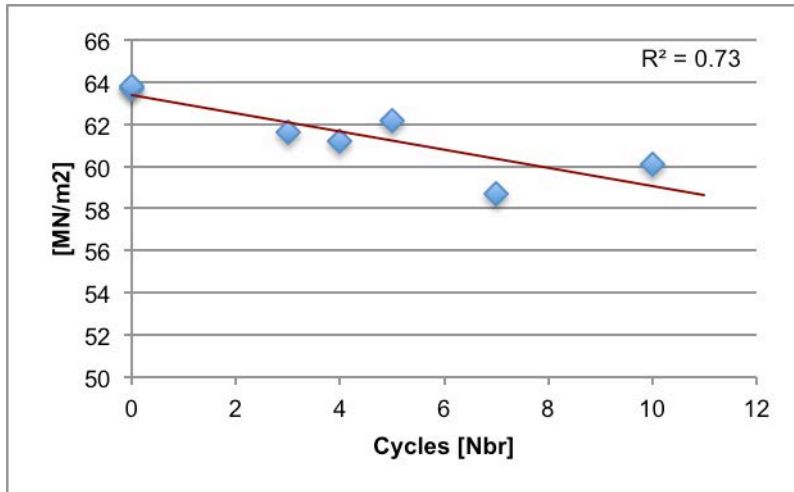


Fig. 11.10 Grès granitique (GBO). Concentration en sulfate de sodium 25%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

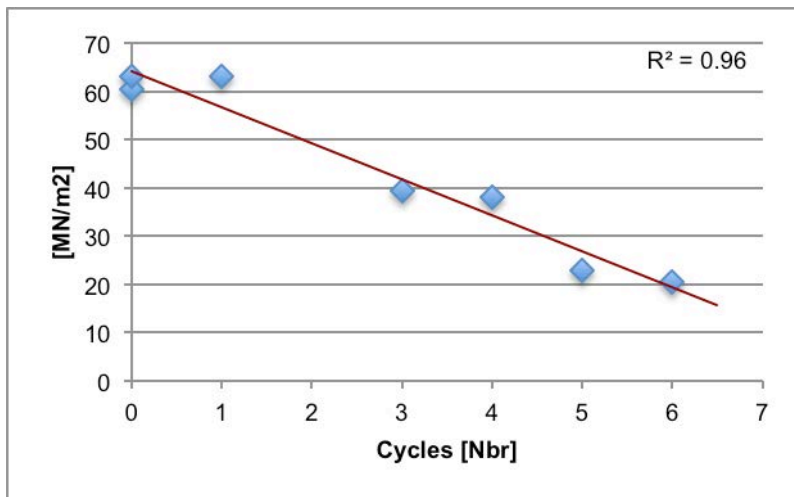


Fig. 11.11 Grès granitique à grain grossier (GBU). Concentration en sulfate de sodium 25%. Variation de la résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

12 Tests sur granulats avec la nouvelle méthode

12.1 Gravillons

Des essais sur des gravillons composés de granite non gélif et des gravillons potentiellement gélifs composés de granite transformé hydrothermalement ont été effectués avec la nouvelle méthode. Les dégradations ont touché uniquement les granulats gélifs (fig. 12.2)

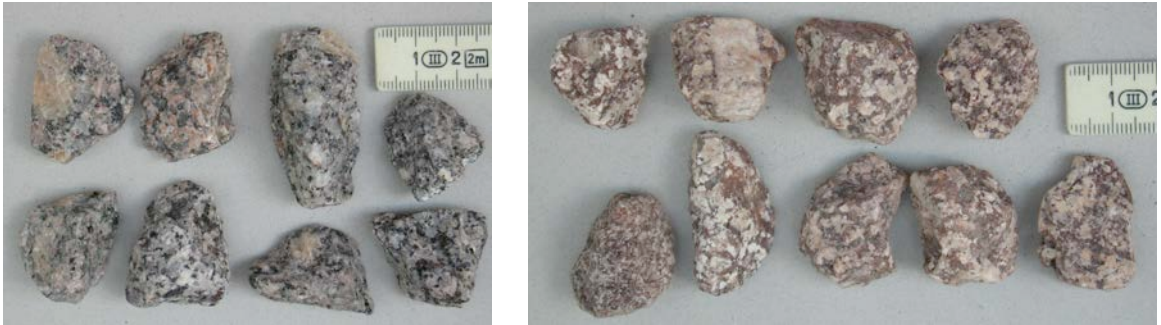


Fig. 12.1 Gravillons 8/11mm durables de couleur noire à gauche et gravillons gélifs 8/11mm à droite.



Fig. 12.2 État des gravillons gélifs après 4 cycles de l'essai. Il s'agissait du premier système comprenant un bac de réaction et une solution à 25% de sulfate de sodium. Les contraintes de température ont été définies en dessous du domaine de stabilité de la phase métastable et en dessous du domaine de stabilité de la thenardite. Les gravillons durables se sont montrés insensibles à l'essai alors que les gravillons sensibles aux intempéries ont été totalement dégradés.

12.2 Ballasts

Divers types de ballast potentiellement sensibles aux intempéries ont été soumis des essais selon la nouvelle méthode. Les ballasts composés de granulats gélifs ont tous subis des détériorations importantes après peu de cycles et dans un délai très court.



Fig. 12.3 grains de ballast composés de gneiss fortement kaolinisé avant l'essai.



Fig. 12.4 grains de ballast composés de gneiss kaolinisé après 6 cycles du nouvel essai dans le réacteur avec une solution à 20% de Na_2SO_4 .



Fig. 12.5 exemples de grains de ballast composés de granite présentant des signes de kaolinisation et de chloritisation. À gauche grain fortement chloritisé et à droite grains fortement kaolinisés. Les transformations ne sont pas homogènes.



Fig. 12.6 grains de ballast composés de granite chloritisé et partiellement kaolinisé après 9 cycles seulement du nouvel essai dans le réacteur avec une solution à 25% de Na_2SO_4 . La durée de l'essai est d'environ 2 jours et demi seulement.



Fig. 12.7 grains de ballast composés de granite chloritisé et partiellement kaolinisé après 9 cycles du nouvel essai dans le réacteur avec une solution à 25% de Na_2SO_4 . La durée de l'essai est d'environ 2 jours et demi seulement.



Fig. 12.8 exemples grains de ballast composés de gneiss altéré partiellement (à gauche) et de volcanite transformée hydrothermalement (à droite). L'altération et la transformation ne sont pas homogènes.



Fig. 12.9 grains de ballast composés de gneiss altéré après 9 cycles du nouvel essai dans le réacteur avec une solution à 25% de Na_2SO_4 .



Fig. 12.10 grains de ballast composés de volcanite transformée hydrothermalement après 9 cycles du nouvel essai dans le réacteur avec une solution à 25% de Na_2SO_4 .

13 Exemples d'altération in situ

Quelques exemples parmi les phénomènes d'altération observés in situ sont décrits dans ce chapitre. Une étude systématique dépasse le cadre de cette recherche et seuls quelques exemples parmi les objets visités sont mentionnés dans ce rapport. Il s'agit de roches en place, de monuments en pierres ornementales ainsi que de granulats.



Fig. 133.12 Bancs de grès molassiques dans la vallée de la Sarine dans le canton de Fribourg. L'altération se présente sous forme de pelure d'oignon et d'effritement.



Fig. 133.13 Blocs de grès molassique bernois dans un bâtiment de la région de Krauchtal dans le canton de Berne. L'altération se présente sous forme de pelure d'oignon et d'effritement.



Fig. 133.3 Exemple de blocs sensibles aux intempéries dans un village protégé de Haute-Loire en France. L'altération se présente sous forme de pelure d'oignon et de fissuration. Le choix et l'emplacement des éléments gélifs sont peu judicieux. Des coûts de réfection dus à l'altération prématurée sont inévitables.



Fig. 133.4 Exemple d'altération en pelures d'oignon d'un grès sur un bâtiment historique de la région de Fiesole en Italie. Les parties exposées du bâtiment sont particulièrement touchées par les phénomènes d'altération. L'altération sous forme de pelure d'oignon est très caractéristique des grès.



Fig. 133.5 Dégradation d'un bâtiment historique en tuffeau ou pierre de Bourré dans la région de Montrichard dans le Val de Loire. Les phénomènes observés in situ correspondent aux dégradations reproduites en laboratoire.



Fig. 133.6 Dégradation d'une paroi dans un château en tuffeau ou pierre de Bourré dans le Val de Loire. Ici aussi les dégradations correspondent aux phénomènes qui peuvent être reproduits en laboratoire.

13.1 Gravillons



Fig. 133.7 Exemple d'altération de granulats composés de volcanite transformée hydrothermalement dans un revêtement de type MR dans une autoroute en Suisse. Des problèmes de glissance dus à la destruction d'une partie des granulats ont nécessité un remplacement prématuré du revêtement.

13.2 Ballast pour voies ferrées



Fig. 133.8 Exemple d'un ballast pour voies ferrées en Suisse nécessitant un renouvellement prématuré dû à l'altération des granulats composés de granite chloritisé et kaolinisé. Examens de la voie et photographie M. Erich Würsch, CFF – Infrastructure.



Fig. 133.09 Exemple de grains de ballast pour voies ferrées altérés provenant d'une voie nécessitant un renouvellement prématuré du ballast dû à l'altération des granulats composés de granite chloritisé et kaolinisé. Examens de la voie et photographie M. Erich Würsch, CFF – Infrastructure.



Fig. 133.10 Exemple d'un lit de ballast pour voies ferrées comportant une forte proportion de grains sensibles aux effets des intempéries. Cette voie nécessite un renouvellement prématuré du ballast dû à l'altération des granulats. Examens de la voie et photographie M. Erich Würsch, CFF – Infrastructure. Les essais en laboratoire avec la nouvelle méthode permettent de reproduire ces types de dégradations.

14 Interprétation

14.1 Comparaison des trois méthodes sur la molasse bernoise

La lithologie principale utilisée lors de l'étude effectuée par le Prof. F. de Quervain fut la molasse bernoise. C'est donc sur cette lithologie que les essais de corrélation ont été principalement effectués. De nombreux problèmes sont apparus qui rendent une adéquation simple avec la nouvelle méthode problématique. Le grès molassique bernois utilisé comme roche ornementale apparaît très homogène et la résistance à la compression de la roche fraîche présente de faibles variations. Les essais de gel/dégel ainsi que les essais de cristallisation ont montré que la molasse bernoise se comportait de façon relativement hétérogène face aux intempéries.

La molasse bernoise est sensible aux effets du gel/dégel. Près de cent cycles sont nécessaires pour que des dégradations visibles significatives apparaissent. Il faut par contre seulement 2 ou 3 cycles pour que des dégradations très importantes se produisent durant l'essai de cristallisation ou selon la nouvelle méthode avec une concentration de 22% de sulfate de sodium. La dispersion des valeurs de résistance à la compression après quelques cycles augmente fortement. C'est une source d'erreur importante qui rend la corrélation problématique entre l'essai de cristallisation, celui de gel-dégel et la nouvelle méthode (fig. 14.1).

L'essai de cristallisation selon de Quervain ou selon la nouvelle méthode apparaît environ 50 ± 10 fois plus intense que le gel/dégel pur.

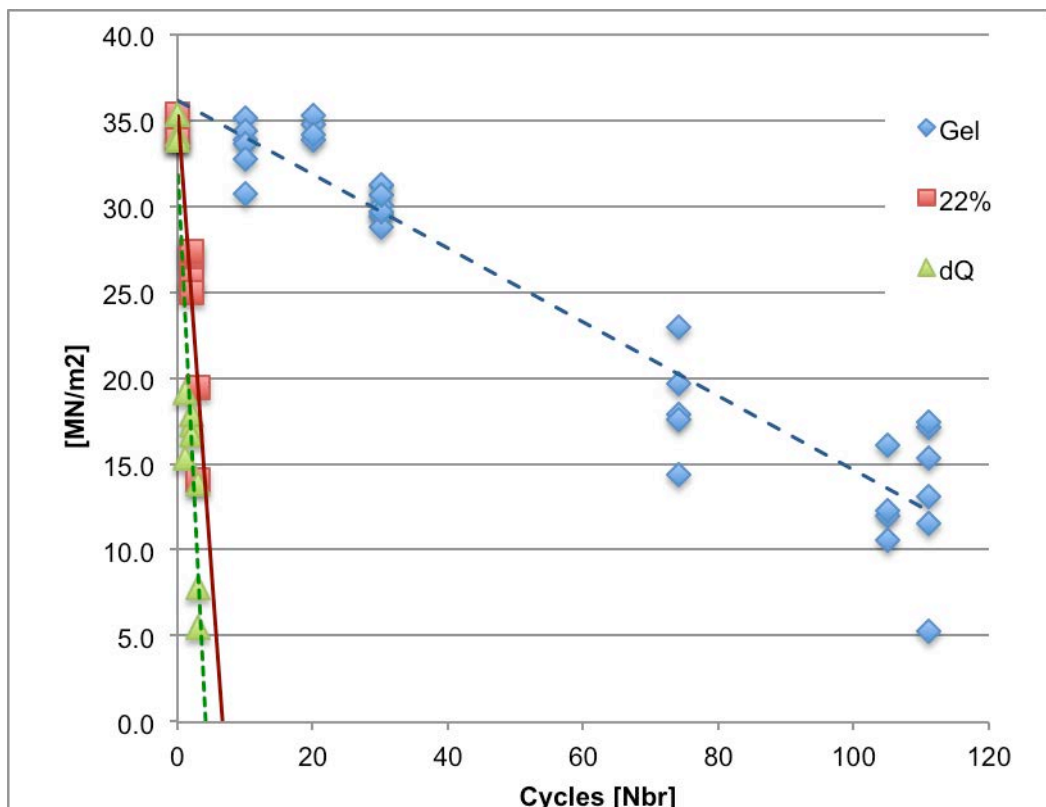


Fig. 14.1 comparaison de la variation de la résistance à la compression entre l'essai de gel-dégel, l'essai de cristallisation selon F. de Quervain et la nouvelle méthode pour une concentration de 22 % de sulfate de sodium pour la molasse bernoise.

14.2 Adéquation entre nouvelle méthode et essai de Quervain

L'usage d'une concentration type en sulfate de sodium permettant une adéquation directe avec l'essai de cristallisation et la nouvelle méthode s'avère impossible. La modification de la concentration en sulfate de sodium permet d'influencer le nombre de cycles de la nouvelle méthode (fig. 14.2).

Pour la molasse bernoise, la concentration en sulfate de sodium permettant une adéquation simple entre la nouvelle méthode et l'essai de cristallisation serait d'environ $24.5 \pm 0.5 \%$ (fig. 15.2).

Par contre une solution à 22% de sulfate de sodium apparaît suffisante pour le grès granitique à grain fin (GGU) (fig. 14.3).

A concentration égale, les divergences entre les différentes lithologies ne permettent pas une adéquation simple basée sur une concentration unique (fig. 14.4 et 14.5).

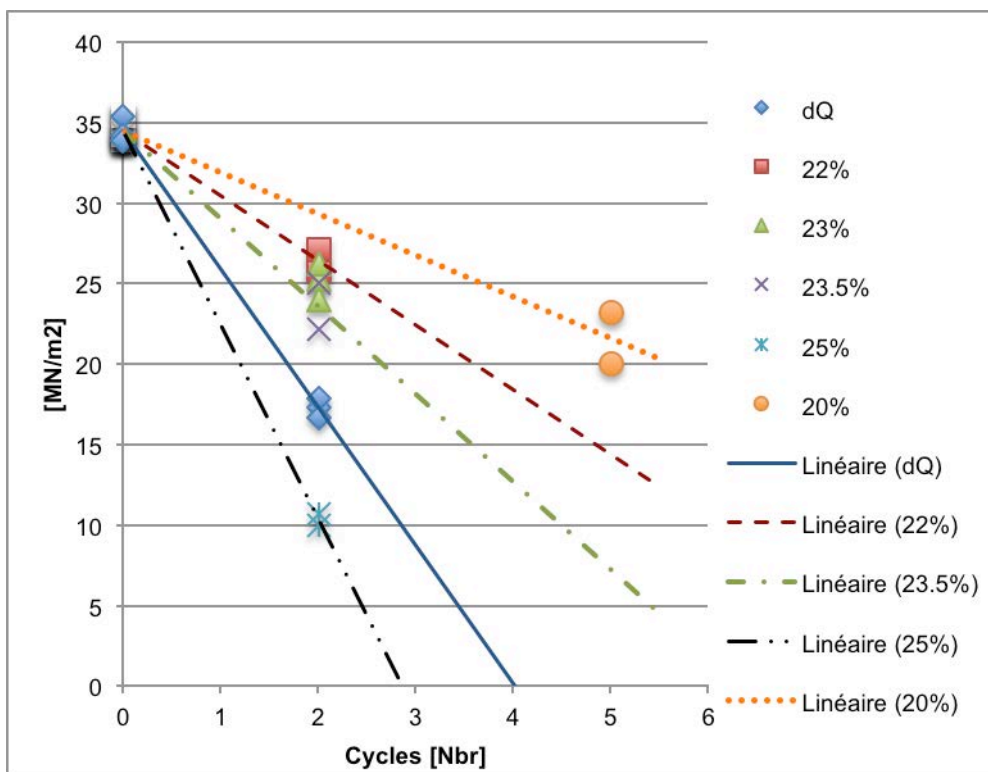


Fig. 14.2 Adéquation entre la nouvelle méthode et l'essai de cristallisation selon F. de Quervain pour la molasse bernoise. Une concentration en sulfate de sodium permettant une adéquation simple entre la nouvelle méthode et l'essai de cristallisation serait d'environ $24.5 \pm 0.5 \%$.

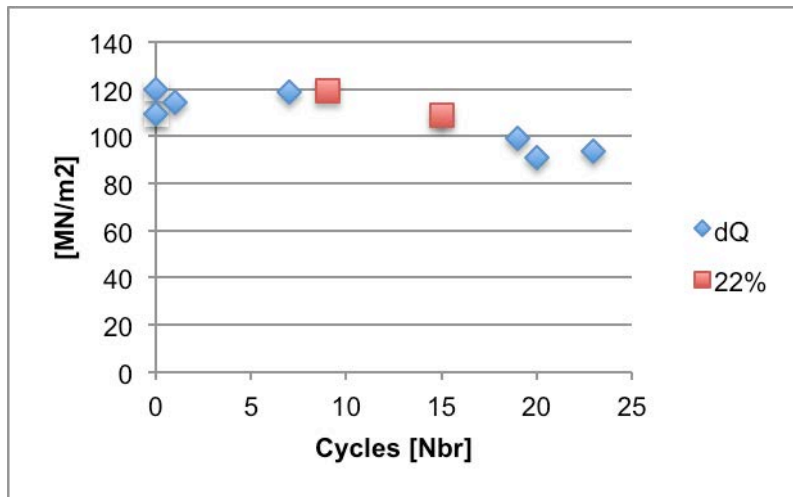


Fig. 14.3 Essai d'adéquation pour le grès granitique à grain fin (GGU). Une concentration de 22% en sulfate de sodium apparaît suffisante.

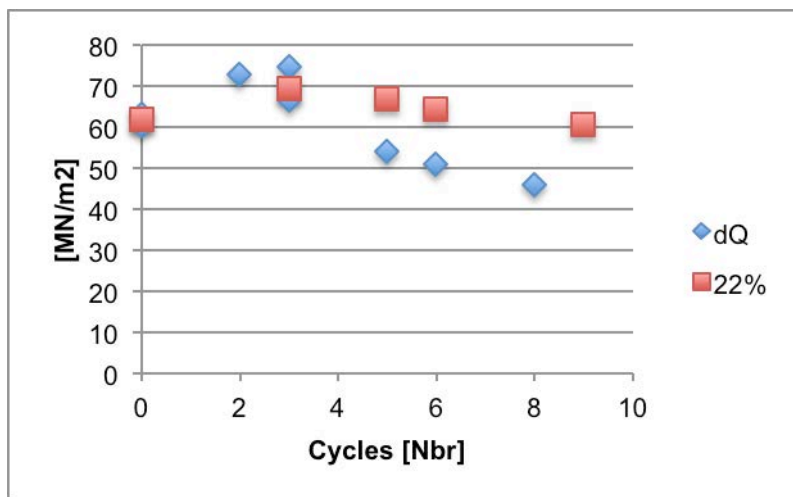


Fig. 14.4 Essai d'adéquation pour le grès granitique à grain grossier (GBU).

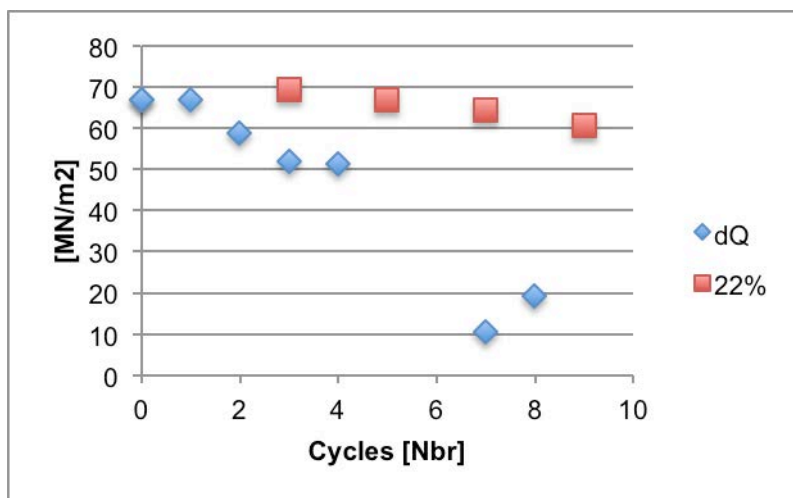


Fig. 14.5 Essai d'adéquation pour le "Plattensandstein" (GPLNG). La teneur en sulfate de sodium est insuffisante dans ce cas.

14.2.1 Adaptation des conditions d'essai à la phase métastable

L'adaptation des conditions d'essai à la phase métastable n'a pas permis d'établir une meilleure adéquation avec l'essai selon la méthode de Quervain. Les divergences entre les lithologies restent présentes (fig. 14.5 et 14.6). Des divergences par rapport aux premiers essais et selon la concentration en sulfate de sodium apparaissent pour certaines lithologies, dont le grès granitique à grain moyen. Ces divergences n'ont pas pu être éclaircies dans le cadre de cette étude. Des études supplémentaires sont nécessaires pour clarifier l'origine de ces divergences et imprécisions.

Une corrélation simple basée sur une concentration en sulfate de sodium unique avec l'essai de cristallisation selon F. de Quervain ou l'essai de cristallisation selon CEN s'avère impossible.

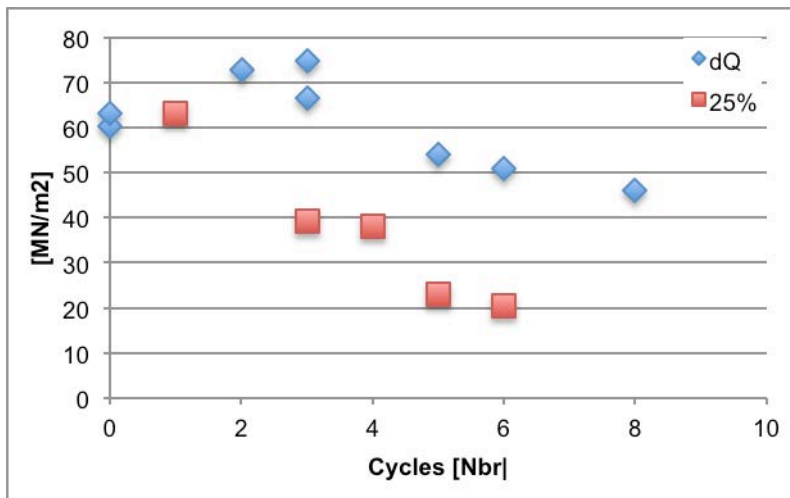


Fig. 14.5 Essai d'adéquation pour le grès granitique à grain grossier (GBU) avec une concentration de 25 % en sulfate de sodium.

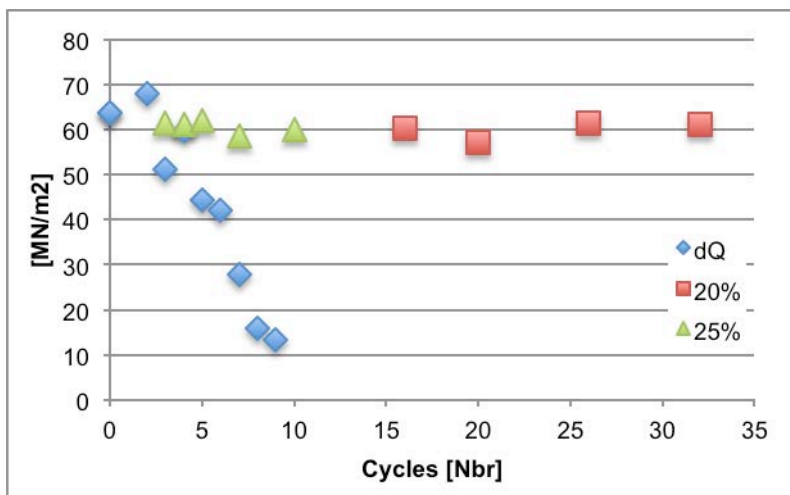


Fig. 14.6 Essai d'adéquation pour le grès granitique à grain moyen (GBO) avec des concentrations de 20 et 25 % en sulfate de sodium. La concentration de 20% semble peu affecter la résistance de ce type de grès.

14.3 Origine probable des divergences

L'essai de cristallisation selon F. de Quervain ou selon la norme CEN implique des cycles de dessiccation intenses à plus de 100°C ainsi que des chocs thermiques qui sont absents de la nouvelle méthode. Les minéraux sensibles à la dessiccation ou aux chocs thermiques, tels que les argiles gonflantes sont beaucoup plus sollicités dans l'essai de cristallisation. C'est probablement une des causes, voire la cause principale la plus probable pour expliquer ces divergences.

14.4 Comparaisons des méthodes

L'essai de cristallisation selon F. de Quervain pratiqué en Suisse depuis plus de 50 ans représente l'essai le plus complet et le plus contraignant. Si l'essai est pratiqué correctement, il permet de tester les effets de cycles de température, dans une certaine mesure des chocs thermiques, de la dessiccation, de la succion, du transport des sels par capillarité, de la cristallisation des sels solubles ainsi que de simuler le gel-dégel beaucoup plus intensément que le gel-dégel lui-même. Cet essai est relativement différencié. Il a l'avantage d'être de présenter un schéma d'interprétation permettant d'évaluer la durabilité aux intempéries en fonction de l'exposition pour le climat en Suisse. C'est une méthode extrême qui simule la plupart des contraintes liées aux intempéries.

Toutefois, plusieurs paramètres ne sont pas contrôlés ni normalisés dans le mode opératoire actuel. Les conditions d'essai sont difficiles à contrôler. Il est probable que les effets des minéraux gonflants par exemple, soient fortement exagérés pour certaines conditions. L'essai nécessite un suivi important de l'évolution des éprouvettes au cours de l'essai. Le coût des équipements est relativement modique. Pour les éléments sensibles aux intempéries et soumis à des contraintes importantes, la méthode de F. de Quervain donne de bons résultats. La sensibilité aux intempéries des roches est bien mise en évidence et correspond relativement bien à ce qui apparaît sur les objets construits ou dans la nature.

L'essai CEN selon EN 12370 présente les mêmes caractéristiques, mais il s'avère beaucoup trop violent pour certaines lithologies utilisées en Suisse, telles que les grès de type molasse bernoise et particulièrement les molasses fribourgeoises qui sont encore plus sensibles que la molasse bernoise. De même, de nombreux paramètres ne sont ni contrôlés ni normalisés suffisamment. En outre il n'existe aucune méthode d'interprétation.

L'essai de gel / dégel nécessite beaucoup de manutention et implique une durée très importante. Seuls les effets du gel/dégel sont testés au cours de cet essai.

La nouvelle méthode proposée ici comprend la plupart des éléments de l'essai de cristallisation. Par contre, les effets liés à la dessiccation ne peuvent pas être testés par cette méthode. L'automatisation de l'essai ne permet pas de prendre en compte ce paramètre. La nouvelle méthode semble beaucoup plus se rapprocher d'un essai de gel/dégel classique comprenant en outre la cristallisation de sel dans les pores de la roche. Des essais comparatifs supplémentaires et beaucoup plus étendus que cette étude seraient nécessaires pour valider cette hypothèse ainsi que la méthode elle-même.

Les avantages de cette nouvelle méthode sont les paramètres qui peuvent être bien contrôlés et facilement modifiés, la rapidité de l'essai, le peu de manutention et l'automatisation qui permettent un déroulement de l'essai sans l'intervention continue d'un opérateur plusieurs fois par jour ainsi qu'un gain en temps très significatif. La simulation de l'essai de gel-dégel permettrait un immense gain de temps, si cette hypothèse devait se confirmer.

Un aspect problématique réside toutefois dans les coûts d'équipement qui restent élevés par rapport à l'essai de cristallisation. Toutefois, les gains en temps et en travail peuvent rapidement compenser les coûts initiaux du matériel.

15 Conclusions

15.1 Problème rencontré

Cette recherche s'est avérée beaucoup plus complexe que prévu. Elle a nécessité des investissements supplémentaires en matériel et en équipement ainsi que beaucoup plus de temps que planifié lors de la demande. Le développement d'une nouvelle méthode d'essai s'en est trouvé fortement compromis du fait que le système est devenu beaucoup plus complexe que prévu initialement. La cause principale réside dans la présence de la forme métastable $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ récemment mise en évidence par Hamilton et al (2008). Cette phase "parasite" a rendu la recherche beaucoup plus complexe (chap. 6, fig. 6.2). Durant près d'un siècle la science et la technique ont considéré que seul le décahydrate de sodium était la phase à prendre en considération en tant que cause des dégradations des pierres ornementales. Il pourrait en être autrement et l'heptahydrate de sodium pourrait jouer un rôle très significatif. Mais des études supplémentaires sont nécessaires pour clarifier l'importance de cette phase métastable dans l'altération des monuments ainsi que dans les essais basés sur ce sel.

15.2 Méthodes d'essais

La validation de la nouvelle méthode proposée dans cette étude nécessite encore des recherches et un travail de mise au point ainsi qu'une validation pour être proposée au niveau européen. Les essais européens pour les granulats sont insatisfaisants et peu voire pas significatifs du tout pour les conditions climatiques rencontrées en Suisse (chap. 1.3). L'essai CEN selon EN 12370 pour les roches ornementales, pavés et bordures pourrait se rapprocher de l'essai selon F. de Quervain. Toutefois, l'essai est beaucoup trop violent pour une bonne partie des roches produites en Suisse du fait de la concentration en sulfate de sodium trop élevée qui induit de trop fortes dégradations immédiates (chap. 10). La mise en évidence d'une phase métastable dans l'essai de cristallisation au sulfate de sodium soulève une problématique nouvelle aussi bien pour l'essai selon EN 12370 que pour l'essai selon F. de Quervain. Il est probable que des phases métastables existent aussi pour le sulfate de magnésium, ceci d'autant plus que le sulfate de magnésium est complètement déshydraté seulement à la température de 200°C. Entre 48.1 et 150°C différentes formes hydratées (tétrahydrate, pentahydrate) se forment qui dépendent de la température et de l'humidité relative (chap. 1.3.3).

15.3 Uniformisation des méthodes d'essais

Les essais de durabilité pour les granulats et les roches naturelles des CEN TC 154, TC 178 et TC 246 devraient être uniformisés sur la base de l'essai au sulfate de sodium. Une adéquation avec l'essai selon F. de Quervain deviendrait envisageable. L'uniformisation des méthodes aussi bien pour les roches que pour les granulats permettrait de tester la résistance aux intempéries sur un seul matériel pour les carrières. Les variations de résistance à la compression après différents nombres de cycles de l'essai de cristallisation montrent que la dégradation des propriétés mécaniques des roches peut servir de mesure de durabilité par exemple idéalement pour les ballasts pour voies ferrées.

15.4 Contrôle des paramètres d'essais

La présence de la phase métastable $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ indique que la science et la technique se sont probablement trompées durant près d'un siècle au niveau de la cause des altérations subies par les roches ornementales in situ (Hamilton et al 2008). Cette récente découverte a des implications déterminantes concernant la pertinence des essais de laboratoire pratiqués actuellement.

16 Propositions

16.1 Normalisation CEN

Les essais européens devraient être uniformisés aussi bien pour les granulats que pour les roches ornementales. L'essai de cristallisation au sulfate de sodium selon F. de Quervain est celui qui apparaît le mieux approprié. L'essai européen de cristallisation selon EN 12370 utilisant une concentration en sulfate de sodium de 14% s'est avéré beaucoup trop violent pour certaines roches ornementales Suisses (chap. 10). La concentration en sulfate de sodium devrait être abaissée à 10% comme pour l'essai selon F. de Quervain pour les procédures de caractérisation des roches, afin de permettre une différenciation plus précise. La concentration de 14%, voire supérieure serait adaptée pour des examens de contrôle, en ce sens qu'elle permettrait de gagner du temps puisque les effets sont plus importants lorsque la concentration augmente.

La procédure d'imbibition pour la détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats selon EN 1367-2 est fautive et elle devrait être réalisée progressivement comme celle de la norme EN 12370 pour les roches ornementales.

16.2 Essai de cristallisation

L'incidence de la phase métastable $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ devrait être déterminée pour tous les essais de cristallisation au sulfate de sodium, que ce soit l'essai selon F. de Quervain ou l'essai selon EN 12370. Il en est de même pour le sulfate de magnésium.

Les conditions de contrôle des essais de cristallisation devraient être mieux définies, telles que les rampes de refroidissement, les conditions ambiantes (température, humidité relative, etc.).

L'utilisation d'éprouvettes cylindriques selon la norme SN 670353 en lieu et place de cubes comme ceux utilisés lors du développement de l'essai par F. de Quervain est parfaitement possible. Les mêmes formes de dégradations ont été observées sur les éprouvettes cylindriques que sur les cubes (chap. 9)

16.3 Nouvelle méthode

La nouvelle méthode est basée sur un prototype qui doit être amélioré. Des améliorations sont possibles, voire nécessaires au niveau de la réduction de la masse de la solution, de l'augmentation du nombre d'éprouvettes, du contrôle des paramètres de température à l'intérieur des éprouvettes afin de pouvoir simuler des conditions climatiques de manière optimale.

La méthode elle-même doit être affinée et validée. La méthode est relativement simple au niveau des paramètres de contrôle. Elle permet des cycles rapides et automatisés. Les paramètres sont mieux maîtrisés dans un réacteur que dans des cycles d'imbibition et de dessiccation. La méthode ne présente pas les problèmes liés au maintien constant de concentration de la solution comme pour le sulfate de sodium ou de magnésium. Cette méthode semble pertinente pour le grès bernois. Toutefois toutes les propriétés de l'essai de cristallisation ne peuvent pas être reproduites. Le désavantage principal est que les phénomènes d'altération liés à la dessiccation ne sont pas pris en compte comme dans la méthode de F. de Quervain.

Cette nouvelle méthode permettrait plutôt d'affiner la grille d'évaluation de la méthode de F. de Quervain. Elle est probablement idéale pour simuler rapidement l'essai de gel/dégel qui est fastidieux et long à réaliser. Des études supplémentaires sont encore nécessaires pour valider cette hypothèse.

16.4 Considérations générales

L'essai de cristallisation selon F. de Quervain est une méthode simulant d'un seul tenant la plupart des cas extrêmes. De telles conditions d'essai sont réalistes pour les pavés, les bordures, les granulats utilisés dans la construction routière ainsi que les ballasts pour voies ferrées. Ces conditions d'essai extrêmes sont par contre rarement rencontrées dans la pratique pour la plupart des roches ornementales. Il en va de même pour quasiment tous les types d'essais proposés dans les normalisations CEN, SN ou ASTM. Il est quasiment inconcevable d'envisager une roche saturée complètement d'eau et subissant en même temps l'action du gel-dégel jusqu'au cœur de la roche pour les roches utilisées dans la construction d'édifices. Des essais plus différenciés seraient nécessaires tenant compte du climat local auquel la roche est exposée. La méthode développée dans cette étude permettrait probablement d'obtenir des résultats mieux différenciés.

Pour les matériaux rocheux utilisés dans la construction routière ainsi que pour les ballasts de chemin de fer il reste préférable pour le climat en Suisse de partir systématiquement de conditions extrêmes. Dans ce cadre, il serait préférable de conserver l'essai de Quervain ou d'utiliser un essai basé sur la norme EN 12370.

La mesure des variations de la résistance à la compression en fonction de cycles de gel-dégel ou de cristallisation de sel comme mesure en pertes de qualités mécaniques de la roche pourrait être une méthode pertinente pour les roches en place, les roches ornementales, les enrochements et par extrapolation sur les ballasts ainsi que les gravillons de taille > 11 mm.

En basant les essais sur la nature pétrographique des granulats et des roches, il est possible à un pétrographe, un minéralogiste ou un géologue d'identifier macroscopiquement les éléments gélifs n'ayant résisté à un essai. Il est difficile d'imaginer une méthode plus rapide qu'un examen pétrographique macroscopique.

16.5 Méthodique envisageable pour une norme suisse

Avant toute chose, il est impératif d'examiner l'effet et/ou l'influence de la phase métastable $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dans les essais de cristallisation basés sur le sulfate de sodium. Les paramètres de l'essai devraient tenir compte de cette nouvelle phase métastable et devraient être définis avec plus de précision et mieux contrôlés qu'actuellement.

L'idéal consisterait à conserver l'essai de cristallisation selon F. de Quervain, mais en l'adaptant aux nouvelles connaissances ainsi que de le compléter par cette nouvelle méthode en lieu et place de l'essai de gel-dégel qui est trop long.

La mesure des variations de résistance à la compression lors de cycles définis d'un essai de cristallisation pourrait aussi être une procédure permettant de déterminer la durabilité d'une roche soumise à des sollicitations mécaniques et selon les applications prévues.

La nouvelle méthode développée ici pourrait idéalement servir de complément à la méthode de cristallisation basée sur le sulfate de sodium. Cette nouvelle méthode semble adaptée pour les roches sensibles aux effets des intempéries (voir fig. 12.1 à 12.9). Elle permet un très grand gain de temps et limite fortement les travaux de manutention. La validation de cette méthode nécessite des recherches et des essais supplémentaires.

En basant les essais sur la nature pétrographique des roches et des granulats, c'est-à-dire en classant les éléments à tester selon leur nature pétrographique il est ensuite possible à un pétrographe, un minéralogiste ou à un géologue, d'identifier très rapidement et avec de simples moyens les roches ou les granulats problématiques ainsi que leurs teneurs respectives. Cette méthodologie est donc très rapide.

Annexes

I Résistance à la compression des éprouvettes

N° éch. LMR	Roche	Norme	Cycles	Conc. sol.	Densité	σ_c	Ep50%	v	
			Nbr	[%]	[t/m ³]	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[-]	
MB-5	Grès de Berne - molasse bernoise	ASTM			2.20	35.4	5350	0.25	
MB-8					2.21	34.2	5400	0.31	
MB-9					2.21	33.9	5450	0.32	
MB-3		DIN		10			33.9	5000	0.28
MB-12				10			35.2	5000	0.33
MB-18				10		2.20	34.4	4925	0.27
MB-22				10			33.7	5050	0.27
MB-41				10			32.8	5150	0.27
MB-46				10			30.8	4700	0.33
MB-7				20			34.8	4800	0.27
MB-21				20			35.3	4950	0.26
MB-36				20			33.9	4600	0.29
MB-40				20			34.2	4800	0.29
MB-52				30		2.20	29.4	4460	0.32
MB-53				30		2.21	29.6	4675	0.24
MB-56				30		2.21	28.8	3970	0.30
MB-58				30		2.23	31.2	5375	0.35
MB-60				30		2.21	30.1	5000	0.32
MB-62				30		2.21	29.7	5000	0.25
MB-64				30		2.25	30.7	4850	0.29
MB-65				30		2.20	31.3	5100	0.34
MB-73				30		2.21	30.7	4950	0.33
MB-11				74		2.19	23.0	2900	0.24
MB-15				74		2.15	17.9	2100	0.18
MB-28				74		2.17	14.4	1650	0.14
MB-34				74		2.23	17.6	1950	0.17
MB-48				74		2.15	19.7	2325	0.24
MB-17				105		2.11	16.1	1385	0.19
MB-23				105			12.0	940	0.12
MB-24				105			10.6	950	0.20
MB-33				105			12.3	1130	0.28
MB-13				111			5.3	415	0.09
MB-37				111			13.1	2650	0.33
MB-38				111			11.6	1280	0.14
MB-39				111			15.4	1800	0.11
MB-43				111			17.2	1840	0.18

N° éch. LMR	Roche	Norme	Cycles	Conc. sol.	Densité	σ_c	Ep50%	v
			Nbr	[%]	[t/m ³]	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[-]
MB-44	Grès de Berne - molasse bernoise	De Quervain (dQ)	111			17.5	2200	0.17
MB-54			1		2.21	15.4	1300	0.23
MB-71			1		2.18	19.4	2100	0.36
MB-57			2		2.18	17.3	1388	0.30
MB-61			2		2.19	17.9	1530	0.30
MB-72			2		2.19	16.7	1430	0.30
MB-63			3		2.16	13.9	1110	0.19
MB-66			3		2.07	5.5	290	0.31
MB-69			3		2.13	7.8	420	0.33
MB-70			3		2.19	12.0	815	0.26
MB-74			Nouvelle méthode (NM)	2	23	2.20	24.0	2100
MB-75		2		23	2.21	26.2	2500	0.35
MB-76		2		25	2.21	10.0	450	0.45
MB-77		2		25	2.21	10.7	440	
MB-81		2		23	2.20	25.3	1950	0.36
MB-84		2		23.5	2.22	22.2	1700	0.35
MB-85		2		23.5	2.21	25.0	2100	0.33
MB-4		3		16	2.19	24.9	3125	0.35
MB-19		5		21	2.21	28.3	3850	0.38
MB-20		11		10	2.20	36.1	4100	0.30
MB-35		3		16		23.7	2960	0.46
MB-6		5		18.9	2.19	28.5	2840	0.30
MB-16		5		20	2.21	20.0	1300	
MB-29		5		20	2.20	23.2	1600	0.45
MB-31		5		16	2.19	29.2	2700	0.35
MB-32		5		18.9		26.1	2850	0.50
MB-45		5		16	2.20	27.3	2950	0.33
MB-55		5		20	2.21	24.5	2950	0.33
MB-27		7		16	2.19	24.2	2700	0.30
MB-49		7		16	2.20	26.2	3125	0.41
MB-30		11		10	2.19	32.5	3570	0.32
MB-51		12		16	2.19	29.6	3335	0.33
MB-68		12		16	2.21	30.1	3750	0.37
MB-10		15		10	2.20	34.6	4000	0.32
MB-42		15		10	2.20	33.9	4225	0.33
MB-50		20		14	2.20	33.7	3350	0.32
MB-59	20	14		2.20	32.5	3370	0.32	

N° éch. LMR	Roche	Norme	Cycles	Conc. sol.	Densité	σ_c	Ep50%	v
			Nbr	[%]	[t/m ³]	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[-]
GME1	Grès rose Mels (Verrucano)	ASTM			2.72	129.2	31800	0.13
GME2					2.70	115.6	30900	0.11
GME9		De Quervain	25		2.70	131.2	26650	0.06
GME6			40		2.70	124.6	24500	0.10
GME8			45		2.70	135.2	27450	0.08
GME7			50		2.70	132.8	25900	0.09
GME14			12		-	-	-	-
GME16			12		-	-	-	-
GME20			12		-	-	-	-
GME21			12		-	-	-	-
GGU1		Grès granitique à grain fin	ASTM			2.65	109.3	26900
GGU2					2.66	119.8	24900	0.24
GGU3	De Quervain		1		2.65	114.2	26500	0.17
GGU4			7		2.65	118.9	28200	0.17
GGU7			15		2.66	108.4	25300	0.20
GGU5			19		2.65	99.4	22200	0.18
GGU6			20		2.65	90.8	19300	0.19
GGU8			23		2.66	93.9	20400	0.19
GBU1	Grès granitique à grain grossier	ASTM	0		2.55	63.1	14800	0.32
GBU2			0		2.56	60.5	15400	0.20
GBU4		De Quervain	2		2.53	73.0	13200	0.26
GBU9			3		2.53	74.8	13550	0.29
GBU10			3		2.52	66.6	12800	0.25
GBU3			5		2.55	54.1	9100	0.17
GBU5			6		2.54	51.0	8600	0.17
GBU6			8		2.53	46.1	8000	0.50
GBU7		Nouvelle méthode (NM)	6	25	2.53	20.4	2300	0.13
GBU8			5	25	2.53	23.0	2200	0.34
GBU14			3	25	2.48	39.3	5300	0.29
GBU12			4	25	2.47	38.0	4400	0.45
GBU21			1	25	2.53	63.2	9800	0.18
GBO1	Grès granitique à grain moyen	ASTM			2.43	63.7	13100	0.34
GBO2					2.42	63.8	13500	0.39
GBO3		De Quervain	2		2.43	68.1	11700	0.36
GBO8			3		2.42	51.2	9300	0.24
GBO4			4		2.43	59.9	9400	0.28
GBO5			5		2.41	44.3	7000	0.19
GBO7			6		2.42	42.0	7000	0.27
GBO6			7		2.42	28.0	4000	
GBO10			8		2.42	15.9	1750	
GBO9			9		2.42	13.4	1150	0.39

N° éch. LMR	Roche	Norme	Cycles	Conc. sol.	Densité	σ_c	Ep50%	v	
			Nbr	[%]	[t/m ³]	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[-]	
GB017		Nouvelle méthode (NM)	6	20	2.44	62.7	10800	0.50	
GB016			16	20	2.42	60.4	11200	0.21	
GB013			20	20	2.43	57.1	13100	0.34	
GB015			26	20	2.41	61.5	12900	0.46	
GB014			32	20	2.43	61.1	10300	0.50	
GB018			4	25	2.42	61.2	12900	0.31	
GB019			3	25	2.42	61.6	9600	0.50	
GB020			5	25	2.42	62.2	12800	0.45	
GB021			7	25	2.42	58.7	11600	0.41	
GB022			10	25	2.42	60.1	9500		
GV1			Grès de Villariod	DQ	1		2.27	20.1	1700
GV2	2				2.29	3.2	130	0.42	
GV3	2				2.28	3.6	150		
GV4	2				2.31	3.6	120		
GV5	2				2.29	3.4	130		
GPLNG1	Plattensandstein	ASTM			2.49	66.8	9600	0.32	
GPLNG2					2.49	67.0	10150	0.36	
GPLNG3		De Quervain	1		2.49	66.8	9700	0.39	
GPLNG4			2		2.49	56.8	6400	0.31	
GPLNG5			3		2.48	52.0	5525	0.21	
GPLNG6			4		2.47	51.3	5550	0.24	
GPLNG7			7		2.47	10.4	870	0.33	
GPLNG8			8		2.47	19.3	1540	0.05	
GPLNG10		Nouvelle méthode (NM)	16	20	2.48	64.9	10300	0.45	
GPLNG13			36	20	2.49	63.0	9500	0.35	
GPLNG14			42	20	2.49	61.6	10800	0.32	
GPLG1		Plattensandstein (gélif)	ASTM			2.47	66.2	9700	0.38
GPLG2						2.49	66.4	9300	0.32
GPLG3			De Quervain	1		2.45	61.7	7100	0.31
GPLG4	2				2.47	57.1	6700	0.35	
GPLG5	3				2.47	55.9	6200	0.31	
GPLG7	5				2.46	28.8	2200	0.07	
GPLG6	6				2.46	31.3	2600	0.08	
GPLG13	Nouvelle Méthode		3	23	2.46	39.8	3100	0.29	
GPLG14			3	23	2.46	41.4	2950	0.30	
GPLG11			4	20	2.46	63.3	10400	0.21	
GPLG15			6	20	2.46	62.9	10400	0.31	

N° éch. LMR	Roche	Norme	Cycles	Densité	σ_c	Ep50%	v		
			Nbr	[t/m ³]	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[-]		
GMA1	Grès Massonnens	ASTM		2.21	11.7	2750	0.45		
GMA2				2.23	12.5	2950	0.44		
GMA6				2.20	11.2	2630	0.29		
GMA5		De Quervain		1	2.21	9.6	1450	0.36	
GMA7				1	2.21	10.0	1525	0.39	
GMA4				2	2.22	7.0	800	0.30	
GMA9				2	2.22	6.8	835	0.28	
GMA3				3	2.22	3.9	380	0.10	
GMA8				3	2.22	4.5	520	0.10	
GMA10				3	2.20	2.3	145		
GMA12				3	2.22	1.9	125		
SP1			Serpentine Poschiavo	ASTM		2.76	159.0	48700	0.09
SP2		2.73			169.2	47900	0.08		
SP3	De Quervain	50		2.72	140.9	48000	0.11		
PP4	Péridorite Poschiavo	ASTM		2.79	168.1	52600	0.13		
PP10					2.80	218.9	56100	0.12	
PP2		De Quervain		25	2.80	187.9	55500	0.12	
PP3				40	2.77	176.8	52600	0.13	
PP7				45	2.78	190.3	54900	0.09	
PP5				50	2.80	193.7	54800	0.11	
PP6				50	2.78	170.7	55500	0.13	
GA4			Granit rose Allemagne	ASTM		2.63	269.9	45400	0.15
GA8							2.63	270.5	44400
GA2	De Quervain			25	2.63	239.5	46500	0.14	
GA5				40	2.63	244.4	44600	0.14	
GA1				45	2.62	252.3	46300	0.15	
GA3				50	2.63	141.2	38700	0.23	
GA6				50	2.63	265.2	48200	0.12	
BOU1		Tuffeau blanc		ASTM		1.23	5.6	1000	0.42
BOU7					1.34	5.3	770	0.38	
BOU8					1.36	5.6	1100	0.40	
BOU2	De Quervain			1	1.36	5.7	1000	0.30	
BOU3				1	1.45	5.8	940	0.29	
BOU4				2	1.46	4.6	850	0.26	
BOU6				2	1.46	4.4	735	0.25	

Abréviations

Concept	Signification
AGB	Arbeitsgruppe Brückenforschung
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BOU	Tuffeau blanc
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
CEN	Comité européen de normalisation
CFF	Chemin de fers fédéraux
DI	Deutsche Industrie Norm
DQ	Méthode selon De Quervain
EN	Europäische Norm
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
FGU	Fachgruppe Untertagebau
GA	Granit
GBO	Grès granitique à grain moyen
GBU	Grès granitique à grain grossier
GGU	Grès granitique à grain fin
GME	Grès du Verrucano
GPLG	Plattensandstein gélif
GPLNG	Plattensandstein non gélif
GV	Grès de Villarod
LMR	Laboratoire de mécanique des roches
MB	Molasse bernoise
OFROU	Office fédéral des routes
PP	Péridotite
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und architektenverein
SP	Serpentine
SN	Schweizer Norm
SVI	Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten
TC	Technical committee
UVEK	Eigenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Bibliographie

[ASTM C88]	ASTM C88 - 05 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
[Chemins de Fer Fédéraux Suisses, 1963]	Spécification technique pour la fourniture de ballast et de gravillon de carrière.
[Chemins de Fer Fédéraux Suisses, 1993, 1997]	Règlement CFF R 211.1 "infrastructure et ballast"
[De Quervain, F., 1945]	Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie.
[De Quervain, F. und Jenny, 1951]	Versuche über das Verhalten d.e Bausteine gegen die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethodik über die Wetterbeständigkeit. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie.
[De Quervain, F. und Jenny, 1953]	Untersuchungen zum Verhalten von Schottersteinen gegenüber Witterungseinflüssen. Beurteilung der Beständigkeit von Kieselkalkproben anhand von Tränkversuchen in Natriumsulfatlösung. Schweizerische Geotechnische Kommission.
[De Quervain, F. und Jenny, 1953]	Untersuchungen zum Verhalten von Schottersteinen gegenüber Witterungseinflüssen. Beurteilung der Beständigkeit von Glaukonitsandstein der Gamserschichten vom Rheintal anhand von Tränkversuchen in Natriumsulfatlösung. Schweizerische Geotechnische Kommission.
[De Quervain, F., 1955]	Zusammenfassender Bericht über die geologische und petrographische Untersuchung der Gesteinsmaterialien für Bahnschotter. Schweizerische Bundesbahnen. Bauabteilung der Generaldirektion. Sektion für Oberbau. Bericht EMPA Nr. 9922.
[De Quervain, F., 1967]	Technische Gesteinskunde.
[CEN TC 125, EN 771-6 : 2005]	Spécification pour éléments de maçonnerie - Partie 6: Éléments de maçonnerie en pierre naturelle.
[CEN TC 154, EN 1097-6 : 2000]	Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
[CEN TC 154, EN 1367-1 : 1999, 2007]	Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats. Partie 1 : Détermination de la résistance au gel-dégel.
[CEN TC 154, EN 1367-2 : 1997]	Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats. Partie 2 : Essai au sulfate de magnésium.
[CEN TC 154, EN 1367-6 : 2008]	Essai pour déterminer les propriétés thermiques des granulats – Résistance au gel-dégel au contact du sel.

[CEN TC 154, EN 12620 : 2002, 2008]	Granulats pour béton.
[CEN TC 154, EN 13043 : 2004]	Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaus-sées, aérodromes et d'autres zones de circulation.
[CEN TC 154, EN 13139 : 2002]	Granulats pour mortier.
[CEN TC 154, EN 13242 : 2007]	Granulats pur matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et la construction routière.
[CEN TC 154, EN 13450 : 2002]	Granulats pour ballasts de voies ferrées.
[CEN TC 154, EN 13383-1 : 2002]	Enrochements Partie 1 : Spécifications.
[CEN TC 154, EN 13383-2 : 2002]	Enrochements Partie 2 : Méthodes d'essais.
[CEN TC 178, EN 1341 : 2001]	Dales de pierre naturelles pour le pavage extérieur. Exigences et méthodes d'essai.
[CEN TC 178, EN 1342 : 2001]	Pavés de pierre naturelle pour le pavage extérieur – Exigences et méthodes d'essai. Exigences et méthodes d'essai.
[CEN TC 178, EN 1343 : 2001]	Bordures de pierre naturelle pour le pavage extérieur. Exigences et méthodes d'essai. Exigences et méthodes d'essai.
[CEN TC 246, EN 1469 : 2004]	Produits en pierre naturelle – Revêtement mural – Exigences.
[CEN TC 246, EN 12057 : 2004]	Produits en pierre naturelle - Plaquettes modulaires - Exigences.
[CEN TC 246, EN 12058 : 2004]	Produits en pierre naturelle - Dalles de revêtement de sols et d'escaliers – Exigences.
[CEN TC 246, EN 12059 : 2004]	Produits en pierre naturelle - Pierre de taille – Exigences.
[CEN TC 246, EN 12370 : 1999]	Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance par un essai de cristallisation des sels.
[CEN TC 246, EN 12371, 2001, 2010]	Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au gel.
DIN 12371	Prüfverfahren für Naturstein, Bestimmung des Frostwiderstandes
[Handbook of Chemistry and Physics]	CRC Handbook of Chemistry and Physics
[Hamilton, A, Hall, C., Pel, L. 2008]	Sodium sulfate heptahydrate : direct observation of crystallisation in a porous material, Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 41)
[VSS SN 670 353]	Essais sur roche. Résistance à la compression uniaxiale d'éprouvettes cylindriques.
[Winkler, Erhard M., 1994]	Stone in Architecture. Properties, Durability. Springer Verlag.

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 10 juillet 2013

Données de base

Projet N° : VSS 2005 / 401

Titre du projet : Résistance à l'altération des granulats et des roches

Echéance effective : 25 juin 2013

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Une méthode automatisée basée sur la solubilité du sulfate de sodium a été développée dans cette recherche. La présence d'une phase instable a fortement compliqué et retardé le développement de la méthode. Une phase métastable a été découverte par Hamilton et al. seulement en 2008 qui correspond à la phase instable observée dans cette étude. Les conditions d'essai ont dû être adaptées à cette phase instable. Le principe fondamental de ce nouvel essai repose sur la variation de solubilité du sulfate de sodium en fonction de la température. La méthode automatisée développée au cours de cette étude est composée d'un thermocryostat, d'un réacteur externe, d'un mélangeur ainsi que de portes éprouvettes spécifiques aux différents types d'éprouvettes.

Les essais réalisés dans cette étude ont montré qu'une corrélation entre l'essai de gel-dégel et cette nouvelle méthode pouvait être possible mais des divergences importantes ont été constatées avec l'essai de cristallisation selon F. de Quervain. Une corrélation simple avec l'essai selon F. de Quervain n'apparaît pas possible avec cette nouvelle méthode. Des essais de résistance à la compression uniaxiale sur des éprouvettes cylindriques ayant subi des cycles de gel-dégel, des cycles de cristallisation de sulfate de sodium et de cycles selon cette nouvelle méthode ont montré une perte de résistance linéaire en fonction du nombre de cycles. Aucune perte significative de résistance n'a été constatée pour les roches durables. Des tests ont été effectués sur des gravillons et des ballasts de différentes compositions pétrographiques. Les roches sensibles aux intempéries ont montré de fortes dégradations avec la nouvelle méthode après avoir subi l'essai. La méthode développée dans cette recherche permet une automatisation de l'essai de résistance aux intempéries et permet un gain de temps très significatif par rapport aux méthodes traditionnelles. La découverte de la présence d'une phase instable dans le processus nécessite d'examiner la méthodologie des essais de cristallisation suisse, ASTM et européens.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

Atteinte des objectifs :

Une partie des objectifs du projet a été atteinte qui était de trouver une méthode automatisée pour tester la durabilité des roches et des granulats, de la mettre au point pour les roches ornementales, les granulats et les enrochements. La corrélation simple avec l'essai de Quervain s'est révélée impossible pour plusieurs raisons qui sont en partie liées à la méthode elle-même mais aussi aux lacunes de la recherche effectuée entre 1945 et 1960 et à la disparation d'une partie des carrières existantes de l'époque. La présence d'une phase métastable découverte par Hamilton et al en 2008 a rendu cette recherche beaucoup plus complexe que prévu. Des recherches supplémentaires ainsi que la validation de la méthode sont nécessaires pour proposer cette méthodologie au niveau européen.

Déductions et recommandations :

Cette recherche a nécessité de la part des auteurs beaucoup plus de temps que prévu ainsi que des investissements supplémentaires. La cause étant la présence d'une phase instable inconnue dans l'essai de cristallisation. Il est recommandé de faire de nouvelles recherches.

Publications :

Encore aucune publication n'a été faite à ce jour.

Chef/cheffe de projet :

Nom : Röthlisberger Prénom : François

Service, entreprise, institut : Bureau d'expertises minéralogiques et pétrographiques

Signature du chef/de la cheffe de projet :



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Le centre de recherche a dressé un état exhaustif de la situation actuelle en montrant bien les lacunes et problèmes des différents essais existants et démontrant ainsi le besoin et l'utilité de cette recherche.

La méthodologie et le programme sont clairement explicités.

L'objectif principal, à savoir la recherche d'une nouvelle méthode d'essai, a été atteint. Les différents aspects de ce nouvel essai (matériel, mode opératoire, éprouvettes, ...) ont été complètement étudiés et sont clairement documentés.

Le travail effectué est important, sérieux et d'une très grande qualité. Le centre de recherche a démontré avoir de grandes connaissances et beaucoup de compétences en la matière.

La commission de suivi ne peut que remercier grandement le centre de recherche pour le travail effectué et recommande vivement à l'Office fédéral des Routes de suivre les propositions et recommandations faites par le centre de recherche.

Pour la commission de suivi : J.-L. Cuénoud.

Mise en oeuvre :

La mise en oeuvre des résultats de cette recherche implique que des recherches supplémentaires doivent être effectuées avant de pouvoir faire des propositions de modifications des essais et normes actuelles. Les résultats de cette recherche permettent toutefois de proposer des modifications des modes opératoires de la norme EN 1367-2.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Les résultats de cette recherche montrent qu'une partie des essais européens et suisses devraient subir une étude approfondie concernant l'influence de la phase instable.

Influence sur les normes :

Des études supplémentaires sont nécessaires avant de proposer des adaptations.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Streiff

Prénom : Bernard

Service, entreprise, institut : Directeur des Carrières d'Arvel. En retraite depuis juillet 2013.

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

Index des rapports de recherche en matière de route depuis 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	atum
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel Acoustical guidance in road tunnels Guidage acoustique dans les tunnels routiers	2012
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining? De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining? New findings on the mobility behavior through Data Mining?	2011
1359	SVI 2004/003	Wissens- und technologientransfer im Verkehrsbereich Know-how and technology transfer in the transport sector Transfert de savoir et de technologies dans le domaine des transports	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten Pronostics de trafic avec des données en temps réel Traffic forecast with real-time data	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement Basic Principles on the Design, Construction and Sustainability of Sidings	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betongranulat aus Betongranulat	2011
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011

1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften <i>Potentiel du covoiturage</i> <i>Potential of Car Pooling</i>	2011
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schwiessnähte von KDB <i>Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité</i> <i>Development of a nondestructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes</i>	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen <i>Signalisations dynamiques sur des routes principales</i> <i>Dynamic signalling at primary distributors</i>	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau <i>Expériences dans la construction de ponts en Suisse</i> <i>Experiences in Swiss Bridge Construction</i>	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems</i> <i>Harmonisation des processus et des interfaces utilisateurs dans les systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität <i>Mode of action and potential of combined mobility</i> <i>Mode d'action et le potentiel de la mobilité combinée</i>	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr <i>Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur</i> <i>Benefits of travel time savings in passenger traffic</i>	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel <i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg</i> <i>Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel</i>	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich <i>Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art</i> <i>Noise reflections on structures in the street</i>	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Data storage in tunnel process control systems</i> <i>Enregistrement ds données de systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen <i>Exigences par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons</i> <i>Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes</i>	2012
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen <i>Résistance à la corrosion des aciers d'armature inoxydables</i> <i>Use of stainless steels in concrete structures</i>	2012

Remerciements

Nous tenons à remercier les entreprises et personnes suivantes sans lesquelles ce projet n'aurait pas pu aboutir ou qui ont grandement contribué à sa réalisation.

Tout particulièrement à M. Jürg Daepfen des (CFF) pour le soutien au projet, à M. Laurent Gastaldo (EPFL) pour les conseils, l'appui ainsi que la réalisation des essais de résistance à la compression des éprouvettes. Le Dr. Thierry Meyer (EPFL) pour les conseils d'utilisation d'un réacteur. M. Jean-Marc Therraz (EPFL) pour la réalisation des parties mécaniques et du porte éprouvettes. M. Fabrice Bugnon ingénieur EPFL pour la partie électronique des premiers prototypes. Prof. Dr. Thomas Armbruster (Université de Berne).

En particulier à Monsieur H. W. Fritz de la VSS, au président de la commission de suivi M. Bernard Streiff ainsi qu'aux membres de la commission de suivi, Messieurs Guido Frenzer, Jean-Louis Cuénoud, Jean-Gabriel Hammerschlag, Jürg Däppen, Jean-Louis Amiguet et Christoph Bürgi pour le soutien et le suivi apporté au projet, de même qu'à la commission EK 4.01 pour les discussions et les suggestions fructueuses.

L'Association Suisse des Professionnels de la Route, les CFF ainsi que l'Office Fédéral des Routes pour avoir accepté et soutenu le financement de cette recherche

IG Instrumenten-Gesellschaft AG à Zürich, les verreries de Carrouge pour les instruments et les rabais accordés.

Les carrières Anton Ackermann, 8887 Mels / SG, Emil Fischer AG Steinbruch Steinhof, 5564 Othmarsingen, Bärlocher Steinbruch & Steinhauerei AG CH-9422 Staad, J & A. KUSTER, Steinbrüche AG Bäch, Sonja Schumacher, Steinbruch à 7608 Castasegna, M. Jochum Marmor und Serpentinwerk AG, à CH-7742 Poschiavo, Porphyrwerk Detzeln, D-79761 Waldshut-Tiengen, B.R.D., Gebrüder Müller AG, Eschenbach. Carrières d'Arvel S.A. 1844 Villeneuve (VD), Carrière de Villarlod S.A., 1695 Villarlod, Mme P. Genilloud SA CH-1740 Neyruz / FR, Carlo Bernasconi AG Natursteine, Riedbachstrasse 51, 3027 Bern, en particulier M. Kiener et M. Niederhäuser ainsi que les apprentis pour la préparation d'éprouvettes en molasse bernoise, carrières Famsa à 1869-Massongex (VS), carrière des Roches à F-41400 Bourré (France).

M. Erich Würsch (CFF) pour la mise à disposition des relevés et des photographies de ballasts dégradés prématurément.

M. Preite, M. Pascal Schaer et Mme Jeanine Delley pour la confection de prototype de portes-éprouvettes et M. Vincent Mathier pour la correction des textes anglais.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à cette recherche.