Quand l'aluminium recyclé est utilisé dans les zones marines

Cuivre, prétraitement de surface et vérité des essais : pourquoi la corrosion des huisseries en bord de mer n'est pas qu'une affaire de peinture

Jean-Jacques Aernout, Ingénieur, expert judiciaire en industrie et métallurgie
Expert inscrit sur la liste des experts agréés par la Cour de Cassation
Expert inscrit sur la liste de la Cour Pénale Internationale de La Haye
Expert inscrit sur les liste des Cours d'appel et administrative d'appel de Douai
Expert judiciaire assermenté par la Cour Supérieure de Justice du Luxembourg

Nota : Cette note n'est pas une publication scientifique bien qu'appuyée sur des sources publiques (voir notes de bas de page).

Toute application à un dossier particulier suppose la vérification contradictoire des faits propres à ce dossier : composition réelle des alliages, nature du prétraitement et du laquage, cartographie de l'attaque.

Avant-propos

On choisit l'aluminium pour sa réputation d'inaltérable. Il y a déjà plus de soixante ans, l'aluminium (nu à l'époque) a commencé en France à remplacer le bois pour les huisseries au regard de leur absence d'entretien.

Alors, quand des huisseries neuves se couvrent d'oxydation en quelques mois, face à la mer, la tentation est grande de considérer que c'est la faute exclusive de la peinture.

Cette note défend une lecture différente, sans a priori, et je crois plus juste : ce que l'on voit à la surface est le **symptôme**, pas la cause.

La cause se joue aussi bien en dessous de la peinture,

- dans la **composition du métal** (le cuivre que le recyclage ne sait pas retirer),
- dans la **préparation de surface** (le dérochage qui, paradoxalement, expose ce cuivre),
- dans l'extrême **finesse des traitements de surface modernes** (devenus trop minces pour couvrir quoi que ce soit),
- dans un **milieu marin** qui apporte le sel à la surface des huisseries.

La peinture, elle, ne fait « bien souvent » que trahir, en se soulevant, une cause qui vient de dessous.

J'y ajoute une mise en garde sur les essais au brouillard salin de plus en plus sévère, qui rassurent sur le papier mais ne prouve rien sur la tenue réelle.

1 Ce que la mer révèle

Il y a des dossiers d'expertise où le premier réflexe est le bon, et d'autres où il faut résister à l'évidence apparente.

Celui de l'oxydation des huisserie en bordure de mer est du second type.

Une menuiserie aluminium, thermolaquée, posée en bord de mer… et quelques mois plus tard, douze mois, parfois seulement six … et on constate les premières zones d'oxydation qui apparaissent, d'abord là où les embruns s'accroche le plus.

La solution de facilité est bien sûr d'y voir un défaut de tenue de la peinture.

C'est possible, c'est en effet une hypothèse, mais en tant qu'ingénieur qui a été confronté à des millier de cas où on incriminait le métal et qui a passé sa vie à chercher la cause avant le coupable se pose une autre question : **pourquoi l'oxydation apparait si rapidement, et pourquoi là ?**

Six à douze mois, c'est trop court pour un vieillissement de peinture, qui se compte généralement en années.

Ici, au plus près de la mer, on désigne parmi les responsables : le **chlorure**.

À partir de ces deux indices, tout le raisonnement change de paradigme : de la surface vers le cœur de l'huisserie, et de la peinture vers le trio infernal : **matériau / procédé / milieu**.

C'est ce raisonnement que je vais parcourir dans cette note en m'appuyant à chaque étape sur de la littérature scientifique publique.

2 La réputation surfaite de l'aluminium

L'aluminium ne résiste pas parce qu'il est noble car il ne l'est pas.

Il résiste parce qu'il se couvre instantanément d'un film d'oxyde extrêmement mince, quelques nanomètres, qui le protège comme une peau.

Tout le paradoxe de ce métal tient là : sa réputation d'inaltérable repose sur une pellicule invisible, et cette pellicule a un ennemi terrible, l'**ion chlorure**.

Le chlorure ne « ronge » pas l'aluminium au sens courant ; il ne fait que **percer le film passif**, localement, et ouvre une « porte » qui permet d'enclencher l'oxydation[1].

En bord de mer, cette porte est enfoncée en permanence : l'embrun dépose du sel, l'humidité fait le reste.

C'est pourquoi la même huisserie qui vieillirait tranquillement à l'intérieur des terres pendant des années et quelle que soit la couleur de la peinture se dégrade vite face au large.

Dans ce thriller, le sel n'est pas un détail de contexte, un acteur comme les autres, il est le déclencheur. Et il agit **dès la pose**, sans attendre que la peinture vieillisse.

Et une fois la brèche ouverte, le mal s'entretient tout seul.

Très rapidement, l'aluminium qui se dissout acidifie le milieu et les chlorures s'y concentrent : il s'y forme, localement, un acide agressif, il s'agit du même phénomène auto-entretenu que l'on connaît sur les aciers inoxydables.

1 *Filiform Corrosion, an overview, ScienceDirect Topics, sciencedirect.com/topics/materials-science/filiform-corrosion. ; SINTEF, Corrosion of aluminium in marine environments, http://sintef.no.*

Le scenario n'a besoin que de peu : une amorce, un peu de sel, et la réaction creuse son propre nid.

3 Le cuivre, un acteur qu'il vaudrait mieux ne pas mettre en scène …

L'aluminium primaire, tiré de la bauxite, est propre : le cuivre est dans des quantités infinitésimale (0,01% à 0,05%)

L'aluminium recyclé, quant à lui, hérite de tout ce qu'on a fondu avec lui … et le cuivre en fait partie. Or, une fois dans le bain… **le cuivre ne disparait pas**.

Il n'est en effet pas possible de « dé-cuivrer » un aluminium liquide. La littérature le dit sans détour : le cuivre est le facteur qui limite le recyclage, précisément à cause de la corrosion :

> *« Le cuivre est fréquemment le facteur limitant pour déterminer quels alliages peuvent être recyclés, principalement en raison de préoccupations de corrosion. »*[2]

Le même raisonnement vaut également pour le **fer** : quasi insoluble dans l'aluminium, il ne disparaît pas non plus et précipite en composés durs, souvent associés au cuivre[3].

Recycler, c'est donc concentrer, lentement, deux éléments indésirables : le cuivre et le fer.

L'industrie automobile allemande ne s'y trompe pas : Novelis propose déjà des tôles de peau à fort taux de recyclé, et travaille avec Audi sur la boucle fermée, mais en mettant en avant, à chaque fois, la maîtrise de la **tenue à la corrosion**[4].

Si le sujet valait un prix d'éco-conception et des années de recherche, c'est bien qu'il ne va pas de soi et qu'il est d'une grande importance pour l'industrie automobile allemande..

On m'objectera que les profilés de menuiserie sont, en principe, des 6060/6063 réputés « propres ». C'est vrai en principe, mais la pression, à la fois économique et écologique, pousse à incorporer toujours plus de matière recyclée, et la frontière entre un lingot propre et un lingot chargé se joue à quelques centièmes de pour-cent près.

D'où l'importance, dans ce dossier, de connaître la composition **réelle** des profilés posés et non celle du certificat théorique basé sur le respect de la norme, mais celle du métal réel qui est utilisé en zone maritime.

2 *Aluminum Scrap, an overview, ScienceDirect Topics, http://sciencedirect.com/topics/engineering/aluminum-scrap.*

3 *Excessive Fe Contamination in Secondary Al Alloys: Microstructure, Porosity and Corrosion Behaviour, Metals (MDPI), doi http://10.3390/met15040451.*

4 *Recycled Versus Primary Aluminum in the European Automotive Industry, Recycling (MDPI), 2026,http:// mdpi.com/2313-4321/11/1/19.*

4 La taille des composés cuivrés compte pour permettre la mise en condition de la cathode

Pour donner une image compréhensible par chacun d'entre nous, le cuivre dans l'aluminium n'est pas réparti comme du sucre dans l'eau.

Alors qu'une partie reste en solution, invisible ; le reste précipite sous forme de **particules intermétalliques** tels des grains à part entière. Ces grains ont bien sur leur composition et leur électrochimie spécifiques[5].

Leur taille couvre plusieurs échelles :

Type de « particule » au cuivre	Taille typique	Rôle en corrosion
Précipités de durcissement	De 1 à 50 nm	Mineur (mais déjà cathodiques)
Dispersoïdes	De 0,05 à 0,5 µm	Secondaire
Intermétalliques constitutifs (Al_2CuMg, Al-Cu-Fe-Mn…)	De 1 à 10 µm, jusqu'à 20-30 µm en recyclé	Cathodes principales en surface
Aiguilles/plaquettes riches en fer (issu de fonderie secondaire)	dizaines de µm à plus de 100 µm	Très cathodiques et fragilisantes

Ce sont essentiellement les **intermétalliques constitutifs**, de quelques microns à une trentaine de microns dans le cas d'aluminium recyclé, qui sont à l'origine de la corrosion de surface.

Leur nombre comme leur taille augmentent avec la teneur en cuivre.

Pour l'aluminium recyclé destiné aux véhicules, on retient des intermétalliques d'une taille « inférieure ou égale à 30 µm », dont le nombre et la dimension croissent avec le fer[6].

Cette taille, ce chiffre est important, car il permet d'appréhender la suite du raisonnement : une particule de cuivre de **10 microns**.

Nous verrons au chapitre 7 que le traitement de surface censé la couvrir mesure, lui, quelques dizaines de **nanomètres**, soit entre cent et mille fois plus fin.

5 Des micro-piles sous la peau

Pourquoi ces grains de cuivre sont-ils si nuisibles ?

Parce qu'e ces particules de cuivre sont **plus nobles** que l'aluminium qui les entoure. Mettez côte à côte un métal dont le potentiel d'oxydoréduction est élevé (le Cu est de +0,34 V) et un métal à bas potentiel d'oxydoréduction (celui de l'Al est de -1,66 V), ajoutez-y un peu d'eau salée, et vous avez fabriqué une pile.

5 *Effect of surface preparation treatments on copper enrichment on 2024 aluminium alloy surface, ScienceDirect, pii/S0169433221010679. ; Synchrotron X-ray tomography of intermetallic phases in cast Al-Cu alloys http://arXiv 1805.01100.*

6 *Influence of secondary aluminium content on high-pressure die casting (intermétalliques ≤ 30 µm ; Fe → taille et nombre), ScienceDirect, http://pii/S2666330925000822.*

Le cuivre devient la **cathode**, l'aluminium l'**anode** qui se sacrifie.

Sur la cathode, l'oxygène se réduit ; autour, l'aluminium se dissout. Ce n'est pas une hypothèse d'école, c'est le mécanisme décrit pour ces alliages :

> *« Les particules intermétalliques peuvent servir de régions cathodiques couplées galvaniquement au métal de base, et, dans l'aluminium, catalyser la réduction de l'oxygène, entraînant la corrosion périphérique de l'alliage. »*[7]

Sous une peinture, ce film de série B a un nom : la **corrosion filiforme** ; de fins filaments qui cheminent sous le film et le **cloquage**, quand les produits de corrosion, en gonflant, soulèvent la peinture par-dessous.

La littérature est nette : la corrosion filiforme est le mode de défaillance dominant des aluminiums thermolaqués en façade côtière, et sa trajectoire est déterminée par le degré d'activité cathodique des particules intermétalliques au voisinage[8].

Pour faire simple : plus il y a de cuivre en surface, plus la peinture se décolle vite, et sur de plus grandes surfaces et cela n'est pas limité aux arêtes.

C'est un point important à prendre en compte dans ces dossiers sériels d'oxydation : en bord de mer, l'attaque n'est pas cantonnée aux arêtes.

L'embrun couvre **toute la surface** de chlorures ; là où le film est le plus perméable, ils passent et atteignent le métal partout. On observe alors, côte à côte, corrosion filiforme aux amorces et corrosion **de pleine surface**.

6 Le dérochage, on en attend le meilleur mais il est capable du pire …

Avant de laquer, on prépare le métal : on dégraisse, puis on **déroche** (une attaque chimique, alcaline puis souvent acide) pour retirer l'oxyde et offrir une surface propre et exempte d'oxyde.

L'intention est bonne et nécessaire.

Son impact, sur un aluminium chargé en cuivre, peut-être très négatif.

L'aluminium et le cuivre ne réagissent pas à la même vitesse à l'attaque : la consommation d'aluminium est importante alors que celle du Cuivre l'est beaucoup moins… cela conduit à laisser le cuivre affleurer[9].

---

7 *Hydro, Copper's effects on the intergranular corrosion of aluminium alloy 6005, shapesbyhydro.com. ; Copper enriched by dealloying as external cathode in intergranular corrosion of AA6005, Corrosion Science (Elsevier), http://sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X19309291.*

8 *Filiform Corrosion, an overview, ScienceDirect Topics, sciencedirect.com/topics/materials-science/filiform-corrosion. ; Cathodic Delamination, an overview, ScienceDirect Topics, http://sciencedirect.com/topics/engineering/cathodic-delamination.*

9 *Effect of surface preparation treatments on copper enrichment on 2024 aluminium alloy surface, ScienceDirect, pii/S0169433221010679. ; Behaviour of copper during alkaline corrosion of Al-Cu alloys, ScienceDirect, pii/S0010938X08000486.*

> *« L'aluminium et le cuivre réagissent avec la soude à des vitesses différentes, laissant potentiellement des particules intermétalliques au cuivre libres en surface, susceptibles de provoquer une attaque galvanique lors du rinçage suivant. »*[10]

Autrement dit, le dérochage censé nettoyer la surface **enrichit le cuivre en surface** et initie les futures cathodes.

Il est à noter que cet enrichissement croît avec la durée du décapage : les analyses montrent une augmentation des épaisseurs d'aluminium enlevé avec le temps de décapage, et de fait un enrichissement des éléments et impuretés (Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Si) près de l'interface[11].

Ce détail, anodin en apparence, est capital pour tenter d'expliquer les phénomènes d'oxydation des huisserie à proximité immédiate de la mer.

Il faut noter que le dérochage, le traitement de surface et la mise en peinture se font, en usine, sur une **ligne continue**.

Or une ligne continue s'arrête du fait de panne, de réglage, de week-end ou d'incident.

Et un profilé qui reste plus longtemps dans le bain de décapage est un profilé **sur-déroché** : plus de cuivre exposé, plus de cathodes. C'est ici qu'un indice de terrain devient une preuve : si l'on constate que **certaines huisseries, ou certaines zones, sont nettement plus attaquées que d'autres**, alors le matériau n'est pas seul en cause, les **conditions de dérochage** peuvent l'être aussi.

Une attaque homogène accuse le matériau ; une attaque hétérogène, corrélée à des lots ou à des épisodes de production, signe le procédé.

Cartographier cette hétérogénéité est, à mon sens, l'un des gestes d'expertise à prendre en compte.

7 Du chrome hexavalent de l'ordre du µm aux traitement de substitution de quelques dizaines de nm

La suite de ce scenario est relatif au traitement de conversion, cette fine couche déposée avant peinture pour protéger et faire accrocher le laquage.

Pendant des décennies, ce traitement était au chrome hexavalent (CrVI).

Toxique, cancérogène, elle est aujourd'hui bannie à très juste titre juste titre pour la santé. Mais il faut mesurer ce que l'on a perdu au change.

Traitement	Épaisseur typique	Protection « active »
Chromatation CrVI (ancienne référence)	0,25-1 µm (250-1000 nm)	Oui, auto-cicatrisante
Sans chrome : Ti/Zr, Cr(III), bore…	Quelques à quelques dizaines de nm	Non (ou très limitée)

10 *NIST, Surface Engineering of Aluminum and Aluminum Alloys (PDF), http://materialsdata.nist.gov.*

11 *Enrichment factors for copper in aluminium alloys following chemical and electrochemical surface treatments, Corrosion Science, http://pii/S0010938X02002494.*

Le changement de type de traitement de surface a deux impacts :

D'abord l'**épaisseur** : on est passé du micron à la dizaine de nanomètres[12]. Un tel film ne peut, physiquement, pas **recouvrir** une particule de cuivre de dix microns.

Le deuxième effet est relatif à la **protection active de la chromatation**. Le chromate avait une vertu qqui a été perdue avec les produits de substitution : il se **déposait sur les particules de cuivre** et empoisonnait leur activité cathodique. La recherche l'a montré très explicitement : le chrome se fixe sur les intermétalliques au cuivre et entrave la réduction de l'oxygène nécessaire à la progression de la corrosion filiforme[13]. Il n'avait pas besoin de couvrir la cathode car il la **neutralisait chimiquement**.

Les traitements sans chrome hexavalent (Ti/Zr, trivalent, bore…) n'ont pas (ou très peu) cette capacité, et la littérature reconnaît qu'ils sont souvent nettement inférieurs au chromate en protection[14].

On a donc, en même temps, **aminci le couche de traitement et considérablement diminué sa capacité à désarmer le cuivre**.

Sur un aluminium primaire pauvre en cuivre, cela peut passer.

Sur un recyclé riche en cuivre, en bord de mer, c'est une addition qui se paie vite.

8 Du noir au blanc : un autre acteur éclatant… le soleil…

Je rappelle que, dans ces cas qui nous sont exposés, l'huisserie **noire** souffre plus que la **blanche**.

La tentation est très forte d'y voir une histoire d'ultraviolets.

Cette explication ne tient pas pour une raison simple : la dégradation par les UV se compte en **années**, et nous parlons dans ces cas de **six à douze mois**. Ce n'est donc pas l'UV, par ailleurs, le noir de carbone est justement un **excellent absorbeur d'UV** ; on l'ajoute pour **protéger** la résine, et non pas pour la fragiliser[15].

Quelle autres explication ?

12 *Valence Surface Technologies, Chromate Conversion Coating (épaisseur 0,25-1 µm), valencesurfacetech.com. ; Review, Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium (épaisseurs nanométriques), IOPscience, http://doi 10.1149/2.0371803jes.*

13 *Chromate (Cr6+)-free surface treatments for active corrosion protection of aluminum alloys: a review, J. Coat. Technol. Res. (Springer), http://link.springer.com/article/10.1007/s11998-023-00831-1.*

14 *Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys, Corrosion Reviews (De Gruyter), doi 10.1515/corrrev-2019-0032. ; European Coatings, Chromate (Cr6)-free surface treatments for active corrosion protection of aluminum alloys, http://european-coatings.com.*

15 *Beilum, Carbon Black Pigment: the application of UV protection (noir de carbone, absorbeur/stabilisant UV), http://beilum.com.*

La cause la plus solide est **thermique**. Une peinture noire peut monter à environ 50 °C au-dessus de la température de l'air au soleil alors qu'une blanche, réfléchissante, se limite à une dizaine de degrés[16] soit quarante degrés d'écart, dès le premier jour de soleil.

On ajoute que la chaleur **accélère la corrosion** (elle double environ tous les dix degrés), elle multiplie les **cycles thermiques** et de **condensation**, et elle accélère le transport de l'eau (et du sel) sous le film. Ce mécanisme-là agit en mois, pas en années et colle exactement à ce que nous observons.

Ce mécanisme thermique n'est pas une image : il obéit à la loi d'Arrhenius, selon laquelle une vitesse de réaction croît de façon exponentielle, et non proportionnelle, avec la température.

Sur les quarante degrés d'écart entre le noir et le blanc, deux effets se cumulent : la perméabilité du film à l'eau et au sel, régie par une énergie d'activation de l'ordre de 24 à 26 kJ/mol[17], est multipliée par environ trois ; et la cinétique de corrosion, qui double environ tous les dix degrés (coefficient Q10 de l'ordre de 2 à 2,3)[18], est multipliée par 16 et jusqu'à 28 (soit entre 2^4 et $2{,}3^4$).

À cela s'ajoute un seuil décisif : la température de transition vitreuse (Tg) du laquage polyester, généralement comprise entre 55 et 70 °C[19].

En dessous, le film fait barrière ; au-dessus, il devient caoutchouteux et sa perméabilité augmente brutalement.

Un profilé blanc, à environ 45 °C, reste sous sa Tg alors qu'un profilé noir, à environ 85 °C, la dépasse.

La même chaleur accélère enfin l'hydrolyse du polyester (la rupture de ses liaisons ester en présence d'eau), d'autant plus vive que le milieu est chaud, humide et salin.

Ces valeurs sont des ordres de grandeur issus de la littérature ; pour un dossier donné, la Tg réelle du laquage se mesure par calorimétrie différentielle à balayage (DSC), et la température de surface se relève in situ, noir contre blanc, au plus fort de l'ensoleillement.

L'hypothèse d'une **meilleure conductivité** des peintures noires (riches en noir de carbone) a pu être pris en compte en première analyse : au-dessus d'un certain seuil, le noir de carbone rend effectivement le film conducteur[20], ce qui peut entretenir les réactions cathodiques. Il s'agit ici d'un **facteur contributif possible**, largement derrière le thermique.

---

16 *Cool coatings with high near-infrared transmittance for coil-coated aluminium (noir ≈ +50 °C vs blanc ≈ +10 °C), Solar Energy Materials (ScienceDirect), http://pii/S0927024819301400.*

17 *Ordres de grandeur des énergies d'activation de la diffusion de l'eau dans les polymères : PNNL, Water Vapor Permeation in Plastics (rapport PNNL-26070) ; ScienceDirect, Diffusion and permeation of vapors in composite polymer thin films.*

18 *Effet de la température sur la vitesse de corrosion (Q10 ≈ 2 à 2,3) : ScienceDirect, The effect of temperature on the corrosion rate of iron-carbon alloys. Sur l'aluminium, baisse du potentiel de piqûre avec la température : ScienceDirect, Temperature dependence of the pitting potential of high purity aluminium in chloride solutions.*

19 *Température de transition vitreuse des laquages polyester (≈ 55 à 70 °C) : Products Finishing, How to Control Powder's Glass Transition Temperature ; ScienceDirect, Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using DSC and DMTA.*

20 *Electrical conductivity of carbon black pigments, ScienceDirect, http://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014372081200068X.*

En réalité, cette hypothèse peut être écartée : pour rendre le film réellement conducteur, il faudrait de l'ordre de quatre fois plus de noir de carbone qu'il n'en faut pour obtenir la teinte.

Un noir de type RAL 9005 ne demande que 3 à 5 % de noir de carbone en masse, quand le seuil de percolation qui rend un film conducteur se situe bien plus haut, de l'ordre de 13 à 25 %[21].

À ce taux de coloration, le laquage est optiquement noir mais presque certainement isolant ; seule une mesure de résistivité de surface pourrait, le cas échéant, nous donner la validation de d'exclusion de cette hypothèse.

Le même raisonnement écarte l'idée qu'un pigment « laisserait passer l'eau » : à 3 à 5 %, on demeure très loin de la concentration pigmentaire volumique critique (CPVC), et c'est au contraire le blanc, chargé de 15 à 25 % de dioxyde de titane, qui est la teinte la plus pigmentée.

Pour ce qui est de l'UV, il reste un **aggravant de long terme** qui, en rendant peu à peu tous les films plus perméables, laisse présager que d'autres teintes révéleront également le problème d'oxydation du support mais plus tard. **A vouloir trouver un bouc émissaire dans la peinture, on met sous le tapis un risque important d'oxydation des huisseries non noires ; il serait judicieux de prévoir ces dérives avant de les subir ; les constructeurs automobiles l'ont compris alors que la durée de vie d'une voiture est en moyenne de 12 ans à comparer aux 50 ans escomptés pour des huisserie métalliques.**

9 Qualimarine : quand la profession connait l'histoire …

S'il ne fallait garder qu'une pièce, ce serait celle-là. Il existe, pour l'aluminium thermolaqué de bord de mer, un label dédié : **Qualimarine**.

Sa seule existence est un aveu. Il a été créé en 1996 par la profession pour enrayer un **fort taux de sinistres en zone côtière** qui déstabilisait le marché de la menuiserie aluminium[22]. Autrement dit : le problème est **bien connu, ancien et systémique**.

Surtout, regardez ce que Qualimarine **exige de plus** que le label courant. Deux choses, et deux choses seulement :

- un **prétraitement renforcé** : une double attaque chimique des profilés, **alcaline puis acide** (c'est-à-dire une maîtrise du dérochage, traité dans le § 6) ;
- une **composition d'alliage imposée** : obligatoirement un **6060 ou 6063**, alliages d'extrusion à bas cuivre (traité dans les § 3 et § 4).

Et le contrôle inclut des **essais de corrosion filiforme**[23].

L**a norme de référence de la profession affirme elle-même que la durabilité en bord de mer se joue sur la composition de l'alliage et sur le prétraitement de surface et pas sur la seule peinture**.

21 *Seuil de percolation électrique du noir de carbone : Nature, Scientific Reports (2019), Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix (13,5-14 % en masse dans le polycarbonate, ≈ 20 % dans le polyéthylène) ; MDPI, Journal of Composites Science (2021).*

22 *20 ans de Qualimarine, origine 1996, sinistres côtiers, http://qualimarine.fr.*

23 *Qualimarine, la référence de l'aluminium thermolaqué (exigences), http://qualimarine.fr.*

Si les profilés litigieux n'étaient pas conformes (alliage hors 6060/6063, cuivre trop élevé, dérochage insuffisant ou mal maîtrisé), la cause racine est là. On ne peut pas, d'un même coup (ou coût ?), écrire une norme qui encadre le métal et le procédé… et considérer ensuite que seule la peinture est en cause.

Compte tenu des difficultés rencontrées en zones maritimes, l'ADAL a décidé de passer de 1000 heures de BS à 1440 heures pour Qualimarine mais sans changer la température du test à 35°C. La dégradation dues aux hautes températures atteintes du fait de la chaleur mais surtout de l'absence de réflectivité des peintures sombres n'est nullement pris en compte. Il serait utile de mener des essais de BS en utilisant une température équivalente à celle atteinte par les huisserie sombre en période de forte chaleur et fort ensoleillement (60°C par exemple).

10 Le brouillard salin, ou l'illusion de la garantie

Le dernier argument est que « nos produits passent tant d'heures au brouillard salin ».

La norme est limpide sur cet aspect : l'essai au brouillard salin neutre (ASTM B117 / ISO 9227) est un outil de **comparaison en contrôle qualité**, pas un prédicteur de durée de vie.

Le texte normatif l'admet :

> *« La corrélation et l'extrapolation des performances de corrosion à partir de cet essai ne sont pas toujours prévisibles. »*[24]

Et, plus directement encore, la littérature technique le formule ainsi : **obtenir davantage d'heures de brouillard salin ne signifie pas qu'un revêtement durera plus longtemps en service**[25].

Le brouillard salin continu ne reproduit ni les cycles humide/sec, **ni le soleil**, ni la variation des chlorures ; il crée des mécanismes différents du réel, sur-testant les uns, sous-testant les autres.

Pour le milieu marin, ce sont les essais **cycliques** (ISO 11997, ISO 12944-9) qui corrèlent correctement[26].

Par ailleurs, ces essais se font sur des **éprouvettes standardisées**, le plus souvent en aluminium **primaire**, à surface idéale, sans les arêtes ni le laquage « tel que posé », et surtout sans le cuivre du recyclé.

Une éprouvette qui n'a ni la même composition, ni le même état de surface que le profilé réellement installé **ne teste pas le bon objet**.

Augmenter la garantie sur une telle éprouvette, c'est renforcer une garantie qui n'est pas celle relative aux défauts que l'on rencontre. **Le nombre d'heures peut alors croître indéfiniment : il ne dira jamais rien de l'huisserie posée face à la mer**.

---

24 *Sherwin-Williams, The Limitations of ASTM B117 Salt Spray (Fog) Testing, http://industrial.sherwin-williams.com.*

25 *Sherwin-Williams, The Limitations of ASTM B117 Salt Spray (Fog) Testing, industrial.sherwin-williams.com. ; Heresite, ASTM B117 does not correlate to real-world environments, http://heresite.com.*

26 *Testronix, Salt Spray Test vs Cyclic Corrosion Test (ISO 12944-9, ISO 11997), http://testronixinstruments.com.*

Pour mémoire, ces tests se font à une température normalisée de **35°C largement sous estimée dans le cas de périodes chaudes et ensoleillées sur des huisserie sombres**.

11 Et si c'était vraiment la peinture ?

Et si la peinture était réellement, à elle seule, en cause ?

Un laquage peut mal tenir à cause d'une mauvaise réticulation, d'une sous-cuisson, d'une contamination du support, mais aussi d'une épaisseur insuffisante.

Ces défauts existent, et il faut les écarter bien sur les prendre en compte avant de conclure.

Cependant, trois faits très clairs résistent à cette explication.

- **Le calendrier.** Un défaut de peinture se paie surtout dans la durée, perte de brillant, farinage, microfissures après des années. Une oxydation du métal en six à douze mois trahit un moteur électrochimique actif dès le premier jour, pas une peinture qui « vieillit mal ».
- **La géographie.** Si la peinture était en cause, pourquoi l'attaque se concentrerait-elle au plus près de la mer ? Une mauvaise peinture est mauvaise partout. Une corrosion qui suit la charge en chlorures désigne le milieu et le métal, pas le film.
- **La norme.** Qualimarine, écrit par la profession elle-même, ne réclame pas une peinture différente pour le bord de mer, elle s'est contenté récemment d'augmenter la durée du BS de 1000 à 1440 heures sans changer les conditions auxquelles sont menées les tests (en particulier la température) : elle impose par contre un alliage 6060/6063 et un prétraitement renforcé.

La peinture n'est donc pas hors de cause par principe, elle l'est par les faits. Et rien n'interdit qu'elle ait, en plus, ses propres faiblesses ; mais celles-ci s'ajouteraient au mal sans en être l'origine.

A confondre le dernier maillon visible avec une cause première, on ne fait que soigner la fièvre tout en ignorant l'infection … et on sait comment cela finit.

12 Quels devraient être la démarche expertale optimale ?

Il s'agit en fait de faire la part des choses entre le matériau et le procédé ? Si j'avais été missionné par un juge pour ces litiges sériels, je proposerais la démarche suivante :

- **cartographier l'attaque** : relever précisément où la corrosion est forte, faible ou absente, huisserie par huisserie, zone par zone ;
- **croiser avec la production** : ces zones correspondent-elles à des lots, des bains, des épisodes d'arrêt de ligne ? Une hétérogénéité corrélée accuse le **procédé** (les fabriquants s'y refusent car ces arrêts ne sont pas affectables à telle ou telle autre production ;
- **caractériser le métal** : composition réelle des profilés (teneurs en Cu et Fe), conformité 6060/6063, présence et taille des intermétalliques au microscope ;

- **analyser l'interface** : enrichissement en cuivre sous l'oxyde, épaisseur et nature du traitement de conversion, morphologie des cloques et filaments ;
- **mesurer sur site** : température de surface noir versus blanc au soleil, résistivité du laquage, charge saline ambiante.

Pour ce faire, je réclamerais notamment :

- **les certificats matière** des profilés réellement posés, avec les teneurs **mesurées** en cuivre et en fer, et non les seules valeurs nominales de la norme ;
- **les paramètres et les journaux de la ligne** de traitement, composition et température des bains de dérochage, temps d'immersion, et surtout la traçabilité des **arrêts de ligne** ;
- **les fiches du système de finition** soit nature et épaisseur du traitement de conversion, référence et classe de durabilité du laquage ;
- **les procès-verbaux d'essais** (Qualicoat / Qualimarine, brouillard salin, corrosion filiforme), en vérifiant, à chaque fois, **sur quelles éprouvettes** ils ont été obtenus (aluminium primaire ou aluminium issu de la filière recyclage avec quelle analyse matériaux réelle).
- **conduire un plan d'expérience du type Taguchi,** en analysant les quatre paramètres suivant : couleur (blanc/noir), température de test (35°C/60°C), support (Al primaire/Al à fort taux de Fe et de Cu), dérochage (faible/fort). Les résultats sont la durée de BS à partir de laquelle on constate des premiers défauts.

C'est seulement après analyse de ces relevés et de ce plan d'expérience que pourra se faire une conviction argumentée, chiffrée, opposable et non une opinion de principe.

C'est en fait la différence entre deux expressions « la peinture n'a pas tenu » et « voici pourquoi elle ne pouvait pas tenir ».

13 Ce que je souhaite mettre en avant à l'issue de cette note …

Trois piliers, qui convergent.

- Le **matériau** : un aluminium recyclé chargé en cuivre (et en fer) que l'on ne sait pas purifier, semant des cathodes microscopiques.
- Le **procédé** : un dérochage qui expose ce cuivre, des arrêts de ligne qui l'aggravent, et des traitements de surface devenus trop minces et privés du pouvoir neutralisant du chromate.
- Le **milieu** : la mer, ses chlorures, et le soleil qui chauffe deux fois plus le noir que le blanc.

Un mot, enfin, sur les huisseries noires, qui sont les premières touchées.

Ce n'est pas la couleur en elle-même qui les incrimine : on vient de voir que la piste de la conductivité doit être écartée, faute d'un taux de noir de carbone suffisant.

Si le noir souffre davantage, c'est d'abord parce que sa peinture est plus chaude (ce qui vaut pour tous les noirs), et surtout parce que, sous cette chaleur, un aluminium déjà fragilisé se corrode plus vite.

On retombe alors exactement sur les trois mêmes piliers : le métal (le cuivre et le fer), le dérochage qui expose ce cuivre, et l'extrême finesse du traitement de surface.

La couleur ne fait que révéler, plus tôt, une sensibilité qui vient du métal et du procédé.

Au bout de cette chaîne, la peinture se soulève, non parce qu'elle serait, en soi, de mauvaise qualité, mais parce qu'on lui a demandé de tenir sur un support défaillant, dans un environnement qui l'agresse, avec une sous-couche qui ne la protège plus depuis l'abandon nécessaire des traitement au chrome hexavalent.

La peinture est très probablement la **victime visible** de cette affaire.

Le meilleur témoin de tout cela reste ce que la profession a elle-même écrit noir sur blanc dans Qualimarine, et ce que les normes d'essai avouent sur leurs propres limites : en bord de mer, la durabilité d'un aluminium laqué se décide bien avant la peinture dans le métal, et dans le dérochage et le traitement de surface. Le passage récent de 1000 heures à 1440 heures de BS n'est qu'un pis-aller qui ne fait que cacher les causes profondes des défauts.