



HAL
open science

Les toitures en ardoises : inspection et diagnostic. Étude de cas.

Laurent Molez, Damien Rangeard, Franck Rendell, Raoul Jauberthie

► To cite this version:

Laurent Molez, Damien Rangeard, Franck Rendell, Raoul Jauberthie. Les toitures en ardoises : inspection et diagnostic. Étude de cas.. 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oct 2009, Oran, Algérie. hal-01462710

HAL Id: hal-01462710

<https://hal.science/hal-01462710>

Submitted on 8 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES TOITURES EN ARDOISES : INSPECTION ET DIAGNOSTIC ; ETUDE DE CAS

L. Molez¹, D. Rangeard¹, F. Rendell¹, R. Jauberthie¹

T. 5 Experiment maintenance and pathologie

RESUME

La durée de vie des ardoises est bien connue ; elle dépasse souvent 100ans. En effet, la résistance mécanique perpendiculairement à la schistosité est très grande et permet d'éviter des dégâts importants lors de gros orages ou épisode de grêle. De plus, sa faible porosité induit une résistance au gel élevée.

La principale origine de dégradation est la présence de pyrites FeS₂ et essentiellement lorsque celles-ci sont traversantes. En présence d'humidité les pyrites se transforme en rouille. Cette rouille laisse des traînées peu esthétiques mais libère aussi des sulfates solubles. Ce mécanisme peut se prolonger jusqu'à la perforation de l'ardoise.

Ce travail relate une étude de cas : la dégradation d'une toiture de château en bord de mer. Le toit de ce monument historique date d'une cinquantaine d'années, il a été refait après destruction lors de la guerre 1939 45. Les ardoises très corrodées se détachent ou se desquament. Les observations sur site et les analyses en laboratoire permettent de déterminer les causes de cette durée de vie limitée. Cette étude montre que l'exposition aux embruns et à la pollution liée aux activités portuaires sont les causes principales des dégradations observées.

MOT CLES

Ardoise, durabilité, gélivité, pyrites, pollution portuaire

¹ Université Européenne de Bretagne, France,
INSA-LGCGM - EA 3913, 20, avenue des Buttes de Coësmes 35043 RENNES Cédex

1. INTRODUCTION

Les couvertures en ardoises sont réputées de longue durée de vie (quelques centaines d'années), la très faible porosité leur conférant une résistance au gel élevée. La source de dégradation la plus courante est liée à la présence de pyrites FeS_2 . Ces pyrites sont réputées dangereuses lorsqu'elles sont traversantes puisque leur contact avec l'humidité va conduire à la formation de rouille mais aussi de sulfates solubles qui vont être lessivés progressivement. Au contraire, les pyrites non traversantes ne sont pas en contact avec l'eau et ne sont donc pas altérées.

La présente étude concerne un bâtiment, l'Hôtel de Ville de Saint Malo (Ille et Vilaine, France) situé dans un château classé Monument Historique. Sa situation géographique, en bord de mer, le positionne dans un site particulièrement exposé aux embruns marins. La toiture a été refaite après la dernière guerre, Saint Malo ayant été en grande partie détruit par les bombardements. Une deuxième cause possible de dégradation est liée à l'activité portuaire avec des stocks passés ou présents de matériaux tels que engrais agricoles plus ou moins polluants.

Le but de cette étude est d'effectuer un diagnostic de l'état de cette couverture, quantifier les dégradations, identifier les causes et de proposer quelques solutions de réhabilitation éventuelle.

Après avoir effectué un repérage sur site, les échantillons d'ardoises sont analysés par microscopie optique et électronique / MEB couplé à une microanalyse EDS. La porosité à l'eau est déterminée et les dégradations engendrées par des cycles gel/dégel sont observées.

2. OBSERVATIONS SUR SITE

L'Hôtel de Ville se compose de deux bâtiments principaux à R+2 plus combles aménagés. Le premier est orienté Nord-Sud et le second est orienté Est-Ouest.

Chaque bâtiment comporte deux versants principaux et des croupes, et présente des lucarnes (à l'exception du versant Est) ainsi que des souches de cheminées. La pente des versants est d'environ 55° (soit 140%).

La couverture ardoises (Fig. 1a) peut être décrite comme suit :

- Ardoises grises épaisses (épaisseur supérieure à 10 mm) provenant probablement des carrières de centre Bretagne, comme Plévin / Maël Carhaix ou Sizun
- Pose brouillée (c'est-à-dire que les ardoises sont de tailles variables sur une même rangée)
- Pose à pureau décroissant (c'est-à-dire que les ardoises sont très grandes en pied de pente et de plus en plus petites à mesure que l'on monte vers le faîtage)
- Pose au clou
- Faîtages en terre cuite scellés au mortier
- Arêtiers fermés
- Noues rondes en ardoises
- Solins des souches de cheminées en ardoises et mortier
- Chéneaux en granit
- Descendants en cuivre
- Support de couverture en voliges jointives de 30mm d'épaisseur, probablement en châtaignier, sur chevrons de 50x55 (entraxe de 23 cm)
- Lucarnes à fronton granit, rampants et jouées en ardoises.



Figure 1. (a) Vue générale de la toiture. (b) chutes d'éléments et mise en sécurité

Les désordres observés que se soit au niveau des clous ou bien par cassure des ardoises (Fig. 1b) ont conduits les services à une mise en sécurité pour éviter la chute des éléments sur la chaussée.

Si l'on compare les zones de recouvrements des ardoises et les largeurs des pureaux constatées, selon les recommandations des règles de l'art (DTU 40.11), on n'observe pas d'anomalie dans la pose (la longueur de recouvrement est suffisante). De même, le nombre et la qualité des clous sont globalement satisfaisants.

Le problème est donc strictement physico-chimique, et s'explique à la fois par la composition même des ardoises, révélée par les études réalisées en laboratoire et par l'exposition à un environnement marin très difficile.

3. ANALYSES EN LABORATOIRE

Les échantillons d'ardoises ont fait l'objet de divers tests et analyses :

- Observations visuelles
- Observations à la binoculaire
- Observations par microscopie électronique (Microscope à balayage conventionnel JSM 6400)
- Composition par microanalyse par spectrométrie à dispersion d'énergie OXFORD Link Isis.
- Composition minéralogique par diffraction X
- Diffractomètre Philips PW3710, anticathode Cu, Rayonnement $K\alpha$ filtré, enregistrement pas à pas.
- Tests au gel/dégel.
- Absorption d'eau - capillarité

3.1. Observations visuelles

Les ardoises sont cloutées sur la volige par des clous en cuivre ou en acier. Les fixations sont dans un bon état et ne provoquent pas d'altération particulière des ardoises.

Les ardoises elles mêmes sont de forte épaisseur plutôt d'aspect schiste ardoisier grossier (Fig. 2). Elles sont systématiquement affaiblies coté clou : épaisseur 7mm coté clou et épaisseur 12 mm coté opposé. La partie abritée par l'autre ardoise est plus dégradée que la partie exposée à l'air libre. Bien que le toit soit sec lors de l'inspection, on constate que cette partie abritée reste humide.



Figure 2. Aspect des ardoises dégradées

Quelques grosses pyrites (FeS_2) sont visibles, elles sont altérées en rouille. Leur taille est de l'ordre du mm, elles ne sont en aucun cas traversantes. Des traces sous forme de piqûres de la surface laissent penser que se sont des empreintes de pyrites lessivées.

Une deuxième famille de pyrites de taille à peine visible à l'œil nu est également présente mais la couleur dorée permet de dire qu'elles ne sont pas altérées. Elles sont détectées sur des fractures que nous provoquons à l'intérieur de la zone saine de l'ardoise.

3.2. Microscopie électronique et microanalyse

Les analyses sont réalisées à l'aide :

- Microscope à balayage conventionnel JEOL JSM 6400,
- Microanalyse par spectrométrie à dispersion d'énergie OXFORD Link Isis.

Les ardoises sont observées sur les faces

- Externe supérieure coté clou
- Externe supérieure coté air libre
- Externe inférieure
- Et après clivage, à l'intérieur.

A titre d'exemples, on observe (Fig. 3) l'aspect habituel de la mousse, celle-ci peut être le lieu de fixation de poussières ou de cristallisation par évaporation d'eau (Fig. 4).

Ces cristallites sont essentiellement composées de calcite mais la présence de Cl et de S est à relier aux embruns marins [Tableau 1].

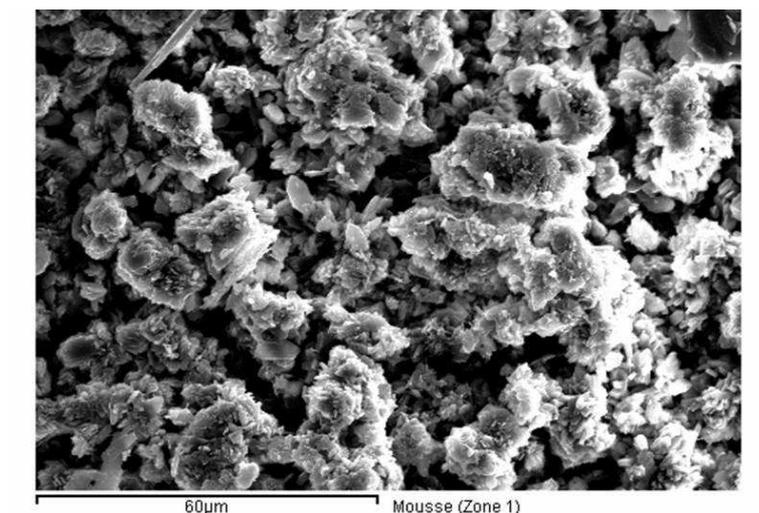


Figure 3. Observation au MEB de la mousse : présence de quelques cristallites

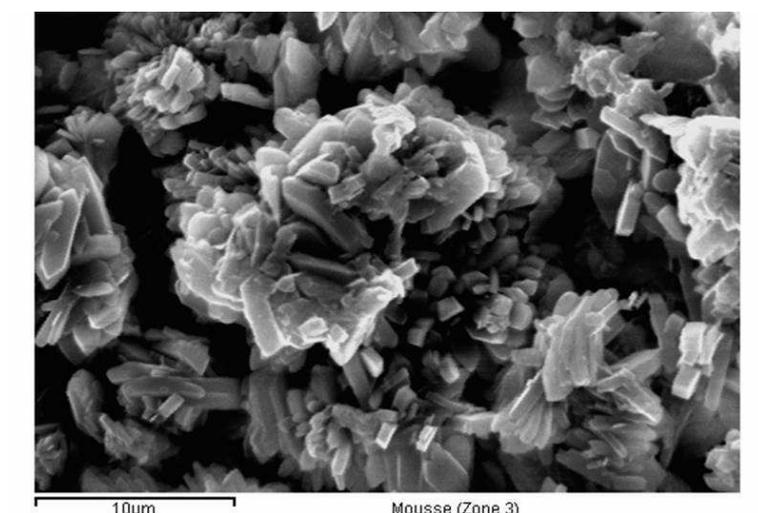


Figure 4. Observation au MEB des cristallites accrochées à la mousse

Tableau 1 : Analyse EDS des cristallites accrochées à la mousse

| Elément | %Masse | % Atomique |
|---------|--------|------------|
| C K | 15.85 | 25.27 |
| O K | 47.61 | 56.99 |
| Al K | 0.46 | 0.33 |
| Si K | 0.43 | 0.29 |
| S K | 0.42 | 0.25 |
| Cl K | 0.56 | 0.30 |
| Ca K | 34.67 | 16.56 |
| Totaux | 100.00 | |

Outre la partie organique liée à la mousse et aux lichens, la face de l'ardoise exposée à l'air libre contient les cristallites suivantes

- Quartz ;
- Séricite, muscovite ;
- Phyllosilicate, chlorite.

Tous ces minéraux sont des formations normales dans les ardoises.

La composition globale est assez fortement ferrugineuse. Le fer a trois origines : principalement les phyllosilicates mais aussi des pyrites et des oxydes de fer.

Les pyrites de formule chimique FeS_2 apparaissent sous forme de placages et, lorsqu'elles sont en contact avec de l'humidité, elles libèrent S et reste Fe sous forme d'oxyde pouvant être plus ou moins lessivé.

La micro analyse met clairement en évidence ces pyrites avec en surface peu de soufre car la réaction avec l'eau a entraîné une partie de sulfates.

Il semblerait également qu'une autre famille de pyrites soit présente sous forme de micro cristaux.

La partie organique détectée sur la surface exposée à l'air libre sous forme de lichens ne peut qu'amplifier les dégradations lorsqu'ils se développent dans les microfissures générées par le départ des pyrites. Une partie également organique est observée à l'intérieur même des ardoises en relation avec un métamorphisme peu intense.

3.3. Analyse par diffraction X

Les analyses sont réalisées à l'aide d'un diffractomètre Philips PW3710, anticathode Cu, Rayonnement $K\alpha$ filtré, à enregistrement pas à pas.

Les échantillons sont réduits en poudre de granulométrie inférieure à 50 μm (passant en totalité à travers le tamis).

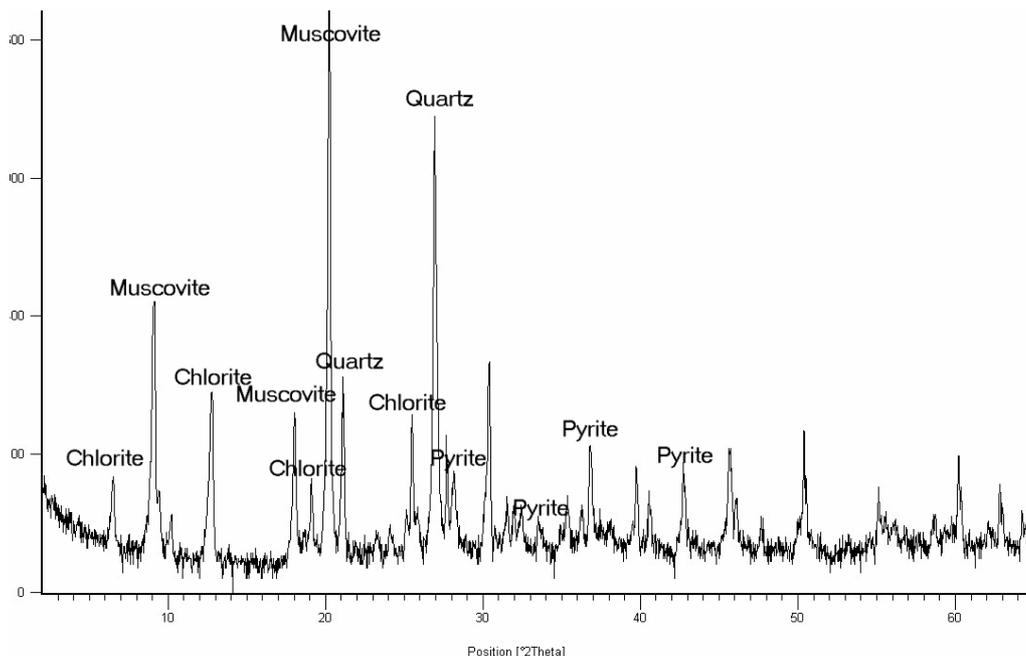


Figure 5. Diagramme de diffraction X de l'ardoise (Rayonnement $K\alpha$ Cu filtré)

L'analyse par diffraction X (Fig. 5) met clairement en évidence 4 phases cristallisées qui sont :

- le quartz
- la chlorite
- la muscovite
- la pyrite.
-

Ceci recoupe les résultats de la microanalyse et des observations au microscope électronique.

3.4. Absorption d'eau - capillarité

Deux ardoises ont été conservées dans l'eau du robinet pendant 48 h. Après les avoir ressuyées sur leur périphérie avec un tissu sec, elles sont pesées immédiatement. Elles sont en suite stockées en salle climatisée (20°C et 50% d'humidité relative). Le suivi journalier de l'évolution de la masse jusqu'à masse constante conduit à des porosités à l'eau de :

- Echantillon 1 1.6%
- Echantillon 2 2.6%.

Ces résultats sont trop élevés pour des ardoises. En effet, la norme NF EN 12326-1 spécifie une valeur limite de 0,4% (classe A1). Cette faible absorption d'eau est censé assurée la tenue au gel de ces ardoise. Dans notre cas, les valeurs élevées obtenues laissent présager une mauvaise tenue au gel / dégel.

3.5. Essai au gel/dégel

Les ardoises sont découpées à la scie diamantée afin d'avoir une surface parfaitement plane perpendiculairement au plan de schistosité. Ces éléments sont soumis à des cycles gel /dégel de 8 heures : 4h dans l'eau à température ambiante et 4h à l'air à la température de -20°C. Nous avons fait 50 cycles de ce type.

Après les 50 cycles on constate une fissuration dans le plan de schistosité. Cette fissuration s'est propagée au cœur de l'ardoise et conduit à la formation d'écailles qui peuvent prendre la forme de desquamation. Les dégradations obtenues en laboratoire sont similaire à celle observée sur site dans la partie recouverte des ardoises (Fig. 6).

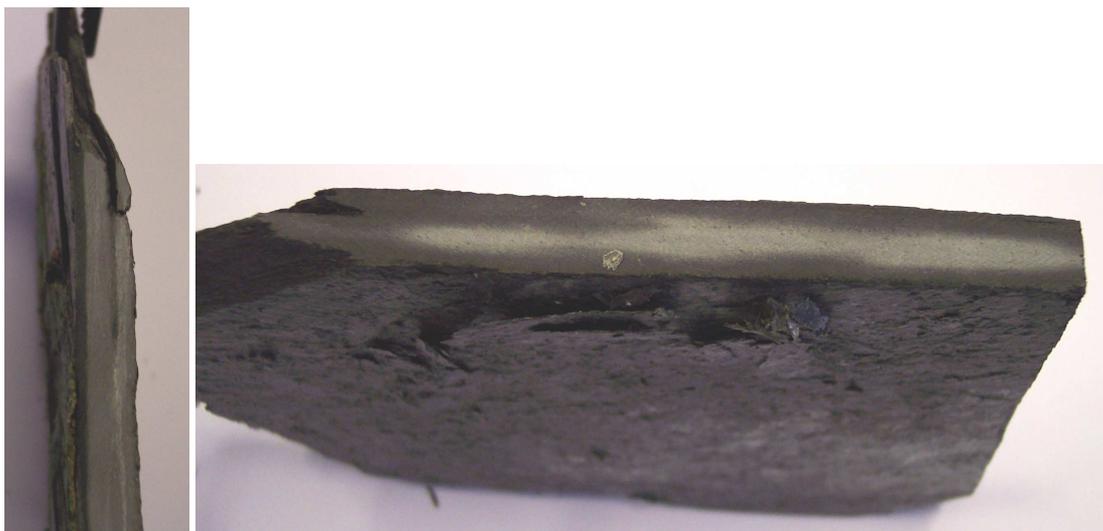


Figure 6. Dégradation après cycles de gel/dégel

3.6. Observations par microscopie binoculaire

Les échantillons fissurés par le gel (en laboratoire) sont observés à la loupe binoculaire. Il est visible que des pyrites se sont transformées en oxydes de fer (naturellement rouille) mais il apparaît également une néoformation sous forme de cristallites blanches. Ces cristallisations sont vraisemblablement des sulfates. Cette formation est expansive et peut être la cause de l'exfoliation des ardoises.

4. CONCLUSION

En conclusion, il s'avère que les ardoises sont quasiment toutes fortement dégradées. La diminution d'épaisseur coté recouvert (coté clou) peut atteindre plusieurs millimètres. L'épaisseur lors de la pose n'étant pas connue, il est difficile de limiter l'altération à la zone recouverte.

Les sulfures de type pyrites sont présents dans les ardoises et ceci en quantité relativement importante. Leur dégradation est réputée engendrer la formation de minéraux expansifs augmentant ainsi la cinétique de dégradation.

L'action du gel est clairement mise en évidence par les essais en laboratoire. Ceci est en accord avec l'absorption d'eau qui est anormalement élevée pour des ardoises.

L'action des sels provenant de l'eau de mer (par les embruns) accentue la cinétique de dégradation et ceci dans les zones abritées de l'eau de pluie (qui lessive) et de l'air libre.

Le problème initial est lié à la présence de pyrites qui s'altèrent et entraînent dans un premier temps un gonflement par formation de sulfates. Ces sulfates sont relativement solubles et sont lessivés. Reste de la porosité facilitant la cinétique de dégradation et la desquamation. La situation en bord de mer est une condition encore plus défavorable.

Ceci laisse penser que cette couverture va continuer à se dégrader, le phénomène ne pouvant que s'accélérer. Les ardoises sont vraisemblablement de la même origine géographique, et ont le même problème de composition initiale.

REMERCIEMENT

Cette étude a été réalisée à la demande de la société IOSIS et de la mairie de Saint Malo dont les locaux sont situés à l'intérieur du monument.

REFERENCES

DTU 40.11 (NF P 32-201). 1993, *Travaux de bâtiment - Couverture en ardoises*, AFNOR.

NF EN 12326-1. *Ardoises et éléments en pierre pour toiture et bardage pour pose en discontinu - Partie 1 : spécification du produit*, AFNOR.