

Comprendre la formation instantanée de rouille

Lyndsie Selwyn

L'activité qui suit est destinée aux professionnels du patrimoine désireux d'apprendre comment le fer rouille instantanément. Elle fait partie de l'atelier [Soin des métaux dans les collections](#) offert par l'Institut canadien de conservation. Il n'est pas nécessaire de disposer d'un laboratoire ni d'un système de ventilation pour faire cette activité, sauf si l'on a besoin d'utiliser un solvant organique, comme l'acétone, pour retirer des huiles ou des revêtements. En pareil cas, consulter la fiche signalétique du solvant avant de l'utiliser afin de connaître l'information de santé et sécurité qui s'y rapporte.

Objectifs d'apprentissage

En comprenant comment se produit la formation instantanée de rouille, les professionnels du patrimoine pourront :

- reconnaître la formation instantanée de rouille;
- reconnaître les conditions ambiantes propices à la formation instantanée de rouille et réduire au minimum l'exposition des objets à de telles conditions.

Contexte

Quand le fer devient mouillé, il peut commencer à se corroder en quelques minutes et devenir taché ou se couvrir d'une corrosion orange vif. Cette corrosion se compose principalement de lépidocrocite, un oxyhydroxyde de fer dont la formule chimique est $\gamma\text{-FeO(OH)}$, également appelé « oxyhydroxyde de fer(III) » ou « oxohydroxyde de fer(III) » (Selwyn, 2004). Dans le milieu de la conservation, on parle communément de « corrosion instantanée » ou de « formation instantanée de rouille », alors que certains parlent tout simplement de « corrosion rapide » (Galban, 2002).

La formation instantanée de rouille se produit de diverses façons. Dans un contexte archéologique, elle peut découler du rinçage à l'eau d'un objet de fer après un traitement alcalin. Dans d'autres contextes, elle survient parfois dans un bâtiment patrimonial ou industriel dont les conditions ambiantes ne sont pas régulées et où, en raison d'une soudaine chute de température, l'eau se condense sur les surfaces de fer non protégées. La formation instantanée de rouille peut aussi se produire à la suite d'une fuite dans le toit d'une maison historique ou de l'inondation d'un espace de mise en réserve. La formation de rouille n'affectera peut-être pas l'intégrité structurale des objets touchés, mais la couleur orangée de la rouille en déparera l'apparence. Le brossage permet souvent d'enlever la corrosion orange. Sur un objet déjà rouillé, par exemple un objet archéologique, le nettoyage au moyen d'un simple brossage suffira sans doute. Dans le cas d'un objet qui était brillant

et lustré avant la formation instantanée de rouille, la surface se trouvant sous la corrosion orangée risque d'être piquée et sombre, et la tache sombre sera plus difficile à éliminer.

Dans les applications commerciales, on allie le fer à d'autres éléments pour obtenir des aciers, des fontes, des aciers inoxydables et d'autres alliages spécialisés. L'acier est un fer allié avec du carbone (en général, moins de 2 % massique); les aciers au carbone sont des alliages de fer et de carbone qui contiennent peu ou pas d'autres éléments d'alliage. La fonte désigne un fer dont le titre de carbone est plus élevé (habituellement environ 2 à 4 % massique). Les aciers inoxydables sont des alliages de fer et de carbone qui contiennent également au moins 10,5 % massique de chrome et une certaine quantité de nickel. Ils sont dits inoxydables parce qu'ils résistent davantage à la rouille que les aciers ordinaires.

Activité : comment provoquer la formation instantanée de rouille sur le fer

Cette activité pratique présente la marche à suivre et les matériaux à utiliser pour illustrer combien le fer rouille rapidement. Elle consiste à exposer du fer à l'eau du robinet.

Équipement et matériel requis pour faire rouiller le fer

- Couteau à mastic neuf en fer (ou un couteau usagé sur lequel la rouille a été éliminée), dont la lame n'est pas en acier inoxydable
- Coupons d'acier au carbone (par exemple, 4 sur 2,5 cm ou 2,5 sur 2,5 cm, n° 20 [0,9 mm d'épaisseur])
- Vaporisateur d'eau (par exemple, une vieille bouteille de produit pour laver les fenêtres dotée d'un bec pulvérisateur)
- Eau du robinet
- Papier abrasif (par exemple, à grain de n° 100 à 400)
- Laine d'acier (par exemple, la plus « fine », n° 0000)
- Papier buvard (par exemple, pièces de 8 sur 10 cm)
- Boîtes de Petri jetables (petites, 60 sur 15 mm, ou grandes, 150 sur 15 mm), pour déposer les échantillons et les empêcher de tacher les matériaux environnants; ou encore feuille de plastique sur laquelle déposer les échantillons
- Pipettes (Pasteur ou plastiques) ou compte-gouttes
- Gants jetables en nitrile
- Essuie-tout ou papiers-mouchoirs

Marche à suivre pour faire rouiller le fer

Préparation du fer

Avec du papier abrasif, frotter les coupons d'acier et le couteau à mastic pour en éliminer les traces de corrosion, les marques et toute couche protectrice. Les surfaces métalliques doivent être brillantes. Pour ce faire, frotter d'abord une surface dans un sens jusqu'à ce qu'elle soit propre, puis tourner l'objet de 90 degrés et répéter l'opération. Il faudra peut-être utiliser du papier abrasif grossier (par exemple, grain n° 100) pour éliminer les taches tenaces. S'il y a lieu, utiliser un solvant, tel de l'acétone, pour supprimer les couches protectrices, les étiquettes adhésives et l'huile. Le cas échéant, consulter d'abord la fiche signalétique du produit pour connaître l'information de santé et de sécurité qui s'y rapporte. Enfiler des gants pour manipuler le fer propre afin d'éviter de le contaminer.

Pulvérisation d'eau sur le couteau à mastic en fer

1. Remplir le vaporisateur avec de l'eau du robinet.
2. Pulvériser un peu d'eau sur la surface de la lame jusqu'à ce qu'elle soit à peu près à moitié couverte de gouttelettes.
3. Surveiller ce qui se passe.
4. Après que l'eau a séché, essuyer la rouille orangée avec un essuie-tout ou un papier-mouchoir et prendre note des taches sombres ou des piqûres éventuelles.

Dépôt d'une goutte d'eau du robinet sur un coupon d'acier au carbone

1. Placer un coupon d'acier au carbone propre au fond d'une boîte de Petri.
2. Sur le côté de la boîte, apposer une étiquette comportant le nom, la date et l'heure de début.
3. À l'aide d'une pipette, faire tomber de 5 à 10 gouttelettes d'eau du robinet au même endroit afin de former une grosse goutte d'eau sur le coupon et laisser la boîte ouverte.
4. Constater le résultat une fois que l'eau s'est complètement évaporée.
5. Il faudra peut-être laisser sécher la goutte jusqu'au lendemain.

Immersion d'un coupon d'acier au carbone dans l'eau du robinet

1. Placer un coupon d'acier au carbone propre dans une boîte de Petri.
2. Sur le côté de la boîte, apposer une étiquette comportant le nom, la date et l'heure de début.
3. Ajouter assez d'eau du robinet pour couvrir toute la surface du fer.
4. Si le niveau baisse en cours d'essai, ajouter de l'eau pour que le fer reste immergé.
5. Si l'essai se poursuit jusqu'au lendemain, couvrir la boîte de Petri pour éviter que l'eau s'évapore.
6. Surveiller ce qui se passe au bout d'un jour ou d'une nuit.
7. Une fois la rouille orangée formée, retirer le coupon et constater à quel point il est facile d'éliminer la rouille en rinçant tout simplement le coupon à l'eau courante ou en le brossant sous l'eau fraîche.
8. Assécher le coupon à l'aide d'un essuie-tout et prendre note de tout dommage à la surface.

Formation de taches de rouille sur du papier (facultatif)

1. Pour manipuler la laine d'acier, toujours porter des gants et la couper aux ciseaux plutôt que d'en déchirer un morceau. Cela évite les coupures et protège les mains.
2. Couper un morceau de laine d'acier fine (par exemple, n° 0000) sans huile, plus petit que les morceaux de papier buvard.
3. Si la laine d'acier ne porte pas d'étiquette précisant « sans huile », la tremper dans un solvant (par exemple, l'acétone).
4. Étirer les fils de la laine d'acier pour les ouvrir.
5. Mouiller deux morceaux de papier buvard à l'eau du robinet.
6. Déposer la laine d'acier sur un morceau de papier buvard mouillé.
7. Pulvériser de l'eau du robinet sur la laine d'acier pour la mouiller complètement.
8. La couvrir ensuite avec l'autre morceau de papier buvard mouillé.
9. Ajouter un petit poids inerte (par exemple, un bécot ou un verre contenant de l'eau) sur le papier buvard pour que la laine d'acier et le buvard soient bien en contact.
10. Laisser le papier buvard sécher jusqu'au lendemain.
11. Retirer la laine d'acier des papiers buvards et observer les résultats.

Résultats de l'activité

Pulvérisation d'eau sur le couteau à mastic en fer

À la figure 1, on voit la surface grise du fer nu qui compose la lame du couteau à mastic immédiatement après la pulvérisation d'eau du robinet. La surface avait été nettoyée à l'acétone pour éliminer le revêtement, puis frottée au papier abrasif n° 320.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0003

Figure 1. Le couteau à mastic immédiatement après la pulvérisation d'eau du robinet sur la lame de fer.

Au bout de quelques minutes, les gouttelettes d'eau devraient prendre une teinte orangée. À la figure 2, on voit le couteau à mastic après la formation de la corrosion orangée dans les gouttes d'eau (environ deux heures plus tard dans cet exemple), mais avant qu'elles aient séché.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0005
Figure 2. Le couteau à mastic au bout d'environ deux heures. La corrosion orangée s'est formée dans les gouttes d'eau du robinet sur la lame de fer.

Une fois que les gouttes ont séché (presque quatre heures plus tard dans cet exemple), il devrait y avoir un résidu pulvérulent orangé sur la surface, comme le montre la figure 3.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0007
Figure 3. Le couteau à mastic presque quatre heures plus tard. L'eau séchée a laissé, sur la lame de fer, une corrosion orangée, typique de la formation instantanée de rouille.



[Formation instantanée de rouille sur une lame de fer](#)

Cette vidéo a été créée par l'Institut canadien de conservation.

[Transcription](#) | [Visionner sur YouTube](#)

Quand on essuie le résidu orangé, on découvre que la surface en dessous a foncé, comme le montre la figure 4, et qu'elle pourrait même être piquée.

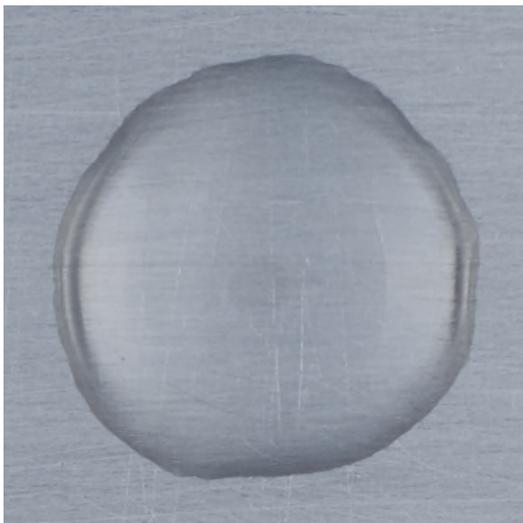


© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0008

Figure 4. Le couteau à mastic après qu'on a essuyé la lame de fer pour en retirer la corrosion orangée. La surface sous-jacente a foncé.

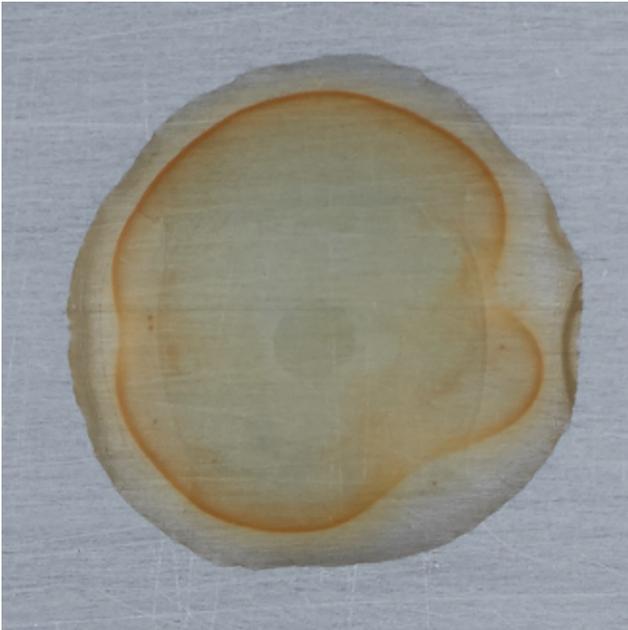
Dépôt d'une goutte d'eau du robinet sur un coupon d'acier au carbone

Le temps de séchage de la grosse goutte d'eau varie selon l'humidité relative, la température et la circulation d'air dans la pièce. Il faudra peut-être plusieurs heures. Les changements visuels se comparent à ceux observés sur le couteau à mastic où de l'eau a été pulvérisée. La séquence d'images ci-après montre à quoi s'attendre. À la figure 5, on voit la goutte d'eau immédiatement après son dépôt sur le coupon d'acier au carbone préalablement nettoyé à l'acétone, puis frotté avec du papier abrasif n° 220. À la figure 6, on voit la goutte au bout d'une heure et, à la figure 7, au bout de quatre heures.



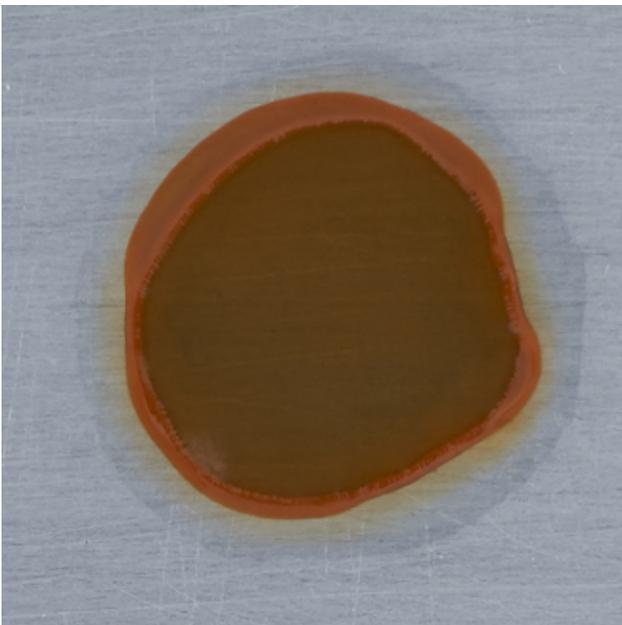
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0022

Figure 5. Goutte d'eau du robinet immédiatement après son dépôt sur le coupon d'acier au carbone.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0024

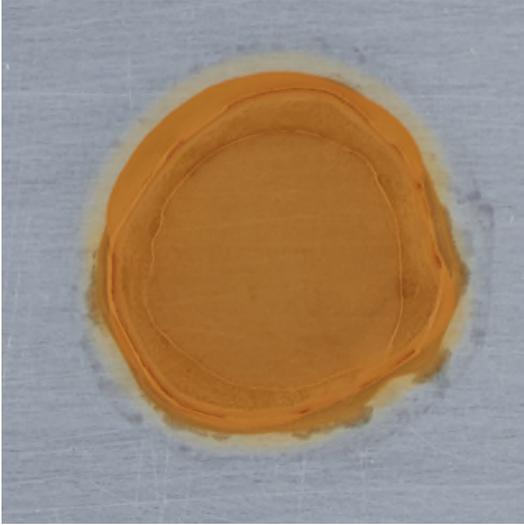
Figure 6. La corrosion orangée sur le coupon d'acier au carbone une heure après le dépôt d'une goutte d'eau du robinet.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0027

Figure 7. La corrosion orangée sur le coupon d'acier au carbone quatre heures après le dépôt d'une goutte d'eau du robinet.

Une fois la goutte séchée, un résidu pulvérulent orangé apparaît sur la surface, comme le montre la figure 8. Quand on essuie le résidu orangé, on découvre que la surface a foncé, comme le montre la figure 9, et qu'elle pourrait même être piquée.



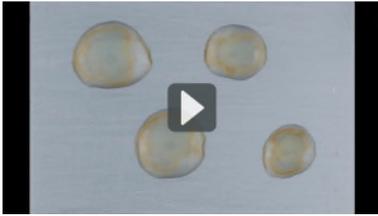
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0028

Figure 8. La corrosion orange vif, typique de la formation instantanée de rouille, sur le coupon d'acier au carbone une fois que la goutte d'eau du robinet a séché.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0031

Figure 9. Le coupon d'acier au carbone après que la corrosion orangée a été éliminée au papier abrasif n° 220. La surface sous-jacente a foncé.



[Formation instantanée de rouille sous quatre gouttes d'eau déposées sur le fer](#)

Cette vidéo a été créée par l'Institut canadien de conservation.

[Transcription](#) | [Visionner sur YouTube](#)

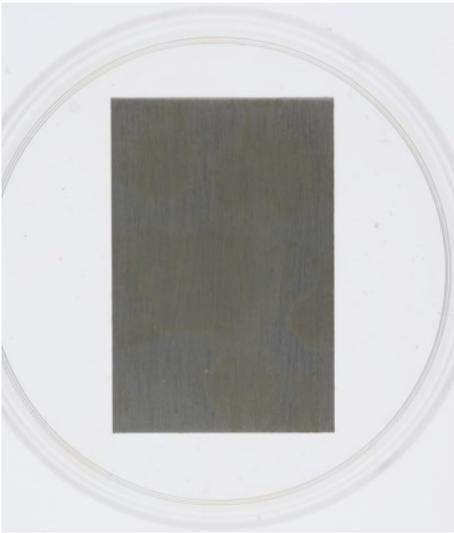
Immersion d'un coupon d'acier au carbone dans l'eau du robinet

Immédiatement après l'immersion d'un coupon d'acier au carbone dans l'eau du robinet, sa surface est brillante et lustrée, comme le montre la figure 10. Ce coupon avait été préalablement nettoyé à l'acétone, puis frotté avec du papier abrasif n° 220. En cinq minutes, la corrosion orangée commence à apparaître. À la figure 11, on voit la surface au bout de 30 minutes d'immersion dans l'eau du robinet. En quelques heures, la surface du fer devient graduellement plus orangée. À la figure 12, on voit le coupon d'acier au carbone au bout de cinq heures d'immersion.

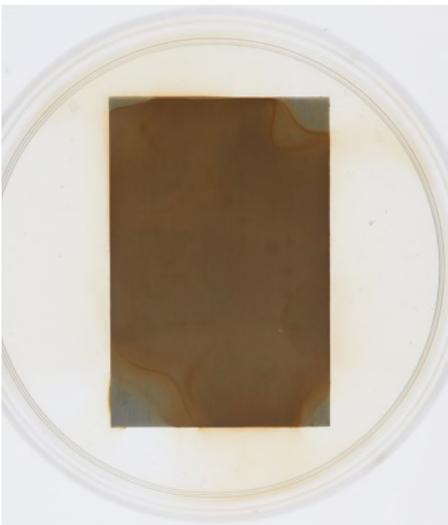


© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0014

Figure 10. Un coupon d'acier au carbone immédiatement après son immersion dans l'eau du robinet.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0016
Figure 11. Un coupon d'acier au carbone au bout de 30 minutes d'immersion dans l'eau du robinet.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0017
Figure 12. Un coupon d'acier au carbone au bout de cinq heures d'immersion dans l'eau du robinet.

Après plusieurs jours, la surface du coupon devient orange vif. À la figure 13, on voit le coupon d'acier au carbone au bout de 72 heures (3 jours) d'immersion dans l'eau du robinet. Une fois le coupon retiré de la solution et le résidu orangé essuyé, la surface en dessous devrait avoir foncé, comme le montre la figure 14.



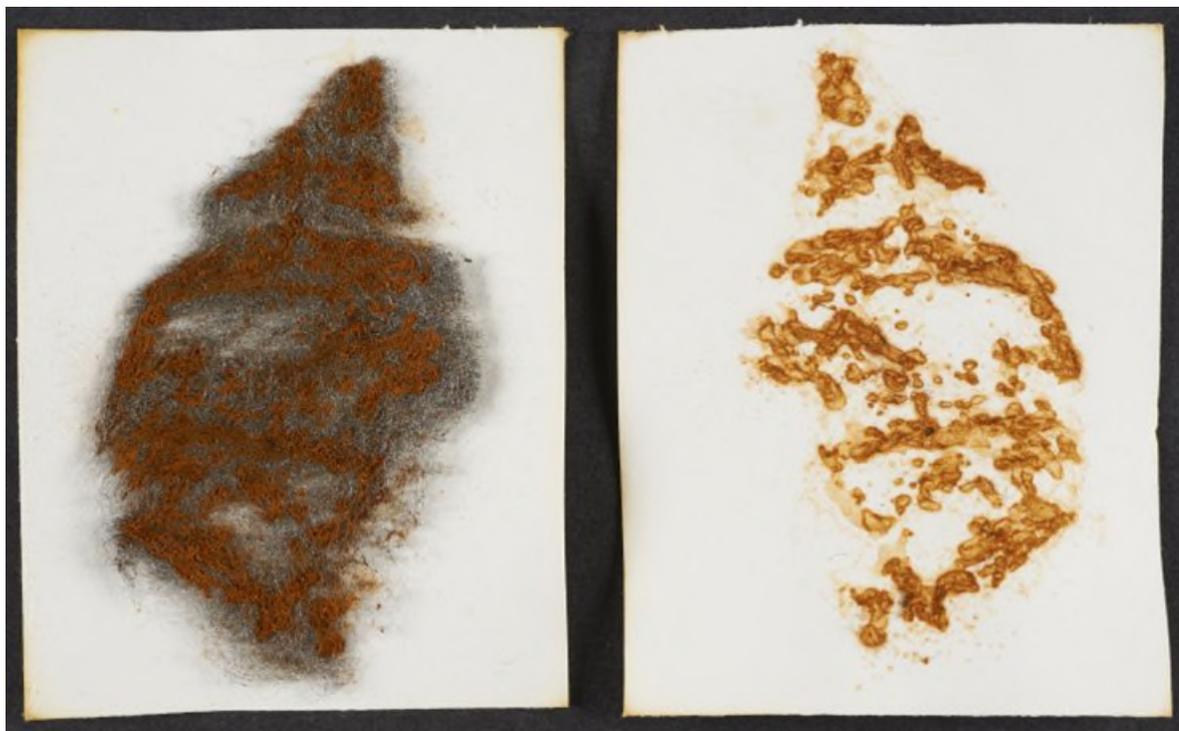
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0019
Figure 13. Un coupon d'acier au carbone au bout de 72 heures (3 jours) d'immersion dans l'eau du robinet.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0020
Figure 14. Le coupon d'acier au carbone après que la corrosion orangée a été essuyée délicatement. La surface sous-jacente a foncé par endroits.

Formation de taches de rouille sur du papier (facultatif)

Les fils fins de la laine d'acier rouillent rapidement. Quand la laine d'acier mouillée est bien maintenue entre deux morceaux de papier buvard mouillé et qu'on la laisse lentement sécher à l'air, elle rouille. À mesure que le fer dans l'acier rouille, des ions fer pénètrent dans le papier buvard, où ils se déposent par précipitation sous forme de rouille orangée. Une fois le papier buvard séché et retiré, la laine d'acier est partiellement couverte d'une rouille orangée qui a taché le buvard. C'est ce que l'on voit à la figure 15.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0012

Figure 15. À gauche, la laine d'acier (n° 0000, ultrafine) rouillée sur le papier buvard blanc. À droite, les taches de rouille sur le papier buvard dues au contact de la laine d'acier mouillée et rouillée de gauche.

Suggestions d'essais supplémentaires

Comparer la formation instantanée de rouille sur le fer dans des solutions contenant différentes concentrations de sels. Plutôt que de l'eau du robinet, utiliser de l'eau déionisée ou des solutions renfermant différentes concentrations de chlorure de sodium. Essayer avec une solution de chlorure de sodium, comme un produit commercial à concentration standard d'ions chlorure (par exemple, 0,1 M NaCl), ou préparer une solution dans laquelle la vitesse de corrosion du fer est la plus grande, c'est-à-dire une solution ayant une concentration d'environ 0,5 M NaCl. La rouille se formera plus

rapidement dans l'eau salée que dans l'eau du robinet, et les résidus pulvérulents seront plus foncés. Par contre, elle se formera plus lentement dans l'eau déionisée, voire pas du tout, avant que l'eau s'évapore.

Si l'on ne dispose pas de laine d'acier ni de coupon d'acier au carbone pour constater le transfert de la rouille et les taches sur le buvard, faire l'exercice avec quelques clous ordinaires (non galvanisés). Frotter les clous avec du papier abrasif pour que ni l'huile ni le revêtement protecteur n'interfèrent avec la formation de rouille. Les envelopper serré dans un essuie-tout mouillé et laisser sécher à l'air. Prendre soin d'éliminer le surplus d'eau de l'essuie-tout avant d'envelopper soigneusement les clous pour qu'ils soient bien en contact.

Informations complémentaires

Feuilles d'acier au carbone

Les feuilles d'acier au carbone sont vendues en diverses épaisseurs. Cette activité a été faite avec de l'acier d'épaisseur n° 20 (0,9 mm). La surface des feuilles que l'on trouve maintenant dans le commerce est enduite d'une huile anticorrosive qu'il faut éliminer avant de faire l'activité. Ne pas acheter d'acier au carbone laminé à chaud, car sa surface est couverte d'une forme de rouille appelée « écailles de laminage » qui résulte du laminage à chaud. Si l'on ne dispose pas de cisailles à métaux pour couper les feuilles, demander au fournisseur de tailler ces dernières en coupons de la taille voulue.

Formation instantanée de rouille dans les contextes autres qu'archéologiques

À l'extérieur et à découvert, le fer subit l'alternance de cycles humides et secs. De gros objets historiques en fer doivent peut-être être rangés à l'extérieur ou dans un entrepôt où l'humidité n'est pas régulée. À force d'utilisation, le matériel et les machines-outils agricoles perdent l'huile ou la peinture qui les protègent et se couvrent d'une couche de rouille (Prytulak, 1999). La rouille brun foncé est commune sur ces objets, mais si, une fois rouillés, ils sont mouillés, ils sont sensibles à la formation instantanée de rouille et virent rapidement à l'orangé disgracieux. Les figures 16 et 17 montrent des exemples de formation instantanée de rouille sur des objets.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0010

Figure 16. Exemple de formation instantanée de rouille sur du fer qui entre dans la composition de cette fourchette patrimoniale à manche en bois.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0009
Figure 17. Une tortue en fer forgé sur laquelle on voit la formation instantanée de rouille du côté gauche et de la rouille stable du côté droit.

En cas de situation d'urgence où l'eau entre en jeu, il est recommandé de traiter les métaux instables, comme le fer dont la corrosion peut être rapide, dans les 48 heures (Galban, 2002). Il n'empêche que, comme il est montré dans cette activité d'apprentissage sur la formation instantanée de rouille, beaucoup de rouille peut se former en 48 heures. Si un objet mouillé a rouillé instantanément, la majeure partie de la rouille orangée peut être enlevée au moyen d'une brosse ou d'un pinceau à soies douces. L'objet est ensuite rincé à l'eau claire, puis épongé avec des serviettes non pelucheuses et séché à l'aide d'un ventilateur.

Si un objet en fer qui a rouillé instantanément a eu le temps de sécher, on peut enlever la rouille de façon mécanique, par exemple avec de la laine d'acier fine (n° 000 ou n° 0000) et quelques gouttes d'huile légère, tel qu'il est expliqué dans la Note de l'ICC 9/6 [Le soin et le nettoyage du fer](#).

Formation instantanée de rouille dans un contexte archéologique

Les restaurateurs spécialisés en archéologie rencontrent parfois des cas de formation instantanée de rouille vers la fin des traitements visant à retirer les sels d'objets archéologiques qui renferment du fer. Les objets sont immergés, parfois des mois ou des années durant, dans des solutions alcalines, comme de l'hydroxyde de sodium à 0,5 M (2 % p/v) (North et Pearson, 1978). Il faut changer la solution quand la concentration d'ions chlorure libérés par le lavage des objets augmente. On peut arrêter le traitement quand la concentration d'ions chlorure reste faible après qu'on a changé plusieurs fois la solution de lavage; une faible concentration d'ions chlorure, par exemple 5 mg/L, est recommandée (Rimmer et al., 2013b). Durant le trempage, le pH élevé de la solution d'hydroxyde de sodium empêche le fer de rouiller, mais il faut rincer l'objet à la fin du traitement afin d'éliminer l'hydroxyde de sodium. Au rinçage, on surveille le pH ou la conductivité jusqu'à ce que la solution de rinçage présente un pH neutre ou une faible conductivité. Quand le pH à la surface du fer descend sous environ 11, le fer restant recommence à rouiller et à prendre une teinte orange vif typique de la formation instantanée de rouille.



[Formation instantanée de rouille sur quatre clous archéologiques en fer](#)

Cette vidéo a été créée par l'Institut canadien de conservation.

[Transcription](#) | [Visionner sur YouTube](#)

Ces clous ont d'abord été traités dans une solution d'hydroxyde de sodium à 1 % p/v pendant plusieurs années, puis ils ont passé 24 jours dans l'eau avant d'en être retirés. On les a ensuite brossés pour en éliminer la rouille orange vif, puis on les a mis dans l'eau fraîche avant d'enregistrer la vidéo. À la figure 18, on les voit au bout de trois jours dans le même bain d'eau; à la figure 19, après qu'ils ont été séchés.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 88658-0188

Figure 18. Les quatre clous archéologiques en fer après immersion dans l'eau pendant trois jours, montrant l'orange vif et l'aspect floculeux de la rouille instantanée. On remarque aussi la teinte orangée de l'eau.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 88658-0189

Figure 19. Les quatre clous archéologiques en fer après trempage dans l'eau pendant trois jours, suivi d'une immersion dans l'acétone et d'un séchage à l'air. La corrosion orange vif n'a pas été retirée intentionnellement, mais la plus grande partie s'est détachée au moment du transfert dans l'acétone.

Les restaurateurs en archéologie traitent la rouille instantanée au rinçage en brossant les petits objets ou en lavant au jet les plus gros à la fin de chaque cycle de lavage avant de les tremper dans un nouveau bain. À la fin du traitement, toute trace de rouille restante est retirée de façon mécanique.

Application d'un fini pour réduire au minimum la formation instantanée de rouille après le traitement

Divers finis contribuent à réduire au minimum la formation instantanée de rouille qui risque de survenir après le traitement. On parle ici, entre autres, de cire, de vernis ou d'huile, tel qu'il est précisé dans la Note de l'ICC 9/6 [Le soin et le nettoyage du fer](#) et la Note de l'ICC 15/4 [Présentation de collections industrielles à l'intérieur](#). Il est également possible d'appliquer une couche d'acide tannique, ce qui ne constituera pas à proprement parler une protection, mais qui améliorera l'apparence de l'objet dont la surface deviendra noire, tel qu'il est expliqué dans la Note de l'ICC 9/5 [Le traitement à l'acide tannique pour les artefacts en fer rouillé](#). Les poêles en fer forgé sont souvent

revêtus d'un produit à polir, ce qui leur donne un fini noir. Ce genre de produit contient un pigment noir et, dans certains cas, de la cire.

La formation instantanée de rouille dans l'industrie

L'expression « formation instantanée de rouille » a un sens technique précis dans le monde des revêtements. Cette forme de rouille présente un problème après que le fer a été lavé sous un jet d'eau à haute pression avant d'être peint (ASTM, 2015; SSPC/NACE, 2002). Quand le fer sèche, il se corrode rapidement et se couvre d'une couche de rouille orangée. Si cette couche est mince et adhérente, on peut y appliquer de la peinture; si, par contre, elle est épaisse et s'enlève facilement par frottement, il faut l'éliminer avant de peindre. Les fabricants de revêtements précisent le degré de formation instantanée de rouille acceptable pour leurs produits, selon les normes définies sur le sujet (SSPC/NACE, 2002). Des inhibiteurs de corrosion ont été mis au point, lesquels, ajoutés à l'eau d'arrosage, permettent de ralentir la formation instantanée de rouille jusqu'au moment d'appliquer de la peinture (ASTM, 2015).

Dangers de la contamination d'autres métaux par le fer due à la laine d'acier ou à d'autres outils

Il est recommandé de ne jamais utiliser des laines d'acier ni des brosses en fil d'acier sur d'autres métaux (par exemple, l'acier inoxydable, les alliages de cuivre et l'aluminium), car ces outils risquent de laisser des parcelles de fer piégées en surface. Avec le temps, en particulier à l'extérieur, la forte humidité ou la pluie provoqueront la formation instantanée de rouille du fer et donc, de vilaines taches de rouille. Dans le même ordre d'idée, les meules utilisées sur le fer ne doivent jamais servir ultérieurement sur d'autres métaux, au risque d'y transférer des fragments de fer. C'est pourquoi on effectuera tous les travaux de meulage du fer à bonne distance des autres métaux pour les mettre à l'abri des fragments de fer éjectés par la meule.

Endommagement des substances organiques par les ions fer

Quand le fer se corrode, il produit des ions fer susceptibles d'endommager les polymères organiques naturels tels que la cellulose et les protéines (Selwyn, 2004). La cellulose est le principal composant organique qui entre dans la composition du papier, du bois, du coton et du lin. Des protéines (par exemple, la kératine, le collagène et la fibroïne) sont présentes dans les matériaux tels que la laine, le cuir, le parchemin, la peau et la soie. Les ions fer sont un catalyseur (accélérateur) de l'oxydation de ces polymères organiques qui, une fois dégradés et rendus fragiles et cassants, s'abîment facilement. Ainsi, une aiguille à coudre laissée dans une pièce de tissu est sensible à la rouille en période de forte humidité. À mesure que les ions fer migrent dans le tissu, non seulement ils l'endommagent, mais ils le tachent aussi quand ils finissent par précipiter sous forme de rouille.

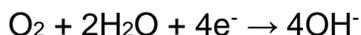
Aspects scientifiques de la formation instantanée de rouille

Réactions entre le fer et l'eau

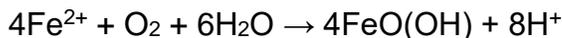
Dans l'eau, le fer s'oxyde (perd des électrons) et quelque chose d'autre, généralement de l'oxygène dissous, se réduit (gagne des électrons). Ces deux réactions se produisent simultanément, mais pas nécessairement au même endroit sur la surface. La réaction d'oxydation du fer en ions fer(II) (Fe^{2+}) s'exprime dans la formule que voici :



Et la réaction de réduction de l'oxygène dissous en ions hydroxyde (OH^-) s'exprime dans celle-ci :



Les ions fer(II) se dissolvent dans l'eau et s'éloignent de la surface de métal. Ils peuvent réagir avec l'oxygène dissous pour former des ions fer(III), qui sont beaucoup moins solubles que les ions fer(II) et précipitent donc sous forme d'hydroxyde de fer ou d'oxyhydroxyde de fer (rouille) (Cornell et Schwertmann, 2003). Voici la formule de cette réaction :



L'oxyhydroxyde de fer qui se forme au moment de la formation instantanée de rouille se compose habituellement de lépidocrocite, dont la formule est $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$, qui est produite par l'oxydation rapide de la solution contenant des ions fer(II) (Misawa et al., 1974). La lépidocrocite se transforme progressivement en une forme plus thermodynamiquement stable, la goethite, de formule $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ (Stratmann, 1990). Une autre forme d'oxyhydroxyde de fer, l'akaganéite, de formule $\beta\text{-FeO}(\text{OH})$, se forme en présence d'ions chlorure dans une solution de concentration supérieure à environ 2 M (Refaat et Génin, 1997). Un composé noir, la magnétite, de formule Fe_3O_4 , peut également se former par la combinaison d'ions fer(II) et d'ions fer(III) dans la réaction que voici :



Parce que la plupart des précipités solides ne se forment pas directement à la surface du métal, ils n'offrent guère de protection contre la progression de la rouille (Evans, 1948).

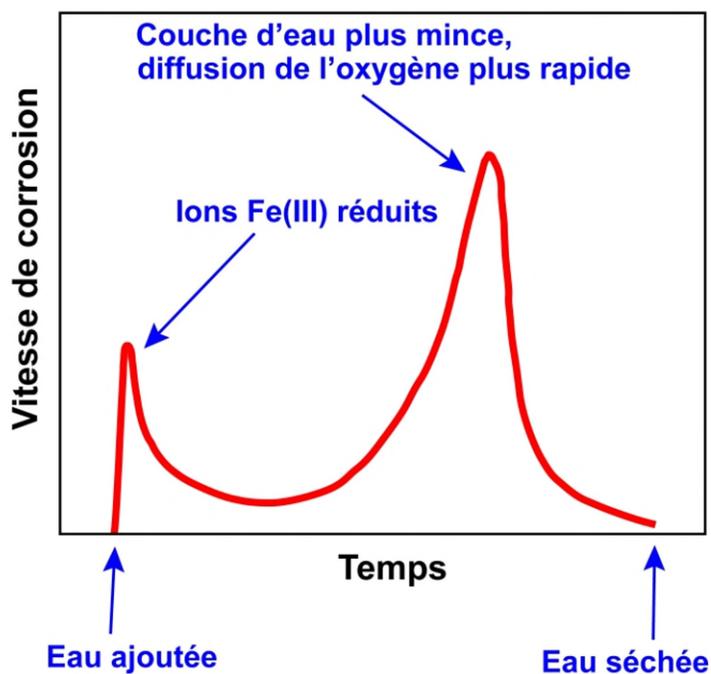
Formation de rouille dans une goutte d'eau

Dans des gouttelettes d'eau, on voit parfois la rouille se former en anneau (Evans, 1981), comme le montre la figure 7. La réduction de l'oxygène se produit principalement sur le pourtour de la goutte, car la couche d'eau y est à son plus mince, de sorte que l'oxygène migre plus rapidement à la surface du métal. L'oxydation du fer se produit principalement dans le centre de la goutte, où la

concentration d'oxygène dissous est la plus faible, tandis que la réduction d'oxygène qui l'accompagne se fait surtout à la bordure de la goutte. Quand les ions fer(II) migrant vers le pourtour de la goutte entrent en contact avec l'oxygène se diffusant vers l'intérieur, l'oxyhydroxyde de fer(III) se dépose par précipitation et l'intérieur de la goutte se remplit de rouille orangée.

Vitesse de corrosion

À mesure que la surface de fer mouillée s'assèche, la couche d'eau s'amincit et l'oxygène atteint la surface du fer plus rapidement, ce qui augmente la vitesse de corrosion (Stratmann, 1990). La corrosion s'accélère juste avant le séchage complet de la surface (la deuxième pointe, la plus haute, dans le graphique de la figure 20). Si le fer présente déjà une couche de lépidocrocite au moment où il est mouillé, les ions fer(III) de la rouille se transforment par réduction en fer(II), ce qui, ajouté à la réduction de l'oxygène, donne un élan initial à la vitesse de corrosion (Stratmann, 1990) (la première pointe, la plus basse, dans la figure 20). Une fois la surface sèche, les ions fer(II) formés de cette façon s'oxydent de nouveau en ions fer(III).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 127992-0034

Figure 20. Graphique illustrant la vitesse de corrosion du fer rouillé en fonction du temps. Quand le fer déjà rouillé est de nouveau mouillé, la vitesse de corrosion monte en flèche [en raison de la réduction des ions fer(III)], puis se stabilise un certain temps jusqu'à connaître sa plus haute pointe juste avant que la surface sèche. Adapté de Stratmann (1990).

Il y a une deuxième raison pour laquelle la formation instantanée de rouille s'accélère à mesure que la surface devient sèche : la concentration accrue des ions dans l'eau au fil de l'évaporation. Les ions sont produits par les sels dissous dans l'eau. À l'extérieur, la pluie est une source d'ions divers, tels des ions chlorure, sodium, potassium, calcium et sulfate (Junge et Werby, 1958); l'eau du robinet renferme aussi une variété d'ions. Les ions sont nécessaires pour que le courant ionique circule dans le liquide entre les zones où le fer est oxydé et les zones où l'oxygène est réduit. Plus la concentration d'ions est élevée, plus le courant ionique circule facilement. C'est pour cette raison que la formation instantanée de rouille se produit plus lentement dans l'eau du robinet que dans une solution de chlorure de sodium et plus lentement encore dans l'eau déionisée. Certains ions, notamment les ions chlorure, accélèrent aussi la vitesse de corrosion en interférant avec la capacité qu'a la couche de corrosion de protéger la surface.

C'est dans une solution de chlorure de sodium dont la concentration est d'environ 0,5 M NaCl (Foley, 1970) que la vitesse à laquelle le fer se corrode est la plus grande. À une concentration inférieure à 0,5 M, la vitesse de corrosion du fer augmente avec la concentration, car la conductivité de la solution augmente également. À une concentration supérieure à 0,5 M, la vitesse de corrosion diminue, car la solubilité de l'oxygène faiblit. La concentration des ions chlorure dans l'eau de mer est d'environ 0,54 M (principalement due au NaCl) (Stumm et Morgan, 1996).

Corrosion à un fort taux d'humidité relative

L'expression « formation instantanée de rouille » désigne habituellement la corrosion du fer mouillé et s'amorce en quelques minutes. Le fer exposé à une forte humidité relative (HR) se corrode aussi, bien que moins rapidement. À une forte HR, même si le fer ne semble pas mouillé, la surface est couverte d'eau adsorbée. L'épaisseur de l'eau sur le métal augmente avec l'HR et, à forte HR, elle atteint plusieurs molécules d'épaisseur (Leygraf et Graedel, 2000). La vitesse de corrosion s'accélère rapidement au-delà d'un certain niveau d'HR, appelé « valeur critique d'HR », qui s'établit pour le fer aux alentours de 65 % (Phipps et Rice, 1979). Au-dessus de ce niveau, l'eau adsorbée à la surface ressemble à une masse d'eau et favorise la corrosion.

Les impuretés, comme des particules de saleté, les sels (provenant, par exemple, des empreintes) et les polluants acides présents en surface, participent aussi à la formation de rouille sur le fer (Rimmer et al., 2013a). Elles attirent et piègent l'humidité à la surface du métal, favorisant ainsi la corrosion localisée. L'entretien régulier visant à réduire les dépôts de poussières à la surface du métal aidera à prévenir la corrosion et l'endommagement de la surface (Thickett et Costa, 2014).

De nombreux sels sont hygroscopiques (absorbent l'eau) et risquent donc de produire de l'humidité à la surface du fer, même si l'HR est relativement faible. L'accumulation de poussières sur le fer nu est souvent une source de tels sels, susceptibles d'entraîner des taches de corrosion localisées quand ils absorbent l'humidité.

Remerciements

Merci tout spécialement à Alyson Tang et à Megan Doxsey-Whitfiel (anciennes stagiaires à l'ICC), à Liz Croome (de Parcs Canada) et à Miriam Harris (Collège Fleming) d'avoir participé à l'élaboration de la présente activité.

Fournisseurs

Remarque: Les renseignements qui suivent visent uniquement à informer le lecteur. Le fait qu'une entreprise figure dans la présente liste ne signifie pas pour autant qu'elle est approuvée par l'Institut canadien de conservation.

Couteaux à mastic

On trouve des couteaux à mastic dans la plupart des quincailleries et des magasins à bas prix (magasins à un dollar). Acheter des couteaux bon marché en acier au carbone et non ceux plus chers, en acier inoxydable.

Feuilles d'acier au carbone

Les feuilles d'acier au carbone laminé à froid sont offertes dans les magasins de fournitures de métal, comme [Metal Supermarkets](#) (en anglais seulement).

Fournitures de produits chimiques et de matériel de laboratoire

Le chlorure de sodium, les solvants organiques, les pipettes, les boîtes de Petri jetables et les gants jetables en nitrile se vendent chez les fournisseurs de produits chimiques tels que [Fisher Scientific](#).

Laine d'acier

La laine d'acier est offerte en diverses qualités, allant de fine (n° 0000) à grossière (n° 4) et se vend dans nombre de quincailleries. On en trouve aussi sans huile, par exemple à [Lee Valley](#) (en anglais seulement).

Solutions standards d'ions chlorure

[Ricca Chemical](#) (en anglais seulement) fabrique un éventail de solutions standards d'ions chlorure qui sont distribuées par les fournisseurs de produits chimiques tels que [Fisher Scientific](#).

Références

ASTM International D5367-08. « Standard Practice for Evaluating Coatings Applied Over Surfaces Treated With Inhibitors Used to Prevent Flash Rusting of Steel When Water or Water/Abrasive Blasted », dans Annual Book of ASTM Standards, vol. 06.02, West Conshohocken (Pennsylvanie), American Society for Testing and Materials, 2015, p. 595-597.

Cornell, R. M., et U. Schwertmann. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses, 2^e éd., Weinheim (Allemagne), Wiley-VCH, 2003.

Evans, U. R. « An Outline of Corrosion Mechanisms, Including the Electrochemical Theory », dans Corrosion Handbook (sous la direction de H. H. Uhlig), New York (New York), John Wiley & Sons, 1948, p. 3-11.

Evans, U. R. An Introduction to Metallic Corrosion, 3^e éd., Londres (Royaume-Uni), Edward Arnold, 1981, p. 35-37.

Foley, R. T. « Role of the Chloride Ion in Iron Corrosion », Corrosion, vol. 26, n^o 2 (1970), p. 58-70.

Galban, M. [Salvage at a Glance Part III: Object Collections](#) (PDF) (en anglais seulement), Conserve O Gram 21/6, Washington (D.C.), National Park Service, 2002.

Junge, C. E., et R. T. Werby. « The Concentration of Chloride, Sodium, Potassium, Calcium, and Sulfate in Rain Water over the United States », Journal of Meteorology, vol. 15, n^o 5 (1958), p. 417-425.

Leygraf, C., et T. Graedel. Atmospheric Corrosion, New York (New York), John Wiley & Sons, 2000.

Logan, J. [Le soin et le nettoyage du fer](#), Notes de l'ICC 9/6, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2007.

Logan, J. [Le traitement à l'acide tannique pour les artefacts en fer rouillé](#), Notes de l'ICC 9/5, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2013.

Misawa, T., K. Hashimoto et S. Shimodaira. « The Mechanism of Formation of Iron Oxide and Oxyhydroxides in Aqueous Solutions at Room Temperature », Corrosion Science, vol. 14, n^o 2 (1974), p. 131-149.

North, N. A., et C. Pearson. « Washing Methods for Chloride Removal from Marine Iron Artifacts », Studies in Conservation, vol. 23, n^o 4 (1978), p. 174-186.

Phipps, P. B. P., et D. W. Rice. « The Role of Water in Atmospheric Corrosion », Corrosion Chemistry, ACS Symposium Series, n° 89 (sous la direction de G. R. Brubaker et P. B. P. Phipps), Washington (D.C.), American Chemical Society, 1979, p. 235-261.

Prytulak, G. [Présentation de collections industrielles à l'intérieur](#), Notes de l'ICC 15/4, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 1998.

Prytulak, G. « Rust and the Working Surfaces of Industrial Artefacts », dans Industrial Collections, Care and Conservation: Proceedings of the Conference Hosted by the Council of Museums in Wales & the United Kingdom Institute for Conservation, Cardiff, 9 – 11 April 1997 (sous la direction de D. Dollery et J. Henderson), Cardiff (Pays de Galle), Council of Museums in Wales and London; Londres (Royaume-Uni), United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artstic Works, 1999, p. 59-64.

Refait, P., et J.-M. R. Génin. « The Mechanisms of Oxidation of Ferrous Hydroxychloride β - $\text{Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ in Aqueous Solution: The Formation of Akaganeite vs Goethite », Corrosion Science, vol. 39, n° 3 (1997), p. 539-553.

Rimmer, M., D. Thickett, D. Watkinson et H. Ganiaris. [Guidelines for the Storage and Display of Archaeological Metalwork](#) (en anglais seulement), Swindon (Royaume-Uni), English Heritage, 2013a.

Rimmer, M., D. Watkinson et Q. Wang. « The Impact of Chloride Desalination on the Corrosion Rate of Archaeological Iron », Studies in Conservation, vol. 58, n° 4 (2013b), p. 326-337.

Selwyn, L. Métaux et corrosion : Un manuel pour le professionnel de la conservation, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2004.

SSPC/NACE International (The Society for Protective Coatings and National Association of Corrosion Engineers). Surface Preparation and Cleaning of Metals by Waterjetting Prior to Recoating, Joint Surface Preparation Standard SSPC-SP 12/NACE N° 5, Pittsburgh (Pennsylvanie), SSPC, 2002.

Stratmann, M. « The Atmospheric Corrosion of Iron – A Discussion of the Physico-Chemical Fundamentals of this Omnipresent Corrosion Process », Berichte Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, vol. 94, n° 6 (1990), p. 626-639.

Stumm, W., et J. J. Morgan. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3^e éd., New York (New York), John Wiley & Sons, 1996, p. 899.

Thickett, D., et V. Costa. « The Effect of Particulate Pollution on the Corrosion of Metals in Heritage Locations », dans ICOM Committee for Conservation, 17th Triennial Conference, Melbourne, Australia, 15 – 19 September 2014: Preprints (sous la direction de J. Bridgland), Paris (France), Conseil international des musées, 2014.