



Métallurgie sanitaire: le cuivre, ses alliages et la lutte microbienne

A. Fleurentin (Métallo Corner, Conseils, expert judiciaire métallurgiste)

Le cuivre entre dans l'histoire des hommes durant la période du Néolithique. Il possède des propriétés antimicrobiennes reconnues depuis l'Antiquité, fort utiles pour jouer un rôle barrière dans la propagation des microbes. Quelques résultats d'études mettent en évidence les qualités du cuivre pour ses vertus sanitaires.

Le cuivre et ses alliages sont réputés pour leur bonne aptitude à la mise en forme, leur bonne coulabilité en fonderie, une relativement grande stabilité chimique et une excellente conductivité électrique et thermique. Il est donc normal de les retrouver dans la fabrication de pièces de monnaie, de conducteurs électriques, de systèmes caloporteurs, des instruments de musique (par exemple la cloche en bronze sonore), sans oublier les nombreux objets décoratifs (souvent en laiton) et les boules de pétanque lyonnaise (en cupro-aluminium) [6]. La période insolite de confinement associée à la pandémie (Covid-19) que nous vivons en France depuis le 17 mars, nous oblige à nous rappeler que le cuivre peut jouer un rôle barrière dans la propagation du virus. En effet, on l'utilise aussi comme fongicide, bactéricide, virucide, spermicide, algicides, herbicides et insecticides soit sous forme de sels (sulfates ou hydroxyde de cuivre) principalement dans le monde agricole, soit à l'état métallique. Ce métal a donc des vertus reconnues depuis des siècles qu'il serait fort dommageable d'occulter...

Afin d'éviter cet impair, nous vous proposons, dans un premier temps, de réaliser un bref rappel historique, de l'Antiquité à nos jours de l'intérêt du cuivre en médecine et en biologie. Nous poursuivrons, dans un second temps, en présentant quelques résultats d'études qui ont permis de mettre en évidence l'effet du cuivre sur

les cellules et nous clôturerons par plusieurs exemples de notre vie courante où l'incorporation d'alliages cuivreux peut rendre de grands services à la population soumise à un risque sanitaire sans précédent, au même titre que pour lutter face aux cortèges d'infections associées aux soins dans les hôpitaux et les Ehpad.

Le cuivre au service de l'humanité depuis l'Antiquité...

Depuis 2008, le cuivre et ses alliages sont considérés par l'agence américaine l'EPA (Environmental Protection Agency) comme un biocide, produit capable de détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, par une action chimique ou biologique. Le cuivre est donc le seul élément métallique reconnu capable de réduire la

prolifération de germes, bactéries, virus, champignons, potentiellement responsables d'infections. Bien que l'homme découvre l'alliage cuivre - étain pendant l'Âge de Bronze (3500 ans avant J.-C.), les propriétés bienfaitrices du cuivre pour la santé sont connues depuis l'Antiquité et ce sont les Égyptiens qui l'utiliseront au niveau médical. Les papyrus d'Edwin Smith et d'Eber qui correspondent aux plus vieux traités de médecine de notre civilisation en sont la preuve. Ils décrivent des techniques de désinfection de plaies au niveau de la poitrine et des systèmes de stérilisation de l'eau à l'aide de cuivre. À cette époque, les Égyptiens ont compris que certains matériaux métalliques dont le cuivre (Ag, Hg, Zn, Au...) pouvaient être utilisés pour leur propriété anti-infectieuse. Plus contemporain, il a pu être observé que les orfèvres du cuivre, concentrés principalement dans le quartier Saint-Antoine à Paris, ont été relativement épargnés par les vagues de choléra qui ont balayé l'Europe pendant toute la première moitié du XIX^e siècle [5].



FIGURE 1 : Bracelet thérapeutique en cuivre.



Alliages cuivreux	État métallurgique	Résistance mécanique	Allongement
Cuivre quasi pur	Non déformé	~ 230 MPa	45 %
	Écroui H14	~ 350 MPa	6 %
Bronzes	Non déformé	345 - 405 MPa	40 - 50 %
	Écroui H14	550 - 740 MPa	3 - 5%
Laitons	Non déformé	275 - 370 MPa	40 - 60 %
	Écroui H14	430 - 510 MPa	5 - 8%
Cupro-nickel	Non déformé	270 - 470 MPa	40 - 45 %
	Traité + écroui H14	740 - 900 MPa	6 - 7%
Cupro-aluminium	Non déformé	310 - 530 MPa	40 - 10 %
	Écroui H14	415 - 530 MPa	20%
Maillechorts	Non déformé	390 - 440 MPa	20 - 52 %
	Écroui H12	500 - 570 MPa	15 - 20 %

TABLEAU 1 : Ordres de grandeur des caractéristiques mécaniques des principaux alliages cuivreux.

En 1880, un chimiste et un botaniste bordelais, Ulysse Gayon et Alexis Millardet eurent l'idée d'utiliser du sulfate de cuivre neutralisé à la chaux afin de protéger les vignes de la région de Bordeaux contre le mildiou : la bouillie bordelaise était née. Celle-ci servira également pour lutter contre la tavelure du pommier ou le mildiou de la pomme de terre. Ce produit fait actuellement partie des quelques substances actives homologuées AB (Agriculture Biologique) utilisées comme pesticides. En 1939, le médecin allemand, Werner Hangarter, a remarqué que les travailleurs des mines de cuivre de Finlande souffraient beaucoup moins d'arthrite tant qu'ils étaient en exercice, par rapport à l'ensemble de la population, assez sujet aux rhumatismes. Ce constat fut à l'origine d'essais cliniques à base de chlorure de cuivre et de salicylate de sodium pour soigner des patients atteints de rhumatisme articulaire aigu, la polyarthrite rhumatoïde ainsi que les sciaticques. Certains grands joueurs de golf, dont le regretté Severiano Ballesteros, ont utilisé des bracelets en cuivre (Figure 1) pour leurs vertus antirhumastimale et anti-inflammatoire afin d'éviter, entre autres, les fameuses épicondylites (inflammation du tendon du coude). Cependant, avec le développement révolutionnaire dans les années cinquante, des antibiotiques pour les traitements modernes des maladies pathogènes, nous avons progressivement abandonné les vertus biocides du cuivre qui nous avait bien rendu service depuis l'Antiquité. Mais comme toute technique révolutionnaire, utilisée à tort et à travers mais surtout de façon

intensive à l'image du miracle qu'elle représentait à nos yeux, celle-ci commence à entrevoir ses limites face à la résistance de plus en plus grandes de certains micro-organismes en perpétuelle mutation afin de s'adapter à l'environnement dans lequel elles évoluent. Cette situation est d'autant plus préoccupante dans les hôpitaux et EHPAD avec ces agents pathogènes multirésistants à l'origine des maladies nosocomiales. Face à ce constat et depuis la reconnaissance du cuivre et ses alliages par l'EPA (Environmental Protection Agency), en tant que biocide, l'utilisation du cuivre retrouve une place de plus en plus importante dans la lutte contre la propagation des infections dans notre quotidien.

Choix et efficacité des alliages cuivreux

Comme nous l'avons rappelé dans la première partie, l'unique métal enregistré par l'agence américaine EPA, c'est le cuivre et ses nombreux alliages dérivés.

La procédure de validation des nuances va être réalisée par le biais de plusieurs tests : le pouvoir désinfectant, l'activité autodésinfectante

résiduelles et la force de nuisance en fonction de l'alliage et du temps de séjour du temps face à six bactéries (*staphylococcus aureus*, *enterobacter aerogene*, *escherichia coli*, *pseudomonas aeruginosa*...).

À date, plus de 500 alliages cuivreux ont été qualifiés par l'EPA comme matériaux antibactériens (la liste est disponible sur le site : <https://copperalloystewardship.com/antimicrobial-copper-range>). On y trouve des laitons (Cu-Zn), des bronzes (Cu-Sn), des cupro-nickels (Cu-Ni), des maillechorts (Cu-Zn-Ni). Pour le moment, le point commun pour l'ensemble des alliages validés, se situe au niveau du pourcentage de cuivre qui doit être supérieur à 58 %. Cependant, plus la teneur en cuivre est élevée, meilleure est l'action biocide. Par conséquent, pour des outils utilisés dans des environnements sensibles dans le corps humain (par exemple la muqueuse de l'utérus), les outils utilisés sont en cuivre pur à plus de 99 %.

Approche mécano-chimique

Pour les dispositifs à risques plus limités, on choisit la composition de l'alliage cuivreux en fonction des conditions d'utilisation (efforts, environnement...) et des moyens de fabrication envisagés. On s'intéressera donc :

- Aux propriétés physiques (principalement la conductivité électrique et thermique).
 - > Idée générale : moins il y a d'éléments d'addition, meilleure est la conductivité.
- Aux propriétés mécaniques (Tableau 1).
- Aux propriétés tribologiques (pour les problèmes de grippage et d'abrasion).
 - > Idée générale pour le grippage : le choix va s'orienter globalement vers des bronzes spéciaux.
 - > Idée générale pour la tenue à l'abrasion : on se concentrera sur les alliages à fortes duretés (par écrouissage ou par traitement thermique pour les cupro-bérylliums).
- À la tenue à la corrosion.
 - > Idée générale : le choix se portera généralement sur des cupro-aluminiums ou des cupro-nickels.
- À l'aspect décoratif, les alliages cuivreux



FIGURE 2 : Pièces de monnaie européennes.



(laitons, maillechorts) sont très utilisés.
> Idée générale sur les coloris: le cuivre est rouge orangé, les laitons sont jaune, les cupro-nickels sont blanc argenté identique au centre d'une pièce de 1 euro, les maillechorts sont jaune à l'image de la couronne d'une pièce de 1 euro. Pour information, les pièces de 10, 20 et 50 centimes d'euro sont en cupro-aluminium avec du zinc et de l'étain (Figure 2).
• Aux techniques de fabrication (usinabilité, coulabilité pour la fonderie, mise en forme à froid).
> Idée générale pour l'usinage: on trouvera très souvent du plomb dans les alliages.
> Idée générale pour la coulabilité: on s'orientera vers les bronzes (œuvres d'art), voir des cupro-aluminiums (la boule de pétanque lyonnaise) ou les cupro-nickels (échangeurs et pompes).
> Idée générale pour la mise en forme: plus on va déformer la matière et plus la plasticité de celle-ci sera réduite, il faut donc utiliser des alliages avec un large domaine plastique. La réactivité de surface des objets en cuivre va également jouer un rôle prépondérant comme dans toutes interactions physico-chimiques de surface. Par conséquent, il est fortement déconseillé:
> De recouvrir le cuivre par des cires, laques, vernis ou tout autre revêtement.
> D'effectuer un polissage trop prononcé qui réduit fortement la rugosité de l'objet et donc sa surface apparente capable de réagir avec le milieu.

Compte tenu du coût à l'achat du cuivre et du degré de convoitise qu'il inspire, rien n'interdit également, de travailler à partir de revêtement: type cuivrage électrolytique ou des peintures composites associant des polymères et un alliage à 92% de cuivre (associé à du phosphore^[3]), appliqué sur une épaisseur de quelques centaines de microns. Son utilisation permet de diviser en moyenne par 3000 le nombre de bactéries en une heure, à l'image de ce qui est développé par la société *MetalSkin* medical à Neuilly-sur-Seine (<https://metalskin.eu>).

Les limites de ces orientations techniques reposent sur le fait qu'une fois le revêtement ou le dépôt est endommagé, l'objet a perdu localement son effet biocide et le métal sous-jacent mis à nu peut devenir un site de prolifération bactérienne, sans oublier les risques de corrosion galvanique en fonction du substrat.

Approche biologique

D'un point de vue épidémiologique, les mécanismes antibactériens du cuivre sont multiples et complexes; ils reposent sur l'endommagement de la membrane, la perméation du cuivre dans la

cellule et l'endommagement ou la paralysie de l'agent infectieux. Des controverses résident sur la pondération entre « l'effet tueur » ou « l'inactivation des microbes » par le cuivre. En 2011, l'équipe du professeur Grass a proposé un modèle global groupant les principaux mécanismes identifiés à date qui permet de se faire une idée lorsque l'on n'est pas de la partie (Figure 3):

A. Endommagement de la membrane: des ions formés par dissolution du cuivre viennent perturber l'intégrité de l'enveloppe bactérienne.
B. La cellule se vide de son contenu cytoplasmique.
C. Perméation du cuivre: les ions cuivre Cu⁺ et Cu²⁺ pénètrent dans la cellule et induisent la formation de ROS (espèces réactives oxygénées) par oxydo-réduction.
D/Libération et dégradation de l'ADN bactérien sur la surface du produit.
Tous les alliages cuivreux n'ont pas le même

degré d'efficacité face aux bactéries, virus ou champignons. La figure 4 nous montre l'évolution de la quantité d'un micro-organisme (le norovirus murin type 1) en fonction du temps lorsque celui-ci est placé sur une plaque en laiton ou en cupro-nickel. On s'aperçoit, avec ce cas, que le laiton permet d'éliminer le norovirus en moins de 2 heures alors que l'activité virale sur la plaque en cupro-nickel est encore élevée^[4]. L'efficacité du cuivre et des alliages cuivreux est fonction du micro-organisme contre lequel il faut lutter, mais également de certains paramètres environnementaux tels que la température et le taux d'humidité. Une température ambiante semble idéale pour permettre au cuivre de combattre les agents pathogènes. Il faut savoir que l'abaissement de la température d'un objet en cuivre contaminé (ex: lors

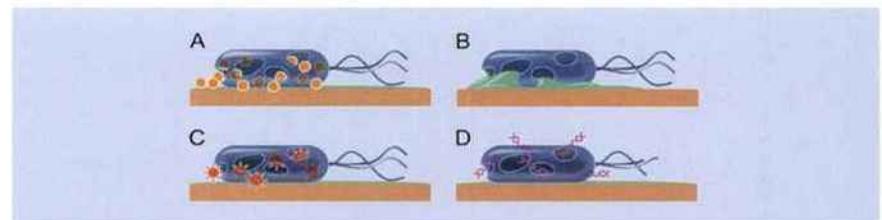


FIGURE 3 : Modèle global de l'action du cuivre sur une bactérie [7].

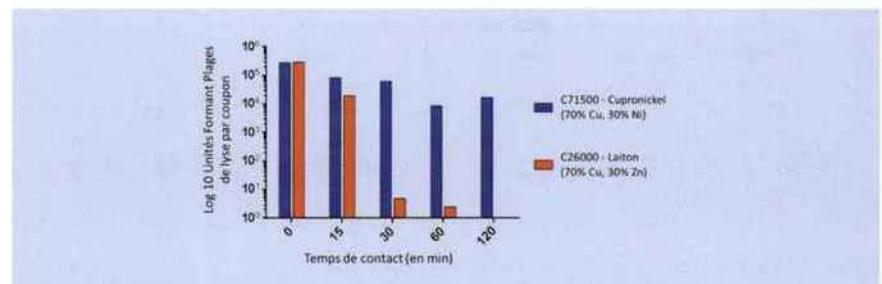


FIGURE 4 : Comparaison de l'activité antivirale d'un cupro-nickel et d'un laiton [7].

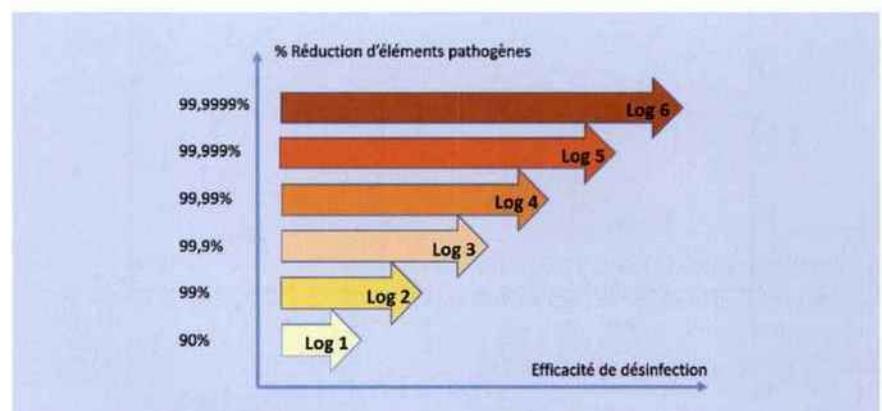


FIGURE 5 : Échelle de désinfection en Log.

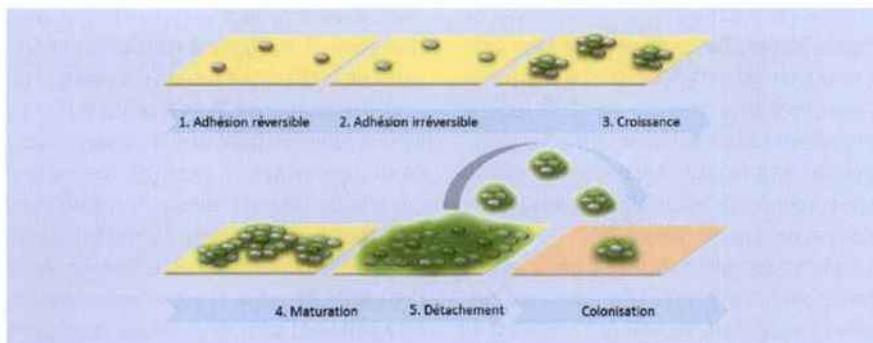


FIGURE 6 : Formation et prolifération d'une communauté microbienne adhérente : biofilm.

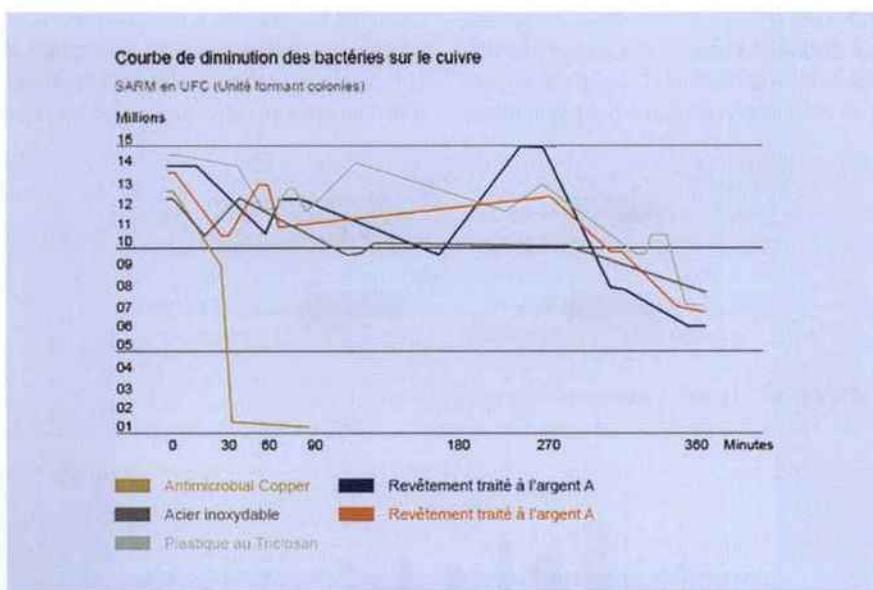


FIGURE 7 : Comparaison sur différents matériaux de la durée de vie du SARM (Source : entreprise FAVI basée à Hallencourt - www.favi.com).

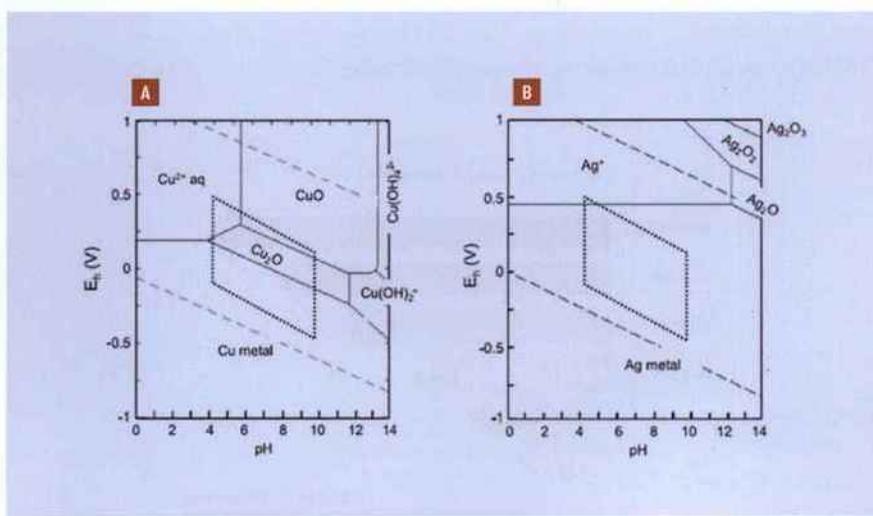


FIGURE 8 : Diagramme de Pourbaix pour le cuivre (A) et l'argent (B).

d'une mise au réfrigérateur) va entraîner une augmentation de la durée nécessaire pour éliminer l'agent infectieux :

> Pour des études menées à 22 °C la durée pour éliminer SARM de 10⁷ UFC (Colony Forming Unit/cm²) est de 45 à 90 min. Ce temps est multiplié par un facteur 4 pour des essais menés à 4 °C [14]. Ce constat explique les problèmes rencontrés, ces derniers mois, dans les abattoirs et les ateliers de découpe.

Vu que les mécanismes d'interaction entre les micro-organismes et le cuivre passent par les ions et les hydroxydes de cuivre, l'augmentation de l'humidité joue un rôle bénéfique face à la lutte contre les microbes et virus [12] :

> 90% d'humidité permet une réduction de la charge de SARM de 6,4 log.

> 20 % d'humidité permet une réduction de la charge de SARM de 5,5 log.

Pour information, la réduction de 1 log correspond à une division par 10 du nombre de bactéries ; on parle d'efficacité de 90 %. Autrement dit, si au début du test, on avait 100 000 bactéries sur une surface donnée, une réduction de 1 log en heure permet d'éliminer 90 000 bactéries. Cette échelle est définie dans la norme NF S90-700 (Figure 5).

Comparaison entre les alliages cuivreux, les aciers inoxydables et l'argent

Dans notre environnement de tous les jours, il est aisé de constater que les aciers inoxydables austénitiques sont omniprésents par leur excellente tenue à la corrosion et leur facilité d'entretien (nettoyage et désinfection). On pourrait trop facilement croire que ces alliages (Fe-Cr-Ni) ont de bonnes prédispositions pour être utilisés dans des environnements dits sensibles à la prolifération bactérienne tels que les hôpitaux, les EHPAD, les établissements scolaires, les cantines collectives... Il faut savoir, comme le rappelle Ugitech (<http://ugitech.fr/>), que « la sécurité alimentaire ou médicale s'appuie avant tout sur l'application et le respect de procédures d'hygiène stricte (nettoyage, désinfection) : dans ce domaine, les aciers inoxydables austénitiques sont parfaitement armés, compte tenu de leur excellente résistance à la corrosion dans les détergents et les désinfectants les plus divers ». La caractéristique chimique principale de ses alliages est leur capacité à ne pas réagir avec son environnement. Il est donc tout à fait logique que les aciers inoxydables n'interagissent pas avec des microbes qui ne pensent qu'à se multiplier au sein de ce que l'on nomme biofilm (matrice



extracellulaire composée essentiellement de protéines, sucres et ADN libre) en suivant un processus en 5 étapes aboutissant à la colonisation d'une nouvelle surface (Figure 6).

En l'absence d'un nettoyage régulier et efficace, des organismes pathogènes tels que les staphylococcus aureus et bien d'autres peuvent rester en vie et actifs pendant plusieurs semaines ^[11] (Figure 7).

À l'opposé du concept des « matériaux inertes », on trouve la catégorie des « matériaux tueurs ou neutralisant » comme le cuivre ou l'argent qui vont interagir avec l'environnement proche en larguant des espèces chimiques (ions, hydroxydes...) qui vont tendre à éradiquer des bactéries, virus, champignons dangereux pour la santé. Des études menées à l'Université de Southampton, dans le service du Pr Keevil, avec l'Institut Européen du Cuivre, ont montré que sur des plaques de cuivres, les agents infectieux (comme le Covid-19, staphylocoque doré, virus de la grippe A...), à la température ambiante, disparaissent entre 2 et 4 heures (Figure 7).

On remarque que l'argent se comporte de façon similaire à l'acier inoxydable ou au plastique, mais comment se fait-il que celui-ci soit utilisé pour la fabrication de tubes endotrachéaux et des sondes urinaires... ^[14].

La norme JIS Z 2801 décrit les conditions de travail dans lesquelles l'argent est un excellent antibactérien : 35 °C associée à un taux d'humidité de plus de 90 %. Dans des conditions moins agressives (température et taux d'humidité réduits), l'argent reste inerte (Ag métal), il est donc incapable de produire des ions qui agiront sur les bactéries ^[14].

Le diagramme de Pourbaix (potentiel chimique - degré d'acidité pH) de l'argent comparé à celui du cuivre (Figure 8) permet de définir à 25 °C les domaines d'existence des différentes formes que peut prendre le matériau (ions, oxydes, métal...) ^[14].

Le parallélogramme en pointillé, figurant sur les deux diagrammes, définit les conditions dans lesquelles évoluent la plupart des organismes sur la terre. On s'aperçoit que les conditions environnementales de la biosphère permettent au cuivre d'être à l'état oxydé (Cu_2O et CuO) alors que c'est loin d'être le cas pour l'argent.

Exemples d'applications permettant de lutter contre la propagation des micro-organismes infectieux

Pour lutter contre la propagation des micro-organismes infectieux, les solutions ont été



FIGURE 9 : Exemple de surfaces de contact et leurs emplacements au sein d'une unité de soins intensifs de New York. (SCHMIDT et al. 2012) ^[4].



FIGURE 10 : Poignées de porte et rampes Stérial installées dans des hôpitaux (Source : Stérial).

mises en place dans beaucoup d'établissements de santé avec les gels hydroalcooliques, le respect des gestes barrières et la désinfection intensive. Ces mesures permettent de lutter contre la prolifération bactérienne, sous condition du respect des règles et d'un nettoyage très fréquent afin de limiter au mieux les phénomènes de recolonisation qui interviennent après quelques heures ^[8].

On imagine donc facilement que les idées associées à l'utilisation du cuivre permettant de limiter à long terme la prolifération des bactéries et des virus sont nombreuses dans le monde hospitalier principalement au niveau des services de réanimation, de néonatalité ou des soins intensifs. Cela concerne le mobilier, les vêtements ou les outils de travail (Figure 9).

Le cas des poignées de porte et des rampes

Comme nous indique le site de la société Stérial du groupe Bronze Industrie (www.sterial.com/fr/) basée à Suippes, après plus de 3 ans d'études,



FIGURE 11 : Poignées de porte et rampes revêtues par la société MetalSkin (Source : MetalSkin).

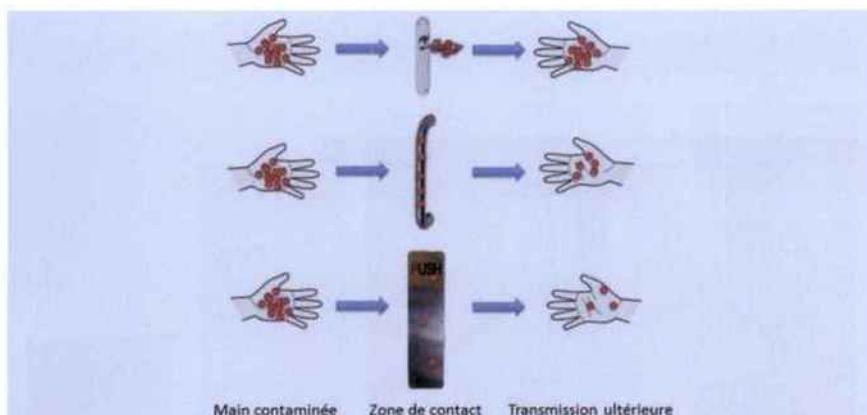


FIGURE 12 : illustration de la propagation des agents infectieux en fonction de l'ouvrant.

l'URCA (Université de Reims Champagne Ardennes) a publié ses résultats sur l'apport de la mise en place d'éléments d'architecture en alliage de cuivre en EHPAD/MARPA. Plus de 1000 poignées et 1000 m de main courante ont été installés pour cette étude dans 5 EHPAD/MARPA de la région Grand Est (Figure 10).

Sur toute la durée de l'étude, plus de 1000 prélèvements de surface ont été réalisés pour comparer la contamination bactérienne des surfaces en alliage de cuivre aux surfaces de référence. Une diminution majeure des contaminations bactériennes sur les poignées et les mains courantes a été constatée, confirmant l'efficacité des éléments d'architecture en

alliage de cuivre comme outil de lutte contre le risque infectieux [4].

La société MetalSkin medical (déjà évoquée), avec sa peinture composite riche en cuivre, a également testé ces produits dans le monde hospitalier (Figure 11).

Les études de Wojgani publiées en 2012 nous permettent de comprendre qu'il existe d'autres voies complémentaires pour lutter contre la propagation des micro-organismes : le fonctionnement des ouvrants. On y apprend que les poignées à levier présentent le ratio « UFC/nombre d'utilisations » le plus élevé. Il est préférable d'utiliser des portes à battant. Ce constat est essentiellement lié à la zone de contact qui est la plus petite avec les ouvrants à levier (Figure 12).

Il est aussi possible de réinventer la façon dont on peut ouvrir les portes à l'image de la société cherbourgeoise Probent (<https://probent.com>) qui a mis au point le système « Keyck ». Ce procédé qui relie par un câble la poignée à une pédale placée à la base de la porte permet d'ouvrir les portes sans se servir de ses mains.

Les « smart textiles »

Depuis maintenant une dizaine d'années, il est possible de concevoir des vêtements qui permettent de lutter contre les bactéries, les virus et les champignons en associant au tissu des nanoparticules d'oxyde de cuivre (CuO, CuCO₃...) [13].

L'efficacité pour lutter contre les bactéries va dépendre de la concentration en nanoparticules et de la quantité de bactérie à combattre [16]. La toxicité des nanoparticules face aux microbes va dépendre :

- De leur composition chimique (le cuivre

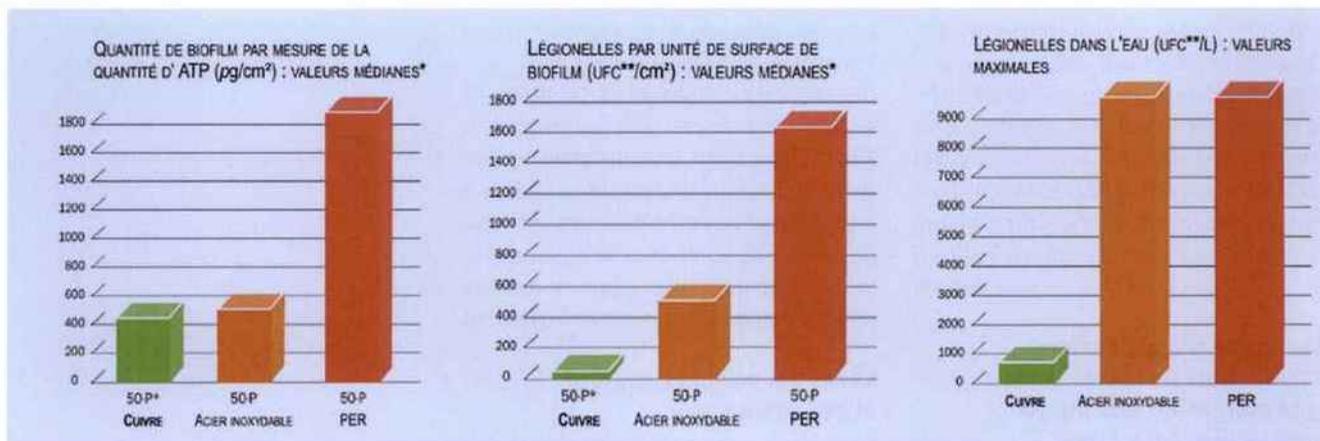


FIGURE 13, 14, 15 : Principaux résultats des études KIWA.



n'étant pas l'unique métal étudié, des recherches sont menées sur des oxydes métalliques à base d'argent ou de zinc).

- De la taille et de la forme des particules.
- De leur attraction électrostatique.

On retrouve d'ores et déjà cette technologie dans la fabrication de masques lavables en machine à 65 °C et réutilisables entre 30 et 100 fois selon le fabricant et le modèle. Plusieurs sociétés à travers le monde ont augmenté fortement leur production à partir du mois de mars (l'américain Nufabrx et l'américano-chilien Copper 3D, l'israélien Sonovia, le chilien Courtex, l'anglais Copper Clothing...) [13].

Il est également possible d'incorporer au sein des fibres en coton d'un textile des « fils de cuivre » de très petites tailles pour la conception de gants, de draps, de sous-vêtements. Une des applications bien connues par les sportifs est les chaussettes antibactériennes et antifongiques dans lesquelles il a été incorporé des fils imprégnés de cuivre (voire d'argent) pour lutter contre les infections liées aux champignons [11]. Il est donc possible de lutter contre des infections mycosiques sans avoir recours à des traitements médicamenteux. On peut également retrouver du cuivre imprégné sur des gants antiviraux en latex et du polyester pour des filtres antiviraux et également sur du papier. Une des techniques envisageables par l'université de l'Iowa (USA) s'apparente à un traitement électrochimique avec des précurseurs d'oxydes métalliques dans l'électrolyte [13].

Les « hydro-applications » du cuivre

Depuis de nombreuses années, on sait que pour lutter contre la légionellose, il est nécessaire d'utiliser des tuyaux en cuivre pour transporter l'eau de ville. On retrouve du cuivre dans tous les systèmes de purification de l'eau.

L'organisme officiel de certification néerlandais a publié en 2001 et 2003 deux rapports N°KOA 99.079 et KWR02.090 (disponible sur le site www.kiwa.nl) en comparant des canalisations en cuivre, acier inoxydable austénitique et en matière plastique (type PER).

Ces études ont permis de comprendre que :

- La quantité de biofilm estimée par la mesure de l'ATP (l'Adénosine TriPhosphate étant fortement représenté dans le biofilm) était similaire

aux surfaces en acier inoxydable mais beaucoup plus faible par rapport à un plastique type PER (Figure 13). Cependant, ce sont avec uniquement des surfaces en cuivre que l'on observe une chute importante de la quantité de biofilm après un choc thermique (70 à 75 °C). Ce traitement anti-légionelles se prête bien au cuivre compte tenu de son excellente conductivité thermique.

La teneur en légionelle sur un support cuivre était 20 fois plus faible que sur un acier inoxydable austénitique et 60 fois inférieure à une surface plastique (Figure 14).

L'eau qui circule dans des canalisations en cuivre contient le moins de légionelle (Figure 15).

D'autres techniques que le choc thermique peuvent être utilisées pour décontaminer un système attaqué par des légionelles : l'utilisation d'agents chlorés (eau de Javel, monochloramine, dioxyde de chlore), de rayonnement UV (Ultraviolet), la pulvérisation de peroxyde d'hydrogène, le traitement à l'ozone, la microfiltration...

	Cuve en cuivre	Cuve en verre	Cuve PVC
Début de l'expérience	X	X	X
Après 2h	0		
Après 48h	0	2X	2X

X : quantité de bactérie (K. pneumoniae, P. aeruginosa, SARM et E. coli) en début de test

TABLEAU 2 : Résumé d'une partie des résultats de l'étude de Cervantes. [CERV 2013]

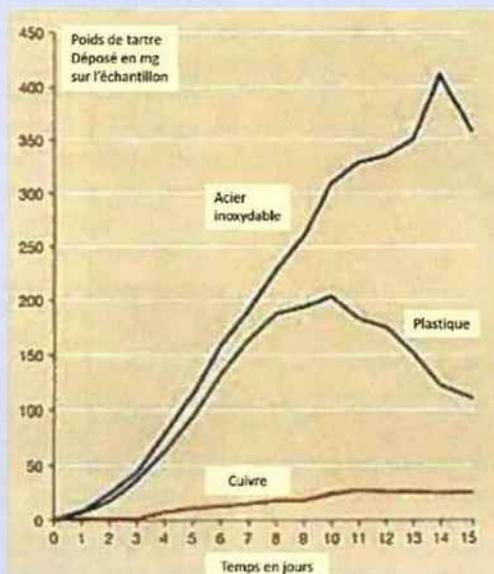


FIGURE 16 : Comparaison des cinétiques d'entartrage sur du cuivre, PER et acier inoxydable pour une eau à 52 °C [9].



Bibliographie

[1] H-I. Cervantes, J-A. Alvarez and all, "Antimicrobial activity of copper against organisms in aqueous solution; a case for copper-based water pipelines in hospital?", American journal of injection control, 41, e115-e118.

[2] "Lutte contre l'entartage: Etude du professeur Jean Ledion de l'école des Arts et Métiers", Extrait de la lettre N°52a de décembre 2000 du Centre d'information du Cuivre Laiton.

[3] C. Clicquot de Mentque, "Covid-19: quelles innovations durables face aux risques microbiologiques ?" www.actu-environnement.com.

[4] M. Colin, "Evaluation de l'activité antibactérienne d'éléments en alliages de cuivre dans des établissements de santé", Thèse de l'université de Reims Champagne-Ardenne, 29 mars 2019.

[5] HHA. Dollwet, JRI. Sorenson, "Historic uses of copper compounds in medicine", Traces elements in Medicine, 2nd edition, the Humana Press inc., 77, 1541-1547.

[6] A. Fleurentin, "Métallurgie de la boule lyonnaise: des cuivreux aux procédés de fonderie", Traitements et Matériaux N° 452, mai-juin 2018.

[7] G. Grass, C. Rensing, M. Solioz, "Metallic copper as an antimicrobial. Applied and environmental microbiology", 77(5), 1541-1547.

[8] K.J. Hardy, S. Gossain, N. Drugan and all, "Rapid recontamination with MRSA of the environment on an intensive care unit after decontamination with hydrogen peroxide vapour", Journal of hospital infection, 66, 360-368.

[9] Haut Conseil de la santé publique, "Avis relatif aux propriétés biocides du cuivre participant à la baisse des infections nosocomiales et son intérêt médico-économique", 25 mars 2015.

[10] V. LE, "Influence du cuivre sur les biomasses microbiennes dans les canalisations d'eau", Thèse de l'université Paris sud, 26 juin 2008.

[11] J-L. Masson, «Le cuivre sur les surfaces en milieu de santé pour lutter contre les infections nosocomiales», thèse de l'université de Lorraine, 25 janvier 1986.

[12] H-T. Michels, J.O. Noyce, C.W. Keevil, "Effect of temperature and humidity on the efficacy of methicillin-resistant staphylococcus aureus challenged antimicrobial materials containing silver and copper." Letters in applied microbiology, 49, 191-195.

[13] www.modeintextile.fr

[14] J-O. Noyce, H. Michels, C-W. Keevil, "Potential use of copper surfaces to reduce survival of epidemic methicillin-resistant staphylococcus aureus in the healthcare environment", Journal of hospital Infection 63, 289-297.

[15] <https://pas-a-pas.be/electroculture-une-pre-science>.

[16] M. Talantikit, «Effets antibactériens des nanoparticules de cuivre, oxyde de cuivre et oxyde de fer», Thèse université de Montréal, décembre 2014.

[17] S. Warns, ZR. Little, C.W. Keevil, "Human coronavirus 229E remains infectious on common touch surface materials", Revue MBio, 2015.



FIGURE 17 : Alambics utilisés pour la distillerie du calvados.

Des études sur des réservoirs d'eau en cuivre, en PVC et en verre confirment l'importance du cuivre dans la lutte contre la prolifération bactérienne (Tableau 2) [1].

Pour compléter ces résultats, il est intéressant d'y associer ceux du professeur Jean Ledion de l'école des Arts et Métiers qui a travaillé sur le développement du tartre sur différents matériaux (cuivre, acier inoxydable austénitique et plastique PER). En effet, le tartre aide à la prolifération de la légionnelle [2].

On trouve du tartre uniquement dans les circuits d'eau chaude et avec une eau riche en calcium et magnésium. Plus le titre hydro-timétrique (T.H.) est élevé, plus on retrouvera sur les parois des installations du carbonate de calcium (CaCO₃). Ce problème est à prendre en compte surtout sur des installations où l'eau chaude est renouvelée. Par conséquent il concerne peu les installations de chauffage où l'eau est en boucle fermée.

La figure 16, nous montre que l'entartage est très limité pour les canalisations en cuivre par rapport à l'acier inoxydable et au PER.

On peut ajouter à titre anecdotique que l'on utilise aussi des revêtements dits

« antifouling » à base de sulfate de cuivre pour limiter la bio-incrustations des organismes sur la coque des bateaux ou la prolifération des algues dans les cuves de stockage d'eau [10].

Bilan et perspectives

Bien que l'on connaisse les vertus sanitaires et médicales du cuivre depuis des milliers d'années et qu'on utilise pour la plupart des systèmes de distribution d'eau des canalisations en cuivre pour lutter contre la légionellose, l'émergence de bactéries de plus en plus résistantes aux antibiotiques dans les hôpitaux et EHPAD et l'épisode de confinement planétaire associé au Covid-19 ont permis de réfléchir d'avantage à l'utilisation des cuivreux face à la propagation des microbes.

La reconnaissance du cuivre et ses alliages comme biocide depuis 2008 par l'agence américaine EPA (Environmental Protection Agency) ont permis un développement important de « produits de contact » incorporant plus de cuivre (poignées, rampes, stéthoscopes...) dans les hôpitaux, les EHPAD, les cantines collectives... C'est en 2015, que le haut conseil de la santé publique a fourni un avis favorable relatif aux propriétés biocides du cuivre [9].

L'utilisation du cuivre permet d'améliorer la lutte contre les microbes et les champignons et permet de limiter la propagation des micro-organismes infectieux et invasifs à l'origine de nombreuses maladies nosocomiales. Cependant, ses nombreuses applications, dans les espaces hospitaliers ou autres, ne sont en aucun cas des palliatifs aux gestes barrières et aux protocoles sanitaires, il reste impératif de mettre en place des actions ciblées visant à nettoyer et désinfecter les locaux et les appareils de santé, sans oublier les



FIGURE 18 : Electro-permaculture [15].



FIGURE 19 : boule lyonnaise (Cu-Al).

objets du quotidien (stylos, coques de téléphone portable...).

L'emploi d'objets de préhension en cuivre, à l'image des centres hospitaliers de Rambouillet et d'Amiens, devrait s'amplifier dans les hôpitaux, mais également dans les EHPAD et, plus généralement, dans tous les lieux dits « collectif » (établissements scolaires, restaurants collectifs...), compte tenu de la période que nous vivons avec la Covid-19.

D'autres applications, très diverses, soulignent le fort intérêt des alliages cuivreux dans la vie courante : sur les toitures (fils de cuivre tendu) pour éviter la

formation de mousse, chez les confituriers (cuve, bassin, chaudron) pour favoriser la prise de la confiture, chez les fabricants d'eau-de-vie (Cognac, Armagnac, Rhum...) pour la fabrication des alambics (serpentins, col-de-cygne...) mais également pour la distillation du raisin ou des huiles essentielles (Figure 17). Que de produits qui peuvent nous faire du bien en cette période de déconfinement...

Nous aurions pu également parler d'électroculture pour les « plus croyants » d'entre nous qui utilisent des « montages pyramidaux en cuivre » (Figure 18) dans leur jardin afin de dynamiser leur récolte en canalisant les flux électriques... Mais n'oublions pas que certains de nos anciens incorporaient dans les pots de fleurs des pièces de cuivres ou transperçaient leurs tomates à l'aide d'un fil de cuivre pour lutter contre les parasites !

Pour finir sur des propos plus légers, vous pouvez d'ores et déjà vous prescrire une séance de 2 heures par jour de pétanque lyonnaise afin d'être en contact avec des boules en cupro-aluminium (Figure 19). Cette activité contribuera à réduire le nombre de bactéries sur vos mains et de ce fait limitera la propagation des microbes, tout en passant un bon moment de convivialité !

Remerciements

Nous tenons à remercier les entreprises Stérial et MetalSkyn pour les informations communiquées. Il est également important de souligner que les thèses de Mme Lé et Talantikit ainsi que celles de MM. Masson et Colin nous ont permis de compléter nos connaissances en ce qui concerne la biologie cellulaire et les interactions des micro-organismes avec les matériaux métalliques.