

# Étude de la problématique de qualité d'eau des chaudières à condensation aluminium-silicium

Ing. T. MARLIERE  
Ing. P. THIRY  
Ing. G. VANDERVEKEN

ECAM – Bruxelles

*La mise en place de chaudières à condensation à corps de chauffe en aluminium-silicium est de plus en plus fréquente dans les bâtiments tertiaires. Ces chaudières, intéressantes techniquement et économiquement, nécessitent une maintenance particulière qui, si elle n'est pas correctement effectuée, risque d'endommager les composants de l'installation et entraîner ainsi des coûts élevés de remplacement.*

*Cet article a pour but de sensibiliser le lecteur à la problématique d'incompatibilité entre un circuit en acier et une chaudière à condensation en aluminium-silicium. Une solution pour pallier cette problématique sera développée en fin d'article afin d'assurer la pérennité de l'ensemble de l'installation.*

*Mots-clefs: chaudière aluminium-silicium, qualité d'eau, maintenance, chaudière à condensation, déminéralisation.*

*The installation of aluminium-silicon boilers is becoming more common in tertiary buildings. These boilers, which are technically and economically interesting, require special maintenance which, if not properly carried out, may damage the components of the installation and thus lead to high replacement costs.*

*This article aims to make the reader aware of the problem of incompatibility between steel circuit and an aluminium silicon condensing boiler. A solution to overcome this problem will be developed at the end of this article to ensure the sustainability of the entire installation.*

*Keywords: Aluminium-silicon boiler, water quality, maintenance, condensing boiler, demineralisation.*

## 1. Les chaudières à condensation

### 1.1. Principe de la chaudière à condensation

La technologie des chaudières à condensation a été développée pour maximiser le rendement thermique des chaudières. Cette maximisation est possible grâce à une diminution de l'écart de température entre les gaz brûlés en sortie et l'ambiance ainsi que l'utilisation du pouvoir calorifique supérieur (condensation de la vapeur d'eau).

Ces chaudières deviennent aujourd'hui la norme. Un schéma de principe d'une chaudière à condensation est illustré ci-dessous (figure 1).

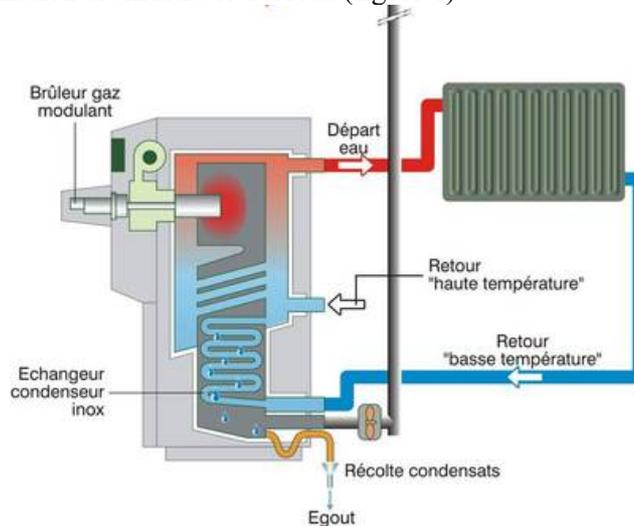


Figure 1: Schéma de principe d'une chaudière à condensation. [1]

### 1.2. Intérêt envers les chaudières à condensation en fonte d'aluminium

Il existe deux matériaux pouvant constituer le corps de chauffe des chaudières à condensation : l'acier inoxydable et un alliage d'aluminium-silicium.

Les chaudières aluminium-silicium ont différents avantages qui font d'elles une alternative intéressante lors de l'achat et de l'installation :

- Une meilleure réactivité thermique.
- Un poids et volume d'échangeur plus faible facilitant la manutention.
- Une meilleure conductivité thermique, minimisant les pertes.
- Une meilleure recyclabilité du matériau constituant le corps de chauffe.

Néanmoins, le principal avantage du corps de chauffe en aluminium-silicium est son prix d'achat qui est moins élevé que le corps de chauffe en acier inoxydable pour une puissance inférieure à 650 kW. Cette différence est illustrée à la figure 2.

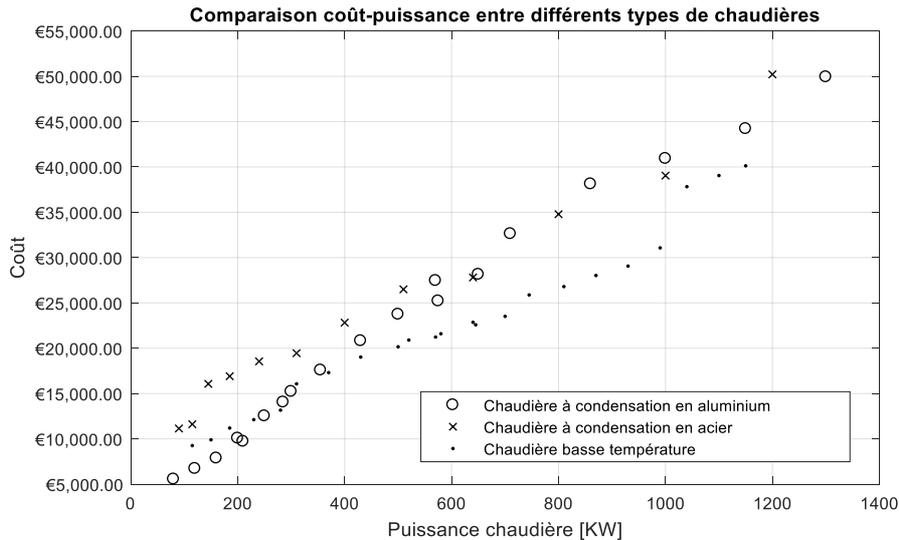


Figure 2: Étude comparative de coût entre différentes gammes de chaudières.

## 2. Exigences techniques propres à l'aluminium

### 2.1. Paramètres exigés par les fabricants

Les chaudières à condensation en aluminium ont des exigences très précises en ce qui concerne la qualité de l'eau parcourant la chaudière. Ces paramètres varient légèrement en fonction des fabricants et assurent un bon fonctionnement de la chaudière. Le non-respect de cette qualité d'eau va entraîner la dégradation rapide du corps de chauffe en aluminium, par corrosion localisée et/ou généralisée. La dégradation du corps de chauffe par des mécanismes de corrosion entraîne son percement.

Les différentes valeurs de qualité d'eau à respecter sont proposées ici à titre d'exemple classées par ordre décroissant d'importance [2][5]:

- Un pH compris entre 7 et 8,5 unités.
- Une conductivité à 25°C inférieure à 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Une concentration en chlorures inférieure à 150 mg/l.
- Une dureté inférieure à 0,2°F pour une installation de plus de 550kW.

## 2.2. Conséquences d'une mauvaise qualité d'eau

L'analyse de plusieurs corps de chauffe ayant percé a montré que la forme de corrosion généralement responsable du percement est une corrosion localisée dite « par piqûre ». Ce phénomène se déroule lorsqu'un défaut dans la couche d'oxyde d'aluminium (hautement adhérent à la paroi) apparaît. La piqûre s'amorce alors lorsque le pH de l'eau est trop élevé, qu'il y a présence d'oxygène ainsi que de chlorures en solution. Une couche de complexe soluble va se former à la place de la couche d'aluminium passivé et former un complexe soluble  $AlCl_4^-$ . Les ions  $Al^{3+}$  vont s'hydrolyser et ainsi acidifier l'espace confiné de la piqûre. Ceux-ci, en contact avec le milieu extérieur de la piqûre, à un pH moins acide, vont précipiter en  $Al(OH)_3$  et ainsi contribuer au confinement de la piqûre et donc à l'aggravation du phénomène.

La mécanique de cette corrosion locale est schématisée ci-dessous. Une fois ce phénomène amorcé et dans le cas où une piqûre reste active, le percement peut arriver rapidement.

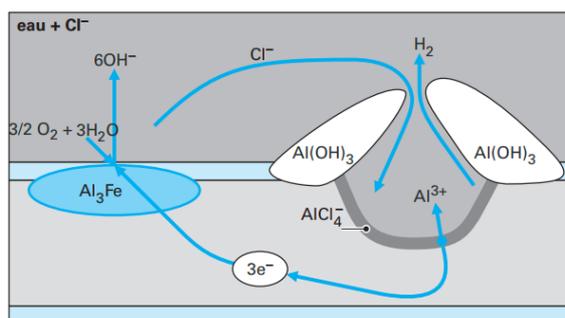


Figure 3 : Corrosion par piqûre [2]

Le résultat d'une corrosion de ce type est illustré ci-dessous (figure 4). Notons que d'autres produits de corrosion fortement adhérents à la paroi peuvent faire office de confinement à la piqûre à la place de l'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$ .



Figure 4 : Piqûration d'un corps de chauffe de chaudière aluminium-silicium. Corrosion généralisée de l'aluminium et confinement de la piqûre par les oxydes d'aluminium. Illustration de l'auteur.

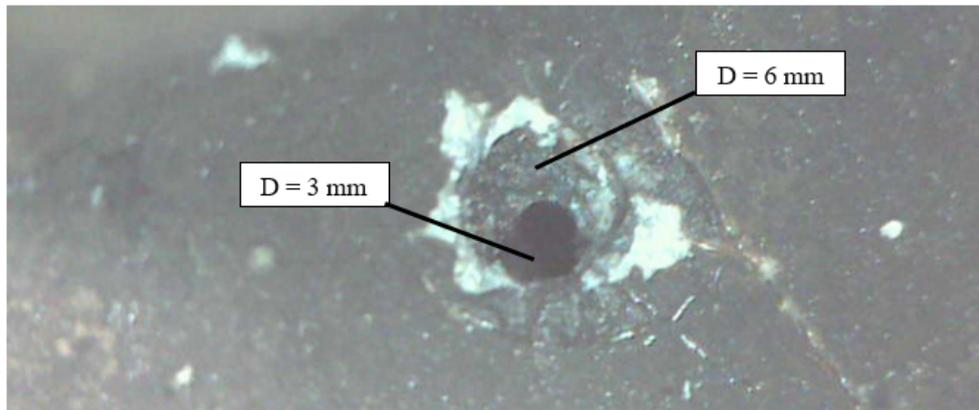


Figure 5 : Piqûration d'un corps de chauffe de chaudière aluminium-silicium. Corrosion généralisée de l'acier du circuit sous forme de magnétite s'étant déposée dans le corps de chauffe. Confinement par cette même magnétite de la piqûre. Illustration de l'auteur.

### 2.3. Autres catalyseurs de corrosion

Outre la problématique du pH, différents éléments sont également des facteurs de risque entraînant ces corrosions par piqûre :

#### *La conductivité du fluide caloporteur*

La corrosion est un phénomène électrochimique, la vitesse de corrosion va augmenter proportionnellement à la conductivité. Il y a donc lieu de diminuer cette conductivité pour réduire la vitesse de corrosion.

#### *La présence d'ions catalyseurs :*

En fonction des ions présents dans le circuit, ceux-ci peuvent jouer le rôle de catalyseur à la réaction de corrosion.

Enfin, notons que d'autres paramètres liés à la qualité d'eau, tels que la dureté, peuvent être responsables d'une dégradation de la chaudière. Nous ne nous attarderons dans cet article que sur les conséquences du pH.

### 3. La problématique des chaudières à condensation à corps de chauffe en aluminium-silicium

Le chapitre 2 a traité de l'importance de respecter les paramètres de qualité d'eau propres aux chaudières aluminium-silicium. Ce chapitre va illustrer les problèmes liés au maintien de cette qualité d'eau dans un circuit caloporteur réel.

#### 3.1. L'incompatibilité au niveau du pH de l'eau

En fonction du fabricant de chaudières et des différentes normes existantes, le graphique ci-dessous illustre les différents intervalles de pH assurant le bon fonctionnement des différentes chaudières et d'un circuit classiquement en acier, en minimisant le risque de corrosion.

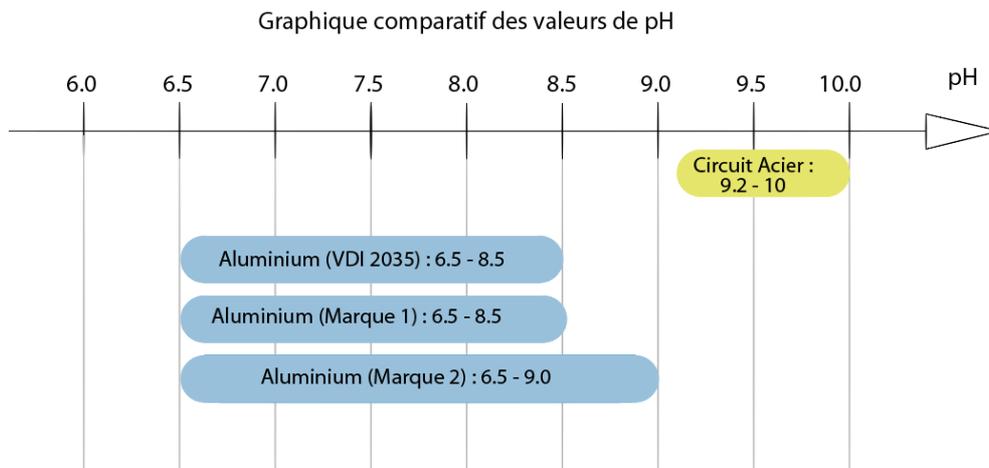


Figure 6 : Comparaison du pH de différents fabricants de chaudières aluminium-silicium et normes. Illustration de l'auteur. [5]

Il apparaît directement que les valeurs de pH d'un circuit en acier ne sont pas compatibles avec les valeurs de pH pour une chaudière en aluminium. Ce problème d'incompatibilité au niveau du pH est l'élément principal lié à la problématique d'incompatibilité des chaudières en aluminium-silicium avec un circuit de tuyauteries en acier.

### 3.2. Conséquences au niveau de la corrosion des métaux

Pour développer plus en détail cette incompatibilité, le diagramme de Pourbaix ci-dessous (figure 7) montre qu'à un pH supérieur à 8,5 unités, l'aluminium subit une forme de corrosion dans le domaine de stabilité de l'eau (zone comprise entre les droites (a) et (b) de la figure 7). La chaudière va ainsi être corrodée et a une plus grande probabilité de se dégrader localement et/ou globalement jusqu'à percement.

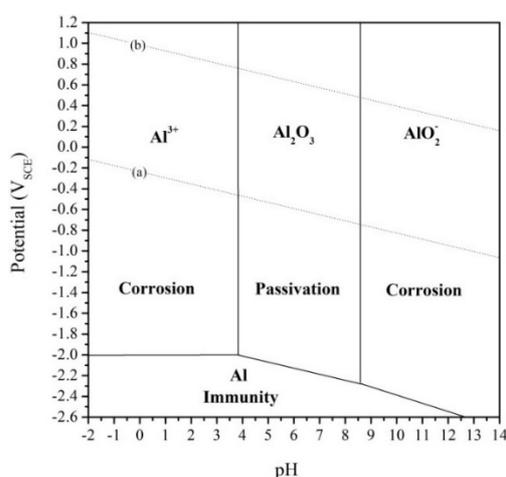


Figure 7 – Diagramme de Pourbaix de l'aluminium [3]

D'un point de vue de l'acier, les ions  $\text{Fe}^{2+}$  sont mis en solutions à une valeur de pH fonction de la concentration en fer déjà en solution. Une valeur de concentration en fer dans un circuit caloporteur classique se situe aux alentours de 0,05 mg/l, ce qui implique une corrosion à une valeur de pH en dessous de 9,2 unités.

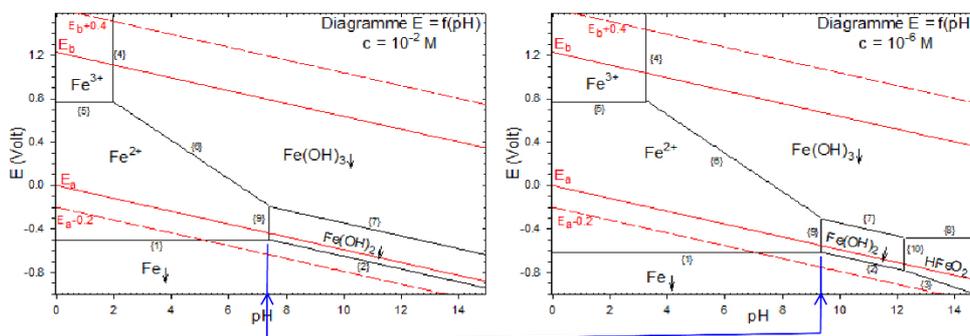


Figure 8 – Diagrammes de Pourbaix de l'acier à différentes concentrations [4].

L'acier va néanmoins toujours subir de la corrosion dans le domaine de stabilité de l'eau (intervalle  $E_a$ - $E_b$ ). Il est donc nécessaire de traiter l'eau des circuits avec des

inhibiteurs de corrosion pour prévenir toute dégradation et minimiser le risque de corrosion.

Il est donc possible de tirer les conclusions suivantes, explicites d'une incompatibilité entre les deux matériaux :

- Dans le cas d'un pH inférieur à 8.5 unités, le risque de corrosion du circuit en acier est accru. Le risque de corrosion de la chaudière aluminium-silicium est réduit. On va retrouver une couche d'oxyde d'aluminium stable et protectrice dans le corps de chauffe.
- Dans le cas d'un pH entre 8.5 et 9.2, le risque de corrosion du circuit en acier et de la chaudière aluminium-silicium est présent.
- Dans le cas d'un pH au-dessus de 9.2, le risque de corrosion de l'aluminium-silicium de la chaudière est accru. Le risque de corrosion du circuit en acier est réduit.

#### **4. Solutions techniques à l'incompatibilité acier aluminium.**

Les paragraphes précédents ont illustré théoriquement l'incompatibilité, essentiellement au niveau du pH, entre l'acier et l'aluminium. Des exemples de percements réels ont également été illustrés au point 2.2. On remarque donc que ce problème, bien que récent, est important et risque d'engendrer de nombreux frais s'il n'est pas pris en charge par les sociétés de maintenance.

Plusieurs solutions ont été trouvées et commencent à être mises en œuvre et proposées par les fabricants de chaudières ainsi que par les sociétés d'installation et de maintenance. Ces solutions vont être présentées ici d'un point de vue technique et économique.

##### **4.1. Mise en œuvre d'un échangeur**

L'idée est de séparer le circuit en acier de la chaudière en aluminium. Cela aura pour avantage de contrôler la qualité d'eau, dont le pH, des deux circuits de manière indépendante.

Cette solution est idéale d'un point de vue technique, car l'incompatibilité n'a plus lieu d'être. Cette solution commence à être proposée par les fournisseurs de chaudière. Néanmoins, elle présente un inconvénient majeur : son prix.

Une estimation financière du coût de mise en place d'un échangeur de chaleur a été réalisée. Elle illustre le coût d'achat et d'installation, mais également le coût total de l'échangeur de chaleur sur 10 ans en fonction de la puissance de la chaudière.

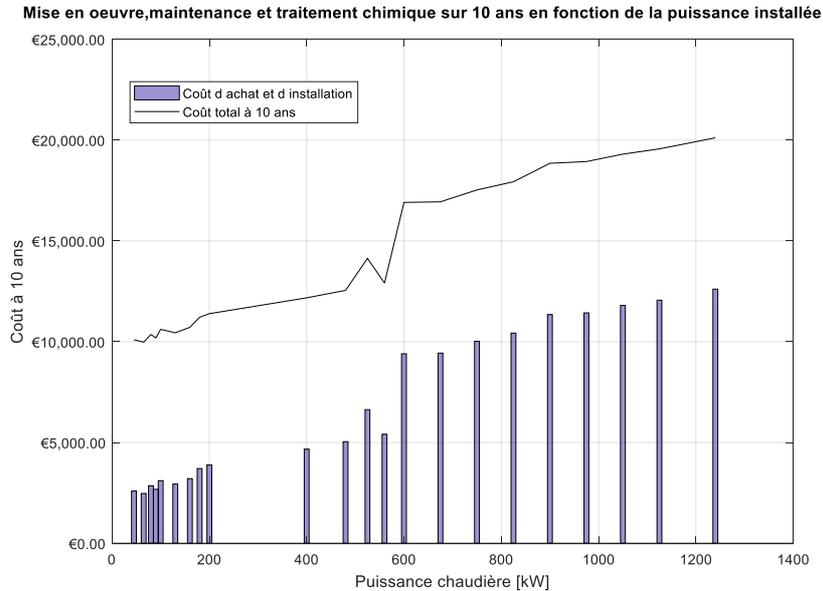


Figure 9 : Estimation du coût de placement d'un échangeur sur une installation en fonction de sa puissance de chauffe. Illustration de l'auteur.

Le coût sur 10 ans prend en compte :

- L'achat de l'échangeur et son installation.
- L'entretien annuel.
- Le traitement anticorrosion des circuits, et le suivi de ceux-ci pour assurer une qualité d'eau optimale minimisant les risques de corrosion.

Dans cette étude financière, les pertes liées à la baisse de performance de la chaudière liée à l'ajout d'un échangeur ne sont pas prises en compte. Le coût énergétique des différents accessoires à l'échangeur, tel que les pompes de circulation, n'est également pas inclus.

On remarque donc que le coût de mise en œuvre et de la maintenance est élevé. De plus, au-delà de 650 kW, cette solution ne tient déjà plus la route financièrement. Comme illustré au point 1.2, au-delà d'une puissance de chauffe de 650 kW, la chaudière en aluminium est équivalente en termes de prix à une chaudière à condensation en acier. L'achat d'un échangeur va rendre la chaudière en aluminium inintéressante financièrement, en plus de diminuer son rendement. Cette solution est donc à écarter.

## 4.2. Déminéralisation de l'eau du circuit

Cette solution a pour avantage de réduire considérablement le risque de corrosion du circuit. En effet, l'eau déminéralisée apporte les avantages suivants :

- Une conductivité de l'ordre de  $50\mu\text{S}/\text{cm}$ , diminuant la vitesse des phénomènes électrochimiques, dont la corrosion.
- La mise en conformité de l'eau avec les paramètres requis par les fabricants : une dureté nulle et des concentrations en ions minimales.

Cette solution présente néanmoins des inconvénients :

- Le pH de l'eau déminéralisée a tendance, en contact avec l'air, à diminuer. Il va également varier avec les résidus et liquides présents dans l'installation lors de l'injection d'eau déminéralisée. Il a donc un caractère incertain.
- Le pH proche du neutre (valeur de 7) est très néfaste pour le circuit en acier et va provoquer sur celui-ci une corrosion acide (mise en solution d'ions fer due à un pH trop faible).

Pour contrer ces effets néfastes tout en maintenant les avantages de l'eau déminéralisée, celle-ci devra être conditionnée :

- Grâce à des alcalinisants, afin d'amener le pH à une valeur de 8,5 unités. Cela permet de rester dans les limites des fabricants de chaudières, tout en s'approchant des valeurs de pH adéquates à l'acier.
- Grâce à des inhibiteurs de corrosion, afin de prévenir la corrosion de l'acier due à un pH légèrement trop faible pour le circuit.

De cette manière, le circuit va être protégé, grâce aux inhibiteurs, et la chaudière sera protégée, grâce à la qualité d'eau maintenue dans les bonnes valeurs. Il est alors possible de concilier une chaudière en aluminium-silicium avec un circuit en acier, en gardant les garanties au niveau du fabricant et en s'assurant que l'installation complète ne soit pas endommagée. Néanmoins, vu que cette solution est nouvelle, personne ne connaît ses conséquences sur le circuit à 10 ans. L'ajout d'inhibiteurs de corrosion est donc une sécurité supplémentaire à cette solution technique.

Plusieurs méthodes de déminéralisation existent :

- De la résine jetable : facile d'utilisation, mais leur coût est élevé et elle est à usage unique.
- Un procédé d'osmose : le coût initial est élevé mais il n'y a pas de consommable. La durée de vie n'est que de 10 ans et le coût de l'entretien n'est pas négligeable.
- De la résine régénérable : ce procédé est facile d'utilisation, et le coût de régénération de la résine est faible.

Dans le cas de l'étude financière, la résine régénérable sera donc privilégiée, car elle est la moins coûteuse.

Le graphique ci-après (figure 10) illustre le coût d'une telle opération de déminéralisation et de traitement chimique à 10 ans. Le coût de cette opération sera fonction de la dureté de l'eau d'appoint du circuit.

Ce graphique permet d'estimer le coût lié à une déminéralisation d'un circuit et son traitement en fonction de la puissance de chauffe utilisée. Le lien entre la puissance et le volume d'une installation ont été estimés grâce à l'équation suivante :

Hypothèse de travail : 1 kW à la chaudière = 1 litre d'eau dans le circuit.

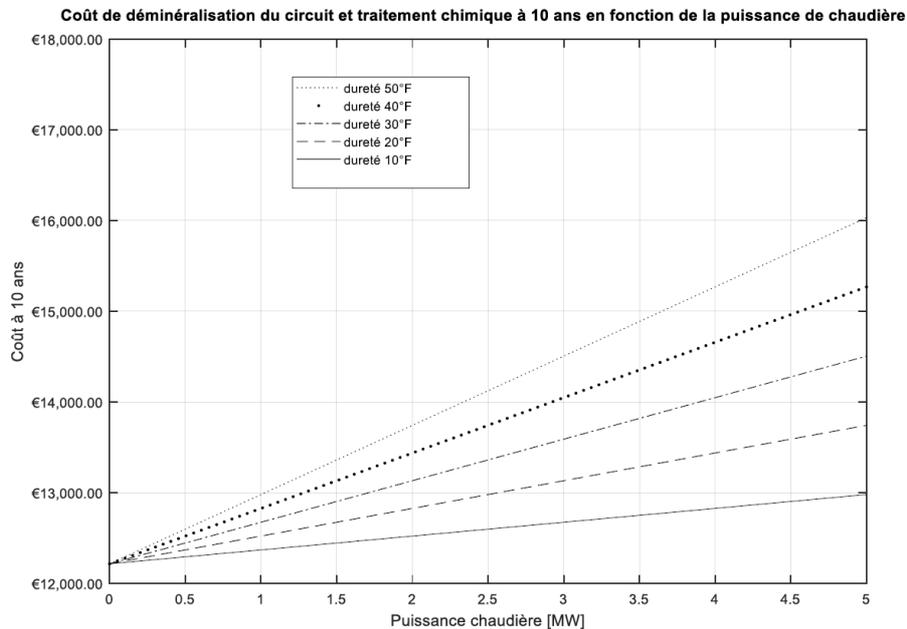


Figure 10 : Estimation du coût de déminéralisation par résine régénérable (solution la plus économique) en fonction de la dureté totale de l'eau de remplissage et de la puissance du circuit à 10 ans. Illustration de l'auteur.

### 4.3. Utilisation de la chaudière comme pièce sacrificielle

Dans cette troisième solution, la qualité d'eau du circuit va être maintenue dans les paramètres propres au circuit en acier. Cela aura bien entendu un impact négatif sur la durée de vie de la chaudière.

Il est plus intéressant de prolonger la durée de vie des canalisations en acier, car celles-ci sont plus coûteuses à remplacer que la chaudière. Cette solution reste néanmoins difficile à chiffrer d'un point de vue global. Le coût à 10 ans sera fonction du volume du circuit : des traitements et conditionnements à réaliser sur celui-ci pour assurer une qualité d'eau optimale.

Les chaudières seront donc, dans cette solution, remplacées lorsqu'elles sont défaillantes. Il y aura là un coût lié au remplacement, à la main-d'œuvre et aux éléments à remplacer, mais également un coût lié à l'indisponibilité de la chaudière. Ce coût étant prohibitif, cette solution ne sera pas développée.

## 5. Conclusions

Le graphique ci-dessous (figure 11) montre que l'ordre de grandeur financier entre les deux solutions techniques de déminéralisation et de mise en place d'un échangeur est très différent. En effet, en utilisant la relation liant la puissance et le cubage du circuit, on remarque que la solution d'échangeur est beaucoup plus onéreuse que la solution de déminéralisation, en fonction de la dureté totale de l'eau du circuit.

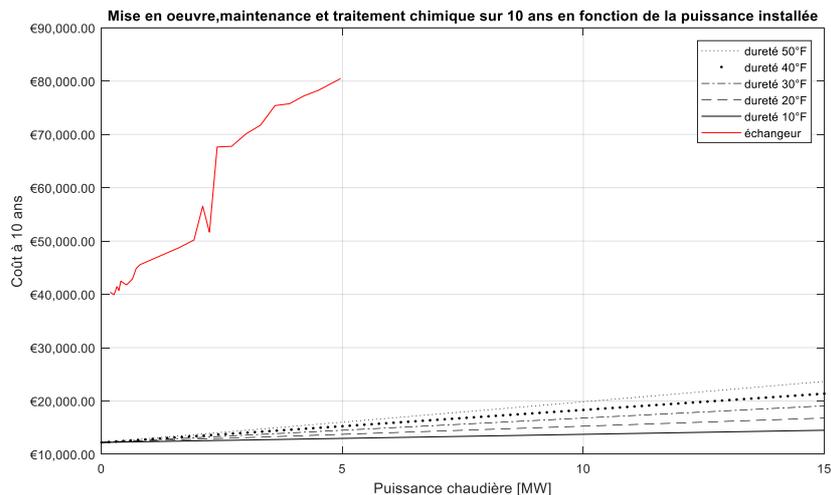


Figure 11 : Mise en œuvre, maintenance et traitement chimique sur 10 ans pour une déminéralisation et un échangeur de chaleur en fonction de la puissance de la chaudière. Illustration de l'auteur.

Dans le cas d'une installation existante, l'installation d'un échangeur s'avérera trop onéreuse ; la solution de déminéralisation sera donc privilégiée. Dans le cas d'une nouvelle installation, le prix initial de l'échangeur de chaleur étant très élevé, le retour sur investissement est trop long pour être une solution techniquement intéressante.

En conclusion, la solution de déminéralisation et de traitement chimique régulier est la plus intéressante tant techniquement qu'économiquement. Cette solution présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et permet d'être en conformité totale avec les prérequis des fabricants de chaudières. L'incertitude liée au comportement d'un circuit déminéralisé à long terme est contrebalancée par la présence du traitement anticorrosion qui va assurer que le circuit ne se dégrade pas.

Dans le futur, il faudrait donc établir un suivi d'installations où cette solution est mise en place afin de s'assurer de l'efficacité de la solution technique proposée dans cet article.

## 6. Sources

[1] : LES CHAUDIERES A CONDENSATION, in Energieplus-lesite.be, s.d., en ligne : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15580>. Consulté le 28 avril 2018.

[2] : M. REBOUL : « Corrosion des alliages d'aluminium », in *techniques-ingenieur.fr*, s.d., en ligne : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-resistance-a-la-corrosion-et-au-vieillissement-42373210/corrosion-des-alliages-d-aluminium-cor325/>. Consulté le 10 novembre 2017.

[3] : N.L. SUKIMAN, X. ZHOU et al. : «Durability and corrosion of aluminium and its alloys : overview, property space, techniques and developments » , in *intechopen.com*, s.d., en ligne : <https://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/durability-and-corrosion-of-aluminium-and-its-alloys-overview-property-space-techniques-and-developm>. Consulté le 11 novembre 2017.

[4] : UNIVERSITE LEMANS, Diagramme E-pH du fer, in : univ-lemans.fr, en ligne : [http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/chimie/01/04-Chimie\\_descriptive/co/module\\_04-Chimie\\_descriptive\\_10.html](http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/chimie/01/04-Chimie_descriptive/co/module_04-Chimie_descriptive_10.html). Consulté le 6 mai 2018.

[5] : VDI 2035 : *Part 2 - Prevention of damage in water heating installations water-side corrosion*, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V, 43p.