Appui scientifique et technique de l'Anses
Demande n° 2026-AST-0008
Saisines liées n° 2024-AST-0027, 2022-AST-0185, 2021-SA-0186

La directrice générale

Maisons-Alfort, le 17 juin 2026

NOTE
d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à la demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) des anodes sacrificielles de magnésium destinées à la protection cathodique des systèmes de production d'eau chaude sanitaire

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux, l'évaluation des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des aliments et, en évaluant l'impact des produits réglementés, la protection de l'environnement.
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du Code de la santé publique).
Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 16 janvier 2026 par la Direction générale de la santé (DGS) pour la réalisation de l'expertise suivante : Appui scientifique et technique (AST) relatif à la demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) des anodes sacrificielles de magnésium (Mg) destinées à la protection cathodique des systèmes de production d'eau chaude sanitaire".

Cette demande d'AMM initiée en 2021 fait suite à l'avis émis le 18 février 2022 et aux AST émis le 20 juin 2023 et le 1er juillet 2024 (Anses, 2022, 2023 et 2024).

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA DEMANDE

1.1. Contexte

L'Agence est saisie en application de l'article 5 de l'arrêté du 25 juin 2020 relatif aux matériaux et produits métalliques destinés aux installations de production, de distribution et de conditionnement qui entrent en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine : "*Les anodes de protection cathodique en magnésium, en aluminium et en titane peuvent être utilisées pour la protection contre la corrosion interne des appareils de production d'eau chaude sanitaire. Le magnésium, l'aluminium et le titane peuvent être utilisés sous réserve*

qu'un dossier, conformément à l'annexe V de l'arrêté du 29 mai 1997 susvisé, soit déposé dans les deux ans suivant l'entrée en vigueur du présent arrêté, afin qu'ils soient ensuite définitivement inscrits sur la liste de compositions".

L'annexe V de la Décision d'exécution (UE) 2024/367 de la Commission du 23 janvier 2024 portant modalités d'application de la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en établissant les listes positives européennes des substances de départ, des compositions et des constituants dont l'utilisation est autorisée pour la fabrication de matériaux ou de produits entrant en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine fixe les concentrations maximales tolérables au robinet du consommateur pour les éléments métalliques éventuellement relargués de matériaux métalliques ($CMT_{robinet,\ métallique}$ ou $MTC_{tap,\ metallic}$).

Dans la réglementation française, les anodes sacrificielles sont considérées comme des matériaux métalliques, ce qui n'est pas le cas dans la réglementation européenne où elles sont exclues du champ d'application de l'article 11 de la directive (UE) n° 2020/2184 du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (DWD). Il n'existe pas de lignes directrices spécifiques pour l'évaluation de leur innocuité sanitaire, celles pour l'évaluation des matériaux métalliques ne s'appliquant pas *de facto* même si certaines de leurs préconisations, telles que les $CMT_{robinet,\ métallique}$, peuvent leur être transposées.

1.2. Historique des travaux de l'Anses sur les anodes de Magnésium (Mg)

Dans l'avis n° 2021-SA-0186 émis le 18 février 2022 (Anses, 2022), l'Anses était favorable à l'autorisation d'anodes sacrificielles en Mg pour la protection cathodique des systèmes de production d'eau chaude sanitaire avec des restrictions d'usage. Ces restrictions ont été reconsidérées dans l'AST n° 2022-AST-0185 émis le 20 juin 2023 (Anses, 2023) sous réserve de la mise en place d'essais expérimentaux permettant de vérifier que les produits mis sur le marché n'entraînent pas de risque de dépassement des concentrations de référence (CR)[1] dans l'eau pour les éléments métalliques constitutifs des anodes dans les conditions d'utilisation habituelles. Dans l'AST n° 2024-AST-0027 du 1er juillet 2024 (Anses, 2024), suite à l'examen des essais expérimentaux menés par le pétitionnaire qui ne satisfaisaient pas toutes les recommandations de l'AST de 2023, au regard des difficultés techniques rencontrées, l'Anses n'a pas pu statuer sur l'AMM et a recommandé :

- la réitération des essais de relargage des éléments constitutifs des alliages de magnésium dans les conditions révisées permettant d'éviter les biais constatés ;
- la réalisation d'une mesure du courant d'auto-corrosion des anodes selon une méthode électrochimique en laboratoire, afin de fournir des données consolidées et représentatives.

[1] Les CR de la 4MSI sont identiques aux $MTC_{tap,\ metallic}$ (ou $CMT_{robinet,\ métallique}$) de la Décision d'exécution (UE) 2024/367 à l'exception du zinc : 100 µg/L pour l'aluminium (Al), 25 µg/L pour le manganèse (Mn), 2250 µg/L pour le zinc (Zn) au niveau européen vs 2700 µg/L pour la 4MSi, 100 µg/L pour le fer (Fe), 1800 µg/L pour le cuivre (Cu) et 10 µg/L pour le nickel (Ni). Pour rappel, il n'y a pas de CR ou de $CMT_{robinet,\ métallique}$ pour le Mg mais une limite supérieure de sécurité (LSS), valable pour toute personne au-delà de 4 ans, de 250 mg/j existe. L'apport en Mg par les anodes étant dans le « pire cas » de l'ordre du mg/L, il n'a pas été considéré dans les calculs. De plus, contrairement aux autres LSS qui couvrent l'ensemble des apports (alimentation courante + compléments alimentaires), celle du Mg ne couvre que les apports complémentaires. Ainsi, elle ne représente pas la quantité maximale que le corps peut tolérer par jour mais le maximum de ce qui peut être apporté en plus de l'alimentation courante.

Le présent AST porte sur les éléments complémentaires apportés par le pétitionnaire à l'appui de sa demande depuis l'AST n° 2024-AST-0027 du 1er juillet 2024 (Anses, 2024).

2. ORGANISATION DES TRAVAUX

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Janvier 2024) ».

L'expertise collective a été réalisée par le groupe de travail (GT) pérenne « Evaluation des matériaux et auxiliaires technologiques dans le domaine de l'alimentation et de l'eau » (GT MATAE). Quatre experts rapporteurs ont été nommés pour l'analyse du dossier technique du pétitionnaire et des autres documents utiles à l'expertise.

Les travaux ont été présentés au GT MATAE, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques, lors des séances du 19 février 2026 et du 23 avril 2026. La note d'AST a été validée lors de la séance du 23 avril 2026.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : http://dpi.sante.gouv.fr/ .

Les travaux d'expertise se sont appuyés sur les documents suivants :

- le dossier technique du pétitionnaire daté du 4 décembre 2025 et les compléments d'information adressés le 19 mars 2026 et le 30 avril 2026,
- les comptes-rendus des échanges avec le pétitionnaire du 30 mars 2023 (audition dans le cadre de la saisine n° 2022-AST-0185), du 13 décembre 2024 (réunion d'explication des produits d'expertise rendus par l'Anses) et le 28 août 2025 (réunion d'échanges sur les premiers essais réalisés et les difficultés rencontrées).

L'évaluation a été réalisée selon les préconisations, quand applicables, des lignes directrices suivantes :

- le guide pratique de la DGS de mars 1999 pour la constitution des dossiers relatifs à la conformité sanitaire des matériaux placés en contact avec les eaux d'alimentation (DGS, 1999) ;
- les recommandations de la 4MS-Initiative (4MSi)[2] pour tester en vue de leur acceptation les compositions dans la liste positive commune pour les matériaux métalliques (4MSi, 2021) ;
- la décision d'exécution (UE) 2024/365 de la Commission du 23 janvier 2024 portant modalités d'application de la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les méthodes d'essai et d'acceptation des substances de départ, des compositions et des constituants à inscrire sur les listes positives européennes.

[2] Travaux de coopération entre la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, les Pays-Bas et le Danemark dans le champ de la réglementation relative aux MCDE.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU GT MATAE

Le dossier technique du pétitionnaire comprend toutes les informations nécessaires à l'évaluation des anodes de Mg conformément aux recommandations précédentes formulées par le GT MATAE (Anses, 2024).

Le dossier vise à quantifier le risque d'exposition des usagers aux éléments constitutifs de l'anode selon deux approches :

- l'une permettant d'estimer les valeurs de relargage dans l'eau des ballons à partir d'un modèle mathématique ;
- l'autre à partir de la mesure directe des éléments relargués dans l'eau des ballons.

3.1. Rappel sur l'utilisation des anodes sacrificielles de Mg et les cas couverts par la demande

Pour rappel, les anodes sacrificielles en Mg sont utilisées pour la protection cathodique des ballons de production et/ou de stockage d'eau chaude sanitaire. Elles permettent de protéger les parois métalliques contre la corrosion afin d'éviter la dégradation de la qualité de l'eau et de garantir la durabilité des équipements. Leur intérêt technologique et sanitaire est détaillé dans l'avis n° 2021-SA-0186 du 18 février 2022 (Anses, 2022).

Le pétitionnaire souhaite une AMM pour les anodes de Mg dont la composition est conforme à la norme NF EN 12438[3]. Des anodes fabriquées en alliage de magnésium, d'aluminium et de zinc AZ 63 (MgAl6Zn3)[4] ont été utilisées pour les essais. Il semble que seuls les alliages AZ63 et AZ31 sur les cinq de la norme soient utilisés dans les applications en eau chaude sanitaire (Anses, 2023).

Le pétitionnaire souhaite une autorisation pour les ballons en acier émaillés et les ballons revêtus de résine époxydique (Acier Thermo-Laqué) du moment que le revêtement du ballon (surface cathodique à protéger) est conforme à la norme DIN 4753-3[5], et pour les chauffe-eaux en acier inoxydable dont seul le fourreau émaillé isolé est sous protection cathodique.

Les essais et calculs ont été réalisés sur des ballons en acier émaillé de 50 L conformes à la norme DIN 4753-3. En effet, au regard de la difficulté pratique de produire une eau synthétique en grande quantité pour les ballons en acier revêtu de résine époxydique de petite capacité (300 L minimum), le pétitionnaire n'a pas conduit d'essais sur ce type de ballon. Le pétitionnaire estime que les essais réalisés sur les ballons en acier émaillés de 50 L, présentent les conditions d'essais les plus défavorables (rapport surface de l'électrode/volume

[3] NF EN 12438 : Magnésium et alliages de magnésium – Alliages de magnésium pour anodes coulées. Cinq alliages figurent dans cette norme : trois alliages de magnésium, d'aluminium et de zinc (MgAl3Zn1 ou AZ31, MgAl6Zn1 ou AZ61 et MgAl6Zn3 ou AZ63) et deux alliages de magnésium et de manganèse (MgMn1 ou M1 et MgMn2 ou M2).
[4] L'alliage AZ63 contient un maximum de 7 % d'aluminium (Al), de 4 % de zinc (Zn) et de 1 % de manganèse (Mn) et des teneurs maximales de 0,3 % en silice (Si), 0,02 % en fer (Fe), 0,05 % en cuivre (Cu) et 0,002 % en nickel (Ni).
[5] DIN 4753-3. Chauffe-eau, installations de chauffe-eau pour eau potable et réservoir-chauffe-eau pour eau potable - Partie 3 : Protection contre la corrosion côté eau par émaillage et protection cathodique - Exigences et essais.

d'eau du ballon (S/V) plus élevé), sont suffisants pour l'autorisation des ballons en acier revêtu de résine époxydique.

Le GT MATAE précise que compte tenu des réactions de corrosion conduisant à la dissolution de l'anode, les concentrations des différents éléments susceptibles de migrer dans l'eau seront directement proportionnelles à leur teneur dans l'alliage de l'anode. Ainsi, étant donné que l'alliage AZ63 contient le plus d'éléments métalliques (constituants ou impuretés) autres que le Mg des trois alliages de magnésium, d'aluminium et de zinc figurant dans la norme NF EN 12438, le GT MATAE considère que les résultats de l'évaluation avec des anodes en AZ63 seront transposables aux deux autres alliages de magnésium, d'aluminium et de zinc de la norme (AZ31 et AZ61).

Le GT est d'accord que les résultats de l'évaluation réalisée sur des ballons en acier émaillé seront transposables :

- aux ballons revêtus de résine époxydique conformes à la norme DIN 4753-3,
- aux chauffe-eaux en acier inoxydable équipés de fourreaux émaillés isolés et sous protection cathodique, la surface à protéger étant faible (de l'ordre de 0,1 m^2).

3.2. Relargage des éléments constitutifs de l'anode estimé à partir de la loi de Faraday et de la mesure du courant d'auto-corrosion de l'anode

3.2.1. Mesure du courant d'auto-corrosion de l'anode

Le courant d'auto-corrosion d'anodes en AZ63 a été mesuré en laboratoire par une méthode électrochimique, suivant le montage décrit dans la norme NF EN 12438 en remplaçant le galvanostat par un potentiostat. Après 24 heures d'immersion de l'anode dans de l'eau d'essai identique à celle utilisée pour les essais de relargage des éléments métalliques dans l'eau des ballons et à 60°C, les courbes de polarisation ont été tracées et les valeurs du courant d'auto-corrosion ont été déterminées en utilisant la méthode de Tafel.

Les valeurs de densité du courant d'auto-corrosion ont été mesurées sur trois électrodes de deux fournisseurs différents, par un laboratoire indépendant du pétitionnaire :

Tableau 1 : Mesures du courant d'auto-corrosion de deux anodes de Mg du marché en AZ63

Fournisseur de l'alliage *Ø = diamètre* *S = surface* *M = masse*	**Échantillon**	**Densité de courant d'auto-corrosion ($\mu A.cm^{-2}$)**	**Densité de courant d'auto-corrosion moyen intra-fournisseur ($\mu A.cm^{-2}$)**	**Densité de courant d'auto-corrosion moyen inter-fournisseur ($\mu A.cm^{-2}$)**
1 Caractéristiques des anodes : Ø = 26 mm, S = 98 cm^2, M= 106 g S anode utilisée pour le test en laboratoire = 5,1 cm^2	A	5,55	6,02 ± 0,55 (9 %)	6,89 ± 19 %
	B	6,63		
	C	5,89		
2 Caractéristiques des anodes : Ø = 18 mm, S = 108 cm^2, M = 91 g S anode utilisée pour le test en laboratoire = 2,4 cm^2	A	7,88	7,66 ± 1,37 (18 %)	
	B	6,19		
	C	8,91		

Le courant d'auto-corrosion est proportionnel à la densité de courant d'auto-corrosion mesuré et à la surface de l'anode utilisée pour les mesures (cf. équation 1).

$$i_{\text{auto-corrosion}}\ (\mu A) = I_{\text{densité courant auto-corrosion}}\ (\mu A.cm^{-2})\ \text{x}\ \text{Surface}_{\text{anode}}\ (cm^2) \qquad \textbf{Équation 1}$$

Le GT MATAE note que la valeur du courant d'auto-corrosion (0,7 mA en moyenne pour les anodes 1 et 2, cf. équation 1) étant faible par rapport à celle du courant de protection cathodique même si le revêtement est conforme à la norme DIN 4753-3 (environ 20 %), les variations observées (± 19 %) auront peu d'impact sur l'estimation du relargage des éléments constitutifs de l'anode à partir de la loi de Faraday.

3.2.2. Estimation du relargage des éléments constitutifs de l'anode – Calcul à partir de la loi de Faraday

L'approche par modélisation basée sur la loi de Faraday a été utilisée par le pétitionnaire pour calculer les concentrations attendues en éléments métalliques constitutifs de l'anode dans l'eau des ballons d'ECS.

Le courant de dissolution de l'anode à utiliser dans la loi de Faraday pour le calcul de la quantité de Mg libérée dans l'eau des ballons est la somme du courant d'auto-corrosion ($i_{auto-corrosion}$) et du courant de protection cathodique (i_{pc}).

Le pétitionnaire a utilisé la loi de Faraday pour estimer le relargage dans l'eau des ballons de tous les éléments constitutifs de l'anode. Toutefois, en toute rigueur, il convient de considérer que le Mg est le seul élément métallique à se dissoudre électrochimiquement et que le relargage des autres éléments constitutifs de l'alliage résulte de la dissolution de la matrice magnésienne.

Ainsi, il est plus juste de n'utiliser l'équation 2 que pour estimer le relargage de Mg dans l'eau des ballons.

$$[\text{Mg}] = \frac{\left[\frac{(i_{pc}+i_{auto-corrosion})\cdot t\cdot A_{Mg}}{F.n_{Mg}}\right]}{V} \qquad \textbf{Équation 2}$$

Avec :

[Mg] = concentration en Mg émis par l'anode dans l'eau du ballon ($mg.L^{-1}$)

A_{Mg} = masse molaire du Mg = 24,305 $g.mol^{-1}$

$i_{auto-corrosion}$ = courant d'auto-corrosion (mA) (cf. équation 1)

i_{pc} = courant de protection cathodique mesurée (mA)

t = temps de séjour (secondes)

F = constante de Faraday = 96485 $C.mol^{-1}$

n_{Mg} = nombre d'électrons de valence du Mg = 2

V = capacité volumique du ballon (L)

Pour estimer le relargage des autres éléments métalliques constitutifs de l'anode, la concentration sera proportionnelle à celle du Mg en prenant en compte la composition de l'alliage (cf. tableau 2). L'équation 3 permet d'estimer leur relargage dans l'eau des ballons. Il est considéré dans cette approche que la dissolution des éléments constitutifs de l'anode est totale et proportionnelle à leur présence dans l'alliage (dissolution congruente). Ce postulat maximalise le relargage estimé.

$$[X] = 1000\ x\ [Mg]\ x\ Mx/87{,}5$$ **Équation 3**

Avec :

[Mg] = concentration en Mg émis par l'anode dans l'eau du ballon ($mg.L^{-1}$)

[X] = concentration en élément métallique X émise par l'anode dans l'eau du ballon ($\mu g.L^{-1}$)

Mx = fraction massique (tolérance haute) de l'élément métallique X dans l'alliage de Mg constitutif de l'anode

1°) Les teneurs maximales (fractions massiques) des éléments métalliques constitutifs de l'alliage AZ63 conforme à la norme NF EN 12438 (tolérance haute) sont utilisés dans le calcul.

Tableau 2 : Composition des anodes en Mg en AZ63

Alliage	Composition alliage AZ63 tolérance haute						
	Mg	Al	Zn	Mn	Ni	Fe	Cu
% massique	87,5	7,0	4,000	1,000	0,002	0,020	0,050

2°) Le temps (t) est le temps de séjour maximum considéré en fonction du type de ballon, soit :

- t = 0,5 jour pour le ballon de capacité < 50 L,
- t = 1 jour pour le ballon 50 L ≥ capacité < 500 L,
- t = 2 jours pour le ballon de capacité ≥ 500 L.

Toutefois l'estimation n'est réalisée que pour le 50 L pour comparer les résultats à ceux des essais de migration.

3°) le courant de protection cathodique (i_{pc}) a été mesuré tout au long de la période de migration de 12 jours sur les deux ballons (BAL1 et BAL2) en acier émaillé de 50 litres utilisés pour les essais de migration (cf. § 3.3). Le i_{pc} a une valeur moyenne de 3,9 mA pour le BAL1 et de 2,7 mA pour le BAL2. Ces deux ballons sont conformes à la norme DIN 4753-3 et présentent, comme préconisé dans la norme, un besoin en courant de protection inférieure à 22,5 $mA.m^{-2}$ (soit une valeur moyenne de 13,7 $mA.m^{-2}$ pour le BAL1 et 17,2 $mA.m^{-2}$ pour le BAL2)[6].

[6] Les mesures de courant suivant la norme DIN 4753-3 sont effectuées dans des conditions différentes de celles des mesures de courant de protection cathodique (i_{pc}) utilisé dans la loi de Faraday (apposition d'une tension de 1,5 V entre la cuve et l'anode en Mg comme préconisé au § 6.2.2 de la norme).

Le GT MATAE est d'accord sur l'utilisation de la loi de Faraday pour estimer le relargage du Mg à partir duquel est estimé le relargage des autres éléments constitutifs des anodes de Mg.

Le GT note que les résultats calculés à partir des équations 2 et 3 sont du même ordre de grandeur que ceux estimés par le pétitionnaire en utilisant l'équation 2 (adaptée à la fraction molaire de chaque constituant) pour tous les éléments constitutifs de l'anode. Les différences les plus importantes sont pour l'aluminium car dans les calculs précédents un nombre d'électrons de valence « $^{+3}$ » était pris en compte.

Les résultats des calculs effectués par le GT MATAE pour un ballon de 50 L (temps de séjour de 24 h soit 86400 s) selon les équations 2 (Mg) et 3 (autres éléments constitutifs de l'anode) sont détaillés en annexe 1.

3.3. Relargage des éléments constitutifs de l'anode mesuré dans l'eau des ballons

3.3.1. Conditions d'essais

Les essais (trois répétitions par type de ballon) ont été réalisés sur les ballons BAL1 et BAL2 mentionnés ci-dessus (cf. 3° du § 3.2.2).

L'eau d'essai est préparée à partir de l'eau de distribution du réseau public. Elle est enrichie en chlorure de sodium, nitrate de sodium et adoucie pour satisfaire les critères du Tableau 3. Si une évolution de pH supérieure à 0,2 unité par rapport au pH initial est constaté une correction est effectuée dans la bâche de stockage d'eau par adjonction de CO_2.

Tableau 3 : critères de qualité de l'eau d'essais

Paramètre	Critère
TH (dureté calcique et magnésique)	≤ 15°F
TAC (Alcalinité)	≥ 10°F
Nitrates	25 mg.L^{-1} ≤ NO3- ≤ 50 mg.L^{-1}
Conductivité	1000 ± 100 µS.cm-1 à 20°C 1116 ± 112 µS.cm-1 à 25°C
pH	pH d'équilibre +/- 0.2 (à la température initiale de l'eau d'essai). Adjonction de CO2 si la variation de pH est > 0,2

Les conditions de renouvellement et d'analyse d'eau sont mentionnées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Mode opératoire pour les analyses d'eau

Capacité ballon	Jour essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50 L	Renouvellement d'eau de stockage dans bâche	x			x					x			x
	Renouvellement d'eau du ballon	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
	Prélèvement (P) et analyse (A) d'eau du ballon	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
	Temps séjour espèce dans l'eau	0h	24 h	24 h	24 h	24 h			72 h	24 h	24 h	24 h	24 h

L'eau témoin est prélevée et analysée au jour N. Cette eau est ensuite prélevée et analysée au jour N+1 dans le produit après un temps de contact de 24h à 60°C[7] dans le ballon (eau d'essai). Pour comparer les caractéristiques de l'eau prélevée dans le ballon avec celle de l'eau témoin, les données du témoin au jour N ont été décalées au jour N+1 dans le tableau de résultats du pétitionnaire.

Les paramètres chimiques figurant dans le tableau 5 ont été recherchées dans l'eau de remplissage (témoin) et dans l'eau de soutirage après chauffage à 60°C (eau d'essais).

Tableau 5 : Paramètres de suivi de la qualité de l'eau

Paramètre	Unité	Méthode d'analyse	Analyse réalisée par le pétitionnaire	Analyse réalisée par un laboratoire extérieur accrédité COFRAC	
				LoQ	Incertitude
Conductivité	$\mu S.cm^{-1}$	NF EN 27888	X (Analyseur de paillasse)	5	9 %
pH		NF EN ISO 10523	X	2	4 %
Titre alcalimétrique complet (TAC)	°F	NF EN ISO 9963-1		0,5	25 %
Titre hydrotimétrique (TH)	°F	Méthode interne		0,5	-
Calcium (Ca)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 14911		1	25 %
Magnésium (Mg)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 14911		0,5	20 %
Sodium (Na)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 14911		0,5	31 %
Potassium (K)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 14911		0,5	25 %
Chlorures (Cl^-)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 10304-1		0,5	19 %
Sulfates (SO_4^{2-})	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 10304-1		0,5	19 %
Nitrates (NO_3^-)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 10304-1		0,5	21 %
Nitrites (NO_2^-)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 10304-1		0,01	39 %
Ammonium (NH_4^+)	$mg.L^{-1}$	NF EN ISO 15923-1		0,05	30 %
Aluminium (Al)	$\mu g.L^{-1}$	NF EN ISO 17294-2		1	25 %
Manganèse (Mn)	$\mu g.L^{-1}$	NF EN ISO 17294-2		0,05	35 %
Zinc (Zn)	$\mu g.L^{-1}$	NF EN ISO 17294-2		0,9	25 %
Nickel (Ni)	$\mu g.L^{-1}$	NF EN ISO 17294-2		0,2	21 %
Fer (Fe)	$\mu g.L^{-1}$	NF EN ISO 17294-2		1	25 %
Cuivre (Cu)	$\mu g.L^{-1}$	NF EN ISO 17294-2		0,15	22 %

[7] La température de régulation des ballons est de 65 ± 3°C.

Le GT MATAE considère que les caractéristiques de l'eau utilisée pour les essais sont conformes aux recommandations de l'AST n° 2024-AST-0027 (TH, TAC et nitrates dans les limites recommandées et eau légèrement calcifiante à 20°C).

La température de 60°C est la température maximale de l'eau chaude sanitaire (ECS) pour éviter les brûlures et même si le dispositif de chauffage peut monter plus haut, de l'eau d'appoint est ajoutée en permanence faisant diminuer la température de l'eau. Par ailleurs, plus l'eau sera chaude, plus elle pourra devenir fortement calcifiante et ainsi entartrer très rapidement les parois du ballon. Pour les essais de migration, cet entartrage excessif peut réduire anormalement la migration et donc minimiser l'effet de la protection cathodique sur celle-ci.

Les conditions de mesure « pire cas » (temps de séjour de l'eau dans le ballon et conductivité de l'eau) sont considérées comme acceptables par le GT MATAE. Les conditions d'essais peuvent être qualifiées comme extrêmes vis-à-vis du relargage des anodes (conductivité et corrosivité de l'eau d'essais en limite de référence de qualité de l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié).

3.3.2. Résultats des essais de suivi du relargage des éléments constitutifs de l'anode dans l'eau des ballons

Le GT MATAE note que pour le Fe et le Ni, les valeurs aberrantes de l'essai 2 du ballon 2, probablement liées au relargage d'un acier inoxydable présent dans l'installation d'essais, n'ont pas été censurées pour les calculs.

Le GT MATAE a recalculé les valeurs de migration en soustrayant des résultats des analyses effectuées sur les eaux d'essais, ceux obtenus sur les eaux témoins afin d'évaluer uniquement l'impact de la protection cathodique sur la qualité de l'eau. Cependant cette soustraction entraîne des résultats négatifs principalement pour le Zn, les valeurs des eaux témoins étant très proches (voire supérieures) à celles des eaux d'essais. En effet, en sus du « bruit de fond » de l'eau, les métaux peuvent précipiter au fond et sur les parois du ballon et ne pas être présents dans la phase liquide prélevée et analysée. Ce possible biais avait été signalé dans l'expertise de 2023 (Anses, 2023).

Par ailleurs, seuls les résultats obtenus après un temps de séjour de 24 heures ont été pris en compte dans les calculs du GT MATAE, les résultats du jour 8 après 72 heures de temps de séjour ont été supprimés. En effet, après des périodes de stagnations prolongées, il est conseillé de purger son ballon si ce dernier est muni d'une protection cathodique (Anses, 2022).

Les résultats des essais exploités par le GT MATAE sont détaillés en annexe 2 (cf. Tableau 2).

3.3.3. Résultats des essais de suivi des paramètres azotés

Dans l'avis n° 2021-SA-0186 (Anses, 2022), l'Anses avait souligné la formation vraisemblable dans les ballons d'eau chaude de nitrites et/ou d'ammonium après des périodes de stagnation prolongée, selon la teneur en nitrates de l'eau alimentant le ballon et la durée de stagnation et avait recommandé le suivi des paramètres azotés dans l'AST n° 2024-AST-0027 (Anses, 2024).

Le GT MATAE conclut que la formation d'ammoniaque n'a pas été mise en évidence et que seules des concentrations de nitrites inférieures à la limite de qualité réglementaire de l'EDCH (0,50 $mg.L^{-1}$, cf. arrêté du 11 janvier 2007 modifié) ont été détectées (une seule mesure à

0,32 mg.L^{-1} et 0,056 mg.L^{-1} en moyenne). Dans les conditions normales d'utilisation de ballons sous protection cathodique, il n'y a donc pas de risque de dépassement.

3.4. Analyse statistique des résultats de relargage des éléments constitutifs de l'anode dans l'eau des ballons mesurés et estimés par calcul

Les valeurs minimales, maximales, médianes et moyennes ont été calculées par le pétitionnaire pour chaque élément constitutif de l'anode en regroupant les résultats des deux ballons.

Un indicateur « écart à la limite » a été utilisé par le pétitionnaire pour pondérer le risque sanitaire (cf. Équation 4).

Pour chaque élément la limite est la $CMT_{robinet,\ metallique}$ de la Décision d'exécution (UE) 2024/367 : 100 µg/L pour l'Al, 25 µg/L pour le Mn, 2250 µg/L pour le Zn, 100 µg/L pour le Fe, 1800 µg/L pour le Cu et 10 µg/L pour le Ni. Pour rappel, il n'y a pas de $CMT_{robinet,\ metallique}$ fixée pour le Mg mais une limite supérieure de sécurité (LSS), valable pour toute personne au-delà de 4 ans, de 250 mg/j existe (Anses, 2021). L'apport en Mg par les anodes étant dans le « pire cas » de l'ordre du mg/L, il n'a pas été calculé d'écart à la limite par le pétitionnaire.

$$Ecart\ \text{à}\ la\ limite = 100\ (\ 1 - \frac{[MOYENNE_{migration} - MOYENNE_{témoin}]}{LIMITE})$$ **Équation 4**

Le GT MATAE suggère de remplacer le terme « écart à la limite » peu explicite par le terme « apport moyen à la $CMT_{robinet,\ métallique}$ ».

$$Apport\ moyen\ \text{à}\ la\ CMT_{robinet,métallique} = 100\ (\frac{[MOYENNE_{migration} - MOYENNE_{témoin}]}{CMT_{robinet,métallique}})$$ **Équation 5**

Les valeurs du courant de dissolution de l'anode ($i_{auto\text{-}corrosion} + i_{pc}$) et donc les valeurs théoriques de relargage des éléments constitutifs des anodes de Mg dans l'eau des ballons évoluent peu sur la durée de l'essai (cf. annexe 1). Ainsi les résultats ont été évalués par le GT MATAE à partir de valeurs moyennes calculées sur toute la durée de l'essai pour les données théoriques comme pour les valeurs mesurées (cf. Tableaux 1 et 2 de l'annexe 2).

Le Tableau 3 de l'annexe 2 présente les apports moyens calculés à partir des valeurs théoriques (Tableaux 1) et mesurées (Tableau 2).

Pour les deux ballons, les valeurs maximales et moyennes mesurées sur l'ensemble des périodes de migration sont inférieures à la $CMT_{robinet,\ metallique}$ pour tous les éléments constitutifs de l'anode (cf. Tableau 2 de l'annexe 2).

Pour le Mg, les valeurs moyennes mesurées et estimées sont du même ordre de grandeur, ce qui témoigne de la représentativité de l'essai. Toutefois, des écarts assez importants existent entre les minimums et maximums, ce qui peut s'expliquer par le « bruit de fond » de l'eau témoin (près de 10 fois plus de Mg dans l'eau témoin que ce qui est relargué par l'anode).

Pour l'Al les valeurs mesurées sont sensiblement plus faibles que les valeurs théoriques, ce qui peut s'expliquer par la précipitation d'hydroxyde d'aluminium sur les anodes où le pH est plus faible que dans l'eau des ballons.

Pour le Zn et le Mn, les valeurs de migration sont plus faibles que celles estimées, ce qui peut s'expliquer par leur précipitation dans le ballon. Ainsi, les valeurs calculées représentent le « pire cas » par rapport aux valeurs mesurées.

Pour le Zn, les valeurs mesurées sont très faibles par rapport au « bruit de fond « de l'eau d'essai et très éloignées de la $CMT_{robinet,\ métallique}$.

Pour le Ni, le Fe et le Cu, les migrations mesurées sont nettement plus élevées que les valeurs théoriques mais restent très inférieures aux $CMT_{robinet,\ métallique}$. Pour le Fe et le Ni, certains résultats élevés des mesures de migrations sont liés à une pollution par des particules d'acier inoxydable, ce qui impacte la moyenne mesurée.

Pour le Mn, il est oxydé rapidement par l'oxygène dissous dans les eaux dont le pH est supérieur à 8, ce qui est le cas de l'eau d'essai. Donc la migration à prendre en compte est la valeur calculée et non celle qui est mesurée.

3.5. Conclusions du GT MATAE

Les valeurs de migration mesurées des éléments constitutifs des anodes sont cohérentes avec les valeurs de relargage calculées à partir du courant de dissolution de l'anode. Les valeurs théoriques peuvent être considérées comme représentatives du « pire cas » et confirment l'impact limité de l'utilisation des anodes de Mg sur la qualité de l'eau des ballons.

Sur la base des éléments présentés dans le dossier et des calculs effectués, le GT MATAE considère que les trois alliages de magnésium, d'aluminium et de zinc (AZ63, AZ31 et AZ61) conformes à la norme NF EN 12438 peuvent être utilisés pour la fabrication d'anodes sacrificielles pour la protection cathodique des ballons d'eau chaude sanitaire en acier émaillé ou revêtus de résine époxydique du moment que le revêtement du ballon est conforme à la norme DIN 4753-3[8], et pour les chauffe-eaux en acier inoxydable dont seul le fourreau émaillé isolé est sous protection cathodique.

Par ailleurs, il n'y a pas lieu de mettre de restriction d'utilisation pour les ballons de capacité inférieure à 50 L. En effet, même si tous les calculs ont été réalisés avec des ballons de 50 L et un temps de séjour de 24 heures, pour les ballons de 10 L avec un temps de séjour 12 heures, le courant de protection cathodique étant proportionnel à la surface à protéger qui sera plus petite, les valeurs de relargage estimées à partir du courant de corrosion seront de l'ordre de 85 % de celles qui ont été calculées pour les ballons de 50 L (cf. annexe 4).

4. CONCLUSION AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail adopte les conclusions du GT « MATAE » relatives à l'évaluation d'un dossier visant à autoriser l'usage de différents alliages pour la fabrication d'anodes sacrificielles de magnésium (Mg) assurant la protection cathodique de systèmes de production et/ou de stockage d'eau chaude sanitaire.

Elisabeth Claverie de Saint Martin

[8] Un projet de norme (PR NF EN 12897-2) est en cours de conception.

MOTS-CLÉS

Eau destinée à la consommation humaine (EDCH), eau chaude sanitaire (ECS), matériaux au contact de l'EDCH (MCDE), anodes sacrificielles en magnésium, acier émaillé, acier revêtu de résine époxydique, acier inoxydable, protection cathodique contre la corrosion.

Drinking water (DW), domestic hot water (DHW), materials in contact with drinking water (DWCMs), magnesium sacrificial anodes, enamelled steel, epoxy resin coated steel, stainless steel, cathodic protection against corrosion.

BIBLIOGRAPHIE

Publications

4 MSi. 2021. Common Approach. Acceptance of metallic materials used for products in contact with drinking water. Part A – Methodologies for testing and accepting compositions to be included in the positive list of compositions for metallic materials.

http://www.umweltbmweltbundesamt.de/system/files/medien/5620/dokumente/ca_mm_part_a_-_methodologies_for_testing_and_accepting_compositions_july_2021_rev04_version_2.pdf

Anses. 2021. Avis et rapport relatifs aux références nutritionnelles en vitamines et minéraux. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf

Anses. 2022. Avis relatif à la demande d'inscription des anodes sacrificielles en magnésium sur la "liste de compositions" figurant à l'annexe 1 de l'arrêté du 25 juin 2020 relatif aux matériaux et produits métalliques destinés aux installations de production, de distribution et de conditionnement qui entrent en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine. Saisine n° 2021-SA-0186. Maisons-Alfort : Anses, 24 p.

http://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2021SA0186.pdf.

Anses. 2023. Note d'appui scientifique et technique (AST) relatif à la poursuite d'instruction d'une demande d'autorisation de mise sur le marché d'anodes sacrificielles en magnésium pour la protection cathodique contre la corrosion des appareils de production et/ou de stockage d'eau chaude sanitaire. Saisine n° 2022-AST-0185. Maisons-Alfort : Anses, 22 p.

http://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2022AST0185.pdf.

Anses. 2024. Note d'appui scientifique et technique (AST) relatif à l'évaluation des essais expérimentaux menés par GIFAM-UNICLIMA en vue de poursuivre l'instruction de son dossier de demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) d'anodes sacrificielles en magnésium (Mg) pour la protection cathodique des systèmes de production d'eau chaude sanitaire. Saisine n° 2024-AST-0027. Maisons-Alfort : Anses, 13 p. Non publiée.

DGS. 1999. Guide pratique de la DGS de mars 1999 pour la constitution des dossiers relatifs à la conformité sanitaire des matériaux placés en contact avec les eaux d'alimentation.

Normes

DIN 4753-3. Chauffe-eau, installations de chauffe-eau pour eau potable et réservoir-chauffe-eau pour eau potable - Partie 3 : Protection contre la corrosion côté eau par émaillage et protection cathodique - Exigences et essais.

NF EN 12438. Magnésium et alliages de magnésium – Alliages de magnésium pour anodes coulées.

NF EN 27888. Qualité de l'eau - Détermination de la conductivité électrique.

NF EN ISO 10523. Qualité de l'eau - Détermination du pH.

NF EN ISO 9963-1. Qualité de l'eau - Détermination de l'alcalinité - Partie 1 : détermination de l'alcalinité totale et composite

NF EN ISO 14911. Qualité de l'eau - Dosage par chromatographie ionique, des ions Li^+, Na^+, NH^{4+}, K^+, Mn^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+} et Ba^{2+} dissous - Méthode applicable pour l'eau et les eaux résiduaires.

NF EN ISO 10304-1. Qualité de l'eau - Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide - Partie 1 : dosage du bromure, chlorure, fluorure, nitrate, nitrite, phosphate et sulfate.

NF ISO 15923-1. Qualité de l'eau - Détermination de paramètres sélectionnés par des systèmes d'analyse discrète - Partie 1 : ammonium, nitrate, nitrite, chlorure, orthophosphate, sulfate et silicate par détection photométrique.

NF EN ISO 17294-2. Qualité de l'eau - Application de la spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) - Partie 2 : dosage des éléments sélectionnés y compris les isotopes d'uranium.

PR NF EN 12897-2 (projet du 21/09/2023) : Alimentation en eau - Partie 2 : Protection contre la corrosion par émaillage et protection cathodique - Exigences et essais.

https://norminfo.afnor.org/search?term=EN+12897-2

Législation et réglementation

Décision d'exécution (UE) 2024/365 de la Commission du 23 janvier 2024 portant modalités d'application de la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les méthodes d'essai et d'acceptation des substances de départ, des compositions et des constituants à inscrire sur les listes positives européennes.

Décision d'exécution - 2024/365 - EN - EUR-Lex

Décision d'exécution (UE) 2024/367 de la Commission du 23 janvier 2024 portant modalités d'application de la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en établissant les listes positives européennes des substances de départ, des compositions et des constituants dont l'utilisation est autorisée pour la fabrication de matériaux ou de produits entrant en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:32024D0367

Arrêté du 25 juin 2020 relatif aux matériaux et produits métalliques destinés aux installations de production, de distribution et de conditionnement qui entrent en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine.

https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000042045659/

Arrêté du 11 janvier 2007 modifié relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000465574/

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2026). Appui scientifique et technique (AST) relatif à la demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) des anodes sacrificielles de magnésium destinées à la protection cathodique des systèmes de production d'eau chaude sanitaire. Saisine 2026-AST-0008. Maisons-Alfort : Anses, 19 p.

ANNEXE 1 – ESTIMATION PAR MODÉLISATION DU RELARGAGE DES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DES ANODES DE Mg DANS L'EAU DES BALLONS

	Jour	$i_{pc}+i_{auto-corrosion}$ (mA)	Mg ($mg.L^{-1}$)	Al ($\mu g.L^{-1}$)	Zn ($\mu g.L^{-1}$)	Mn ($\mu g.L^{-1}$)	Cu ($\mu g.L^{-1}$)	Fe ($\mu g.L^{-1}$)	Ni ($\mu g.L^{-1}$)
BAL 1	1	5	1,09	87,1	49,7	12,4	0,622	0,249	0,025
	2	4,7	1,02	81,8	46,8	11,7	0,585	0,234	0,023
	3	4,5	0,98	78,4	44,8	11,2	0,560	0,224	0,022
	4	4,4	0,96	76,6	43,8	10,9	0,547	0,219	0,022
	5	4,6	1,00	80,1	45,8	11,4	0,572	0,229	0,023
	6	4,6	1,00	80,1	45,8	11,4	0,572	0,229	0,023
	7	4,6	1,00	80,1	45,8	11,4	0,572	0,229	0,023
	9	4,6	1,00	80,1	45,8	11,4	0,572	0,229	0,023
	10	4,6	1,00	80,1	45,8	11,4	0,572	0,229	0,023
	11	4,6	1,00	80,1	45,8	11,4	0,572	0,229	0,023
	12	4,3	0,94	74,9	42,8	10,7	0,535	0,214	0,021
	Moyenne		1,00	79,9	45,7	11,4	0,571	0,228	0,023
BAL 2	1	5,7	1,24	99,2	56,7	14,2	0,709	0,283	0,028
	2	3,3	0,71	56,8	32,5	8,1	0,406	0,162	0,016
	3	3,1	0,67	53,6	30,6	7,7	0,383	0,153	0,015
	4	3,3	0,71	56,8	32,5	8,1	0,406	0,162	0,016
	5	2,9	0,63	50,4	28,8	7,2	0,360	0,144	0,014
	6	3,0	0,65	52,0	29,7	7,4	0,371	0,149	0,015
	7	3,0	0,65	52,0	29,7	7,4	0,371	0,149	0,015
	9	3,2	0,70	56,0	32,0	8,0	0,400	0,160	0,016
	10	3,2	0,70	56,0	32,0	8,0	0,400	0,160	0,016
	11	3,2	0,70	56,0	32,0	8,0	0,400	0,160	0,016
	12	3,1	0,67	53,6	30,6	7,7	0,383	0,153	0,015
	Moyenne		0,73	58,4	33,4	8,3	0,417	0,167	0,017

ANNEXE 2 – EXPLOITATION DES DONNÉES DU RAPPORT DU PÉTITIONNAIRE PAR LE GT MATAE

Tableau 1 – Estimation théorique par modélisation à partir de la loi de Faraday du relargage des éléments constitutifs des anodes de Mg dans l'eau des ballons

		Mg ($mg.L^{-1}$)	Al ($\mu g.L^{-1}$)	Zn ($\mu g.L^{-1}$)	Mn ($\mu g.L^{-1}$)	Ni ($\mu g.L^{-1}$)	Fe ($\mu g.L^{-1}$)	Cu ($\mu g.L^{-1}$)
Bal1 Théorique	**Moyenne**	1,00	79,95	45,70	11,39	0,02	0,23	0,57
	Minimum	0,94	74,90	42,80	10,70	0,02	0,21	0,54
	Maximum	1,09	87,10	49,70	12,40	0,03	0,25	0,62
Bal2 Théorique	**Moyenne**	0,73	58,40	33,37	8,35	0,02	0,17	0,42
	Minimum	0,63	50,40	28,80	7,20	0,01	0,14	0,36
	Maximum	1,24	99,20	56,70	14,20	0,03	0,28	0,71

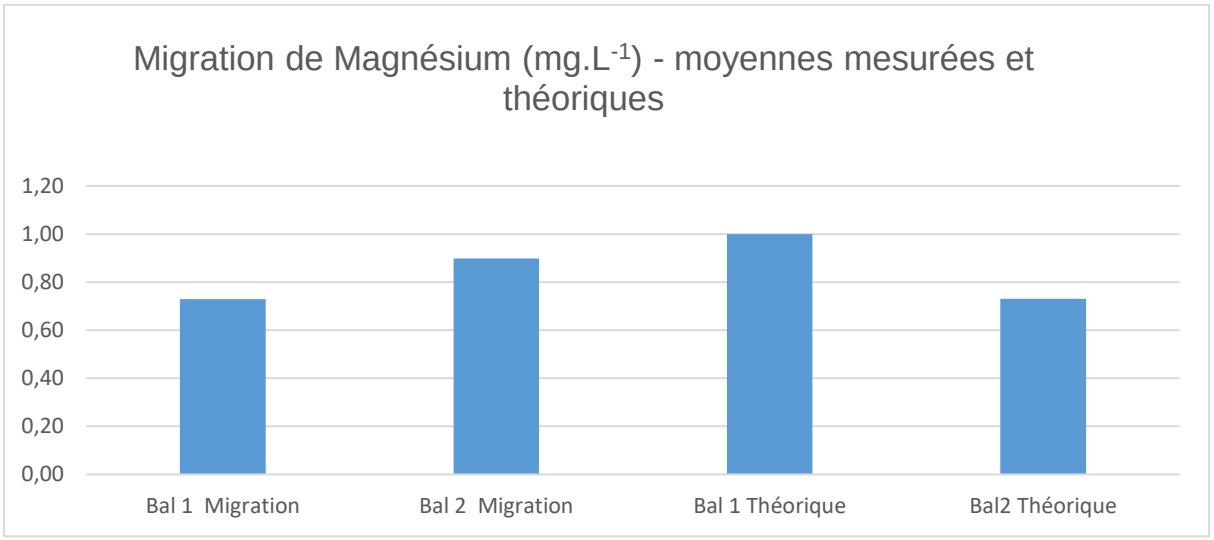
Tableau 2 – Résultats des essais de suivi du relargage des éléments constitutifs de l'anode dans l'eau des ballons

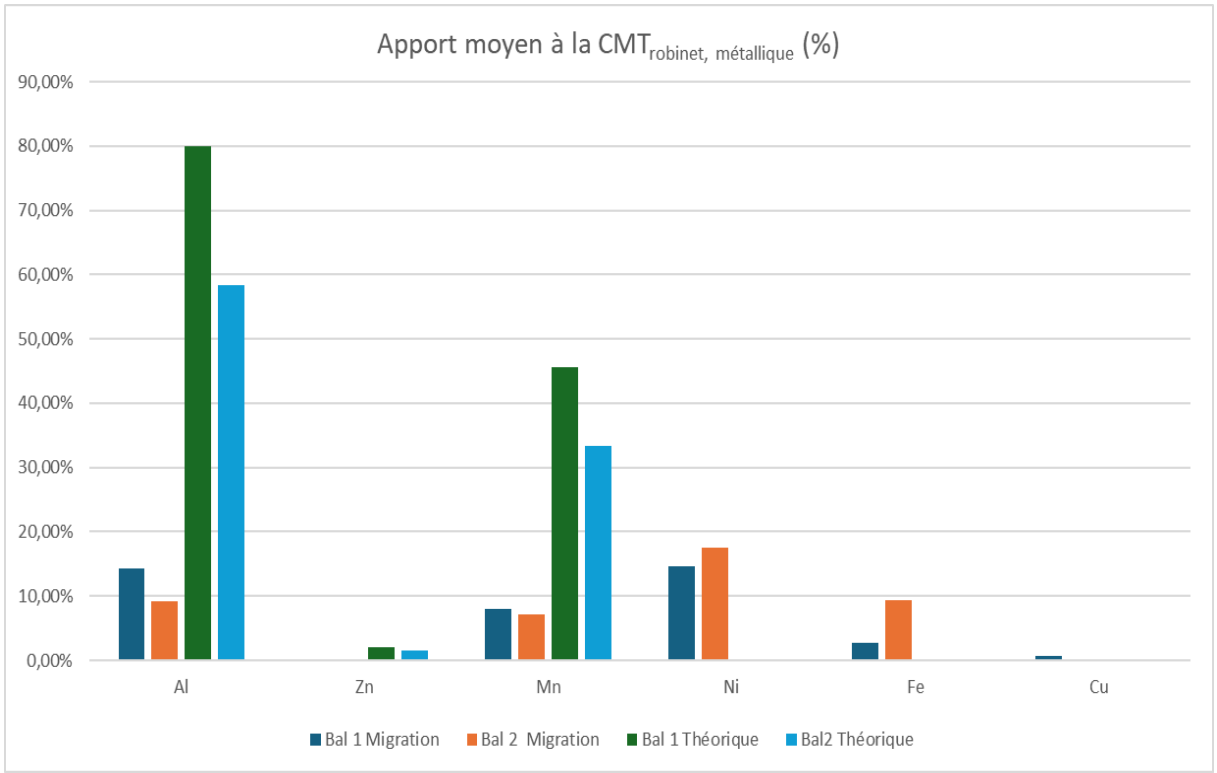
		Mg ($mg.L^{-1}$)	Al ($\mu g.L^{-1}$)	Zn ($\mu g.L^{-1}$)	Mn ($\mu g.L^{-1}$)	Ni ($\mu g.L^{-1}$)	Fe ($\mu g.L^{-1}$)	Cu ($\mu g.L^{-1}$)
Bal1 Migration	**Moyenne**	0,7	14,4	2,4	2,0	1,5	2,7	12,0
	Minimum	0,0	0,0	-25,8	-0,6	0,0	-2,7	0,0
	Maximum	1,3	25,0	22,9	5,3	2,5	8,3	20,1
Bal2 Migration	**Moyenne**	0,9	9,2	-11,7	1,8	1,8	9,3	3,8
	Minimum	0,0	0,0	-43,4	0,0	0,0	-3,0	0,0
	Maximum	1,5	12,3	21,1	2,6	2,4	22,7	5,9

Tableau 3 – Résultats de l'apport moyen à la $CMT_{robinet,\ métallique}$ (%) des éléments constitutifs de l'anode relargués

	Mg	Al	Zn	Mn	Ni	Fe	Cu
Bal1 Migration	NC	14,37%	0,11%	8,04%	14,56%	2,74%	0,67%
Bal2 Migration	NC	9,22%	-0,52%	7,13%	17,54%	9,29%	0,21%
Bal1 Théorique	NC	79,95%	2,03%	45,56%	0,23%	0,23%	0,03%
Bal2 Théorique	NC	58,40%	1,48%	33,38%	0,17%	0,17%	0,02%
$CMT_{robinet,\ métallique}$ (µg/L)	NC	**100**	**2250**	**25**	**10**	**100**	**1800**

ANNEXE 3 – REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES DONNÉES DE L'ANNEXE 2





ANNEXE 4 – TRANSPOSITION DE L'ESTIMATION THÉORIQUE PAR MODÉLISATION DU RELARGAGE DES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DES ANODES DE Mg DANS L'EAU DES BALLONS RÉALISÉE POUR DES BALLONS DE 50 L AUX BALLONS DE 10 L

Un ballon de 50 L sphérique (50000 cm^3, $V = 4/3\pi R^3$) aura un rayon de 22,8 cm et donc une surface ($S = 4\ \pi\ R^2$) de 6532,5 cm^2.

Un ballon de 10 L sphérique (10000 cm^3) aura un rayon de 13,36 cm et donc une surface de 2243 cm^2.

Un ballon de 10 L aura une surface 0,34 fois plus petite qu'un ballon de 50 L.

En considérant que le courant de dissolution de l'anode est proportionnel à la surface du ballon à protéger, les valeurs de relargage estimées à partir du courant de dissolution de l'anode seront 0,85 fois plus faibles (x 0,34 pour tenir compte de la surface à protéger, x 5 pour tenir compte du volume, x 0,5 pour tenir compte du temps de séjour).