

LA CORROSION GALVANIQUE DES BATEAUX ¹

Jack Honey
Marine Technology, Inc.
(800) 772-0796
27 March 1996

<http://mtifilters.com/mtifilters/MARCC.html>

Deux métaux différents plongés dans de l'eau de mer et électriquement reliés entre eux forment une cellule galvanique (une pile) et un courant électrique apparaît. Ce processus met en jeu la corrosion galvanique de l'un des deux métaux, ce qui est franchement mauvais si le métal qui se corrode est celui de votre hélice.

Les parties métalliques sous-marines d'un bateau peuvent être protégées contre la corrosion galvanique simplement : 1) en fixant une ou plusieurs plaque de zinc – les anodes de protection - sur l'extérieur de la coque ; 2) en les reliant galvaniquement aux pièces métalliques sous-marines ; 3) en surveillant le fonctionnement de ces anodes et en les remplaçant lorsqu'elles sont usées.

Dans ce document nous discuterons du fonctionnement d'un système de protection par anodes de zinc, de son installation et de sa surveillance.

Comment les anodes de zincs protègent-elles les pièces sous-marines d'un bateau ?

Dans un bateau correctement protégé, une interconnexion ² existe qui réalise la bonne liaison électrique entre les anodes de protection et l'ensemble des pièces métalliques sous-marines, y compris les hélices, leur arbre, les safrans métalliques, leur arbre et étambot, et les passes-coque ou autres pièces traversant la coque. À l'intérieur du bateau cette interconnexion relie les moteurs, les balais d'arbre, les réservoirs, les prises d'eau de mer, les pompes d'eau de mer, les pompes de cale, ... Cette interconnexion doit être reliée en seul point au pôle négatif du circuit de courant continu du bateau et également en un seul point avec la terre de protection (par opposition au neutre) du circuit de courant alternatif, généralement là où ils sont reliés aux moteurs. Cette interconnexion des terres ne doit en aucun cas être amené à conduire du courant en provenance du circuit continu ou alternatif.

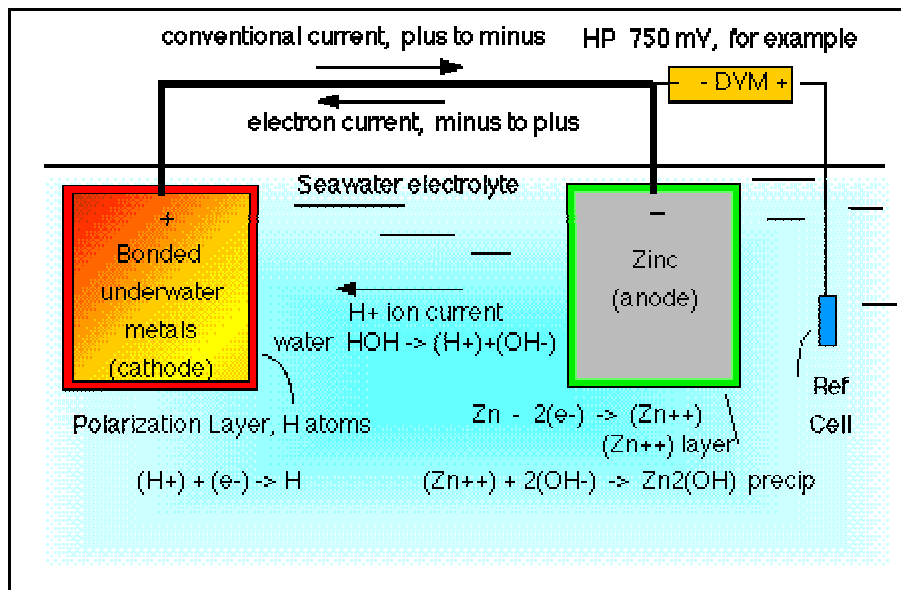
Cet ensemble constitué des anodes en zinc, de l'électrolyte qu'est l'eau de mer et des pièces métalliques sous-marines interconnectées constitue une cellule galvanique (et un couple galvanique), comparable à la pile d'une lampe de poche dans laquelle le zinc –l'anode - et la tige de graphite –la cathode - sont plongés dans un électrolyte. Dans cette pile un courant circule du plot positif à travers l'ampoule vers l'enveloppe métallique négative d'où il passe à travers l'électrolyte vers le pôle central en graphite, refermant ainsi le circuit. Les électrons circulent en sens inverse.

En connectant les anodes de zinc au circuit d'interconnexion du bateau vous mettez en court-circuit la cellule galvanique et permettez ainsi la circulation d'un maximum de courant (courant de court-circuit) des anodes en zinc vers les pièces métalliques sous-marines. C'est ce courant sous-marin là, du zinc vers les pièces métalliques, qui permet de réaliser cette protection contre la corrosion galvanique, ce qui est votre but.

¹ Traduction de yves@devill.net, relu par ... Toutes les notes de bas de page ont été ajoutées à la traduction.

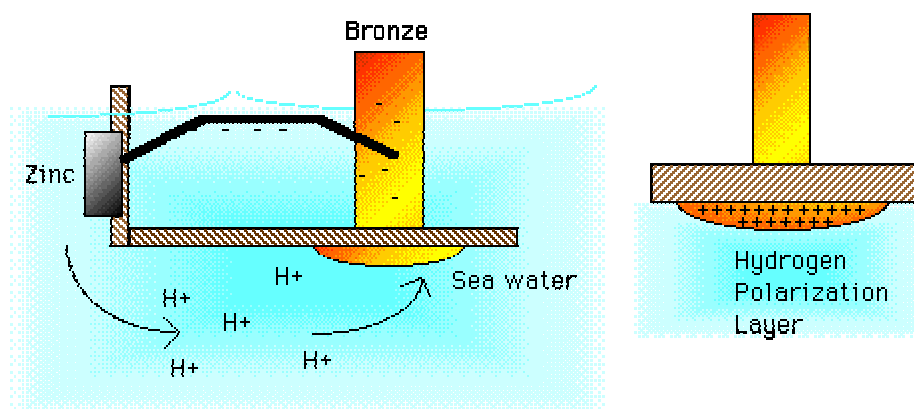
² *ground bonding system*

Un dessin aidera à la compréhension du texte :



HP (Hull Potential)	Potential galvanique de la coque
DVM	Voltmètre numérique
Seawater électrolyte	Eau de mer constituant l'électrolyte
Bonded underwater metals	Pièces métalliques sous-marines interconnectées
H+ ion current water	Courant électrique dans l'eau
Zinc (anode)	Anode de protection en zinc
Ref cell	Électrode référence en argent/chlorure d'argent
Polarization layer	Couche polarisée (en rouge)
(Zn ⁺⁺) layer	Couche de cations Zinc (en vert)
Zn ₂ (OH) precip	Précipitat d'hydroxyde de zinc

Le flux d'ions d'hydrogène (H⁺) se déplaçant dans l'eau de mer constitue le courant électrique. Lorsqu'ils atteignent la cathode ils capturent un électron au métal et se déposent à sa surface –comme dans un placage par électrolyse - sous forme d'une couche infiniment mince d'hydrogène monoatomique qui recouvre la pièce métallique immergée. Cette couche, le courant qui la traverse et la disponibilité permanente d'autres électrons empêchent la transformation du métal en ions positifs, ions qui seraient alors arrachés du métal. La **protection contre la corrosion** recherchée est ainsi obtenue.

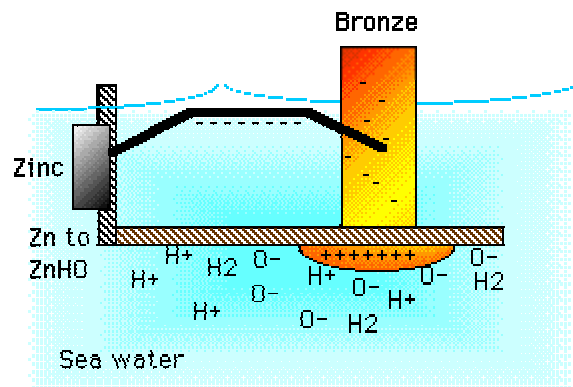


Au fur et à mesure que cette couche d'hydrogène se construit, la différence de potentiel à travers la couche augmente jusqu'à atteindre la valeur de la tension de court-circuit de la cellule galvanique et le courant anodique diminue, on dit alors que la cellule est **polarisée** ; la couche d'hydrogène est la **couche de polarisation**, et la différence de potentiel³ à travers cette couche (de la surface métallique vers l'eau de mer) est le **potentiel**

³ NDT : C'est à dire la tension mesurable entre l'eau et le système d'interconnexion des terres.

galvanique de la coque ⁴. La valeur de cette différence de potentiel entre les pièces métalliques interconnectées et l'eau de mer à proximité du bateau est une excellente indication du fonctionnement de ce système de protection ⁵, cette valeur peut facilement être mesurée avec un voltmètre numérique sensible et une sonde spéciale.

Cette même différence de potentiel, qui apparaît au niveau de la couche infiniment mince d'hydrogène déposée sur le métal à protéger, se retrouve sur une couche, elle aussi mince, à la surface de l'anode en zinc. Cette dernière couche est formée d'ion Zinc (cations zinc, Zn^{2+}) dissous de la surface de zinc, à raison d'un ion zinc pour deux électrons transportés de l'anode vers la cathode à travers le système d'interconnexion. Les ions zinc ne se déplacent pas très loin car ils sont trop lourds et aussi parce qu'ils se combinent avec les ions hydroxydes (OH^-) de l'eau pour former l'hydroxyde de zinc, cette bouillie insoluble blanchâtre ⁶ qu'on observe à la surface des anodes.



La couche polarisée déposée sur le métal protégé ne reste pas en place une fois formée : l'écoulement de l'eau tend à l'enlever, les impuretés à la dégrader, l'oxygène dissous à la convertir en eau et enfin les atomes d'hydrogène s'apparient spontanément pour être évacués sous forme de bulles d'hydrogène gazeux (H_2), d'où la nécessité d'un courant anodique ⁷ permanent pour entretenir la couche. Ceci peut conduire à la consommation, typique et pas du tout surprenante, d'une livre de zinc pour un courant d'un quart d'ampère pendant deux mois

Il faut bien comprendre qu'une consommation importante est normale et nécessaire, elle met en évidence que les anodes remplissent bien leur rôle. Si vos anodes durent six mois ou plus sans diminution significative, il n'y a pas de quoi s'en vanter, c'est qu'elles ne contribuent pas vraiment à leur tâche de protection.

Vérification du bon fonctionnement des anodes

L'efficacité d'une installation de protection contre la corrosion peut être vérifiée en mesurant périodiquement le potentiel galvanique de la coque. Il est généralement suffisant d'inspecter visuellement les anodes et les hélices à chaque carénage – disons tous les mois ou deux – mais ça ne permet pas de voir si les anodes sont inefficaces ... jusqu'à ce qu'il soit trop tard. La plupart des marins ne voient pas l'intérêt d'en faire plus et la plupart des personnes effectuant l'entretien des coques ne savent pas faire une mesure du potentiel de la coque.

Certaines qualités de zinc contiennent des impuretés, souvent du fer, qui perturbent le fonctionnement normal des anodes. Un revêtement gris très dur se forme à la surface, qui ressemble à du zinc normal mais qui bloque complètement le courant anodique. Ce revêtement peut s'enlever avec un grattoir acéré, pas facile à faire sous l'eau, de plus ce revêtement commence à réapparaître dès que vous avez fini.

⁴ *hull potential* dans le texte d'origine, la même expression est utilisée pour d'autres pièces que la coque

⁵ *zinc protection system*, littéralement système de protection par anode en zinc

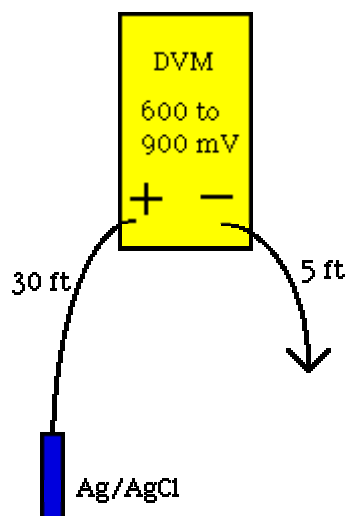
⁶ *whitish mushy material*.

⁷ *flow of zinc current*

Il y a des années, la marine américaine a édicté la spécification Mil-A-18001 précisant le taux maximum d'impuretés admissible dans les anodes qu'elle utilise, un certain nombre de fournisseurs pour la navigation de plaisance ont alors annoncé la conformité de leurs anodes à cette spécification, d'autres pas : il fallait le demander ! Et encore plus amusant, un des principaux fournisseurs vantait ses anodes non conformes à Mil-A-18001 comme plus nettement plus durables que celle qui étaient conformes ... ce qui était bien sur vrai !

Mesure du potentiel galvanique de la coque

Pour la protection de la corrosion, la seule chose qui compte est le potentiel galvanique de la coque, lequel est aisément mesurable grâce à un voltmètre numérique doté d'une électrode de référence en argent / chlorure d'argent (Ag / AgCl) au bout d'une dizaine de mètres de fil conducteur. Les mesures sont faites dans la plage 0 - 1,999 Volts CC avec une résolution de 1 mV et une précision de 1 %. Une paire de cordons de mesure d'environ 1,5 mètre de long et terminés par une pointe acérée permettra un contact électrique de bonne qualité avec les différents éléments du système d'interconnexion.



Le voltmètre est mis sur l'échelle "2 Volt courant continu", l'électrode de référence est reliée d'une part au pôle positif du voltmètre et d'autre part est immergée le long de la coque à 30 cm au moins des pièces métalliques sous-marines⁸. La pointe du cordon de mesure, relié au moins du voltmètre, est mise en contact avec le point commun du système d'interconnexions des masses⁹. On mesure ainsi le potentiel galvanique de la coque, lequel doit être compris entre 600 en 900 mV, 300 mV étant la marque d'une protection insuffisante et 500 mV celle d'une protection limite.

Il est bon de mentionner que le potentiel galvanique de la coque et le courant anodique varient lorsqu'on utilise le bateau, la force du courant d'eau, la hauteur de la marée dans un port, la salinité, la température, l'état des anodes, etc., et qu'il est difficile de trouver le potentiel de coque idéal. Si vous avez une raison de penser que ce potentiel est constamment trop élevé, vous pouvez le réduire en interposant une résistance ajustable, par exemple jusqu'à 0,5 ohms, entre l'anode et le circuit d'interconnexion des masses. Le potentiel se stabilisera au bout de l'ordre d'une journée. Un potentiel d'environ 700 mV protégera de la corrosion tout en évitant de cuire les bois¹⁰. Tout est affaire de compromis !

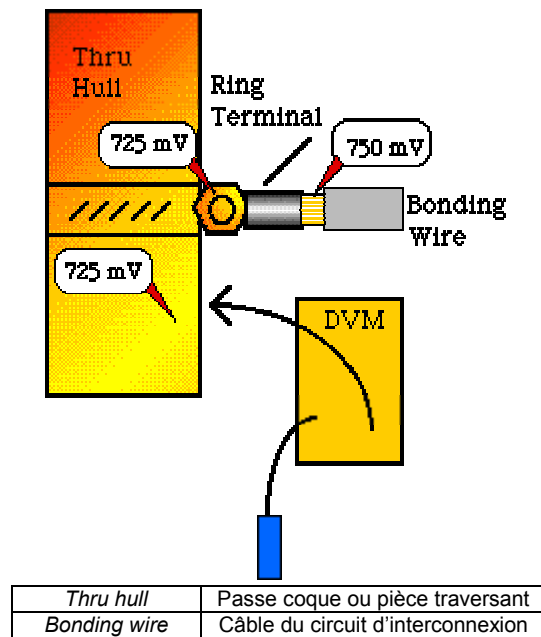
⁸ Prière aux chimistes de valider les deux assertions suivantes :

- Un fonctionnement permanent du système de mesure du potentiel peut entraîner, par corrosion électrochimique, une consommation plus rapide des anodes en zinc dans la mesure ou l'argent est très sensiblement plus électro-positif que le zinc.
- Si le système est coupé mais que l'électrode reste trempée dans l'eau de mer, elle subira une usure par corrosion chimique (encore qu'une gourmette en argent à pu être attribué à Saint Exupéry, donc être restée près de 50 ans dans l'eau de mer sans être gravement endommagée).

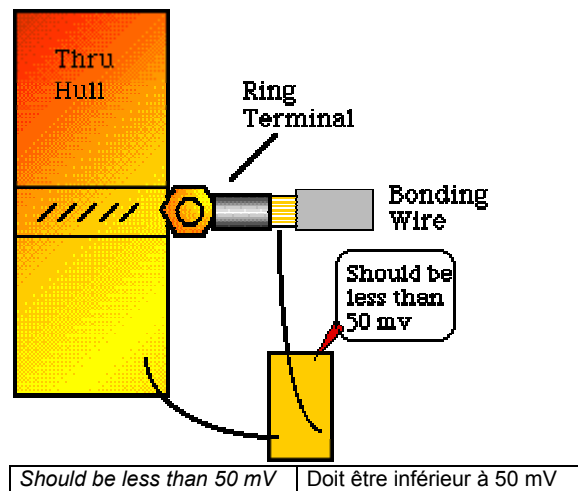
⁹ NDT : là où ce système est relié à l'anode

¹⁰ will assure corrosion control yet minimize wood burning

Le potentiel galvanique de chaque passe-coque ¹¹ peut être mesuré de cette manière. Ceux qui sont interconnectés devraient être au même potentiel. Si un d'eux apparaît, lors de la mesure, à un potentiel sensiblement plus bas c'est qu'il est mal raccordé au système d'interconnexion. Il faudra démonter, nettoyer puis mesurer à nouveau cette connexion.



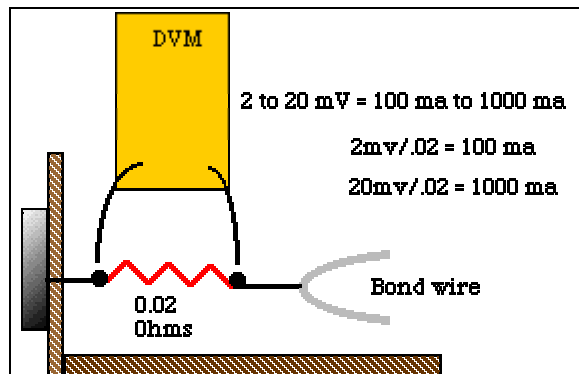
Le voltmètre numérique, utilisé avec deux cordons de mesure et donc sans son électrode de référence, permet de mettre en évidence d'éventuelles différences de potentiel entre des points du système d'interconnexion, en commençant à partir de l'anode, et d'identifier ainsi les connexions de mauvaise qualité.



¹¹ The HP of all through-hull fittings can be measured, l'auteur utilise Hull potential pour une pièce autre que la coque.

Mesure du courant anodique

Le voltmètre numérique peut servir à mesurer directement le courant anodique. On interposera une résistance de type shunt (0,02 ohm, précision de 1% et de 5 watts, juste au cas où !) entre l'anode et le câble du circuit d'interconnexion des masses et on mesurera, sur l'échelle des millivolts, la chute de tension aux bornes du shunt. Le courant anodique est égal à la tension mesurée divisée par la résistance du shunt. Un courant anodique est typiquement dans la plage de 150 à 500 mA mais des valeurs plus élevées peuvent être rencontrées. Grosso-modo, 29^{er} de fil multibrins AWG #16¹² ont une résistance de 0,01 ohm et constituent une bonne approximation d'un shunt de précision.



Un faible courant anodique combiné à une valeur élevée du potentiel galvanique de la coque, disons 800 mV, est la marque d'un système de protection bien en place, stabilisé (au sens où la couche de polarisation de la cathode est complètement formée). Une faible valeur du courant anodique et du potentiel galvanique est la marque d'un système d'interconnexion en mauvais état ou d'anodes hors course. Un fort courant anodique en même temps qu'un faible valeur du potentiel galvanique peut se produire lorsque l'anode est reconnectée après un certain temps¹³. Ainsi la valeur mesurée du courant anodique et du potentiel galvanique fournissent de bons indices pour identifier des problèmes ou au contraire un système en bon état mais, au bout du compte, la mesure du potentiel galvanique, à lui tout seul, permet de s'assurer d'une bonne protection contre la corrosion.

Pendant que nous sommes sur ce sujet, il me revient qu'une fois ou les anodes ne fonctionnaient pas, au moins en apparence, le vendeur me les remplaça obligamment sans que ça marche mieux. Je connaissais la recommandation consistant à nettoyer le filet des boulons de fixation lors de l'installation de nouvelles anodes mais je ne pouvais envisager que les quatre boulons puissent être dans cet état. Une mesure sur les anodes mit en évidence que ces dernières étaient complètement isolées de leurs boulons par d'une couche très dure d'un hydroxyde blanc. La solution : nettoyer soigneusement les filets et utiliser une graisse étanche bien pâteuse pour tenir la jonction à l'abri de l'eau de mer¹⁴.

Les arbres, hélices et safrans sont difficiles à surveiller s'ils sont équipés d'anodes directement sur l'arbre et le safran. On peut estimer le bon fonctionnement en mesurant la différence de potentiel entre l'arbre et le point central du circuit d'interconnexion, de même pour le safran (mèche ou étambot). Si cette différence est faible il y a des chances que la protection soit effective.

Même si les hélices et safrans sont protégés individuellement, ils peuvent bénéficier d'une protection complémentaire¹⁵ en reliant l'arbre d'hélice au moteur ou la mèche du safran au tube étambot, et il est bon d'en mesurer la différence de potentiel relative au point central du système d'interconnexion.

¹² 73,6 cm de fil multibrins de 1,29 mm de diamètre et donc de 1,31 mm² de section. AWG = American Wire Gauge.

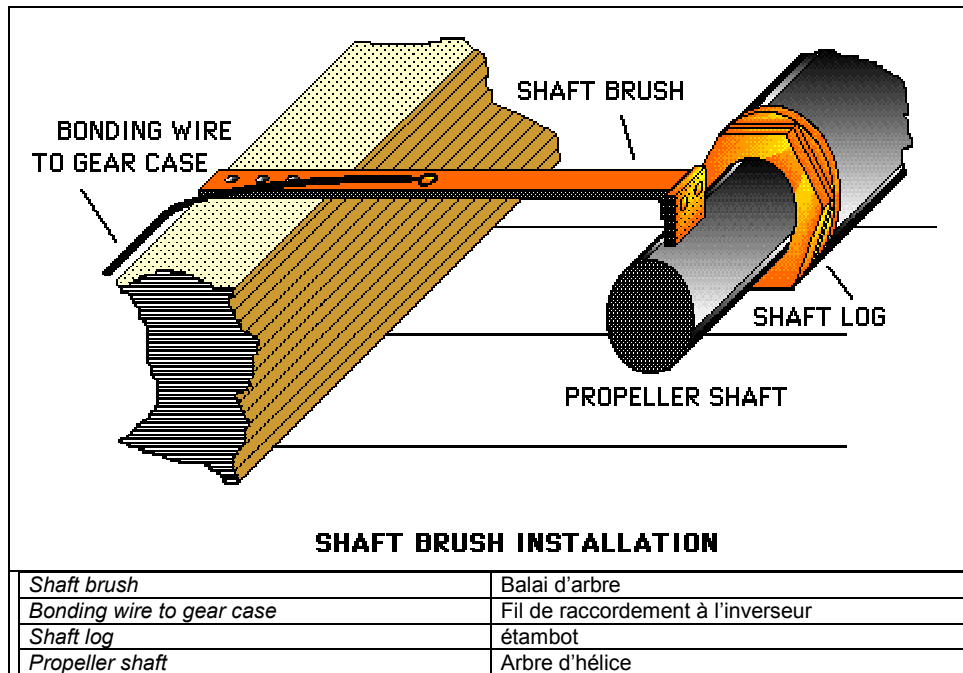
¹³ Après remise à l'eau du bateau ou installation de l'anode à suspendre.

¹⁴ Ici une remarque incompréhensible : *And don't let the HP tests go too long*, note d'humour, suggestion que le test du potentiel galvanique conduit à la formation de cet hydroxyde de zinc ou qu'il est inutile de passer trop de temps sur ce test ?

¹⁵ [NDT : Ceci va à l'encontre de l'article de *Metal Boat Quarterly* qui recommande de protéger chaque pièce séparément par sa propre anode, et ce pour éviter les boucles de courants; même s'il n'indique pas comment s'assurer que chaque protection est individuellement correcte]

Balais d'arbre

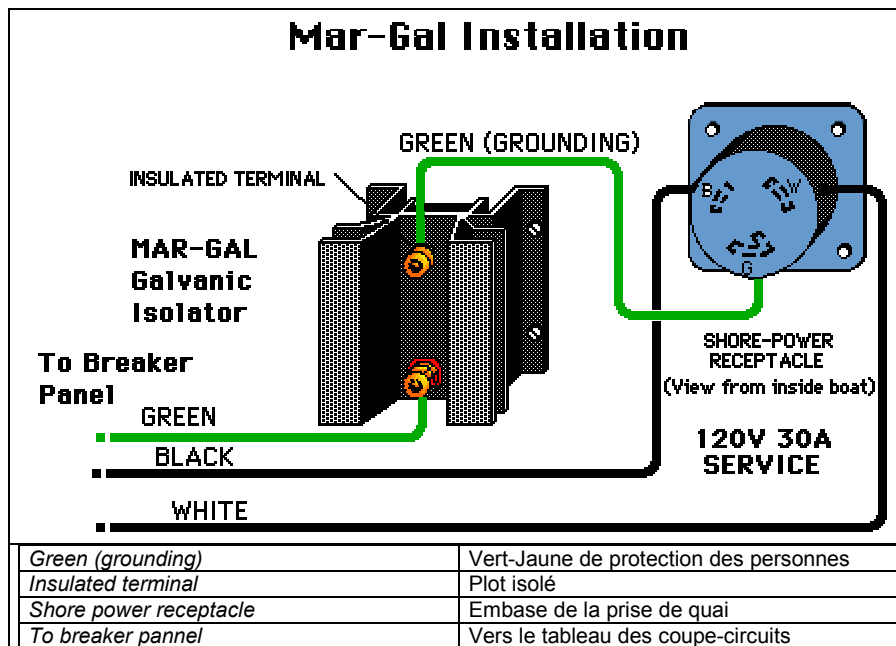
La continuité électrique entre l'arbre d'hélice et le moteur est souvent de mauvaise qualité ou carrément rompue, à cause du film d'huile –isolant- qui existe dans les roulements ou les engrenages. Ce problème, courant, peut avoir deux effets : d'une part la continuité peut être rompue pendant que le bateau est inutilisé, interrompant en même temps la protection anodique, d'autre part l'interruption rapide et répétée du courant anodique au niveau de l'arbre peut créer de sérieuses perturbations radio-électriques, gênantes pour le Loran et les radios du bord. Un balai d'arbre, de bonne qualité et bien entretenu, est la solution à ce problème.



Terre de prise de quai

La terre du port est reliée, par le fil vert (vert jaune en France) de la prise de quai, au point central de mise à la terre ¹⁶. Les anodes du bateau sont ainsi sollicitées pour mettre à la terre le reste du contient nord-américain, sans compter les bateaux alentour (alentours ?). La résistance du réseau de terre, au port, constitué typiquement de quelques centaines de mètre d'un câble AWG #10 ¹⁷, est sensiblement plus élevée que la mise à la mer du bateau lui-même et le courant anodique additionnel qu'il entraîne n'est pas vraiment utile et réduit le potentiel galvanique de la coque. L'installation d'un isolateur galvanique sur ce fil de terre entre l'embase de prise de quai et le point central de mise à la terre du bord empêche la circulation des courants continus de très basse tension tout en maintenant une protection contre les fuites de courant alternatif pour les personnes à bord ou sur le quai ¹⁸.

Marine Technology Inc. fabrique les isolateurs galvaniques Mar-GAL/30 et Mar-GAL/50 pour des courants de 30 et 50 A. L'isolateur Mar-GAL/2 est, lui, conçu pour des bateaux dont l'ensemble des circuits et équipements est protégé par un disjoncteur différentiel ¹⁹.



¹⁶ (NDT : *central grounding point*, où le circuit d'interconnexion est relié au moteur, au pôle négatif, aux anodes, ...)

¹⁷ Environ 5 mm² de section

¹⁸ NDT : pour une boîte qui vend des isolateurs galvaniques, l'explication qui précède est remarquable d'obscurité et d'inintérêt ; ceci expliquant cela ?]

¹⁹ *GFCI, Ground Fault Circuit Interruptor*.

Système de protection par courants imposés ²⁰

Les systèmes de contrôle de la corrosion par courant imposé sont utilisés depuis de nombreuses années par les compagnies d'électricité pour protéger leurs installations et à bord des grands navires. Dans de telles applications, où les économies de courant ne sont pas primordiales, les systèmes à base d'anode en zinc apparaissent non économiques.

Depuis quelques temps déjà Marine Technology a dans ses cartons un système, de prix modique, de protection par courants imposés pour le contrôle de la corrosion galvanique des bateaux de plaisance. Dans ce systèmes les anodes de zinc sont remplacées par des anodes permanentes en carbone, le courant anodique est fournie par un convertisseur DC-DC alimenté par la batterie du bord et est contrôlé par une électrode de référence de manière à maintenir constant le potentiel galvanique de la coque. L'intensité moyenne fournie par la batterie est inférieure à 100 mA, valeur comparable au courant de décharge de la plupart des batteries marines.

Cette famille comportent les membre suivant :

1. Une électrode référence Ag/AgCl au bout d'un cordon, pour une utilisation manuelle.
2. Une électrode référence Ag/AgCl, pour être installée en permanence.
3. Un voltmètre numérique équipé de cordons de test pour une utilisation manuelle.
4. Un voltmètre numérique, conçu pour être installé en permanence, permettant de mesurer le potentiel galvanique et le courant anodique.
5. Une anode au carbone assemblée pour être montée sur la coque.
6. Un convertisseur efficace de courant alimenté de 8 à 16 Volts pour piloter l'anode en carbone.
7. Des shunts de précision de mesurer le courant anodique et des résistances variables pour le contrôler.

Une autre motivation pour cette famille de produit est l'agitation récente de la part des environnementalistes concernant les effets négatifs des composés de zinc sur le milieu marin. Nous ne partageons pas du tout ces convictions mais si nous nous réveillons un beau matin pour découvrir que le zinc pour la protection cathodique ²¹ des bateaux est devenue politiquement incorrecte ou tout simplement interdite, le marché pour les systèmes à courants imposés aura la possibilité de s'accroître.

Ces appareils ne sont pas encore complètement finalisé pour le marché mais nous espérons faire bientôt des annonces intéressantes. Entre temps nous sommes prêts à discuter avec tout ceux qui seraient intéressés par cette nouvelle gamme de produit. Vous pouvez contacter Rick à rickhoney@onebox.com, ou Jack au (800) 772-0796. ou nous écrire à res0nv90@verizon.net

²⁰ *Impressed Current Systems.*

²¹ *Zinc for cathodic protection of boats*, « anodique » semble plus approprié pour les anodes en zinc, et peut-être « cathodique » pour les courant imposés.