



anses

Procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Novembre 2024

Maisons-Alfort, le 04 novembre 2024

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

relatif aux procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

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 26 décembre 2022 par la Direction générale de la santé (DGS) pour la réalisation de l'expertise suivante : « *Demande d'avis relatif à des procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats* ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

1.1. Contexte

La production d'eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) consiste le plus souvent à exploiter une masse d'eau douce présente à l'état liquide (ou exceptionnellement solide) dans le milieu naturel. Il s'agit de ressources superficielles, telles que les lacs et les rivières accessibles directement, ou de ressources souterraines, accessibles via des puits ou des forages.

La surexploitation et le déficit, conjoncturel ou structurel, de recharge de ces ressources conduisent à rechercher des approches alternatives. L'une de ces alternatives consiste à capter l'eau présente dans l'atmosphère sous forme de brouillards (gouttelettes d'eau liquide en suspension dans l'air) ou de vapeur (état gazeux). Les procédés qui connaissent actuellement les plus importants développements sont des procédés actifs de capture/condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Ces générateurs d'eau à partir de condensats sont qualifiés d'AWG pour « *atmospheric water generator* » et mettent en œuvre une succession d'étapes de traitement afin de réduire la concentration de certains polluants présents dans l'air capté et dans l'eau brute condensée. L'objectif principal des fabricants est de produire de l'EDCH.

1.2. Objet de la saisine

La DGS a saisi l'Anses le 26 décembre 2022 afin de rendre une expertise visant à identifier les risques sanitaires liés aux procédés générateurs d'EDCH à partir de condensats, dans l'objectif de répondre aux questions suivantes :

- question 1 (Q1) : statuer sur la possibilité de considérer la condensation comme un procédé de traitement remplissant les dispositions prévues à l'article R.1321-50 du code de la santé publique ;
- question 2 (Q2) : identifier les dangers microbiologiques et chimiques liés à l'hétérogénéité de la qualité de l'air et des condensats en résultant, ainsi que des variations d'un site à l'autre pouvant impacter la qualité de l'eau produite en vue d'une distribution ;
- question 3 (Q3) : disposer d'éléments d'expertise utiles à l'instruction des dossiers de demande de mise sur le marché de ces procédés innovants ;
- question 4 (Q4) : identifier des usages alternatifs de l'eau produite par ces dispositifs, notamment dans les territoires sujets à la problématique de l'accès à l'eau potable.

Suite à la demande de l'Anses du 16 mars 2023, la DGS a clarifié le périmètre de la saisine par courriel en date du 7 avril 2023 :

- les systèmes visés dans le cadre de cette expertise sont des dispositifs pouvant utiliser l'air intérieur et l'air extérieur ;
- les usages visés de l'eau produite peuvent concerner une utilisation par des particuliers (dans la mesure où certains dispositifs sont actuellement déjà en vente en ligne), des collectivités ou des entreprises ;
- l'eau produite peut être destinée à la consommation directe ou être conditionnée en vue d'une commercialisation.

Afin d'apporter des éléments de réponse aux questions de la DGS, l'Anses a :

- réalisé un recensement des différents types de dispositifs existants et des procédés de traitement de l'air et de l'eau mis en œuvre ;
- identifié les dangers susceptibles d'être présents dans l'air capté ;
- identifié les dangers susceptibles d'être présents dans l'eau produite aux différentes étapes ;
- évalué l'efficacité¹ des procédés de traitement mis en œuvre ;
- en fonction des données recueillies, formulé des recommandations en termes de conditions d'utilisation des dispositifs et de l'eau produite.

L'expertise porte sur les procédés de capture de la vapeur d'eau et exclut :

- les dispositifs recueillant l'eau sur filet à partir des gouttelettes présentes dans l'atmosphère (de type pièges à brouillard, pièges à nuages) ;
- les dispositifs de distillation solaire ou les « bouilleurs ».

Elle concerne (i) les dispositifs industriels fixes destinés à la production d'eau conditionnée rendue potable par traitement (ERPTC) ou à alimenter un réseau de distribution d'EDCH, et (ii) les dispositifs destinés à un usage domestique ou collectif (de type fontaine à eau ou unité mobile de production d'EDCH).

L'expertise ne concerne que la production d'EDCH/ERPTC par les AWG ; les éventuelles étapes ultérieures d'enrichissement en minéraux et/ou d'ajout d'ingrédients divers conduisant à la fabrication de « boissons sans alcool » (BSA ; article L.3321-1 du code de la santé publique²) ne sont pas prises en compte.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

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 relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Eaux ». L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail « Condensats ». Ce groupe de travail (GT) a été mis en place le 4 septembre 2023. Le GT a produit un rapport d'expertise intitulé « Procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats ». Les travaux d'expertise du GT ont été présentés au CES « Eaux » tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 5 mars 2024 et le 1er octobre 2024. Le rapport d'expertise a été adopté par le CES « Eaux » réuni le 10 septembre 2024 et le présent avis, qui se fonde sur le rapport d'expertise, les conclusions et les recommandations du GT « Condensats », a été adopté par le CES « Eaux » lors la séance du 1er octobre 2024. Le rapport et l'avis ont tenu compte des observations des membres du CES.

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.

¹ Efficacité : taux d'abattement des polluants transférés de l'air à l'eau par les procédés de traitement utilisés dans les AWG.

² https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006155035/2021-05-14.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>. Un expert a démissionné du groupe de travail le 30 avril 2024 et n'a pas participé à la rédaction de l'avis et du rapport.

L'expertise, dont les modalités de collecte et de traitement des données sont détaillées dans le rapport d'expertise, s'appuie notamment sur :

- le rapport réalisé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et intitulé « État des lieux et étude des dispositifs alternatifs de distribution d'eau potable en cas d'insuffisance ou d'absence de réseau public de distribution »³ ;
- une recherche bibliographique dans les bases de données SCOPUS, *Web of Science*, et à l'aide du moteur de recherche GOOGLE SCHOLAR, réalisée jusqu'au 16 janvier 2024, sur l'ensemble des documents publiés sans restriction de date, en combinant des mots clés anglophones relatifs à l'eau potable, aux condensats, aux générateurs d'eau atmosphérique, à la capture de la vapeur d'eau, à la pollution de l'air et à la microbiologie : 96 publications ont été retenues ;
- les informations relatives aux procédés commercialisés, collectées *via* des moteurs de recherche Internet ;
- les auditions de fabricants ou distributeurs européens recensés commercialisant des dispositifs de condensation de vapeur d'eau atmosphérique et ayant répondu favorablement à la sollicitation de l'Anses : Citycare, Osoley, Genaq et SFEA HAW⁴ ;
- une consultation par courriel :
 - des Agences régionales de santé (ARS) : Provence-Alpes-Côte d'Azur, Martinique, Guadeloupe, Guyane, La Réunion et Mayotte ;
 - du Réseau ENDWARE⁵.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU GT ET DU CES « EAUX »

3.1. Caractéristiques techniques des AWG

3.1.1. Recensement des dispositifs AWG commercialisés

Plusieurs entreprises proposent des dispositifs de production d'eau à partir de la vapeur d'eau présente dans l'air. La gamme est vaste mais quatre catégories d'équipements peuvent être identifiées en fonction de leur capacité de production et du public ciblé :

- **les dispositifs de type fontaines à eau destinés à un usage domestique** qui sont nombreux sur le marché et qui permettent de produire de l'ordre de 10 à 20 litres par jour afin de répondre aux besoins en eau de boisson d'une famille. Ils utilisent généralement l'air intérieur de locaux, ont des dimensions similaires aux fontaines à eaux utilisant des bonbonnes et sont facilement transportables ;
- **les dispositifs de type fontaines à eau destinés à des entreprises ou des petites collectivités** qui ont une capacité de production de 30 à 70 litres par jour. Ils utilisent l'air intérieur de locaux ;

³ Non publié.

⁴ Société française de l'eau atmosphérique (SFEA) Home Atmospheric Water (HAW).

⁵ *European Network of Drinking Water Regulators* – groupe informel de représentants (Ministères en charge de la réglementation sur l'EDCH et Agences sanitaires) des États membres de l'Union européenne et autres pays qui mettent en œuvre les dispositions de la directive sur la qualité de l'eau potable (DWD).

- **les dispositifs de type unités mobiles de production d'EDCH de grande capacité destinés à des contextes spécifiques** (interventions humanitaires, déploiements militaires, sites isolés, plateformes pétrolières, etc.) qui utilisent l'air extérieur. Les plus performants ont une capacité de production, en conditions optimales, de 10 000 litres d'eau par jour. Ils sont généralement dimensionnés selon les standards du transport maritime (en général, conteneur de 20 pieds⁶) ;
- **les dispositifs fixes conçus à la demande** pour des installations industrielles (usines de conditionnement d'eaux rendues potable par traitement (ERPTC), alimentation d'un réseau de distribution d'EDCH, alimentation d'une citerne, fabrication de BSA, etc.). Ces dispositifs utilisent l'air extérieur.

3.1.2. Caractéristiques techniques des AWG

La plupart des dispositifs présentent les mêmes caractéristiques de filière, à savoir une aspiration de l'air, une filtration de l'air, un système de condensation de la vapeur d'eau suivi d'une chaîne de traitement de l'eau récoltée. Les eaux sont ensuite stockées et distribuées, soit de la même manière que dans les fontaines à eau traditionnelles, soit ont vocation à être embouteillées (Figure 1).

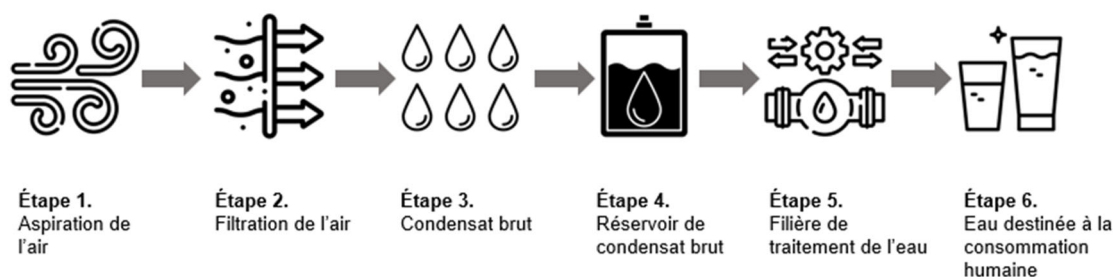


Figure 1. Schéma de principe d'un système de production d'EDCH de type AWG

Les différentes étapes technologiques mises en œuvre sont donc :

- Les procédés de traitement de l'air : la filtration mise en place sur les prises d'air vise en premier lieu à limiter l'empoussièrement du dispositif mais peut aussi permettre d'arrêter des micro-organismes et particules fines, voire des polluants volatils. Ce traitement peut être réalisé par des filtres de différents seuils de coupure via des mécanismes d'interception par les fibres du filtre et/ou des filtres à base de charbon actif, permettant l'adsorption de certaines molécules présentes dans l'air, principalement des composés organiques volatils. Les appellations pour qualifier le système de traitement de l'air, utilisées par les fabricants, sont souvent imprécises. Dans certains cas, il est fait référence à la nomenclature définie par la norme NF EN 7797, avec parfois des renvois à la version de 2002 de cette norme (qui a été remplacée par la norme NF EN ISO 16890-1 de 2017⁸). Un seul fabricant parmi ceux identifiés lors de l'expertise propose un filtre à charbon actif sur la prise d'air sans justifier de son utilité. De plus, certains AWG possèdent un dispositif de régulation du débit d'air en fonction de l'hygrométrie afin de garantir un débit d'eau constant. Enfin, la sortie d'air est généralement équipée de filtres pour limiter le risque de reflux de poussières depuis l'extérieur du dispositif.

⁶ Le conteneur maritime de 20 pieds est l'un des conteneurs les plus couramment utilisés pour l'export de marchandises dans le transport maritime international. Il mesure 6,10 m de long, 2,44 m de large et 2,59 m de haut, pour un volume d'environ 33 m³.

⁷ NF EN 779 (2012). Filtre à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration.

⁸ NF EN ISO 16890-1 (2017). Filtres à air de ventilation générale - Partie 1 : spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension (ePM).

- Les procédés de condensation de la vapeur d'eau : deux techniques de capture de la vapeur d'eau à partir de l'air, entrant dans le champ de l'expertise, sont commercialisées et ont été retenues dans le cadre de l'expertise : la capture de l'eau par condensation directe sur une surface froide et les procédés utilisant des adsorbants en amont de cette première technique. Dans le cadre du recensement des AWG, un seul fabricant utilisant l'adsorption sur matériau (zéolite) a été identifié. Les procédés de condensation sur surface froide reposent sur l'atteinte du point de rosée⁹ : au contact d'une surface artificiellement refroidie (par un compresseur ou par effet Peltier¹⁰), la température de l'air humide diminue jusqu'à atteindre le point de rosée, température à laquelle une partie de la vapeur d'eau se liquéfie. Dans le cas d'une utilisation d'un adsorbant (comme la zéolite) en amont de la condensation sur surface froide, la vapeur d'eau se fixe sur le matériau, puis est désorbée lorsque celui-ci est chauffé ; ainsi, l'air « s'enrichit » progressivement en humidité, ce qui revient à majorer l'hygrométrie en entrée du condenseur. La limite majeure des procédés utilisant des adsorbants est leur cycle de fonctionnement alternant des phases de capture de l'eau puis des phases de production ; cependant, dans des conditions de faible hygrométrie où le point de rosée est souvent à une température négative, cette technologie permet tout de même aux AWG de fonctionner. Il est à noter que tous les procédés commerciaux recensés sont qualifiés « d'actifs » car ils requièrent un apport d'énergie, généralement électrique, par opposition aux procédés dits passifs, qui exploitent des phénomènes naturels (rayonnements solaires), sans besoin de source d'énergie externe.
- Les procédés de traitement de l'eau : il existe peu de connaissances dans la littérature sur l'efficacité opérationnelle des AWG en termes de qualité de l'eau produite en conditions réelles. De plus, le recensement des dispositifs a identifié une grande diversité des AWG actuellement présents sur le marché, ce qui ne permet pas de présenter une description exhaustive de l'ensemble de ces dispositifs. Suite aux auditions et à l'analyse des documentations disponibles sur internet, les principaux procédés utilisés dans les AWG, associés à leurs objectifs, sont :
 - la microfiltration, l'ultrafiltration et la nanofiltration : abattre les matières en suspension (MES) et les micro-organismes ;
 - l'osmose inverse (OI) : abattre les matières organiques (MO) solubles, les micropolluants organiques, les éléments traces métalliques et les micro-organismes ;
 - le charbon actif : adsorber les micropolluants organiques et les éléments traces métalliques ;
 - l'ozonation : désinfecter l'eau ;
 - l'irradiation UV : désinfecter l'eau ou maîtriser la formation de biofilms, selon les protocoles utilisés ;
 - la reminéralisation : augmenter la charge minérale de l'eau produite (conductivité, pH, propriétés organoleptiques).

Concernant l'entretien et la maintenance des AWG, il ressort des auditions et de l'exploitation des documents disponibles que les indications sont parcellaires, imprécises et que les protocoles de nettoyage des équipements et de remplacement des consommables sont proposés sans donnée permettant de les valider.

⁹ Lorsqu'une masse d'air subit une baisse de température, son humidité relative augmente jusqu'à atteindre une température qualifiée de point de rosée pour laquelle le degré hygrométrique est de 100 %. Si la température descend en-dessous de ce point de rosée, une partie de la vapeur d'eau subit un changement de phase et de l'eau liquide se forme.

¹⁰ Effet thermoélectrique de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique.

3.1.3. Revendications et allégations des responsables de la mise sur le marché¹¹

Certains responsables de la mise sur le marché mettent en avant un rôle bénéfique des AWG sur la qualité de l'air intérieur des locaux dans lesquels ils sont installés, notamment grâce à la filtration de l'air en entrée de filière qui permettrait de réduire la charge de l'air environnant en poussières, pollens ou spores fongiques. Cet effet n'a pas été démontré ni documenté par les responsables de la mise sur le marché.

Par ailleurs, une gamme d'AWG, sortant du champ de l'expertise, produit des eaux enrichies en strontium¹², lithium, sélénium¹³, zinc et acide métasilicique, que le fabricant présente comme indispensables à la santé des consommateurs, sans en apporter la preuve. Très exceptionnellement, les eaux produites par AWG font l'objet de traitements originaux, présentés comme bénéfiques pour la santé des consommateurs, non autorisés en France. C'est le cas par exemple de l'emploi de cartouches de billes de céramique « à infrarouges lointains » dont les bienfaits allégués restent à démontrer.

De manière générale, les fabricants d'AWG insistent sur le faible coût de production de l'eau issue de la condensation en comparaison, principalement, de celui des eaux conditionnées, de par une faible consommation électrique des AWG (exprimée en litres d'eau produits par kWh consommé). Peeters *et al.* (2021) soulignent pourtant que le bilan énergétique des différents procédés de production d'eau n'est pas en faveur des AWG en comparaison de l'exploitation d'une ressource liquide (eau superficielle, souterraine, REUT, dessalement par OI, eau de pluie). Ainsi, l'intérêt de ces AWG réside plutôt dans leur utilisation dans des structures sensibles (par exemple, des ambassades, des sites militaires stratégiques), au niveau de sites ne disposant pas d'un raccordement à un réseau public d'adduction d'eau, dans des zones en restriction d'eau ou en pénurie, ou dans les zones géographiques où la consommation énergétique n'est pas un critère déterminant. Certains fabricants proposent une démarche « écoresponsable » en couplant les AWG avec des sources autonomes d'électricité « verte » telles que des panneaux solaires ou des éoliennes.

Enfin, l'argument d'une réduction des déchets plastiques en comparaison d'une commercialisation des eaux embouteillées est présenté ; pour autant, aucun fabricant ou revendeur ne propose d'analyse du cycle de vie (ACV) des AWG et il n'est pas fait mention de la gestion des déchets engendrés, en particulier des consommables de type cartouches de filtration.

3.2. Réglementation et normes existantes en France et dans d'autres pays

3.2.1. Réglementation en France

Conformément aux dispositions du code de la consommation, il appartient à tout responsable de la mise sur le marché de produits de s'assurer que ceux-ci sont propres à l'usage qui en sera fait, qu'ils respectent les prescriptions en vigueur et ne sont pas susceptibles de constituer un danger pour la santé des consommateurs (articles L.121-2, L.411-1, L.411-2, L.421-3, L.423-1).

¹¹ Dans le présent rapport, le terme « responsables de la mise sur le marché » désigne les fabricants et les revendeurs d'AWG.

¹² Anses. 2013. Avis de l'Anses relatif à une évaluation des risques sanitaires liés à la présence de strontium dans les eaux destinées à la consommation humaine. 2012-SA-0262.

¹³ Anses. 2012. Avis de l'Anses relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés aux dépassements de la limite de qualité du sélénium dans les eaux destinées à la consommation humaine - Actualisation de l'avis de l'agence française de sécurité sanitaire des aliments de septembre 2004. 2011-SA-0220.

La production d'EDCH par des dispositifs de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique n'est pas explicitement prévue dans la réglementation française actuelle. Ainsi, d'un point de vue réglementaire et législatif, les dispositions du code de la santé publique (CSP) relatives à la sécurité sanitaire des eaux (articles L.1321-1 et suivants et R.1321-1 et suivants) ne s'appliquent pas toutes *de facto* à ce type de dispositif.

La réglementation sur les ressources concernant les périmètres de protection des captages vis-à-vis des pollutions ponctuelles et accidentelles (article L.1321-2 du CSP), et les exigences de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'EDCH (article 2 et annexe II de l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié), ne sont pas pertinentes puisque la ressource exploitée et sa qualité ne dépendent pas d'un contexte hydrologique et géologique local, mais de l'air au niveau du site d'implantation de l'AWG.

Cependant, certaines de ces dispositions pourraient s'appliquer aux AWG et/ou aux exploitants d'installations fixes/utilisateurs particuliers d'AWG¹⁴ :

- produits et procédés de traitement de l'eau (P&PTE) : les produits et procédés de traitement mis en œuvre pour la production d'EDCH font l'objet de prescriptions techniques adoptées par le ministère en charge de la santé. Ces exigences réglementaires visent à garantir leur innocuité sanitaire et leur efficacité dans les conditions normales d'utilisation (R.1321-50-I) ;
- les matériaux au contact de l'eau (MCDE) : les matériaux et objets au contact de l'eau potable font l'objet d'une réglementation visant à garantir leur innocuité, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas être susceptibles, dans les conditions normales ou prévisibles de leur emploi, de présenter un danger pour la santé humaine ou d'entraîner une altération organoleptique, physico-chimique ou microbiologique de la qualité de l'eau (R.1321-48 et 49) ;
- les fluides caloporteurs : tout fluide introduit dans les installations utilisées pour le traitement thermique des EDCH et destiné à transporter l'énergie thermique relève de l'arrêté du 14 janvier 2019 ;
- la conception, la gestion et l'entretien des réseaux de distribution : la qualité de l'EDCH devant être maîtrisée tout au long de son transport, des règles d'hygiène lors de la conception, la réalisation et l'exploitation des installations sont à mettre en place. Des opérations de nettoyage et de désinfection des installations de stockage et de distribution de l'eau sont préconisées (R.1321-54). La réglementation fixe également une obligation de maîtrise des risques structurée sous la forme d'un « Plan de Gestion de la Sécurité Sanitaire des Eaux (PGSSE) » (R.1321-22-1) ;
- pour les eaux rendues potables par traitement à des fins de conditionnement : plusieurs arrêtés régissent ce cas particulier (arrêté du 22 octobre 2013 modifié, arrêté du 14 mars 2007 modifié, arrêté du 20 juin 2007 et arrêté du 4 mai 2007).

Concernant le code de l'environnement, une distinction est faite entre la qualité de l'air extérieur, dit « ambiant », et la qualité de l'air intérieur.

La surveillance de la qualité de l'air extérieur est confiée par l'État à des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) depuis la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996¹⁵ qui découlait de textes européens. La coordination technique du dispositif de surveillance des polluants réglementés est assurée par le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA). La France développe également, pour des

¹⁴ Ministère du travail, de la santé et des solidarités,
<https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/article/les-dispositifs-garantissant-la-securite-sanitaire-des-eaux-distribuees>.

¹⁵ Loi n°96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie.

polluants qualifiés de « polluants d'intérêt national »¹⁶, différents réseaux de surveillance complémentaires de celui issu de la réglementation européenne, ce qui constitue une spécificité au niveau français. Enfin, des travaux menés par différents organismes ou associations spécialisés existent au niveau national pour améliorer les connaissances sur la pollution de l'air et permettre de documenter la présence d'autres polluants dans l'air.

La surveillance de la qualité de l'air intérieur (QAI) est réglementée dans certains établissements recevant du public (ERP) depuis le début des années 2000 pour le radon et depuis 2011 pour le formaldéhyde et le benzène dans l'air d'établissements accueillant des publics sensibles¹⁷. La réglementation a évolué au cours du temps avec des dispositions propres à la réalisation de campagnes de mesure pour un nombre limité de polluants. L'amélioration des connaissances dans les environnements intérieurs fait également partie des actions des politiques publiques inscrite dans le quatrième plan national santé environnement (loi Grenelle II) et des missions confiées à l'Observatoire de la Qualité des Environnements Intérieurs (OQEI, anciennement OQAI¹⁸) qui a réalisé des campagnes nationales avec la mesure de nombreux paramètres dans différents environnements.

3.2.2. Réglementation dans d'autres États membres de l'Union européenne

Dans le cadre du réseau ENDWARE, une consultation des États membres (EM) de l'Union européenne a été initiée par l'Anses afin de collecter des informations sur les éventuelles réglementations/normes/lignes directrices applicables aux AWG. Six pays ont répondu à la sollicitation de l'Anses. À cette occasion, il est apparu que des dispositions spécifiques existaient dans certains EM mais ce recensement n'est pas exhaustif.

En Italie, des AWG de petites et moyennes capacités de production ont fait l'objet de demandes de mise sur le marché à destination des particuliers et des collectivités. L'agence sanitaire italienne a recommandé que les matériaux, les traitements chimiques et les filtres utilisés dans les dispositifs soient conformes aux dispositions du décret législatif n°18/2023 qui transpose la directive (EU) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des EDCH. En effet, il n'existe pas de réglementation spécifique aux AWG en Italie et il n'est pas prévu d'en créer à ce jour.

En République tchèque, les dispositifs à destination de collectivités ou de bureaux dans des entreprises doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché. Une demande de mise sur le marché a été refusée par les experts de l'agence sanitaire pour le dispositif S.A.W.E.R® car l'eau produite n'était « *pas suffisamment minéralisée pour être consommable sans risque* ». En effet, la réglementation tchèque (décret n°252/2004 fixant les exigences sanitaires pour l'eau potable et l'eau chaude, ainsi que la fréquence et l'étendue des contrôles de l'eau potable¹⁹) impose des concentrations minimales en calcium, magnésium et solides totaux dissous (respectivement 30 mg.L⁻¹, 10 mg.L⁻¹ et 150 mg.L⁻¹). Par ailleurs, les matériaux au contact de l'eau doivent satisfaire aux prescriptions du décret n°409/2005 relatif aux exigences en matière d'hygiène pour les produits entrant en contact direct avec l'eau et pour le traitement de l'eau (amendé par le décret n°446/2021). À ce jour,

¹⁶ Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

¹⁷ Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public.

¹⁸ <https://www.oqai.fr/fr>.

¹⁹ info@aion.cz, AION CS-. s. d. « Vyhláška č. 252/2004 Sb. Vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody (décret n° 252/2004 fixant les exigences sanitaires pour l'eau potable et l'eau chaude, ainsi que la fréquence et l'étendue des contrôles de l'eau potable) ». Zákoný pro lidi. <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2004-252>.

seuls les particuliers peuvent utiliser de tels dispositifs en République tchèque, à condition qu'ils satisfassent aux dispositions relatives aux matériaux et respectent les concentrations minimales en éléments minéraux mentionnées ci-dessus.

En ce qui concerne la Lituanie, la Hongrie, le Luxembourg et les Pays-Bas, les AWG n'ont pas fait l'objet de demandes d'autorisation et il n'est pas prévu d'évolution des dispositions réglementaires pour les prendre en compte.

3.2.3. Normalisation des AWG

Deux normes d'essai, d'application non obligatoire (démarche volontaire des responsables de la mise sur le marché), ont été recensées.

La norme NSF P343 (2023) « *Exigences en matière de santé et d'hygiène pour les générateurs d'eau atmosphérique* » concerne les dispositifs AWG. Celle-ci stipule qu'afin « *de réduire l'impact des biais liés à la ressource en air et de normaliser le processus d'essai, ce protocole est conçu pour évaluer uniquement les composants en contact avec l'eau pour la sécurité des matériaux et la capacité de l'appareil à désinfecter l'eau produite dans des conditions de laboratoire contrôlées* ». La norme ne permet donc pas d'assurer que l'eau produite par les AWG est potable et sans risque pour le consommateur, ni n'assure l'efficacité du dispositif. Il est également stipulé que toute allégation d'abattement d'un polluant par de tels dispositifs doit être justifiée par l'application d'un protocole issu d'une autre norme NSF/ANSI.

La norme ASSE/ANSI 1090-2020e1 « *Exigences de performance pour les générateurs d'eau atmosphérique qui produisent de l'eau potable* » a pour objectif de tester : le taux de production d'eau potable, le volume de remplissage et l'arrêt automatique pour les systèmes à réservoir, l'efficacité énergétique (i.e l'eau potable produite par énergie consommée), la protection contre les retours d'eau, les exigences en matière de qualité microbiologique de l'eau potable (légionelles et coliformes totaux), les essais de performance des filtres inclus dans la conception du système en matière de réduction des produits, le cycle de vie pour les systèmes raccordés en amont du réseau d'eau potable et l'innocuité des matériaux (revue de leur formulation et essais de migration). En revanche, la présente norme n'a pas, selon les termes employés, pour objet de vérifier les affirmations du fabricant concernant « *la pureté de l'eau produite (par exemple, composés chimiques, particules)* ».

Par ailleurs, chacune des deux normes impose de remplir les critères de normes supplémentaires citées.

Il est à noter que ni les dossiers des AWG recensés, ni les fabricants auditionnés ne citent la norme NSF P343 (2023) et qu'un seul fabricant mentionne la norme ASSE/ANSI 1090-2020e1 sans toutefois revendiquer de conformité à cette dernière.

En conclusion, la réglementation française n'est à ce jour pas adaptée pour garantir la sécurité sanitaire des eaux distribuées par les AWG et la réglementation européenne n'a pas encore pris en compte ces nouveaux procédés.

Les AWG doivent être en mesure de produire une eau conforme aux exigences de qualité en vigueur pour l'EDCH/ERPTC dans les limites des conditions d'utilisation fixées par le responsable de la mise sur le marché (par exemple, restrictions d'utilisation dans des enceintes confinées et/ou dans des atmosphères contaminées).

Il incombe donc d'évaluer leur innocuité (impact de la qualité de l'air sur la qualité de l'eau produite, absence de relargage de substances indésirables ou toxiques par les matériaux,

produits et procédés de traitement utilisés dans les AWG) et d'évaluer leur efficacité (taux d'abattement des polluants transférés de l'air à l'eau par les procédés de traitement utilisés dans les AWG).

3.3. Innocuité des AWG

3.3.1. Limites de l'expertise

Il n'a pas été possible de réaliser une évaluation complète des risques sanitaires liés à l'utilisation des AWG car la littérature est peu fournie et se concentre principalement sur les performances de production des dispositifs (volumes d'eau produits par unité d'énergie) en fonction des conditions d'essais (par exemple, le taux d'hygrométrie, la température).

Dans un premier temps, la pluralité des sites potentiels d'utilisation (par exemple, un habitat domestique, un bâtiment collectif, un site militaire, l'espace public) et la variabilité spatio-temporelle de la qualité de l'air ont rendu complexe le recensement des polluants et l'estimation des dangers associés à leur exposition.

De plus, le faible nombre de données disponibles ne permet pas d'apprécier dans quelle mesure les dangers présents dans l'atmosphère sont susceptibles d'altérer la qualité de l'eau brute condensée et, *in fine*, de l'eau produite. En effet, seules sept publications ont été jugées pertinentes puisqu'elles abordent la question des polluants atmosphériques et de leur impact sur la qualité des condensats bruts. Une seule étude permet une approche quantitative des transferts air-eau des polluants. Au cours des auditions réalisées, il a été constaté que les fabricants ne disposent généralement pas de données sur les condensats bruts récoltés et limitent leur approche à des analyses de l'eau en aval de la filière de traitement. Seul un dossier de projet industriel présente des données comparatives entre les condensats bruts et l'eau traitée.

Enfin, l'hétérogénéité des technologies mises en œuvre dans les AWG (diversité des étapes de traitement, des matériaux utilisés), le manque de connaissances précises de la composition des matériaux constitutifs des dispositifs et l'absence de données sur la contamination de l'eau suite à l'utilisation des produits et procédés de traitement (P&PT) rendent complexe l'identification des dangers de manière exhaustive (dangers pertinents²⁰).

3.3.2. Dangers liés à la pollution de l'air

L'air, qu'il soit intérieur ou extérieur, peut contenir divers polluants : des substances chimiques, des radioéléments qui peuvent se trouver à l'état gazeux, liquide ou particulaire et/ou des aérosols biologiques (particules d'origine microbienne, animale ou végétale en suspension dans l'air).

■ Polluants de l'air : composés gazeux et particulaires

Captés par les AWG, les composés gazeux et particulaires peuvent potentiellement être transférés dans les condensats bruts par des mécanismes diffusionnels (modification d'état), réactionnels (modification chimique) ou par dépôt (particules). Or, la littérature actuelle consacrée aux AWG ne s'intéresse que très rarement à la qualité de l'air entrant dans les dispositifs et les rares données récoltées, y compris lors des auditions, sont avant tout qualitatives.

²⁰ Dangers pertinents = dangers chimiques, microbiologiques ou radiologiques à prendre en compte dans l'évaluation de l'innocuité et l'efficacité des AWG car susceptible d'impacter la qualité de l'eau produite.

La qualité de l'air extérieur fluctue fortement dans le temps et l'espace, en fonction notamment des activités humaines et des conditions météorologiques. L'étude des bilans de surveillance de la qualité de l'air extérieur démontre que des dépassements ponctuels des valeurs réglementaires²¹ peuvent être observés en France, de même que des maxima de concentrations pour certains polluants non réglementés comme, par exemple, certains pesticides (le prosulfocarbe, la pendiméthaline, le folpel, l'antraquinone, le triallate ou encore la fenpropidine sur la période 2018-2022²²). Ces concentrations plus élevées en pesticides dans l'air surviennent aussi bien en zones urbaines qu'agricoles, principalement au printemps mais également en octobre-novembre, période de traitement des cultures hivernales.

De plus, la surveillance de la qualité de l'air ne concerne pas l'ensemble des polluants d'intérêt dans le domaine des EDCH.

Concernant l'air intérieur, sa qualité est dépendante de multiples facteurs (par exemple, l'air extérieur via les prises d'air, le bâti, la présence de purificateurs d'air, l'usage des locaux, les occupants²³). Le formaldéhyde, le benzène, le radon²⁴ et le dioxyde de carbone²⁵ sont les quatre polluants faisant l'objet de dispositifs réglementaires.

■ Aérosols biologiques

Une autre source potentielle de contamination des eaux produites par les AWG concerne les aérosols biologiques qui ne sont pas soumis à des dispositions réglementaires, que ce soit dans l'air intérieur ou extérieur ; ainsi, il n'est pas possible d'établir, comme pour les polluants chimiques, une cartographie des zones polluées et des niveaux de pollution rencontrés en France. Si la pollution de l'air par les aérosols biologiques est pourtant bien caractérisée dans la littérature, les auditions ont permis de constater que les fabricants d'AWG se limitent à la réalisation d'une désinfection systématique des eaux brutes sans avoir clairement précisé la nature des agents microbiens à inactiver, ni les conditions de mise en œuvre de cette désinfection. Deux publications de Blatny *et al.* (2008, 2011) ont démontré que si le risque sanitaire biologique n'est pas négligeable aux alentours des stations de traitement des eaux usées, il décroît néanmoins très rapidement avec la distance. Une publication de Sabria *et al.* (2006) montre que la probabilité d'infection par voie aérienne à *Legionella pneumophila* est maximale dans un rayon de 500 m autour d'une tour aérofrigorante (TAR). De même, Rouil *et al.* (2004) indiquent à partir de simulations que des sources d'émission puissantes telles que les TARs pourraient être à l'origine de la diffusion aéroportée de bactéries sur des distances supérieures à 10 km lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

Selon la nature des traitements appliqués aux condensats bruts et/ou la proximité de sources de contaminations microbiologiques de l'air, il pourrait s'avérer nécessaire dans certains cas de prendre en compte d'autres paramètres microbiologiques que ceux du contrôle sanitaire des eaux dans l'identification des dangers, l'évaluation des risques et la surveillance des eaux produites par ces dispositifs (par exemple, des virus).

²¹ Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

²² Base Phytatmo. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-de-surveillance-de-pesticides-dans-l-air-par-les-aasqa-a-partir-de-2002/>.

²³ Et notamment leur état de santé (eu égard à l'émission de dangers microbiologiques).

²⁴ Annexe de l'article R.221-29 du code de l'environnement, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000046835236.

²⁵ Décret n°2022-1690 du 27 décembre 2022 modifiant le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.

■ Transferts de l'air à l'eau des polluants chimiques ou radiologiques

Des sept publications pertinentes abordant la qualité des condensats bruts, il ressort que les taux de transfert des polluants de l'air vers l'eau sont très variables et dépendent de la nature des polluants, des conditions météorologiques et de la position du dispositif vis-à-vis des sources potentielles. Parmi les polluants fréquemment retrouvés dans les condensats bruts, l'ammonium est souvent présent à des concentrations dépassant la référence de qualité réglementaire dans l'EDCH mais pas celle de l'eau brute (respectivement 0,10 mg.L⁻¹ et 4 mg.L⁻¹)²⁶, ce qui implique l'utilisation d'un traitement adapté pour éliminer ce contaminant. Les condensats bruts sont également très pauvres en éléments minéraux, de pH variable selon les études (généralement compris entre 6-8), de conductivité souvent inférieure à la référence de qualité réglementaire pour les EDCH (< 180 µS.cm⁻¹ à 20 °C ou < 200 µS.cm⁻¹ à 25 °C) et contenant quelques fois des éléments métalliques qui seraient relargués par les matériaux constitutifs des AWG (le nickel, notamment).

Une seule étude, réalisée par Kinder *et al.* (2017), apporte des éléments de quantification des transferts entre l'air et le condensat brut pour le benzène, par essais en chambre de simulation. La concentration en benzène dans le condensat brut augmente avec celle mesurée dans l'air et des dépassements de la limite de qualité réglementaire (1 mg.L⁻¹) ont été notés pour des concentrations initiales dans l'air de plusieurs centaines de microgrammes par mètre cube, soit entre 50 et 420 fois celle de l'objectif de qualité fixé au niveau français (2 µg.m⁻³). Par ailleurs, pour une même concentration dans l'air, la concentration en benzène dans le condensat brut diminue quand la température augmente. Les auteurs observent que ces constats sont globalement en accord avec les valeurs calculées par la loi de Henry sous réserve d'une estimation correcte de la température de condensation. Pour mener une évaluation des risques liés aux polluants chimiques de l'air, des données sur leurs concentrations dans l'air, les mécanismes de transfert de l'air vers les condensats bruts, ainsi que les concentrations qui y sont retrouvées, sont donc primordiales.

Une approche pertinente pour identifier les polluants gazeux les plus susceptibles d'être transférés dans les condensats bruts reposerait sur les mécanismes de transfert air-eau, les lois de la thermodynamique, le modèle du double film de Lewis et Whitman (1924)²⁷ et la constante de Henry, propriété intrinsèque caractéristique de chaque polluant, comme paramètre déterminant.

Une démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques pertinents liés à l'air pour les AWG est proposée par le GT. Elle repose sur le recensement d'une liste de polluants présents dans l'air capté par l'AWG et leur caractérisation, incluant leur toxicité par voie orale, leur état physique dans l'air (aérosol versus gaz, formes chimiques), leur concentration maximale observée dans l'air, leur potentiel de transfert air-eau et les possibles transformations chimiques lors du changement de milieu (annexe 8 du rapport). Ainsi :

- pour les dangers à l'état particulaire : faire l'hypothèse que 250 m³ d'air transitent dans le dispositif pour produire un litre d'eau brute (moyenne à ajuster en fonction des données des fabricants) et utiliser le scénario « pire cas » pour lequel la concentration du polluant dans l'air est maximale et la totalité du polluant contenu dans les 250 m³ est transférée dans l'eau. Ainsi, à partir de la concentration maximale du polluant

²⁶ Annexes I et II de l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

²⁷ Lewis, Warren K. and Walter G. b. Whitman. "Principles of Gas Absorption." *Industrial & Engineering Chemistry* 16 (1924): 1215-1220.

considéré dans l'air, calculer sa concentration maximale attendue dans le condensat brut (C_{max}) et la comparer à la limite/référence de qualité dans les EDCH/ERPTC ou, à défaut, à tout autre valeur sanitaire (voir l'exemple du mercure en annexe 8 du rapport, classé non pertinent dans les conditions du calcul) ;

- pour les dangers présents sous forme gazeuse dans l'air et ne subissant pas de transformation chimique lors du passage air-eau : utiliser le scénario « pire cas » pour lequel il est considéré que l'équilibre gaz/liquide est atteint, de telle sorte que la quantité maximale de polluant a été transférée de la phase gaz vers la phase liquide condensée, à la pression d'utilisation de l'AWG²⁸.

Dans cette démonstration, un transfert de la phase gaz (à 25°C i.e 298 K) vers la phase liquide condensée (à 5°C i.e 278 K), à pression atmosphérique, est considéré. Elle s'appuie sur les équations et les données de Sander *et al.* (2023)^{29,30}.

$$C_L^* = Hs^{cp} (298 \text{ K}) \times \exp\left[-\frac{\Delta H_{sol}}{R} \times \left(\frac{1}{T(278 \text{ K})} - \frac{1}{T(298 \text{ K})}\right)\right] \times R \times T(278 \text{ K}) \times C_G$$

avec :

C_L^* : la concentration dans la phase liquide en équilibre avec la phase gaz ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ;

$Hs^{cp} (298 \text{ K})$: la constante de Henry ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$) à 298 K issue des données de Sander³¹ ;

ΔH_{sol} = enthalpie de dissolution ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) ($-\frac{\Delta H_{sol}}{R}$: valeur issue des données de Sander, en K) ;

R : la constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à pression atmosphérique) ;

T : la température du système (en K) ;

C_G : la concentration dans la phase gaz ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Les exemples du benzène, de la fenpropidine et du radon sont détaillés en annexe 8 du rapport. Seule la fenpropidine est classée comme étant pertinente dans les conditions du calcul.

- pour les dangers subissant des transformations chimiques lors du passage air-eau : faute de données dans la littérature, ces dangers sont considérés comme pertinents jusqu'à démonstration que leur concentration dans l'air soit trop faible pour induire une concentration significative dans l'eau.

3.3.3. Innocuité des matériaux et procédés technologiques mis en œuvre

Les dangers relevés ne sont pas spécifiques aux AWG mais peuvent revêtir une importance particulière du fait des caractéristiques des eaux de condensation et des modalités de gestion des AWG :

- dispositifs de filtration de l'air : une contamination des condensats bruts est possible en cas de défaut d'entretien pouvant entraîner la colonisation du média filtrant par des agents microbiens, notamment des moisissures en présence d'humidité. En cas de présence d'ozone dans l'air, des sous-produits de réaction peuvent se former, en particulier le formaldéhyde et l'acide formique ;

²⁸ Les températures et la pression seront à adapter en fonction des conditions de fonctionnement de l'AWG.

²⁹ Sander, R. Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10901–12440, <https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023>, 2023.

³⁰ La constante de Henry d'un composé est fortement influencée par la température. Une correction de la température dérivée de l'équation de Clapeyron est proposée par Sander *et al.* (2023).

³¹ <https://www.henrys-law.org/henry/>.

- matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement : des phénomènes de corrosion ou de migration peuvent aboutir à une dégradation de la qualité microbiologique, organoleptique ou physico-chimique de l'eau. En l'absence de reminéralisation et de correction du pH, l'agressivité des eaux produites par les AWG peut impacter l'état des réseaux de distribution en cas de raccordement ;
- enrichissement de l'eau : si les opérations de reminéralisation et de correction du pH se justifient pour améliorer le goût de l'eau ou corriger son agressivité si elle doit être transportée dans un réseau, certains industriels enrichissent les eaux produites en substances minérales non autorisées pour le traitement des EDCH/ERPTC. L'innocuité des eaux enrichies et leurs allégations de santé ne sont pas démontrées par les responsables de la mise sur le marché. Ces dernières ne relèvent pas de la réglementation sur les EDCH/ERPTC mais de celle des BSA et n'entrent pas dans le champ de cette expertise ;
- contamination et colonisation de la filière de traitement par des agents biologiques : le traitement et le stockage apparaissent comme des étapes critiques pour garantir la qualité microbiologique des eaux brutes et traitées. Parmi les étapes sensibles, la filtration sur charbon actif est propice à une contamination bactérienne de par sa surface colonisable importante et l'accumulation de matière organique. Concernant le stockage des eaux, les surfaces des réservoirs peuvent être colonisées par des biofilms. Face au peu de données disponibles et au regard des similitudes de conception observées entre certains AWG et les fontaines réfrigérantes, les études et recommandations relatives aux fontaines à eau apportent des éléments de réflexion transposables au cas des AWG. Ainsi, les paramètres bactériens usuels du contrôle sanitaire (flore aérobie revivifiable, bactéries coliformes dont *E. coli*, entérocoques intestinaux, spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices) doivent, en cohérence avec la réglementation, être utilisés pour évaluer les risques de dégradation de la qualité microbiologique des eaux produites. En complément du dénombrement de la flore aérobie revivifiable, celui des *Pseudomonas aeruginosa* permettrait d'évaluer la bonne maîtrise de la prolifération microbienne au sein de l'AWG. D'autres paramètres, identifiés lors de l'analyse des dangers, pourraient être à intégrer dans les canevas d'analyses en fonction des équipements.

3.3.4. Autres enjeux concernant les AWG

Aucune étude bibliographique n'a été menée sur l'impact des AWG sur le taux d'hygrométrie de l'air extérieur ou intérieur. Pourtant, le principe de fonctionnement des AWG repose sur une capture de la vapeur d'eau présente dans l'air.

Pour une prise d'air extérieur, seul un projet d'usine d'embouteillage a réalisé des calculs de l'impact de son dispositif sur l'environnement. Ces calculs démontrent qu'à grande échelle les AWG ne sont pas une source significative de spoliation de l'eau pour l'environnement. Ce constat serait cependant à revoir si le dimensionnement de tels sites de production, ainsi que leur nombre, prenaient de l'ampleur sur une zone géographique déterminée.

Pour une prise d'air intérieur, les AWG utilisés en environnement clos sont susceptibles d'avoir un effet bénéfique en jouant le rôle de déshumidificateurs d'air ; cependant, le taux d'hygrométrie pourrait devenir trop bas (< 30 %) dans le local, ce qui pourrait à la fois être une source d'inconfort pour les occupants (Wolkoff, 2018) et un motif de la baisse de performance des AWG. Néanmoins, ils n'ont pas vocation à être installés dans des locaux mal ventilés dès lors que sans renouvellement de l'air intérieur, la concentration en polluants dans l'air pourrait augmenter et potentiellement impacter la qualité de l'eau produite par les AWG.

Une autre question posée par les AWG est la faible minéralisation des eaux produites, bien qu'il n'existe pas en France de dispositions réglementaires interdisant la commercialisation d'eaux conditionnées très faiblement minéralisées, à l'instar de certaines eaux minérales naturelles. Ni la littérature concernant les AWG, ni les fabricants auditionnés n'ont étudié les effets à long terme de la consommation de telles eaux et évalué les risques, notamment de déficits d'apport en minéraux.

3.4. Efficacité des AWG

3.4.1. Limites de l'expertise

Le faible nombre de données sur la qualité des condensats bruts fournies par les responsables de la mise sur le marché (auditions) et issues de la littérature ne permet pas d'évaluer l'efficacité des filières de traitement mises en œuvre. Les choix des procédés employés dans les AWG et leur emplacement dans la chaîne de traitement ne sont pas justifiés par des analyses et/ou données objectives. De plus, les AWG constituant un ensemble hétérogène de dispositifs associant divers procédés de traitement des eaux, il n'est pas possible d'évaluer l'efficacité réelle de tous les dispositifs commercialisés. Par ailleurs, l'efficacité d'un même dispositif peut être très variable d'un site à un autre en fonction des caractéristiques de l'air capté. L'expertise s'est donc focalisée sur les points à considérer dans une démarche d'évaluation de l'efficacité, en rappelant l'intérêt et les limites des différents procédés de traitement de l'eau susceptibles d'être intégrés dans un AWG.

3.4.2. Efficacité des procédés de traitement de l'air

La présence de particules et de polluants volatils dans l'air rend indispensable une filtration pour limiter notamment l'empoussièrement des surfaces de condensation et leur colonisation microbienne. L'efficacité des filtres est dépendante du matériau, de sa porosité et de l'hygrométrie de l'air (Möritz *et al.*, 2001). Leurs performances sont essentiellement affectées par le phénomène de colmatage lié à l'humidité de l'air et l'agglomération de particules solides sur le filtre. Il en résulte une perte progressive du flux d'air et donc du rendement de l'AWG (Poulin *et al.*, 2018 ; US EPA, 2018). Les filtres les plus performants, de type HEPA³², ont une efficacité de collecte supérieure à 99 % pour les particules dont le diamètre est supérieur à 0,3 µm mais restent d'une efficacité limitée vis-à-vis des particules fines (< 2,5 µm), ultrafines ou nanoparticules (< 0,1 µm). Néanmoins, la filtration de l'air n'a pas vocation à être stérilisante puisque des procédés sont prévus pour désinfecter l'eau récoltée après condensation.

Les filtres employés devront être adaptés aux conditions de mise en œuvre des AWG (qualité de l'air capté) et remplacés ou nettoyés à des fréquences optimales pour garantir l'efficacité des dispositifs. Même si des recommandations à cet effet sont données par les responsables de mise sur le marché, elles sont rarement associées à des indicateurs objectifs auxquels pourraient se référer les utilisateurs.

Des adsorbants (zéolites) sont parfois employés dans les AWG pour la capture de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Cependant, l'effet du chauffage de l'adsorbant sur la flore microbienne et les spores apportées par l'air (effet légal revendiqué par certains responsables de la mise sur le marché), ainsi que la possibilité que l'adsorbant capture sélectivement les composés organiques volatils (COV) et les relargue dans les condensats bruts ne sont pas décrits dans la littérature.

³² High efficiency particulate air (HEPA) ; norme NF EN 1822-1 (2019). Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) — Partie 1 : Classification, essais de performance et marquage.

3.4.3. Efficacité des procédés de traitement de l'eau

L'efficacité globale des AWG dépend également des étapes de traitement mises en œuvre.

- **Filtration de l'eau sur charbon actif** : les charbons actifs sont principalement efficaces vis-à-vis de composés organiques de poids moléculaire élevé, non polaires ou faiblement polaires. En pratique courante, les pesticides constituent la principale famille de composés pour lesquels les filtres à charbon actif sont utilisés même si ceux-ci présentent des limites d'efficacité vis-à-vis de pesticides polaires de faible poids moléculaire (glyphosate en particulier). Les taux d'abattement dépendent de la matière première utilisée (par exemple, houille, tourbe) pour la fabrication du charbon et du mode de fabrication lui-même qui déterminent la porosité du charbon obtenu et sa capacité d'adsorption des contaminants à éliminer et des conditions de mise en œuvre du charbon (débit, température).
Si le charbon actif est couramment utilisé dans les fontaines à eau réfrigérantes pour éliminer le chlore et les sous-produits de désinfection, et pour améliorer la qualité organoleptique de l'eau, la pertinence de son utilisation et de son emplacement dans la filière des AWG n'a pas été justifiée lors des auditions des responsables de la mise sur le marché, notamment par une analyse des abattements des polluants. En pratique, outre la nature des composés à éliminer, l'efficacité des filtres à charbon peut être altérée par une saturation progressive des sites d'adsorption liée à une rétention des polluants et de la matière organique (MO). Cette MO peut également favoriser le développement de biofilms responsables d'une obstruction des pores et d'une modification de l'affinité des surfaces avec les polluants. Les capacités d'adsorption des filtres à charbon peuvent ainsi être réduites jusqu'à 50 % après quelques mois d'utilisation (Ding *et al.*, 2006 ; Ye *et al.*, 2019).
- **Filtration membranaire** : l'efficacité des membranes repose sur trois facteurs principaux : la nature des polluants, leurs concentrations et le niveau de vieillissement du matériau. Leur vieillissement dépend des contraintes mécaniques liées aux cycles de fonctionnement, du colmatage progressif de la membrane et/ou des produits de nettoyage utilisés. Lorsque la membrane atteint un vieillissement trop important, une rupture d'intégrité du matériau peut survenir et provoquer un défaut de rétention des polluants. Le cas échéant, si l'eau produite venait à être consommée, elle pourrait présenter un risque sanitaire.
En pratique, le choix de la filtration membranaire (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) repose sur la nature des composés à éliminer et leurs concentrations ; or ni les auditions ni la littérature n'ont fourni de données suffisantes sur les condensats bruts pour justifier le choix technique dans ce domaine. Du recensement des AWG et des auditions, il est ressorti qu'aucun cycle de nettoyage des membranes n'est prévu et que leur remplacement régulier doit être effectué à une fréquence déterminée théoriquement et sans argument technique étayé. De plus, aucun capteur/indicateur ne permet de suivre le vieillissement membranaire. Dans le cas du projet d'usine d'embouteillage dont le dossier a été transmis par la DGS, l'étape de filtration membranaire est précédée d'une étape d'ozonation ; or Li *et al.* (2022) ont montré qu'après un contact prolongé avec l'ozone (jusqu'à 240 heures d'exposition à des concentrations comprises entre 0,05 et 0,20 mg.L⁻¹), une membrane d'ultrafiltration se dégrade : la taille de ses pores augmente, ce qui conduit à une augmentation de 34 % de la perméabilité et une diminution de 21,8 % de la rétention. Le choix des procédés et des produits utilisés en amont de la filtration de l'eau est donc déterminant pour les performances de la filtration membranaire.
- **Désinfection aux UV** : si le recours aux UV est systématique dans les AWG recensés pour l'étape de désinfection, les auditions n'ont apporté d'informations ni sur les données techniques (type de lampes utilisées, conditions de mise en œuvre, doses

employées, emplacement dans la filière) ni sur les modalités de validation des protocoles de désinfection ou du maintien de la qualité microbiologique des eaux produites lors de leur stockage. En effet, l'efficacité de la désinfection aux UV repose sur les conditions d'utilisation des réacteurs UV qui sont fixées par la réglementation³³. Leur fonctionnement intermittent dans certains AWG, le positionnement de certains réacteurs et l'absence de sonde de contrôle de l'irradiation UV interrogent sur le respect de ces dispositions et donc sur l'efficacité de la désinfection.

L'air capté pouvant contenir des polluants différents par rapport à ceux des ressources en eau « conventionnelles » (souterraines et superficielles) et les AWG ayant vocation à être installés dans des environnements très divers, le choix d'une filière de traitement adaptée nécessiterait des connaissances approfondies de la qualité des condensats bruts et de ses fluctuations.

3.5. Conclusion du GT et du CES « Eaux »

Face à la diversité des AWG commercialisés et de leurs usages, au manque de données pour caractériser les dangers (dans la littérature et lors des auditions) et au manque de preuves suffisantes de la capacité des dispositifs à produire une eau conforme aux exigences de qualité réglementaires en vigueur pour l'EDCH/ERPTC, le GT n'a pas pu réaliser une évaluation exhaustive des risques sanitaires associés à l'utilisation de ces dispositifs.

Le GT et le CES « Eaux » soulignent :

- le manque de données relatives à l'impact de la qualité de l'air sur celle de l'eau condensée et, *in fine*, celle de l'eau produite, ne permet pas de garantir l'efficacité en toutes circonstances des filières de traitement mises en œuvre. Ce constat appelle à des études complémentaires ;
- le manque de données analytiques sur la qualité des eaux produites par les AWG au regard des limites et références de qualité réglementaires applicables aux EDCH/ERPTC ;
- l'absence de mise en œuvre, par les industriels, de protocoles de validation des AWG avant commercialisation, en se plaçant dans des conditions « pire cas » de pollution de l'air ou des conditions de pollution de l'air maîtrisées (chambre de simulation) ;
- l'absence de définition précise et de validation des modalités de maintenance des appareils ;
- l'absence de capteurs permettant à l'utilisateur de s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs de traitement de l'eau dans le temps ;
- que si les eaux produites étaient ensuite enrichies, elles ne relèveraient plus de la réglementation sur les EDCH/ERPTC mais de celle des BSA, ces dernières n'entrant pas dans le champ de l'expertise. Elles devraient alors faire l'objet d'une évaluation correspondant à cet usage.

Le GT et le CES « Eaux » concluent en réponse aux questions de la DGS :

- **Q1** : que le phénomène de condensation ne constitue pas un procédé de traitement de l'eau au sens de l'article R.1321-50 du code de la santé publique et que toute étape de condensation pour la production d'EDCH/ERPTC doit faire l'objet d'une évaluation de son innocuité ;

³³ Arrêté du 9 octobre 2012 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets utilisés pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine pris en application de l'article R.1321-50 (I et II) du code de la santé publique.

- **Q2** : que la nature et la concentration des polluants dans l'air présentent de fortes variations spatio-temporelles avec des conséquences potentielles directes sur la qualité des condensats bruts. La conception et la validation de la filière de traitement de l'eau dans l'AWG doit se faire en prenant en compte cette variabilité. Il est à noter que les modalités actuelles de surveillance de la qualité de l'air en France ne sont pas suffisantes pour garantir une qualité de l'air adaptée aux AWG. De même, les exigences de qualité réglementaires actuellement applicables aux eaux brutes d'origines conventionnelles utilisées pour la production d'EDCH/ERPTC ne conviennent pas forcément pour les condensats bruts d'AWG. Par ailleurs, les risques sanitaires ne dépendent pas uniquement de la qualité de l'air prélevé mais également de la nature des matériaux au contact de l'eau, ainsi que des performances et des conditions d'utilisation des procédés de traitement utilisés.
Ainsi, un canevas analytique spécifique pour les eaux produites par des AWG serait à prévoir dans la réglementation relative aux EDCH/ERPTC pour la mise en œuvre du contrôle sanitaire et/ou de la surveillance exercée par l'exploitant. En effet, des polluants présents dans l'air et pouvant être de potentiels dangers ne sont pas pris en compte dans la réglementation actuelle. À ce titre, les experts proposent aux industriels une « démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques pertinents liés à l'air pour les AWG » (annexe 8). Concernant les paramètres microbiologiques, ceux du contrôle sanitaire (flore aérobie revivifiable, bactéries coliformes dont *E. coli*, entérocoques intestinaux, spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices), doivent, en cohérence avec la réglementation, être utilisés pour évaluer les risques de dégradation de la qualité microbiologique des eaux produites. En complément du dénombrement de la flore aérobie revivifiable, celui des *Pseudomonas aeruginosa* permettrait d'évaluer la bonne maîtrise de la prolifération microbienne au sein de l'AWG. D'autres paramètres, identifiés lors de l'analyse des dangers, pourraient être à intégrer dans les canevas d'analyses en fonction des traitements utilisés dans l'AWG ;
- **Q3** : que les dossiers de demande d'autorisation devront particulièrement prendre en considération la pertinence et l'exhaustivité de la liste des dangers identifiés au vu des données de pollution de l'air, la capacité de la filière de traitement de l'air et de l'eau à abattre ces polluants et la validation de l'ensemble de l'AWG réalisée sur la base de simulations en atmosphère polluée. Par ailleurs, les dossiers de demande d'autorisation devront intégrer des éléments permettant de statuer sur la capacité des AWG à limiter la prolifération microbienne (biofilm) et à maintenir dans le temps une qualité microbiologique conforme aux critères de l'EDCH, notamment en s'appuyant sur des tests d'épreuves microbiologiques. Une liste des pièces constitutives d'un dossier de demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) pour un dispositif destiné à un usage domestique ou collectif (I) ou d'un dossier de demande d'autorisation par le Préfet d'un dispositif industriel fixe (II) est proposée en annexe 10 du rapport.
- **Q4** : que les AWG ne constituent une source d'eau alternative intéressante que dans des situations où les ressources classiques sont très rares ou inexistantes, sachant que les volumes d'eau produits restent réduits même en conditions optimales. Compte-tenu du coût de production de l'eau par les AWG, lié à l'acquisition, la maintenance, le suivi et la consommation électrique de ces appareils, le recours à des AWG devrait être réservé à la production d'eau de boisson. Si d'autres usages (domestiques, agricoles, industriels) venaient à être autorisés, une évaluation économique, environnementale et sanitaire spécifique à chaque usage serait nécessaire.

Le GT et le CES « Eaux » soulignent les points suivants :

- l'efficacité et l'innocuité des AWG ne sont pas clairement démontrées par les responsables de la mise sur le marché auditionnés ;
- les conditions de l'entretien des AWG, de leur maintenance et de leur surveillance ne sont pas détaillées et validées par les fabricants ;

- les paramètres actuels de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air et de l'EDCH/ERPTC ne sont pas suffisants ;
- les revendications et allégations des responsables de la mise sur le marché (bénéfices économiques, santé, hygrométrie, écologie) ne sont pas justifiées scientifiquement.

3.6. Recommandations du GT et du CES « Eaux »

La réglementation française n'étant pas adaptée pour garantir la sécurité sanitaire des eaux distribuées par les AWG et ne s'appliquant pas *de facto* aux AWG, les installations fixes devraient faire l'objet d'une demande d'autorisation préfectorale (article R.1321-6 du CSP) avec possibilité de saisir l'Anses (article R.1321-7-II), et les dispositifs mobiles, en tant que produits et procédés innovants, devraient faire l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) conformément à l'article R.1321-50-IV ; cependant, des adaptations des procédures actuelles sont à prévoir.

Ainsi, des recommandations sont émises à destination de la DGS (tableau 1), des fabricants des AWG (tableau 2), des exploitants d'installations fixes (tableau 3) et des utilisateurs particuliers (tableau 4).

Le GT recommande, par ailleurs, que des études soient menées pour pallier le manque de données relatives :

- à la quantification des transferts air-eau de polluants dans les conditions de fonctionnement des AWG ;
- à l'identification des polluants atmosphériques d'intérêt à suivre dans les condensats bruts ;
- aux dispositifs utilisant des adsorbants au vu de la complexité des mécanismes impliqués (capture des particules, impact du chauffage, transferts air-eau-adsorbant).

Tableau 1. Recommandations du GT et du CES « EAUX » à destination de la DGS

	Pour les dispositifs mobiles (demande d'AMM)	Pour les installations fixes (demande d'autorisation préfectorale)
Ressource en eau d'origine atmosphérique	<p>Donner un cadre réglementaire adapté pour l'exploitation de la vapeur d'eau atmosphérique comme ressource pour la production d'EDCH/ERPTC.</p> <p>Les exigences de qualité réglementaires actuellement applicables aux eaux brutes « de toutes origines »³⁴ utilisées pour la production d'EDCH ne conviennent pas pour les condensats bruts d'AWG. La prise en compte des polluants de l'air relève de l'analyse des risques et est spécifique de chaque situation. En l'état actuel, le GT n'a pas été en mesure de proposer des critères de qualité pour les condensats bruts d'AWG.</p> <p>En-dehors des essais de validation des performances de l'AWG, qui impliquent que le pétitionnaire identifie les polluants d'intérêt provenant de l'air, le GT ne considère pas nécessaire de fixer par voie réglementaire une obligation de réalisation d'analyses d'air périodiques au niveau de la prise d'air des AWG.</p>	
	<p>Éditer des recommandations concernant le choix d'un lieu d'implantation de ces dispositifs (ou au minimum de la prise d'air) en évitant des locaux où l'atmosphère peut être particulièrement contaminée (par exemple, ateliers, garages, établissements de santé). La mise hors service des AWG devrait être conseillée en cas de pollution ponctuelle de l'air (de type alerte à la pollution, épandage de produits phytosanitaires à proximité, incendie).</p>	<p>Choisir un site peu exposé aux pollutions atmosphériques (en particulier, éloigné de grands axes de circulation, de TAR, de stations de traitement des eaux usées, de zones de grandes cultures, de certains sites industriels).</p>
Autorisations administratives des AWG	<p>La procédure d'autorisation préalable doit permettre de s'assurer que toutes les précautions ont été prises lors de la conception des équipements.</p>	
	<p>Le dossier de demande d'AMM, en application de l'article 1321-50-IV du code de la santé publique, devra comporter <i>a minima</i> les pièces proposées en annexe 10-I du rapport.</p>	<p>Les installations fixes devront faire l'objet d'une demande d'autorisation préfectorale (article R.1321-6 du CSP) avec possibilité de saisir l'Anses (article R.1321-7-II) et le dossier devra comporter <i>a minima</i> les pièces proposées en annexe 10-II du rapport.</p>

³⁴ Arrêté du 11 janvier 2007 modifié relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

		<p>Considérant le peu de recul actuel dans le domaine de la production d'eau atmosphérique, le GT recommande que les installations industrielles bénéficiant d'une autorisation préfectorale fassent l'objet d'un contrôle renforcé de la part des services de l'État durant au minimum leur première année de fonctionnement.</p>
MCDE/P&PTE/Fluides caloporteurs/Produits de nettoyage	<p>La conformité à la réglementation française des matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement, fluides caloporteurs et produits de nettoyage doit être demandée.</p>	
Pilotage et surveillance de la production	<p>Le cadre réglementaire relatif aux EDCH/ERPTC devrait être aménagé afin que les dispositions actuelles relatives à l'analyse des dangers et des risques, au pilotage et à la surveillance des procédés soient étendues de manière explicite au cas des AWG. En particulier, la pertinence de la filière de traitement de l'eau doit être justifiée.</p> <p>Les fabricants (AWG mobiles) ou exploitants (AWG fixes) doivent être encouragés à développer des capteurs permettant de détecter les dysfonctionnements de l'AWG ; des mesures de surveillance et d'alerte en cas d'incident, de dysfonctionnement ou de dérive, doivent être mis en place.</p> <p>La fréquence de remplacement des différents consommables doit être validée par des tests en se plaçant dans les pires conditions d'installation des AWG (par exemple, atmosphère poussiéreuse ou grasse pour les filtres à air).</p>	<p>Les procédures à mettre en œuvre en cas de pics de pollution de l'air (de type incendie) doivent être décrites.</p> <p>Un suivi analytique (qualité de l'air, des condensats bruts, de l'eau traitée), ainsi qu'une procédure de protection contre les actes de malveillance doivent être mises en place.</p> <p>Dans le cas où les eaux produites seraient conditionnées, des mesures de retrait/rappel doivent être prévues en cas de contamination d'un lot produit.</p>
Contrôle de la qualité des eaux produites	<p>Dans le cadre de la visite d'entretien (au minimum annuelle) par un professionnel qualifié, la réalisation d'analyses d'eau au minimum pour les paramètres microbiologiques des EDCH est recommandée. La réalisation d'analyses supplémentaires serait laissée à l'initiative du propriétaire de l'AWG, seul responsable <i>in fine</i> de la qualité des eaux.</p>	<p>Le contrôle sanitaire doit couvrir la totalité des paramètres réglementés au titre des EDCH/ERPTC et les paramètres pertinents en lien avec l'analyse des risques (et en particulier les polluants amenés par l'air) à des fréquences d'analyses adaptées.</p>

Tableau 2. Recommandations du GT et du CES « EAUX » à destination des fabricants d'AWG

Recommandations
<p>Les fabricants des AWG doivent procéder à une analyse des risques sanitaires associés aux équipements qu'ils commercialisent, et pouvoir justifier les choix technologiques réalisés ; ils doivent pouvoir démontrer l'aptitude de ces équipements à produire une eau conforme à la réglementation relative aux EDCH/ERPTC (selon les usages des AWG) en lien avec la qualité de l'air et des condensats bruts produits. Ils doivent s'assurer en particulier que les matériaux, les produits et procédés employés et les procédures d'entretien des équipements n'induisent pas de risque pour les consommateurs (en particulier, choix des produits d'entretien, couplage UV-ozone, etc.).</p>
<p>Une évaluation spécifique des agents biologiques, radiologiques (radon pour les AWG captant l'air à l'intérieur de locaux) et chimiques susceptibles d'être présents dans l'air est indispensable, notamment pour une utilisation des AWG en intérieur.</p>
<p>Les AWG ne devraient être commercialisés en France que dans la mesure où les utilisateurs peuvent disposer d'une notice d'utilisation et d'entretien en français, détaillée et suffisamment explicite pour être comprise par un utilisateur non spécialiste. Parmi les recommandations à intégrer à la notice devraient figurer notamment :</p> <ul style="list-style-type: none">• un rappel au détenteur qu'il est responsable de la qualité de l'eau produite par l'AWG ;• la nécessité de ne pas utiliser un AWG dans un local confiné (veiller à une aération suffisante) en s'assurant notamment que l'hygrométrie soit supérieure à 30 % ;• des recommandations relatives à l'implantation des AWG, loin de sources évidentes de pollution de l'air (locaux où sont entreposés/utilisés des solvants en particulier) ;• des indications précises sur les protocoles de maintenance (en particulier, produits à utiliser, instructions pour le nettoyage et la désinfection, fréquence de remplacement des consommables) ;• des règles précises en cas d'arrêt prolongé (notamment pour prévenir la colonisation du dispositif par une microflore) ;• le suivi analytique de l'eau par le détenteur (conseillé suivant le débit d'eau produite).
<p>Les fabricants devraient proposer aux détenteurs d'AWG mobile de souscrire, lors de l'achat, à un contrat d'entretien et de maintenance par du personnel qualifié. Ce type de contrat devrait en particulier prévoir la réalisation d'au minimum une analyse microbiologique annuelle de l'eau.</p>
<p>Les AWG destinés à un usage domestique devraient être équipés de dispositifs d'alarme, de capteurs, de systèmes automatiques permettant d'interrompre la production d'eau en cas de dysfonctionnement ayant un impact sur la qualité de l'eau, afin de garantir la sécurité des consommateurs.</p>
<p>L'analyse de cycle de vie (ACV) des dispositifs mis sur le marché devrait être établie.</p>
<p>Les fabricants doivent définir des filières de recyclage-valorisation des consommables à l'attention de leurs clients.</p>

Tableau 3. Recommandations du GT et du CES « EAUX » à destination des exploitants d'installations fixes

Recommandations
Les utilisateurs d'installations fixes doivent organiser et mettre en œuvre un ensemble d'actions de maîtrise de la qualité des eaux produites, selon les principes définis pour les plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux.
Ces actions doivent notamment définir une procédure de suivi de la qualité de l'air extérieur en se référant aux données de la surveillance réglementaire (Atmo France ³⁵) et en ayant recours éventuellement à des capteurs (COV et particules). Cette procédure doit prendre en compte en particulier la gestion des pics de pollution le cas échéant (arrêt de la production, protection du dispositif de condensation, etc.).
La définition d'une zone de protection autour du site de production est à prévoir afin de limiter les activités susceptibles de générer des pollutions de l'air extérieur au voisinage de l'usine. Si une telle zone n'est pas imposée par voie réglementaire, le GT encourage sa mise en place via un contrat avec les riverains (agriculteurs notamment).

Tableau 4. Recommandations du GT et du CES « EAUX » à destination des utilisateurs particuliers

Recommandations
Les utilisateurs particuliers (y compris les responsables d'établissements disposant d'AWG) doivent veiller à ne pas installer d'AWG dans des locaux confinés ou pollués.
La souscription d'un contrat d'entretien et de maintenance est à privilégier, auprès d'un professionnel qualifié.
La réalisation annuelle d'analyses (au minimum microbiologiques) des eaux issues des AWG est à prévoir (paramètres du contrôle sanitaire et <i>Pseudomonas aeruginosa</i>).
En cas de raccordement de l'AWG sur un réseau public de distribution d'EDCH, afin de prévenir tout risque de retour d'eau, il est primordial que les prescriptions techniques de la norme NF EN 1717 soient respectées (cf. l'arrêté du 10 septembre 2021 relatif à la protection des réseaux d'adduction et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine contre les pollutions par retours d'eau).

³⁵ <https://www.atmo-france.org/>.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'impact du dérèglement climatique sur les ressources en eau traditionnellement utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (EDCH) conduit à rechercher des approches alternatives pour compenser la raréfaction, saisonnière ou structurelle, de ces ressources. Parmi ces approches, figure celle consistant à capter l'eau présente dans l'atmosphère, sous forme de brouillards ou de vapeur. Plusieurs dispositifs générateurs d'EDCH à partir de condensats (ou *atmospheric water generator* – AWG) ont été développés, mettant en œuvre des procédés de traitement de l'air, de condensation de la vapeur d'eau puis de traitement de l'eau.

Au-delà de la capacité de ces dispositifs à fournir de l'eau en quantité suffisante, leur capacité à fournir une eau potable doit être également garantie pour les différents environnements dans lesquels ils pourraient être amenés à être utilisés.

L'Agence note que ni la réglementation française, ni la réglementation européenne ne prennent en compte les spécificités des AWG et, surtout, ne sont adaptées à ces dispositifs. En effet, les paramètres définis à ce jour pour le contrôle sanitaire des EDCH ou des eaux conditionnées rendues potables par traitement (ERPTC), produites à partir de ressources conventionnelles, ne couvrent pas la variété des dangers (notamment ceux liés aux polluants de l'air) pouvant être d'intérêt pour une production d'EDCH/ERPTC par condensation de l'air. Ceci ne préjuge cependant pas du respect des exigences réglementaires existantes que le ministère chargé de la santé considère comme d'ores et déjà applicables.

De plus, les normes actuelles d'essai pour les AWG (NSF P343 (2023) et ASSE/ANSI 1090-2020e1) ne sont pas suffisantes pour attester de leur innocuité et de leur efficacité.

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail adopte les conclusions et recommandations des experts portant sur les AWG.

L'Agence souligne que la diversité des environnements d'utilisation potentielle des AWG et la variété des polluants atmosphériques associés à ces environnements constituent une complexité dans la démonstration relative à la capacité de ces dispositifs à fournir une eau conforme aux exigences de qualité réglementaires en vigueur pour les EDCH/ERPTC. Cette complexité peut néanmoins faire l'objet, comme il est d'usage, d'une démarche d'identification des dangers critiques et de leur classification en vue de préciser les moyens de la maîtrise des risques associés³⁶.

Les conditions d'entretien, de maintenance et de surveillance de ces dispositifs sont essentielles à la démonstration de la maîtrise dans le temps de la qualité de l'eau produite.

L'Agence constate qu'une telle démonstration n'est apportée pour aucun des AWG examinés dans le cadre du présent avis. Les données disponibles concernant l'innocuité des AWG et leur efficacité à abattre les polluants sont peu nombreuses, notamment celles concernant le transfert de polluants de l'air vers les condensats bruts produits par les AWG et, *in fine*, l'eau traitée. Ainsi, l'évaluation des risques sanitaires associés à l'utilisation des AWG n'a pas été possible.

³⁶ Démarche de type analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise (Hazard Analysis Critical Control Point - HACCP).

Dans la mesure où une adaptation réglementaire visant à intégrer les spécificités des AWG dans le code de la santé publique (CSP) serait envisagée, l'Anses recommande que des preuves d'innocuité et d'efficacité des AWG soient exigées par les autorités compétentes dans le cadre, soit d'un dossier de demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) pour un dispositif mobile destiné à un usage domestique ou collectif (procédé dit « innovant » en application de l'article R.1321-50-IV du code de la santé publique (CSP)), soit d'un dossier de demande d'autorisation par le Préfet pour les dispositifs fixes (article R.1321-6 du CSP, avec possibilité de saisir l'Anses selon l'article R.1321-7-II). À cette fin, les annexes 8 et 10 du rapport d'expertise proposent respectivement une démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques liés à l'air à prendre en compte dans ces dossiers et les pièces constitutives de ces derniers. L'Anses rappelle qu'il appartient à tout responsable de la mise sur le marché de produits de s'assurer que ceux-ci sont propres à l'usage qui en sera fait, qu'ils respectent les prescriptions en vigueur et ne sont pas susceptibles de constituer un danger pour la santé des consommateurs (articles L.121-2, L.411-1, L.411-2, L.421-3, L.423-1 du CSP).

Dans un contexte où des solutions de type AWG seraient amenées à se développer, l'Anses souligne le besoin de développer la normalisation pour tout ou partie des procédés mis en œuvre. Associée le cas échéant à des mécanismes de certification, une normalisation adaptée permettra de renforcer et de rendre plus lisible, à la fois pour les responsables de la mise sur le marché et les autorités de contrôle, le dispositif d'évaluation et d'autorisation des AWG mobiles.

Enfin, l'Anses rappelle que, conformément à l'article L.1321-4 du CSP, « *toute personne publique ou privée responsable d'une production ou d'une distribution au public d'eau destinée à la consommation humaine sous quelque forme que ce soit, [...] ainsi que toute personne privée responsable d'une distribution privée autorisée en application de l'article L.1321-7, est un fournisseur d'eau* ». De ce fait, le détenteur d'un AWG est responsable de la qualité de l'eau produite.

Pr Benoît Vallet

MOTS-CLÉS

Eau destinée à la consommation humaine, générateur d'eau atmosphérique, condensat, traitement, innocuité, efficacité, qualité de l'air, polluant, contaminant, microbiologie, transfert air-eau.

Drinking water, atmospheric water generator, atmospheric water, treatment, safety, efficiency, air quality, pollutant, contaminant, microbiology, air-water transfert.

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2024). Procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats (saisine 2022-SA-0239). Maisons-Alfort : Anses, 27 p.

**Procédés générateurs d'eau destinée à la
consommation humaine à partir de condensats**

Saisine 2022-SA-0239 – Condensats

**RAPPORT
d'expertise collective**

Comité d'Experts Spécialisé (CES) « Eaux »

Groupe de Travail (GT) « Condensats »

Octobre 2024

Citation suggérée

Anses. (2024). Procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats (saisine 2022-SA-0239). Maisons-Alfort : Anses, 162 p.

Mots clés

Eau destinée à la consommation humaine, générateur d'eau atmosphérique, condensat, traitement, innocuité, efficacité, qualité de l'air, polluant, contaminant, microbiologie, transfert air-eau.

Drinking water, atmospheric water generator, atmospheric water, treatment, safety, efficiency, air quality, pollutant, contaminant, microbiology, air-water transfert.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Gilles BORNERT – Chef de service – Groupe vétérinaire des armées de Rennes – Microbiologie, réglementation, situations dégradées, *water defense*.

Membres

M. Pierre AMATO – Chargé de recherche au CNRS en microbiologie atmosphérique – CNRS, Institut de Chimie de Clermont-Ferrand – Microbiologie, nuages, bioaérosols, chimie atmosphérique.

M. Thierry CHESNOT – Ingénieur, chef d'unité adjoint – Anses, Laboratoire d'Hydrologie de Nancy – Microbiologie, eau destinée à la consommation humaine, analyste, prélèvement, réglementation, air.

M. Bruno COULOMB – Maître de conférences – Université Aix-Marseille, Laboratoire Chimie de l'Environnement – Contaminants chimiques, méthodes d'analyse, devenir des contaminants.

M. François MANSOTTE – Ingénieur général du génie sanitaire honoraire (ancien chef du service santé environnement, ARS Normandie) – Hygiène publique, santé environnementale, technologies appropriées, lutte anti vectorielle, génie sanitaire.

M. Christophe MECHOUK – Chef de division « Études et construction » – Service de l'eau de la ville de Lausanne, Suisse – Ingénierie de l'eau (eau potable, eaux usées, eau de process, piscine), traitement de l'eau (procédés), physico-chimie et microbiologie de l'eau, micropolluants (démission le 30 avril 2024).

Mme Sophie SOBANSKA – Chargée de recherche – CNRS, Université de Bordeaux, Institut des Sciences Moléculaires – Analyses physico-chimiques terrain et laboratoire, techniques de prélèvement, chimie atmosphérique, réactivité.

M. Benoit TEYCHENÉ – Maître de conférences en traitement de l'eau – Université de Poitiers, École Nationale Supérieure d'Ingénieur de Poitiers (ENSI Poitiers), Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers (IC2MP) – Traitement de l'eau (eau potable et eaux usées), micropolluants, procédés membranaires.

RELECTEURS

Mme Anne OPPLIGER – Retraitée – Ancienne responsable de recherche au Centre universitaire de Médecine générale et Santé publique, Département de santé au travail, Suisse – Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Marc DURIF – Directeur exécutif du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, Ineris – Métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, caractérisation des expositions.

M. Jean BARON – Responsable de département, Ingénieur de recherche – Eau de Paris – Matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement de l'eau (filiales de traitement), corrosion.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ (MANDATURE 2021 – 2024)

■ CES « Eaux »

Président

M. Gilles BORNERT – Chef de service – Groupe vétérinaire des armées de Rennes – Microbiologie, réglementation, situations dégradées, *water defense*.

Vice-présidents

M. Jean-François HUMBERT – Directeur de recherche, Docteur habilité à diriger des recherches (HDR) – UMR BIOENCO, Institut de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – Microbiologie de l'eau dont cyanobactéries, écologie microbienne.

Mme Anne TOGOLA – Chef de projet de recherche – Bureau de recherche géologiques et minières (BRGM) – Micropolluants organiques, chimie analytique, eaux souterraines.

Membres

M. Jean BARON – Responsable de département, Ingénieur de recherche – Eau de Paris – Matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement de l'eau (filiales de traitement), corrosion.

M. Jean-Luc BOUDENNE – Professeur – Université Aix-Marseille, Laboratoire Chimie de l'environnement – Métrologie des eaux, chimie et qualité des eaux.

M. Nicolas CIMETIERE – Maître de conférences – École nationale supérieure de chimie de Rennes (ENSCR) – Analyse et traitement des eaux (EDCH, micropolluants organiques).

M. Bruno COULOMB – Maître de conférences – Université Aix-Marseille, Laboratoire Chimie de l'environnement – Contaminants chimiques, méthodes d'analyse, devenir des contaminants.

M. Christophe DAGOT – Professeur – Université de Limoges, UMR Inserm 1092, RESINFIT – Antibiorésistance (intégrons, génie des procédés), qualité des effluents (antibiotiques et bactéries résistantes).

Mme Sabine DENOZ – Expert process et qualité de l'eau – La société wallonne des eaux, Belgique – Produits et procédés de traitement de l'eau (EDCH), plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux (PGSSE), expertise technique.

Mme Isabelle DUBLINEAU – Chargée d'évaluation de la maîtrise des risques radiologiques et nucléaires, Docteur habilité à diriger des recherches – Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) – Toxicologie, radioéléments.

M. Frédéric FEDER – Directeur de l'unité « Recyclage et risque » – Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) – Géochimie, transfert des contaminants eau/sol/plante, évaluation des risques environnementaux, analyses des eaux, sols et végétaux, reuse, REUT.

M. Matthieu FOURNIER – Maître de conférences, HDR en Géosciences – Université Rouen Normandie – Hydrogéologie, hydrologie, EDCH, transfert et devenir des micro-organismes dans l'environnement, modélisation, risques sanitaires.

M. Stéphane GARNAUD-CORBEL – Chargé de mission recherche « Eau, biodiversité et aménagement urbain » – Office français de la biodiversité (OFB) – Assainissement, gestion intégrée des eaux pluviales, traitement des boues, utilisation d'eaux non conventionnelles.

Mme Nathalie GARREC – Ingénieur recherche expertise – Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) – Microbiologie de l'eau, pathogènes opportunistes, efficacité des biocides.

M. Johnny GASPARI – Chercheur – Université Gustave Eiffel – Micropolluants organiques, eaux urbaines, eaux de surface, traitements des eaux usées.

M. Julio GONÇALVÈS – Professeur – Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement (CEREGE) – Hydrogéologie, ressources en eaux, transfert de contaminants dans les nappes, modélisation, recharge.

M. Jean-Louis GONZALEZ – Chercheur, HDR – Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) – Milieu marin, contaminants chimiques, spéciation, modélisation, échantillonnages passifs.

M. Olivier HORNER – Directeur de la Formation – École nationale supérieure de chimie de Paris (ENSCP), Chimie ParisTech – Chimie de l'eau, traitement des eaux.

M. Michel JOYEUX – Retraité, Docteur en Médecine, Docteur en Sciences – Médecine, toxicologie, évaluation quantitative du risque sanitaire, méthodes d'analyse des dangers, chimie de l'eau, produits et procédés de traitement des EDCH, santé environnement.

M. Jérôme LABANOWSKI – Chargé de recherche CNRS – Université de Poitiers, UMR CNRS 7285 IC2MP, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers – Qualité des effluents, biofilm en rivière, sédiments, devenir des contaminants effluents-rivière.

Mme Sophie LARDY-FONTAN – Directrice du laboratoire d'hydrologie de Nancy – Métrologie, chimie analytique, micropolluants, ultratrace, assurance qualité/contrôle qualité (QA/QC).

Mme Françoise LUCAS – Enseignant-chercheur – Université Paris-Est Créteil – Virologie, écologie microbienne, indicateurs de contamination fécale, bactériophages, mycobactéries, virus entériques, eaux usées et pluviales.

M. Christophe MECHOUK – Chef de division « Études et construction » – Service de l'eau de la ville de Lausanne, Suisse – Ingénierie de l'eau (eau potable, eaux usées, eau de process, piscine), traitement de l'eau (procédés), physico-chimie et microbiologie de l'eau, micropolluants (démission le 30 avril 2024).

M. Laurent MOULIN – Responsable du département recherche et développement – Eau de Paris – Microbiologie, virologie, traitements de désinfection, amibes.

M. Damien MOULY – Épidémiologiste, responsable d'unité, en charge de surveillance des épidémies d'origine hydrique – Santé Publique France – Risques infectieux, risques chimiques, PGSSE, épidémiologie, évaluation des risques sanitaires, surveillance, alerte.

Mme Fabienne PETIT – Enseignant chercheur, Professeur – Université de Rouen / UMR CNRS M2C – Écologie microbienne.

Mme Catherine QUIBLIER – Professeur Université Paris Diderot, HDR – Museum National d'Histoire Naturelle – Écologie et toxicité des cyanobactéries planctoniques et benthiques, surveillance.

Mme Pauline ROUSSEAU-GUEUTIN – Enseignante-chercheuse en hydrogéologie – École des hautes études en santé publique (EHESP) – Hydrogéologie, hydrologie, transferts des contaminants, périmètres de protection de captage, PGSSE.

Mme Marie-Pierre SAUVANT-ROCHAT – Professeur – Université Clermont-Auvergne, Faculté de Pharmacie – Santé publique et environnement, épidémiologie, évaluation de risques sanitaires.

Mme Michèle TREMBLAY – Retraitée, Docteur en médecine spécialiste en santé communautaire, Médecin conseil en santé au travail et en maladies infectieuses – Santé travail, microbiologie de l'eau.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ (MANDATURE 2024 – 2028)

■ CES « Eaux »

Président

M. Gilles BORNERT – Chef de service – Groupe vétérinaire des armées de Rennes – Microbiologie, réglementation, situations dégradées, *water defense*.

Vice-présidentes

Mme Catherine QUIBLIER – Professeur Université Paris Diderot, HDR – Museum National d'Histoire Naturelle – Écologie et toxicité des cyanobactéries planctoniques et benthiques, surveillance.

Mme Anne TOGOLA – Chef de projet de recherche – Bureau de recherche géologiques et minières (BRGM) – Micropolluants organiques, chimie analytique, eaux souterraines.

Membres

M. Jean-Luc BOUDENNE – Professeur – Université Aix-Marseille, Laboratoire Chimie de l'environnement – Métrologie des eaux, chimie et qualité des eaux.

M. Nicolas CIMETIERE – Maître de conférences, HDR – École nationale supérieure de chimie de Rennes (ENSCR) – Analyse et traitement des eaux (EDCH, micropolluants organiques).

M. Jean-François COMMAILLE – Retraité – Traitement des eaux et des sous-produits.

M. Christophe DAGOT – Professeur – Université de Limoges, UMR Inserm 1092, RESINFIT – Antibiorésistance (intégrons, génie des procédés), qualité des effluents (antibiotiques et bactéries résistantes).

Mme Sabine DENOZ – Expert process et qualité de l'eau – La société Wallonne des eaux, Belgique – Produits et procédés de traitement de l'eau (EDCH), plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux (PGSSE), expertise technique.

M. Frédéric FEDER – Directeur de l'unité « Recyclage et risque » – Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) – Géochimie, transfert des contaminants eau/sol/plante, évaluation des risques environnementaux, analyses des eaux, sols et végétaux, reuse, REUT.

M. Matthieu FOURNIER – Maître de conférences, HDR en Géosciences – Université Rouen Normandie – Hydrogéologie, hydrologie, EDCH, transfert et devenir des micro-organismes dans l'environnement, modélisation, risques sanitaires.

M. Stéphane GARNAUD-CORBEL – Chargé de mission recherche « Eau, biodiversité et aménagement urbain » – Office français de la biodiversité (OFB) – Assainissement, gestion intégrée des eaux pluviales, traitement des boues, utilisation d'eaux non conventionnelles.

M. Johnny GASPERI – Directeur de recherche – Université Gustave Eiffel – Micropolluants organiques, eaux urbaines, eaux de surface, traitements des eaux usées.

M. Jean-Yves GAUBERT – Responsable R&D – Eau du bassin rennais et Rennes Métropole assainissement – Constituants et contamination des eaux et des rejets, génie des procédés, produits et procédés de traitement, réactions secondaires et sous-produits de désinfection, réseau de distribution, exploitation de services d'eaux.

M. Julio GONÇALVÈS – Professeur – Université Aix-Marseille, Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement (CEREGE) – Hydrogéologie, ressources en eaux, transfert de contaminants dans les nappes, modélisation, recharge.

M. Jean-Louis GONZALEZ – Chercheur, HDR – Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) – Milieu marin, contaminants chimiques, spéciation, modélisation, échantillonnages passifs.

M. Jean-François HUMBERT – Directeur de recherche, HDR – UMR BIOENCO, Institut de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – Microbiologie de l'eau dont cyanobactéries, écologie microbienne.

M. Frédéric JORAND – Professeur – Université de Lorraine-Faculté de pharmacie – Eaux destinées à la consommation humaine, biofilm, biocorrosion, eau minérales naturelles, thermalisme.

M. Jérôme LABANOWSKI – Chargé de recherche CNRS – Université de Poitiers, UMR CNRS 7285 IC2MP, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers – Qualité des effluents, biofilm en rivière, sédiments, devenir des contaminants effluents-rivière.

M. Jérôme LABILLE – Directeur de recherche au CNRS – Université Aix-Marseille – Devenir des contaminants dans les cycles de l'eau, exposition environnementale, vectorisation colloïdale, continuum homme terre mer, transfert en milieu, REUT, traitement de l'eau.

Mme Sophie LARDY-FONTAN – Directrice du laboratoire d'hydrologie de Nancy – Métrologie, chimie analytique, micropolluants, ultratrace, assurance qualité/contrôle qualité (QA/QC).

M. Rodolphe LEMEE – Professeur à Sorbonne Université, HDR – Directeur du Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, UMR 7093 CNRS-Sorbonne Université – Compétences en microalgues toxiques et nuisibles, *Ostreopsis*.

Mme Françoise LUCAS – Enseignant-chercheur – Université Paris-Est Créteil, Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) – Virologie, écologie microbienne, indicateurs de contamination fécale, bactériophages, mycobactéries, virus entériques, eaux usées et pluviales.

Mme Julie MENDRET – Maître de conférences, HDR – Université de Montpellier, Institut Européen des Membranes – Procédés membranaires, procédés d'oxydation avancée, couplage de procédés, élimination de micropolluants dans l'eau, réutilisation des eaux usées traitées.

M. Laurent MOULIN – Responsable du département recherche et développement – Eau de Paris – Microbiologie, virologie, traitements de désinfection, amibes.

M. Damien MOULY – Épidémiologiste, responsable d'unité, en charge de surveillance des épidémies d'origine hydrique – Santé Publique France – Risques infectieux, risques chimiques, PGSSE, épidémiologie, évaluation des risques sanitaires, surveillance, alerte.

Mme Fabienne PETIT – Professeur émérite – Université de Rouen, UMR CNRS M2C – Écologie microbienne.

Mme Pauline ROUSSEAU-GUEUTIN – Enseignante chercheuse en hydrogéologie – École des hautes études en santé publique (EHESP) – Hydrogéologie, hydrologie, transferts des contaminants, périmètres de protection de captage, PGSSE.

Mme Marie-Pierre SAUVANT-ROCHAT – Professeur – Université Clermont-Auvergne, Faculté de Pharmacie – Santé publique et environnement, épidémiologie, évaluation de risques sanitaires.

Mme Mylène TROTTIER – Médecin-conseil – Institut national de santé publique du Québec – Prévention des risques professionnels liés aux nuisances en milieu de travail, épidémiologie, biostatistiques.

M. Sébastien WURTZER – Responsable du service de biologie moléculaire et pathogènes émergents – Eau de Paris – Virologie clinique et environnementale, biologie moléculaire, traitement de l'eau, évaluation du risque sanitaire, gestion du risque microbiologique.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Jeannette CHOKKI – coordinatrice d'expertise scientifique – Unité d'évaluation des risques liés à l'eau, Direction de l'évaluation des risques.

Mme Julie SALVÉ – coordinatrice d'expertise scientifique – Unité d'évaluation des risques liés à l'eau, Direction de l'évaluation des risques.

Contribution scientifique

Mme Éléonore NEY – cheffe de l'unité des risques liés à l'eau – Direction de l'évaluation des risques.

Mme Anne NOVELLI – adjointe à la cheffe de l'unité des risques liés à l'eau – Direction de l'évaluation des risques.

Secrétariat administratif

Mme Françoise LOURENÇO – Anses

Mme Séverine BOIX – Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Citycare

Osoley

GENAQ

Société française de l'eau atmosphérique (SFEA) – Home Atmospheric Water (HAW)

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

Objet de la contribution : Rapport « État des lieux et étude des dispositifs alternatifs de distribution d'eau potable en cas d'insuffisance ou d'absence de réseau public de distribution » ; Mme Nathalie GARREC - Ingénieur Recherche et Expertise - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) ; 23 février 2024.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
SOMMAIRE	9
Sigles et abréviations.....	13
Glossaire.....	16
Liste des tableaux	18
Liste des figures.....	19
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise.....	20
1.1 Contexte	20
1.2 Objet de la saisine	22
1.2.1 Descriptif de la saisine.....	22
1.2.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	23
1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts	26
2 Caractéristiques techniques des générateurs d'eau atmosphérique (AWG) ...	27
2.1 Recensement des dispositifs AWG commercialisés.....	27
2.2 Procédés de traitement de l'air	32
2.3 Procédés de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique	33
2.3.1 Procédés de condensation sur surface froide	34
2.3.1.1 Principe	34
2.3.1.2 Mise en œuvre	34
2.3.2 Procédés par adsorption.....	35
2.4 Procédés de traitement de l'eau	36
2.4.1 Stockage des condensats bruts.....	38
2.4.2 Adsorption sur filtres à charbon actif en grains	38
2.4.3 Filtration sur filtre à sédiments et sur membrane.....	38
2.4.4 Désinfection.....	39
2.4.5 Reminéralisation, neutralisation.....	40
2.4.6 Stockage de l'eau traitée	40
2.4.7 Matériaux.....	40
2.4.8 Autres options techniques.....	41
2.4.9 Entretien, maintenance.....	41
2.5 Aperçu global d'une filière de traitement existante.....	42
2.6 Revendications et allégations des responsables de la mise sur le marché	43
2.6.1 Revendications et allégations concernant l'impact des AWG sur la qualité de l'air intérieur	43

2.6.2	Revendications et allégations concernant la santé des consommateurs d'eau issue d'AWG	43
2.6.3	Revendications et allégations sur le coût de production de l'eau	43
2.6.4	Revendications et allégations sur l'impact environnemental	44
3	Réglementations et normes existantes en France et dans d'autres pays	45
3.1	Réglementation en France	45
3.1.1	Dispositions du code de la consommation	45
3.1.2	Dispositions du code de la santé publique relatives à la sécurité sanitaire des eaux	46
3.1.2.1	Dispositions générales	46
3.1.2.2	Dispositions réglementaires applicables aux ressources en eau	47
3.1.2.3	Dispositions relatives à l'autorisation des installations collectives fixes	48
3.1.2.4	Dispositions réglementaires relatives aux matériaux	49
3.1.2.5	Dispositions réglementaires relatives aux produits et procédés de traitement des eaux	50
3.1.2.6	Dispositions réglementaires relatives aux fluides caloporteurs	51
3.1.2.7	Dispositions réglementaires relatives au pilotage et à la surveillance de la production	51
3.1.2.8	Dispositions réglementaires relatives au contrôle de la qualité des eaux produites	53
3.1.3	Cas particulier des eaux conditionnées	53
3.1.4	Dispositions du code de l'environnement relatives à la surveillance de la qualité de l'air	54
3.1.4.1	Cadre réglementaire et organisation de la surveillance de la qualité de l'air extérieur en France	54
3.1.4.2	Cadre réglementaire et organisation de la surveillance de la qualité de l'air intérieur en France	56
3.2	Réglementation dans d'autres États membres de l'Union européenne	57
3.3	Normalisation des AWG	58
4	Évaluation de l'innocuité et de l'efficacité des dispositifs	61
4.1	Innocuité des dispositifs	61
4.1.1	Dangers liés à la pollution de l'air	61
4.1.1.1	Polluants de l'air extérieur : composés gazeux et particules	63
4.1.1.2	Polluants de l'air intérieur : composés gazeux et particules	64
4.1.1.3	Aérosols biologiques	65
4.1.1.4	Transferts de polluants chimiques ou radiologiques de l'air à l'eau au cours de la phase de condensation	66
4.1.2	Innocuité des matériaux et procédés technologiques mis en œuvre	76
4.1.2.1	Dispositifs de filtration de l'air	76

4.1.2.2	Matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement	77
4.1.2.3	Reminéralisation et correction du pH de l'eau.....	77
4.1.2.4	Enrichissement de l'eau.....	78
4.1.2.5	Contamination et/ou colonisation de la filière de traitement par des agents biologiques	78
4.1.3	Autres enjeux concernant les AWG	84
4.1.3.1	Impact sur l'hygrométrie	84
4.1.3.2	Impact de la faible minéralisation de l'eau produite.....	86
4.2	Efficacité des dispositifs.....	87
4.2.1	Filtration de l'air sur filtres à particules et/ou à charbon.....	88
4.2.1.1	Performances attendues.....	88
4.2.1.2	Limites d'efficacité liées aux modalités d'utilisation.....	89
4.2.2	Filtration de l'eau sur charbon actif	89
4.2.2.1	Performances attendues.....	89
4.2.2.2	Limites d'efficacité liées aux modalités d'utilisation.....	90
4.2.3	Filtration membranaire de l'eau.....	90
4.2.3.1	Performances attendues.....	90
4.2.3.2	Limites d'efficacité liées aux modalités d'utilisation.....	91
4.2.4	Désinfection UV	92
4.2.5	Autres remarques	92
5	Conclusions et recommandations du GT	93
5.1	Conclusions	93
5.2	Recommandations.....	96
5.2.1	Recommandations à destination de la DGS.....	96
5.2.1.1	Dispositions réglementaires applicables aux ressources en eau	96
5.2.1.2	Dispositions relatives à l'autorisation administrative des AWG	97
5.2.1.3	Dispositions réglementaires relatives aux matériaux	97
5.2.1.4	Dispositions réglementaires relatives aux produits et procédés de traitement des eaux	98
5.2.1.5	Dispositions réglementaires relatives aux fluides caloporteurs	98
5.2.1.6	Dispositions réglementaires relatives au pilotage et à la surveillance de la production	98
5.2.1.7	Dispositions réglementaires relatives au contrôle de la qualité des eaux produites	99
5.2.2	Recommandations à destination des fabricants d'AWG.....	99
5.2.3	Recommandations à destination des exploitants d'installations fixes	100
5.2.4	Recommandations à destination des utilisateurs particuliers	101
5.2.5	Recommandations en matière de recherche scientifique.....	101

6	Bibliographie.....	102
6.1	Publications	102
6.2	Normes.....	114
6.3	Législation et réglementation	115
	Annexe 1 : Lettre de saisine	121
	Annexe 2 : Principales pistes de recherche dans le domaine de la production d'eau à partir de l'atmosphère.....	123
	Annexe 3 : Procédés passifs de capture d'eau atmosphérique.....	126
	Annexe 4 : Notions physiques associées à la production d'eau à partir de l'atmosphère	127
	Annexe 5 : Aperçu des différentes approches de capture de la vapeur d'eau par emploi d'adsorbants.....	130
	Annexe 6 : Polluants recherchés dans l'air et valeurs réglementaires	133
	Annexe 7 : Études disponibles sur la qualité des condensats bruts produits par les AWG	141
	Annexe 8 : Démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques pertinents liés à l'air pour les AWG	144
	Annexe 9 : Exemple de calcul de l'impact des AWG sur l'hygrométrie.....	152
	Annexe 10 : Pièces constitutives d'un dossier de demande d'autorisation de la mise sur le marché (AMM) pour un dispositif destiné à un usage domestique ou collectif ou d'un dossier de demande d'autorisation par le Préfet d'un dispositif industriel fixe	153

Sigles et abréviations

ADN	: Acide désoxyribonucléique
ARN	: Acide ribonucléique
ARS	: Agence régionale de santé
ACV	: Analyse de cycle de vie
AFIFAE	: Association française de l'industrie des fontaines à eau
ASTEE	: Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement
AASQA	: Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air
AWG	: Atmospheric water generator – Générateur d'eau atmosphérique
ACS	: Attestation de conformité sanitaire
AMM	: Autorisation de mise sur le marché
BSA	: Boisson sans alcool
COD	: Carbone organique dissous
COT	: Carbone organique total
CCHST	: Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail
CSTB	: Centre scientifique et technique du bâtiment
CAS	: Certificat d'aptitude sanitaire
(n°) CAS	: N° du Chemical Abstracts Service (US)
CLP	: Certificat de conformité aux listes positives
CSP	: Code de la santé publique
CES	: Comité d'experts spécialisé
CEN	: Comité Européen de normalisation
COSV	: Composés organiques semi-volatils
COV	: Composés organiques volatils
DDM	: Date de durabilité minimale
DESARO	: Deliquescent salt reverse osmosis - Osmose inverse après capture de la vapeur d'eau par un sel
DROM	: Départements et régions d'outre-mer
Dae	: Diamètre aérodynamique
DGS	: Direction générale de la santé
EDCH	: Eaux destinées à la consommation humaine

ERP	Établissement recevant du public
ERTC	: Eaux rendues potables par traitement conditionnées
EPA	: Efficiency particulate air - Filtre à air
E. coli	: Escherichia coli
EM	: États membres de l'Union Européenne
ENDWARE	: European Network of Drinking Water Regulators
GT	: Groupe de travail
HEPA	: High efficiency particulate air - Filtre à air à haute efficacité
HAP	: Hydrocarbures aromatiques polycycliques
IRSN	: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
INRS	: Institut national de recherche et de sécurité
INSPQ	: Institut national de santé publique du Québec
JORF	: Journal officiel de la République Française
LCSQA	: Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air
LQ	: Limite de quantification
MCDE	: Matériaux au contact de l'eau
MCDA	: Matériaux au contact des denrées alimentaires
MO	: Matière organique
MES	: Matières en suspension
MOF	: Metal-organic frameworks
MR	: Microfiltration
MDH	: Minnesota Department of Health
NF	: Nanofiltration
NHMRC	: National health and medical research council
OQEI (anciennement OQAI)	: Observatoire de la Qualité des Environnements Intérieurs (anciennement Observatoire de la qualité de l'air intérieur)
OEHHA	: Office of Environmental Health Hazard Assessment
OMS	: Organisation mondiale de la santé
OI	: Osmose inverse
PM	: Particulate Matter - Matière particulaire en suspension dans l'air
PUF	: Particules ultra-fines

PGSSE	: Plan de Gestion de la Sécurité Sanitaire des Eaux
PCB	: Polychlorobiphényles
PES	: Polyéthersulfone
PVDF	: Polyvinylidene fluoride - Polyfluorure de vinylidène
PVP	: Polyvinylpyrrolidone
PACA	: Provence-Alpes-Côte d'Azur
QAI	: Qualité de l'air intérieur
R2A	: Reasoner's 2A Agar
REUT	: Réutilisation des eaux usées traitées
SIET	: Syndicat des industriels des équipements du traitement et de l'analyse de l'eau
Synteau	: Syndicat national des entreprises du traitement de l'eau
TAR	: Tours aéroréfrigérantes
TRHS	: Tray Ration Heating System - Système de chauffage en plateau
UF	: Ultrafiltration
UV	: Ultra-violet
UIE	: Union des industries et entreprises de l'eau
UE	: Union Européenne
US-EPA	: United States Environmental Protection Agency
VR	: Valeur de référence
VGAI	: Valeur Guide de qualité de l'Air Intérieur
VTR	: Valeur toxicologique de référence
VGS	: Valeurs guides sanitaires
VTR	: Valeurs toxicologiques de référence

Glossaire

Adsorption : Phénomène par lequel des solides pulvérulents ou poreux, des solutions retiennent à leur surface des molécules, des ions en phase gazeuse ou liquide (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adsorption/1223>).

Aérosol : dispersion en particules très fines d'un liquide, d'une solution ou d'un solide dans un gaz (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/a%C3%A9rosol/1350>).

Air ambiant : air extérieur.

Analyse des dangers : démarche consistant à rassembler et évaluer les dangers et les conditions entraînant leur présence afin de déterminer ceux qui sont significatifs au niveau de la sécurité sanitaire des eaux et devront par conséquent être maîtrisés par des actions spécifiques (d'après ISO 22000).

Atmospheric Water Generator (AWG) : dispositif réalisant la production d'eau à l'état liquide à partir de la vapeur d'eau atmosphérique.

Boissons sans alcool (BSA) : boissons sans alcool composées d'eau et d'autres ingrédients (article L3321-1 du code de la santé publique).

Bouilleur : dans le présent rapport, dispositif de production d'eau par distillation.

Brouillard : phénomène naturel produit par de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air (<https://dictionnaire.lerobert.com/definition/brouillard>).

Condensat brut : eau à l'état liquide obtenue par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, n'ayant subi aucun traitement visant à en modifier les caractéristiques qualitatives.

Constante de Henry : la Loi de Henry énonce qu'à température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide. Sous forme adimensionnelle, la constante de Henry correspond au ratio de la concentration d'une substance dans l'air sur la concentration de cette substance dans l'eau à l'équilibre (INERIS. 2015. « Paramètres physico-chimiques des substances prédéfinies dans le logiciel MODUL'ERS ». <https://www.ineris.fr/fr/parametres-physico-chimiques-substances-predefinies-logiciel-modul-ers>).

Cycle de Carnot : cycle thermodynamique constitué de quatre processus réversibles, une détente isotherme, une détente adiabatique, une compression isotherme et une compression adiabatique (<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Cycle-de-Carnot.html>).

Danger : agent biologique, chimique ou physique dont la présence dans l'eau peut entraîner un effet néfaste sur la santé du consommateur (d'après ISO 22000).

Dangers pertinents : dangers chimiques, microbiologiques ou radiologiques à prendre en compte dans l'évaluation de l'innocuité et l'efficacité des AWG car susceptibles d'impacter la qualité de l'eau produite.

Diamètre aérodynamique (D_{ae} d'une particule) : diamètre d'une sphère de masse volumique 1g.cm⁻³ possédant la même vitesse terminale de chute dans l'air calme liée à la gravité que celle de la particule, dans les mêmes conditions de température, de pression et d'humidité relative (NF ISO 7708). Le diamètre aérodynamique médian est noté D_{ae50}.

Effet Peltier : phénomène physique (aussi appelé *effet thermoélectrique*) de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique observé dans des matériaux semi-conducteurs

de natures différentes liés par des jonctions : une des jonctions se refroidit, pendant que l'autre se réchauffe (<https://www.techno-science.net/definition/6721.html>).

Filet à brouillard : dispositif de collecte d'eau, constitué d'un filet à mailles fines interposé sur le trajet d'une masse de brouillard.

Humidité absolue (de l'air) : le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec contenues dans le mélange (https://nte.mines-albi.fr/Thermo/fr/co/uc_HumiditeAbsolueRelative.html).

Humidité relative (de l'air) : rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante de l'eau (ou tension de vapeur) à la même température (exprimé en %). Syn. **Taux d'hygrométrie**, degré hydrotimétrique (<https://www.eyrolles.com/DicoBTP/definition.html?id=5042>).

Plan de protection de l'atmosphère : plan d'action prévu par le code de l'environnement (articles L.222-4 à L.222-7) afin de maintenir ou ramener les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur aux valeurs limites réglementaires, lorsque celles-ci sont dépassées ou risquent de l'être.

Point de rosée : le point de rosée (ou aussi température de rosée) est la température à laquelle un air humide présente un taux d'hygrométrie de 100% (<https://www.franceenvironnement.com/question/qu-est-ce-que-la-mesure-du-point-de-rosee-qu-elle-est-son-utilite>).

Pression de vapeur saturante : pression à laquelle la phase gazeuse d'un corps pur est en équilibre avec sa phase liquide ou solide à une température donnée dans un système fermé (<https://www.techno-science.net/definition/5811.html>).

Procédé passif : dans le présent rapport, procédé alimenté en énergie uniquement par le rayonnement solaire direct.

Réseau ENDWARE : European Network of Drinking Water Regulators – groupe informel de représentants (Ministères en charge de la réglementation sur l'EDCH et Agences sanitaires) des États membres de l'Union européenne et autres pays qui transposent la directive sur la qualité de l'eau potable.

Responsables de mise sur le marché : dans le présent rapport, ce terme désigne à la fois les fabricants et les revendeurs d'AWG.

Risque : fonction de la probabilité d'un effet néfaste sur la santé (par exemple, contracter une maladie) et de la gravité de cet effet (décès, hospitalisation, etc.) du fait de l'exposition à un danger spécifique (d'après ISO 22000).

Rosée : gouttelettes d'eau très fines déposées sur les végétaux et certains corps exposés à l'air libre du fait d'un phénomène naturel de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/ros%03%a9e/69888>).

Stress hydrique : disponibilité en eau inférieure à 1700 m³ par habitant et par an (<https://www.cieau.com/eau-transition-ecologique/enjeux/quest-ce-que-le-stress-hydrique-comment-y-repondre/>).

Vapeur d'eau : eau à l'état gazeux (<https://dictionnaire.lerobert.com/definition/vapeur>).

Zéolite (ou zéolithes) : aluminosilicate cristallisé présentant un système nanoporeux constitué d'un réseau de canaux interconnectés ou non et de cages de diamètre inférieur à 10 Å (<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/fabrication-des-grands-produits-industriels-en-chimie-et-petrochimie-42319210/zeolithes-j6675/>).

Liste des tableaux

Tableau 1. Recensement non exhaustif des AWG.	28
Tableau 2. Récapitulatif des technologies de traitement des eaux utilisées dans les AWG et de leurs effets attendus par les fabricants.	37
Tableau 3. Liste de micro-organismes pathogènes ou indicateurs, ciblés dans la littérature scientifique, les préconisations normatives ou les recommandations visant à évaluer la qualité microbiologique des eaux produites par les générateurs d'eau atmosphérique et celles des fontaines réfrigérantes.....	81
Tableau 4. Contribution des eaux aux apports alimentaires en calcium, magnésium, fer et cuivre (% des apports totaux) (d'après Anses, 2017c).....	86
Tableau 5. Tableaux des normes de la qualité de l'air.....	133
Tableau 6. Liste des substances prises en compte dans le cadre du suivi pérenne des pesticides dans l'air ambiant (Autosaisine Anses n° 2020-SA-0030) - Liste des 70 substances détectées dans la campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant (CNEP) pour lesquelles il existe des valeurs de référence sanitaires.....	136
Tableau 7. Résultat de la hiérarchisation des polluants prioritaires en vue d'une surveillance (Anses, 2018).....	137
Tableau 8. polluants réglementés dans l'air intérieur.	137
Tableau 9. Liste des valeurs guides de qualité de l'air intérieur de l'Anses (2021b).....	139
Tableau 10. Données des exemples de l'annexe 8.	150

Liste des figures

Figure 1. Aperçu des différents procédés actifs utilisés pour la capture de la vapeur d'eau présente dans l'air (d'après Wang <i>et al.</i> , 2024). <i>La capture de la vapeur d'eau peut être obtenue soit par condensation directe sur une surface froide, soit par recours à une étape préalable d'adsorption suivie d'une étape de condensation sur surface froide.</i>	33
Figure 2. Principe des procédés utilisant un cycle de compression/décompression de gaz frigorifique pour créer une surface froide (d'après Tashtoush et Alshoubaki, 2023). <i>Le gaz frigorifique est comprimé et se liquéfie avec émission de chaleur. Il subit ensuite une diminution de pression qui permet sa vaporisation avec absorption de chaleur. C'est cette dernière étape qui est exploitée pour la production d'eau atmosphérique par condensation de vapeur.</i>	34
Figure 3. Principe de fonctionnement des dispositifs actuellement commercialisés pour la capture d'eau par zéolite (d'après Tashtoush <i>et al.</i> 2023). <i>La roue composée de matériau dessiccant tourne sur son axe et se trouve exposée alternativement à un flux d'air humide venu de l'extérieur (phase de capture de la vapeur d'eau, en bas du schéma) puis à un chauffage qui permet à la vapeur d'eau capturée d'être libérée (en haut du schéma). La vapeur d'eau est ensuite condensée par contact avec une surface froide.</i>	36
Figure 4. Schéma de principe des systèmes de traitement des condensats bruts avec les différents types de boucles de recirculation (recyclage des concentrats de filtration et/ou retour des eaux stockées en tête de filière).	37
Figure 5. Système de traitement des eaux des dispositifs de la marque Puairwater®.	42
Figure 6. Rentabilité (litres d'eau par kWh consommé) des différentes approches utilisables pour produire de l'eau (d'après Peeters <i>et al.</i> 2021). <i>DESARO : osmose inverse après capture de la vapeur d'eau par un sel ; OI : osmose inverse ; REUT : Réutilisation des eaux usées traitées ; TRHS : Tray Ration Heating System ou Système de chauffage en plateau. Dans la partie de gauche, les carrés noirs représentent la productivité théorique du procédé alors que les rectangles bleus sont tracés à partir des valeurs de la littérature.</i>	44
Figure 7 : Schéma du double film de Lewis et Whitman (1924).	68
Figure 8. Droite d'équilibre gaz-liquide de l'air pollué en benzène au contact de l'eau.....	75
Figure 9. Principe d'un dispositif de production d'eau à partir de l'atmosphère utilisant une membrane sélective (d'après Bergmair <i>et al.</i> 2014). n.c : gaz non condensables.....	124
Figure 10. Principe du procédé de capture de vapeur d'eau par un TRHS (d'après Peeters <i>et al.</i> , 2021).	125
Figure 11. Variations de la pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air en fonction de la température (d'après Tchoryk, 2011).....	127
Figure 12. Valeur estimée du point de rosée en fonction de la température de l'air et du taux d'hygrométrie (d'après https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-pression-atmospherique-et-l-humidite-relative-s1362). <i>L'apparente linéarité de la relation entre la température et la valeur du point de rosée résulte d'approximations liées à la formule de calcul utilisée (approximations d'August-Roche-Magnus).</i>	128
Figure 13. Variations de la valeur du point de rosée en fonction de l'humidité relative, pour différentes valeurs de température (d'après Nikkhah <i>et al.</i> , 2023).	129
Figure 14. Principe du procédé de capture de vapeur d'eau par un adsorbant (d'après Peeters <i>et al.</i> , 2021).	130

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Si l'eau est très abondante sur Terre, soit de l'ordre de 1400 millions de km³, 97 % de cette ressource est de l'eau salée et 2 % se trouve sous forme de glace. Il ne reste donc environ que 1 % d'eau douce sous forme liquide (UNESCO, 2022 ; Clus, 2007 ; Muselli, 2007). Les eaux souterraines constituent la réserve d'eau douce la plus abondante, de l'ordre de 10,5 millions de km³, tandis que les rivières et lacs ne représentent que 0,1 million de km³. Les précipitations atmosphériques, qui alimentent les réserves d'eaux douces superficielles et profondes, sont estimées à 13 000 km³ par an (Muselli, 2007).

La consommation de l'eau par les populations dans le monde augmente chaque année d'environ 1 % depuis les années 1980 (UNESCO, 2019), sous l'effet conjugué de la croissance démographique, du développement socio-économique, de l'évolution des modes de consommation et du dérèglement climatique qui accroît les usages de l'eau pour l'irrigation agricole. La demande mondiale en eau devrait continuer d'augmenter à un rythme similaire jusqu'en 2050 (soit 20 % à 30 % de plus que le niveau actuel d'utilisation) principalement en raison de la demande croissante de l'industrie et des ménages (IPCC, 2023). L'activité humaine vient parfois aggraver une situation naturelle difficile, en particulier par le détournement de cours d'eau et la surexploitation de certaines ressources. Il en résulte des tensions fortes sur les approvisionnements en eau dans de nombreuses régions du monde (UNESCO, 2024). Au final, plus de 2 milliards de personnes vivent dans des pays soumis à un stress hydrique¹ et environ 4 milliards de personnes font face à une grave pénurie d'eau au moins un mois par an (UNESCO, 2019). Ce stress hydrique devrait s'aggraver avec l'augmentation de la demande en eau et l'intensification des effets du dérèglement climatique (IPCC, 2023 ; UNESCO, 2020).

En France métropolitaine, le cycle de l'eau s'appuie sur 503 milliards de m³ d'eau provenant des précipitations, 314 milliards de m³ de l'évaporation et l'apport de 11 milliards de m³ en provenance des pays voisins². En France, les prélèvements d'eau douce sur le milieu naturel (hors hydroélectricité) représentent plus de 30 milliards de m³ par an³. La partie de l'eau prélevée dans le milieu naturel et non restituée aux milieux aquatiques est évaluée à 4,1 milliards de m³ par an. Sur ce total, l'agriculture est la première activité consommatrice d'eau (57%) devant la production d'eau potable (26 %)³. Si le bilan hydrique global au niveau du territoire apparaît favorable, l'eau est toutefois inégalement répartie avec des zones en déficits quantitatifs chroniques et de fortes tensions sur les ressources apparaissent de plus en plus régulièrement du fait des périodes de sécheresse prolongées. En ce qui concerne les DROM⁴, ils connaissent globalement une situation assez peu favorable en termes d'accès à l'eau potable, du fait de problèmes structurels au niveau de la production et de la distribution

¹ La notion de stress hydrique correspond, selon l'organisation mondiale de la santé, à une disponibilité en eau inférieure à 1700 m³ par habitant et par an (<https://www.cieau.com/eau-transition-ecologique/enjeux/quest-ce-que-le-stress-hydrique-comment-y-repondre/>).

² www.eaufrance.fr.

³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>.

⁴ Départements et régions d'outre-mer.

(vétusté des réseaux en particulier, capacité insuffisante des infrastructures) parfois aggravés par un contexte météorologique défavorable, comme c'est le cas actuellement à Mayotte.

La production d'eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) consiste le plus souvent à exploiter une masse d'eau douce présente à l'état liquide (ou exceptionnellement solide) dans le milieu naturel. Il s'agit de ressources superficielles, telles que les lacs et les rivières, accessibles directement, ou de ressources souterraines, accessibles via des puits ou des forages. La surexploitation et le déficit – conjecturel ou structurel - de ces ressources conduit à rechercher des approches alternatives. L'utilisation de l'eau de mer, techniquement maîtrisée via l'osmose inverse ou la distillation, demeure une solution coûteuse, impliquant une technologie énergivore et pouvant avoir un fort impact négatif sur les écosystèmes du fait des rejets de concentrats (Sirota *et al.*, 2024 ; Somashekar *et al.*, 2023). La réutilisation des eaux usées connaît d'importants développements, notamment pour l'irrigation agricole ou les usages industriels (Anses, 2012a). La collecte des eaux de pluie fait aussi partie des approches alternatives en plein essor (Anses, 2016a). Enfin, une autre piste consiste à capter l'eau présente dans l'atmosphère sous forme de brouillards (gouttelettes d'eau liquide en suspension dans l'air) ou de vapeur (état gazeux). Le *KWR Water Research Institute* a ainsi répertorié 29 ressources alternatives dans son rapport de 2019, dont les eaux atmosphériques (KWR, 2019).

La capture des brouillards par l'Homme pour son alimentation en eau est une pratique ancienne dont on attribue l'invention aux Incas (Mollard *et al.*, 2008). Elle a été remise au goût du jour au XX^e siècle, notamment au Chili. Du fait de sa faible productivité (3 à 15 L.jour⁻¹.m⁻², mais jusqu'à 50 dans les conditions les plus favorables), elle est utilisée principalement comme solution d'appoint pour des populations défavorisées lorsque le contexte climatique le permet (principalement, régions montagneuses en bord de mer) (Mollard *et al.*, 2008). La collecte passive des rosées a aussi fait l'objet de développements importants à vocation essentiellement humanitaire. Il s'agit de reproduire et d'optimiser le phénomène naturel de formation de rosée en créant des surfaces sur lesquelles la vapeur d'eau se condense au cours de la nuit. L'eau est ensuite recueillie par raclage. Il s'agit, là encore, d'un procédé à faible rendement (de l'ordre de 0,1 à 0,2 litres par m² par nuit) et très largement tributaire des conditions météorologiques au niveau du site d'implantation.

Dans cette approche d'exploitation de l'eau atmosphérique, les procédés qui connaissent désormais les plus importants développements sont des procédés actifs de capture/condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. En effet, l'atmosphère terrestre contient approximativement 12 900 milliards de tonnes d'eau circulant avec un temps de résidence très court, de l'ordre de quelques jours (Gimeno *et al.*, 2021), et dont 98 % se trouvent sous forme de vapeur (Li *et al.*, 2018). Le réchauffement global tend à augmenter la quantité d'eau présente dans l'atmosphère dans la plupart des régions (Gimeno *et al.*, 2021). Commercialisés depuis plus de vingt ans, les générateurs d'eau atmosphérique (AWG pour *Atmospheric Water Generator*) constituent une solution alternative pour produire de l'eau en quantité significative sans prélever dans les eaux de surface ou les nappes souterraines et connaissent actuellement un regain d'intérêt.

1.2 Objet de la saisine

1.2.1 Descriptif de la saisine

La saisine de la Direction générale de la santé (DGS) est intitulée « Procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats ». Les AWG, objets de la saisine, sont des systèmes ayant la capacité de produire de l'eau liquide à partir d'air intérieur ou extérieur. L'eau est extraite de l'humidité de l'air par condensation, ce qui exclut les brouillards du périmètre de la saisine. Ce changement d'état peut être réalisé via différents procédés qui seront présentés dans la suite du rapport. L'objectif de la majorité des fabricants d'AWG est de produire de l'EDCH. Pour ce faire, les dispositifs mettent en œuvre une succession d'étapes de traitement afin de réduire la concentration de certains polluants potentiellement présents dans l'air capté et dans l'eau produite. Les différentes étapes de traitement appliquées au sein des AWG, leurs objectifs, ainsi que leur pertinence seront discutés dans la suite du rapport.

La DGS a saisi l'Anses le 26 décembre 2022 (cf. annexe 1) afin de rendre une expertise visant à identifier les risques sanitaires liés aux procédés générateurs d'EDCH à partir de condensats, dans l'objectif de :

- statuer sur la possibilité de considérer la condensation comme un procédé de traitement remplissant les dispositions prévues à l'article R.1321-50 du code de la santé publique ;
- identifier les dangers microbiologiques et chimiques liés à l'hétérogénéité de la qualité de l'air et des condensats en résultant ainsi que des variations d'un site à l'autre pouvant impacter la qualité de l'eau produite en vue d'une distribution ;
- disposer d'éléments d'expertise utiles à l'instruction des dossiers de demande de mise sur le marché de ces procédés innovants ;
- identifier des usages alternatifs de l'eau produite par ces dispositifs, notamment dans les territoires sujets à la problématique de l'accès à l'eau potable.

Suite à la demande de l'Anses du 16 mars 2023, la DGS a clarifié le périmètre de la saisine par courriel en date du 7 avril 2023 :

- les systèmes visés dans le cadre de cette expertise sont des dispositifs pouvant utiliser l'air intérieur et l'air extérieur ;
- les usages visés de l'eau produite peuvent concerner une utilisation par des particuliers (dans la mesure où certains dispositifs sont actuellement déjà en vente en ligne), des collectivités ou des entreprises ;
- l'eau produite peut être destinée à la consommation directe ou être conditionnée en vue d'une commercialisation.

Cette saisine figure au programme de travail 2024 de l'Anses.

Afin d'apporter des éléments de réponse aux questions de la DGS, l'Anses a :

- réalisé un recensement des différents types de dispositifs existants et des procédés de traitement de l'air et de l'eau mis en œuvre ;
- identifié les dangers susceptibles d'être présents dans l'air capté ;
- identifié les dangers susceptibles d'être présents dans l'eau produite aux différentes étapes ;

- évalué l'efficacité⁵ des procédés de traitement mis en œuvre ;
- en fonction des données recueillies, formulé des recommandations en termes de conditions d'utilisation des dispositifs et de l'eau produite.

1.2.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

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'Anses a confié au groupe de travail « Condensats », rattaché au comité d'experts spécialisé « Eaux », l'instruction de cette saisine. Ce groupe de travail (GT) a été mis en place le 4 septembre 2023. Les travaux d'expertise du GT ont été présentés au CES « Eaux » tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 5 mars 2024 et le 1er octobre 2024. Le présent rapport d'expertise a été adopté par le CES « Eaux » réuni le 10 septembre 2024 et l'avis, qui se fonde sur le rapport d'expertise, les conclusions et les recommandations du GT « Condensats », a été adopté par le CES « Eaux » lors la séance du 1er octobre 2024. Le rapport et l'avis ont tenu compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a débuté par la réalisation d'un recensement des dispositifs afin de pouvoir rendre compte de la diversité des AWG employés pour la production d'EDCH⁶. Ces AWG peuvent utiliser l'air intérieur et extérieur, être destinés à des particuliers, des collectivités ou des entreprises. L'eau produite est principalement destinée à la consommation directe. Suite au retour de la DGS sur le périmètre de la saisine, le recensement n'a pas tenu compte :

- des dispositifs recueillant l'eau à partir des gouttelettes présentes dans l'atmosphère (de type pièges à brouillard, pièges à nuages) ;
- des dispositifs de distillation solaire à effet de serre ou les « bouilleurs » utilisés depuis la fin du XIX^e siècle sur les bateaux pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer (Oger, 1995).

Ainsi, l'expertise concerne (i) les dispositifs industriels fixes destinés à la production d'eau conditionnée rendue potable par traitement (ERPTC) ou à alimenter un réseau de distribution d'EDCH, et (ii) les dispositifs destinés à un usage domestique ou collectif (de type fontaine à eau ou unité mobile de production d'EDCH).

Le recensement a consisté en une recherche sur internet, non exhaustive devant la multitude des résultats obtenus. Par ailleurs, la recherche n'a pas permis de trouver de dispositifs commercialisés produisant de l'eau à partir de condensats et ayant une autre fonction (climatiseur, purificateur d'air, déshumidificateur d'air, etc.). La recherche de brevet n'a pas permis de mettre en évidence d'informations pertinentes supplémentaires concernant les diverses technologies utilisées. La recherche s'est également appuyée sur le recueil des dossiers de demande d'autorisation reçus par la DGS au cours de la période d'instruction de la saisine.

Il est aussi apparu que les AWG sont parfois utilisés pour produire des boissons, suite notamment à des étapes d'enrichissement en minéraux ou à l'ajout d'ingrédients divers.

⁵ Efficacité : taux d'abattement des polluants transférés de l'air à l'eau par les procédés de traitement utilisés dans les AWG.

⁶ En particulier, les dispositifs dédiés à la production d'eau pour l'abreuvement des animaux domestiques, à l'irrigation des cultures ou à des usages en industrie ou en milieu urbain (par exemple, le nettoyage de la voirie) n'ont pas été pris en compte.

L'expertise s'est limitée à la production d'EDCH/ERPTC par ces AWG mais n'a pas abordé les étapes technologiques ultérieures d'enrichissement en minéraux et/ou d'ajout d'ingrédients divers conduisant à la fabrication de « boissons sans alcool » (BSA ; article L.3321-1 du code de la santé publique⁷).

En parallèle du recensement, une recherche bibliographique a été initiée dans deux bases de données de publications scientifiques/académiques, *Scopus* et *Web of Science*, à partir des deux requêtes suivantes :

- Advanced query TITLE-ABS-KEY ((atmospheric AND water AND (generator OR generation)) OR awg) AND PUBYEAR > 2017 ;
- TITLE-ABS-KEY (((drinking OR freshwater) AND atmospheric AND water AND (generator OR generation)) OR awg) AND PUBYEAR > 2017.

Au vu du nombre conséquent de résultats, la recherche a été orientée sur les références bibliographiques axées sur la partie microbiologie dans la ressource, l'impact du stockage et des traitements, via les requêtes suivantes :

- TITLE-ABS-KEY (atmospheric AND water AND (generator OR generation OR awg) AND (bacteria OR microbiol* OR biological OR microorganism*)) AND PUBYEAR > 2017 ;
- TITLE-ABS-KEY (drinking OR freshwater) AND atmospheric AND water AND (generator OR generation OR awg) AND PUBYEAR > 2017 ;
- TITLE-ABS-KEY ((fog OR dew) AND (generator OR generation OR awg) AND (bacteria OR microbiol* OR biological OR microorganism*)) AND PUBYEAR > 2017 ;
- TITLE-ABS-KEY (drinking OR freshwater) AND (dew OR fog) AND (generator OR generation OR awg) AND (bacteria OR microbiol* OR biological OR microorganism*) AND PUBYEAR > 2017.

Cependant, à la lecture des résumés, il s'est avéré que très peu d'articles traitaient de l'aspect microbiologique. La recherche bibliographique s'est donc tournée vers la littérature grise⁸. Ainsi, 23 références bibliographiques ont été recueillies.

Afin de se concentrer sur la relation entre la qualité de l'air (pollution) et la collecte de vapeur d'eau, une autre recherche bibliographique a été réalisée à partir des requêtes suivantes sur :

- dew AND harvesting AND air AND quality ;
- dew AND water AND collection AND air AND quality ;
- dew AND water AND harvesting AND air AND pollution ;
- atmospheric AND water AND generator AND air AND quality.

Tous les articles traitant de la relation entre l'eau et la composition chimique des aérosols, des brouillards ou des nuages ont été éliminés du fait qu'ils n'entrent pas dans le champ de l'expertise. En recentrant la recherche sur l'eau pouvant être collectée par les AWG et la qualité de l'air, 142 articles ont été recueillis, puis après la lecture des résumés, 38 ont été retenus. Finalement, seuls sept articles ont été jugés pertinents puisqu'ils relient la concentration en polluants atmosphériques aux concentrations des composés présents dans l'eau produite par les AWG.

⁷ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006155035/2021-05-14.

⁸ La littérature grise, terme générique, désigne les documents produits par l'administration, l'industrie, l'enseignement supérieur et la recherche, les services, les ONG, les associations, etc., qui n'entrent pas dans les circuits habituels d'édition et de distribution.

Une recherche bibliographique complémentaire a été effectuée sur *Google Scholar* à partir des trois requêtes suivantes :

- "condensate" AND "water reuse" AND "potable" AND PUBYEAR AFT 2010 ;
- "condensate" AND "air pollution" AND "potable" AND PUBYEAR AFT 2010 ;
- "condensate" AND "drinking water" AND "quality" AND PUBYEAR AFT 2010.

La recherche a été axée sur les références bibliographiques traitant de l'eau potable. Suite à la lecture des résumés, 21 références ont été retenues.

En amont de l'expertise, 16 références bibliographiques ont été identifiées. Parmi ces 16 publications, certaines ont été trouvées suite à une recherche dans la base de données *Scopus* en utilisant les mots-clés suivants : *atmospheric water generation/generator, atmospheric water chemistry, condensation, condensate, water vapour capture, water vapour condensation, air conditioning condensate, atmospheric water harvester, air water harvesting, air pollution, drinking water, water quality, water from air*. Les publications ont été sélectionnées en fonction de la présence des mots-clés dans le titre et suite à la lecture des résumés. Les autres publications ont été transmises par la DGS ou identifiées lors de l'appel à candidatures pour constituer le groupe de travail parmi les articles des candidats.

Après suppression des doublons, 93 références bibliographiques ont été rassemblées.

La recherche bibliographique a été réalisée jusqu'au 16 janvier 2024. Sur les 14 224 publications recensées, 96 ont été retenues pour l'expertise.

L'expertise s'est appuyée sur un livre intitulé « *Water from Air-Quick Guide* » ayant pour but de présenter et d'expliquer aux éventuels acheteurs, propriétaires et utilisateurs d'AWG, les aspects techniques et scientifiques de leur fonctionnement. Elle s'est également appuyée sur différents rapports de l'Anses :

- polluants « émergents » dans l'air ambiant (juin 2018) ;
- caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments (mai 2019a) ;
- les normes de qualité de l'air ambiant (avril 2017a) ;
- impact sanitaire de l'exposition aux moisissures présentes dans l'air ambiant (juillet 2020a) ;
- campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant (octobre 2020b) ;
- note d'appui scientifique et technique relative au bilan de la qualité de l'air en France en 2020 (octobre 2021a) ;
- identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes (septembre 2017b).

En outre, l'Anses a été informée que la DGS avait sollicité le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) afin de réaliser un recensement des dispositifs et équipements mis en œuvre pour pallier les difficultés de distribution d'eau potable par le réseau public et assurer la distribution d'eau de façon alternative. Aussi, dans la mesure où les AWG entrent dans le champ de ce recensement, l'expertise s'est appuyée sur le rapport réalisé par le CSTB et intitulé « État des lieux et étude des dispositifs alternatifs de distribution d'eau potable en cas d'insuffisance ou d'absence de réseau public de distribution »⁹. Il est à noter que par manque de données sur le site internet des fabricants des dispositifs recensés par le CSTB et dans le rapport susnommé (LO2LAIR et KUMULUS), ces AWG ne seront pas mentionnés dans le tableau 1 détaillé en 2.1.

⁹ Non publié.

De plus, aucune fédération de professionnels commercialisant des AWG n'ayant été identifiée (consultation de la liste des adhérents SIET¹⁰, UIE¹¹ et Synteau¹²), l'expertise s'est appuyée également sur :

- les auditions de différentes parties prenantes : les fabricants ou distributeurs européens recensés commercialisant des dispositifs de condensation de vapeur d'eau atmosphérique et ayant répondu favorablement à la sollicitation de l'Anses : Citycare, Osoley, Genaq et SFEA HAW¹³ ;
- une consultation par courriel :
 - des Agences régionales de santé (ARS) : Provence-Alpes-Côte d'Azur, Martinique, Guadeloupe, Guyane, La Réunion et Mayotte ;
 - du Réseau ENDWARE¹⁴.

1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

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 <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

M. Christophe MECHOUK a démissionné du groupe de travail le 30 avril 2024 et n'a pas participé à la rédaction de ce rapport.

¹⁰ Syndicat des industriels des équipements du traitement et de l'analyse de l'eau.

¹¹ Union des industries et entreprises de l'eau.

¹² Syndicat national des entreprises du traitement de l'eau.

¹³ Société française de l'eau atmosphérique (SFEA) Home Atmospheric Water (HAW).

¹⁴ *European Network of Drinking Water Regulators* – groupe informel de représentants (Ministères en charge de la réglementation sur l'EDCH et Agences sanitaires) des États membres de l'Union européenne et autres pays qui mettent en œuvre les dispositions de la directive sur la qualité de l'eau potable (DWD).

2 Caractéristiques techniques des générateurs d'eau atmosphérique (AWG)

2.1 Recensement des dispositifs AWG commercialisés

Plusieurs entreprises proposent des dispositifs de production d'eau à partir de l'humidité de l'air. Ces dispositifs présentent globalement les mêmes caractéristiques, à savoir une capture de l'air, une filtration de l'air, un système de condensation, suivi d'une chaîne de traitement de l'eau récoltée. Les eaux sont ensuite stockées et distribuées, soit de la même manière que dans les fontaines à eau traditionnelles, soit après conditionnement.

Le bilan présenté dans le tableau 1 a été réalisé à partir des dossiers de demande d'autorisation transmis à l'Anses par la DGS et d'une recherche sur internet. Il n'a pas vocation à être exhaustif ; les fabricants qui ne proposaient pas d'informations suffisamment précises n'ont pas été retenus. De plus, certaines données recueillies sur internet sont imprécises voire contradictoires. Le but n'est pas ici d'évaluer les performances de chacun des systèmes mais d'identifier de manière globale les types de technologies mis en œuvre.

D'une manière générale, la gamme de dispositifs actuellement commercialisés est vaste mais quatre catégories d'équipements en lien avec la capacité de production et le public ciblé peuvent être identifiées :

- **les dispositifs de type fontaines à eau destinés à un usage domestique** qui sont nombreux sur le marché et qui permettent de produire de l'ordre de 10 à 20 litres par jour afin de répondre aux besoins en eau de boisson d'une famille. Ils utilisent généralement l'air intérieur de locaux, ne sont pas plus encombrants qu'une fontaine à eau classique utilisant des bonbonnes et sont facilement transportables ;
- **les dispositifs de type fontaines à eau destinés à des entreprises ou des petites collectivités** qui ont une capacité de production de 30 à 70 litres par jour. Ils utilisent l'air intérieur de locaux ;
- **les dispositifs de type unités mobiles de production d'EDCH de grande capacité destinés à des contextes spécifiques** (interventions humanitaires, déploiements militaires, sites isolés, plateformes pétrolières, etc.) qui utilisent l'air extérieur. Les plus grands ont une capacité de production, en conditions optimales, de 10 000 litres d'eau par jour. Ils sont généralement dimensionnés selon les standards du transport maritime (en général, conteneur de 20 pieds¹⁵) ;
- **les dispositifs fixes conçus à la demande** pour des installations industrielles (usines de conditionnement d'eaux rendues potable par traitement (ERPTC), alimentation d'un réseau de distribution d'EDCH, alimentation d'une citerne, fabrication de BSA, etc.). Ces dispositifs utilisent l'air extérieur.

Les caractéristiques des différentes étapes technologiques mises en œuvre pour produire de l'eau avec les AWG sont développées dans la suite du document.

¹⁵ Le conteneur maritime de 20 pieds est l'un des conteneurs les plus couramment utilisés pour l'export de marchandises dans le transport maritime international. Il mesure 6,10 m de long, 2,44 m de large et 2,59 m de haut, pour un volume d'environ 33 m³.

Tableau 1. Recensement non exhaustif des AWG.

Entreprise / marque	Modèle	Performances (litres d'eau par jour) ¹⁶	Traitement de l'air	Capture de la vapeur d'eau	Traitement de l'eau	Traitements complémentaires	Matériaux
KaraWater https://www.karawater.com/	Kara Pure	10	Filtration sur charbon actif	Sur zéolite naturelle	Étapes d'ultrafiltration, de filtration sur charbon actif, de désinfection UV	Reminéralisation (Ca, Mg, Li, ZN, Se, Sr, acide métasilicique) et alcalinisation Boucle de recirculation de l'eau	Acier inoxydable de qualité alimentaire ; matériaux en plastique garantis sans bisphénol A
Osoley https://osoley.fr/fr/accueil/	G 10	10	Filtre à air breveté antistatique	Sur surface froide	Plusieurs étape(s) de filtration, dont filtration sur charbon actif, osmose inverse, désinfection UV	Cartouche minérale pour la reminéralisation / neutralisation Traitement UV lors du stockage Réfrigération (en option, réservoir à eau chaude) Boucle de recirculation de l'eau Traitement UV au niveau du robinet de distribution	Réservoir en acier inoxydable de qualité alimentaire
	G 30	30	Filtre à air breveté antistatique	Sur surface froide	Étape(s) de filtration, dont filtration sur charbon actif, osmose inverse, désinfection UV		
	G60	60	Filtre à air breveté antistatique	Sur surface froide	Étape(s) de filtration, dont filtration sur charbon actif, osmose inverse, désinfection UV		
	G100	100	Filtre à air breveté antistatique	Sur surface froide	Étape(s) de filtration dont filtration sur charbon actif, osmose inverse, désinfection UV		
	G500	500	Filtre à air breveté antistatique	Sur surface froide	Étape(s) de filtration dont filtration sur charbon actif, osmose inverse, désinfection UV		

¹⁶ En conditions optimisées.

Home Atmospheric Water https://www.haw-sas.com/	Modèle spécifique conçu par GENAQ pour un usage industriel	96 ¹⁷	Préfiltre G3 puis filtre F7 selon norme EN 779:2012	Sur surface froide	Filtration sur zéolite et injection d'ozone (condensat brut) Filtre 50 µm, ultrafiltration (0,04 et 0,1 µm). Filtration sur charbon, filtre 100 µm, Reminéralisation/neutralisation, filtre 100 µm, désinfection UV	Stockage avec injection d'ozone Embouteillage	Tous les matériaux au contact de l'eau sont de qualité alimentaire
ATC Co http://atwtec.com/	AD5 pro 2	20	Trois filtres à air successifs ; le troisième est décrit comme H11 HEPA	Sur surface froide	Trois étapes de filtration (1/ filtre à sédiments et charbon ; 2/ filtre à charbon actif ; 3/ ultrafiltration sur membrane (performances non précisées) Désinfection UV	Traitement UV dans le réservoir de stockage	Réservoir, condenseur, tuyaux et structure en acier inoxydable (sans précision).
	AD pro 1000	1000	Trois filtres à air successifs ; le troisième est décrit comme E11 EPA	Sur surface froide	Trois étapes de filtration (1/ filtre ; 2/ complexe charbon actif – ultrafiltration ; 3/ complexe charbon actif – ultrafiltration (éliminant les particules jusqu'à 0,1 µm) Désinfection UV	Traitement UV dans le réservoir de stockage	
Genaq https://genaq.com/ https://www.haw-sas.com/	Stratus S50	52	Préfiltre G3 puis filtre F7	Sur surface froide	Filtre à sédiments, filtre à charbon actif, filtre à zéolite et ultrafiltration Désinfection UV	Minéralisation-neutralisation (filtre minéral) Pour les modèles à forte productivité, stockage dans un réservoir externe, avec recirculation permanente. En option : pompe pour injection de chlore (réservoir externe).	Chambre de condensation en matériaux métalliques (dont aluminium) de qualité alimentaire ou ayant fait l'objet de tests spécifiques de migration Circuit hydraulique en polyéthylène de basse densité de qualité alimentaire
	Stratus S200	201	Préfiltre G3 puis filtre F7	Sur surface froide	Filtre à sédiments, filtre à charbon actif, filtre à zéolite et ultrafiltration Désinfection UV		
	Nimbus N500 ¹⁸	504	Préfiltre à tampons en polyuréthane 60 PPI puis filtre M5	Sur surface froide	Filtre à sédiments de 20 µm, 2 filtres à sédiments de 5 µm, 2 filtres à charbon actif, 2 filtres ultrafiltration, filtre à zéolite Désinfection UV		
	Nimbus N4500	4537	Préfiltre à tampons en polyuréthane 60 PPI puis filtre F7	Sur surface froide	Filtre à sédiments de 20 µm, 2 filtres à sédiments de 5 µm, 2 filtres à charbon actif, 2 filtres ultrafiltration, filtre à zéolite Désinfection UV		

¹⁷ Valeur établie à partir des allégations du fabricant : « Environ 34 000 m³/an, pour une moyenne de 4 m³/heure ».

¹⁸ Les modèles Genaq à fort débit sont équipés d'un réservoir externe permettant de stocker l'eau traitée. L'eau recircule en permanence vers l'appareil (reminéralisation et UV).

	Cumulus C50	52	Préfiltre à tampons en polyuréthane 60 PPI puis filtre M5	Sur surface froide	Filtre à sédiments, filtre à charbon actif, ultrafiltration, filtre à zéolite Désinfection UV		Raccords rapides dans un « matériau adapté à un usage alimentaire »
	Cumulus C500	573	Préfiltre à tampons en polyuréthane 60 PPI puis filtre M5	Sur surface froide	Filtre à sédiments de 20 µm, filtre à sédiments de 5 µm, filtre à charbon actif, ultrafiltration Désinfection UV		Réservoir interne en inox alimentaire
	Cumulus C5000	5192	Préfiltre à tampons en polyuréthane 60 PPI puis filtre M5	Sur surface froide	Filtre à sédiments (trois étapes), filtre à charbon actif, filtre à zéolite Désinfection UV		Échangeurs thermiques en aluminium (ailettes) et en cuivre (tuyaux).
Melianess https://melianess.com/fr/main-home/ Air Water Concept https://www.airwaterconcept.com/	ATMO S20	20	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV	Étape de reminéralisation (sans précisions)	Aucune donnée
	ATMO S70	70	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV	Pas de reminéralisation.	Aucune donnée
	ATMO M100	103	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV		
	ATMO M500	480	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV		
	ATMO L1000	965	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV		
	ATMO L5000	4970	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV		
	ATMO XL10	9940	Aucune donnée	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont charbon actif et ultrafiltration Désinfection UV		

Aquatethys https://aquatethys.business.site/	AR25	250	Préfiltre inox ; filtre classe G4 (EN779)	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration dont filtre 50 µm ; filtre charbon ; filtre 5 µm. Désinfection UV	Traitement UV dans la cuve de stockage des eaux traitées, reminéralisation, boucle de recirculation.	Aucune donnée
	AR50	500	Préfiltre inox ; filtre classe G4 (EN779)	Sur surface froide			
	AQ1000	1000	Préfiltre inox ; filtre classe G4 (EN779)	Sur surface froide			
	AQ5000	5000	Préfiltre inox ; filtre classe G4 (EN779)	Sur surface froide			
	AQ10.000	10.000	Préfiltre inox ; filtre classe G4 (EN779)	Sur surface froide			
Puairwater https://www.puairwater.com/	PAW-90HE	30	Quatre filtres successifs (dont HEPA)	Sur surface froide	Trois filtres à charbon en série Osmose inverse Recirculation des saumures d'osmose	Reminéralisation sur cartouche Traitement UV dans la cuve de stockage des eaux traitées Chauffage (réservoir séparé)	Réservoir interne en inox
	PAW-ZL9510E	16					
Watergen https://www.watergen.com/	Genny	30	Deux filtres (efficacité jusqu'à 2,5 µm)	Sur surface froide	Filtration sur charbon, ultrafiltration 0,1 µm	Reminéralisation-neutralisation (sur cartouche) et désinfection UV, avec recirculation permanente. L'eau stockée est réfrigérée à température inférieure à 5°C.	Tubes en polyéthylène : NF T54-951 Surfaces de condensation en « matériaux autorisés » revêtus de « polymère hydrophile » Mention de certifications vis-à-vis de la NF P41-650 (carafes filtrantes) et à la NF T 90-601 (résines échangeuses d'ions)
	GEN M1	220	Filtration « multi-barrières » (sans précisions)	Sur surface froide	Filtre à sédiment, filtre à charbon actif Désinfection UV	Étape de reminéralisation-neutralisation (sans précisions)	
	GEN M Pro	900	Filtre « hydro-lipophile » (sans précisions)	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration (sans précisions) Désinfection UV	Étape de reminéralisation-neutralisation (sans précisions)	
	GEN L	6000	Filtration « multi-barrières » (sans précisions)	Sur surface froide	Plusieurs étapes de filtration (sans précisions) Désinfection UV	Étape de reminéralisation-neutralisation (sans précisions)	

2.2 Procédés de traitement de l'air

L'ensemble des systèmes font intervenir en premier lieu un captage actif de l'air, par aspiration, destiné à la collecte de la vapeur d'eau qu'il contient. Le traitement de l'air entrant, avant condensation de l'eau, peut être réalisé par deux types de filtres :

- des filtres à particules de différents seuils de coupure permettant la rétention de particules (incluant des micro-organismes) via des mécanismes d'interception par les fibres du filtre ;
- des filtres à base de charbon actif, permettant l'adsorption de certaines molécules présentes dans l'air, principalement des composés organiques volatils (Baskaran *et al.*, 2024 ; Sidheswaran *et al.*, 2012).

Le traitement de l'air en entrée des AWG est systématiquement prévu, avec cependant de grandes disparités en ce qui concerne les types, nombres et performances des filtres. La filtration mise en place sur les prises d'air vise en premier lieu à limiter l'empoussièrement du dispositif mais peut aussi permettre d'arrêter des micro-organismes et particules fines, voire des polluants volatils. L'association de plusieurs filtres de performances différentes permet de limiter leur colmatage : par exemple, un filtre G3 (filtre généralement en matériau synthétique permettant de retenir 80% des poussières grossières¹⁹) sur la prise d'air, puis un filtre F7 (en fibre de verre qui arrête 90% des particules de diamètre aérodynamique supérieur ou égal à 0,4 µm). Certains fabricants mettent également en œuvre des filtres électrostatiques qui permettent de charger négativement les particules via des électrodes positionnées en entrée de filtre puis de les attirer et de les collecter en sortie de filtre sur une grille chargée positivement. Ce type de filtre permet généralement de renforcer l'efficacité de piégeage des particules. Dans certains cas, les fibres synthétiques (polypropylène) des filtres à particules peuvent également être recouvertes d'une couche de nanoparticules d'argent permettant de limiter le développement microbien à leur surface. Le filtre le plus performant (maille la plus fine) détermine la taille des particules susceptibles d'être retrouvées *in fine* sur les plaques de condensation.

Les appellations pour qualifier le système de traitement de l'air, utilisées par les fabricants, sont souvent imprécises. Dans certains cas, il est fait référence à la nomenclature définie par la norme NF EN 779²⁰, avec parfois des renvois à la version de 2002 de cette norme. Il est à noter que cette norme n'est plus en vigueur et a été remplacée par la norme NF EN ISO 16890-1²¹ de 2017 qui permet la classification des filtres selon une efficacité qui intègre un spectre de particules de diamètres 0,3 à 10 µm et propose une meilleure prise en compte de la taille des particules piégées par le filtre. La norme ISO 16890-1 regroupe les performances des filtres à particules en quatre classes : ePM₁, ePM_{2,5}, ePM₁₀²² et poussières grossières. L'efficacité d'un filtre est mesurée par le pourcentage de particules retenues pour la taille de particule visée, ce pourcentage devant être supérieur à 50 %. Certains matériels sont équipés

¹⁹ Rendement gravimétrique.

²⁰ NF EN 779 (2012). Filtre à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration.

²¹ NF EN ISO 16890-1 (2017). Filtres à air de ventilation générale - Partie 1 : spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension (ePM).

²² Efficacités sur les différentes tailles de particules de diamètre inférieur à 1 µm, 2,5 µm et 10 µm (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀).

de filtres à haute ou très haute efficacité (EPA²³ ou HEPA²⁴ – groupes E ou H de la norme NF EN 1822-1:2019²⁵).

Un seul fabricant parmi ceux identifiés lors de l'expertise propose un filtre à charbon actif sur la prise d'air sans justifier son utilité (types de polluants de l'air à éliminer).

Certains appareils possèdent un dispositif de régulation du débit d'air en fonction de l'hygrométrie afin de garantir un débit d'eau constant.

La sortie d'air est généralement équipée de filtres pour limiter le risque de reflux de poussières depuis l'extérieur.

2.3 Procédés de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique

De nombreux travaux de recherche ont étudié les différentes techniques permettant la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique dans la perspective de produire de l'eau pour la consommation humaine, pour l'irrigation agricole ou pour des usages industriels. Ils ont servi de base au développement de dispositifs de production d'eau à partir de l'atmosphère dont les premiers ont été commercialisés en 2002 (Mandal *et al.*, 2021).

Il est possible de classer les procédés identifiés dans la littérature en fonction des techniques de capture de la vapeur d'eau à partir de l'air. Parmi celles qui entrent dans le champ de l'expertise, on distingue, d'une part, un ensemble de techniques réalisant la capture de l'eau par condensation directe sur une surface froide, et, d'autre part, des procédés utilisant une étape préalable d'adsorption (figure 1).

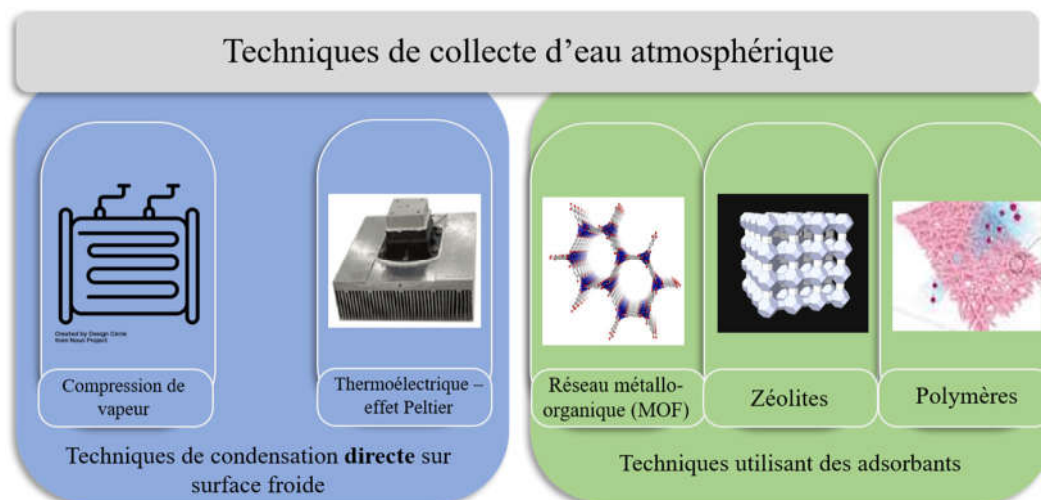


Figure 1. Aperçu des différents procédés actifs utilisés pour la capture de la vapeur d'eau présente dans l'air (d'après Wang *et al.*, 2024). La capture de la vapeur d'eau peut être obtenue soit par condensation directe sur une surface froide, soit par recours à une étape préalable d'adsorption suivie d'une étape de condensation sur surface froide.

La plupart de ces procédés sont encore au stade de la recherche et du développement, et seuls deux d'entre eux font actuellement l'objet de développements commerciaux. Le plus souvent, la condensation est réalisée *directement* sur une surface refroidie. La deuxième option technologique est le procédé de capture de la vapeur d'eau sur zéolite, mais un seul

²³ Efficiency particulate air (EPA).

²⁴ High efficiency particulate air (HEPA).

²⁵ NF EN 1822-1 (2019). Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) — Partie 1 : Classification, essais de performance et marquage.

fabricant l'utilisant a été identifié. Ces deux options sont présentées dans la suite du document tandis que les approches alternatives et pistes de recherche sont décrites dans l'annexe 2.

Il convient par ailleurs de noter que tous les procédés commerciaux sont qualifiés d'actifs car ils requièrent un apport d'énergie, généralement électrique, par opposition aux procédés dits passifs, qui exploitent des phénomènes naturels, sans besoin de source d'énergie externe (annexe 3).

2.3.1 Procédés de condensation sur surface froide

2.3.1.1 Principe

Les procédés de condensation de la vapeur d'eau sur une surface froide exploitent la notion de point de rosée²⁶. Il s'agit de mettre en contact un air humide avec une surface artificiellement refroidie, de manière à atteindre une température inférieure au point de rosée.

2.3.1.2 Mise en œuvre

Actuellement, la plupart des AWG commercialisés utilisent le procédé consistant à créer une circulation forcée de l'air qui est dirigé vers des surfaces froides. Au contact de ces surfaces, l'air subit un refroidissement brutal, le point de rosée est atteint et l'eau liquide formée est récupérée par gravité et stockée avant traitement.

Le plus souvent, les surfaces froides sont obtenues en ayant recours à un compresseur, avec mise en place d'un cycle de changement de phase ou cycle de Carnot : un gaz réfrigérant est comprimé par un dispositif mécanique (compresseur). Ce changement de phase consomme de l'énergie et produit de la chaleur qui doit être éliminée vers l'extérieur. Puis, le fluide formé est dirigé vers un évaporateur où, sous l'effet de la diminution de pression, il se volatilise. Le passage du fluide de l'état liquide à l'état gazeux absorbe de la chaleur, de sorte que le fluide en se vaporisant refroidit les surfaces au contact desquelles il se trouve. Dirigé sur ces surfaces froides, l'air subit un refroidissement rapide qui provoque la condensation d'une partie de la vapeur d'eau qu'il contient (figure 2). L'AWG rejette de l'air froid saturé en humidité (Wahlgren, 2016).

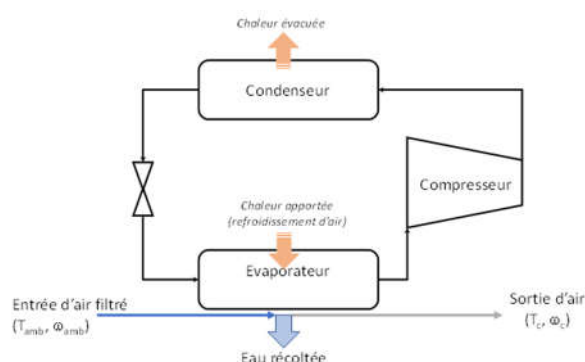


Figure 2. Principe des procédés utilisant un cycle de compression/décompression de gaz frigorifique pour créer une surface froide (d'après Tashtoush et Alshoubaki, 2023). Le gaz frigorifique est comprimé et se liquéfie avec émission de chaleur. Il subit ensuite une diminution de pression qui permet sa vaporisation avec absorption de chaleur. C'est cette dernière étape qui est exploitée pour la production d'eau atmosphérique par condensation de vapeur.

²⁶ Lorsqu'une masse d'air subit une baisse de température, son humidité relative augmente jusqu'à atteindre une température, qualifiée de point de rosée, pour laquelle le degré hygrométrique est de 100 %. Si la température descend en dessous de ce point de rosée, une partie de la vapeur d'eau subit un changement de phase et de l'eau liquide se forme (pour plus de détails, se référer à l'annexe 4).

Une autre option pour obtenir une surface froide consiste à utiliser l'effet Peltier, ou effet thermoélectrique, produit par le passage d'un courant électrique dans un module associant deux matériaux semi-conducteurs de nature différente réunis au niveau de deux jonctions. L'une des jonctions se refroidit, pendant que l'autre se réchauffe. La jonction froide permet de réaliser la condensation de la vapeur d'eau. Cette approche technique est actuellement envisagée pour des dispositifs portatifs mais elle ne fait pas, pour l'instant, l'objet de développements commerciaux significatifs.

Les éléments clés du dimensionnement des appareils sont le débit d'air, la surface des plaques de condensation et la capacité du dispositif producteur de froid à abaisser la température de ces plaques. En ce qui concerne le débit d'air, Habeebullah (2009) observe que pour les vitesses d'air élevées, le rendement en eau diminue du fait de la réduction des échanges thermiques (l'air ne se refroidit pas suffisamment). Le débit d'air doit donc être optimisé en fonction de la surface d'échange. D'autre part, pour les vitesses d'air faibles, il observe la formation de givre qui entrave le processus de condensation de la vapeur.

Les paramètres extrinsèques déterminants demeurent la température et le taux d'hygrométrie de l'air.

2.3.2 Procédés par adsorption

Les procédés par adsorption utilisent des matériaux qui fixent la vapeur d'eau présente dans l'air puis la libèrent lorsqu'ils sont chauffés. L'air est alors « enrichi » en vapeur d'eau, ce qui revient à majorer l'hygrométrie en entrée de condenseur. La vapeur d'eau est ensuite liquéfiée, généralement sur une surface froide, selon un processus identique à celui décrit au paragraphe 2.3.1.

Si de nombreux matériaux adsorbants ont fait l'objet de travaux de recherche (Annexe 5), le seul dispositif identifié sur le marché fait appel à des zéolites naturelles.

Les zéolites sont des minéraux naturels ou de synthèse constitués d'aluminosilicates qui forment un réseau tridimensionnel microporeux, formant une succession de cavités interconnectées, pouvant être occupées par des cations et des molécules d'eau. Les ions et les molécules d'eau sont mobiles au sein de la structure, ce qui permet une hydratation et une déshydratation réversibles (Guisnet et Pinard, 2018 ; Auerbach *et al.*, 2003).

Le rôle des adsorbants est de capturer la vapeur d'eau grâce à leur structure et leurs propriétés hydrophiles. Cette capture se fait sans nécessité d'atteindre le point de rosée puisque l'eau reste sous forme de vapeur.

La limite majeure des procédés utilisant des adsorbants est leur cycle de fonctionnement alternant des phases de capture de l'eau puis des phases de production. Pour en améliorer la productivité, le système de roue dessiccante rotative, proposé dans les années 1950, utilise un dessiccant solide tel que le gel de silice ou la zéolite, pour adsorber l'humidité de l'air, ce qui assure une production d'eau en continu. Le processus de désorption consiste à libérer les molécules d'eau des matériaux dessiccants par chauffage (respectivement grâce au rayonnement solaire ou par apport d'énergie pour les systèmes passifs ou actifs). La figure 3 représente le schéma de principe de ces systèmes.

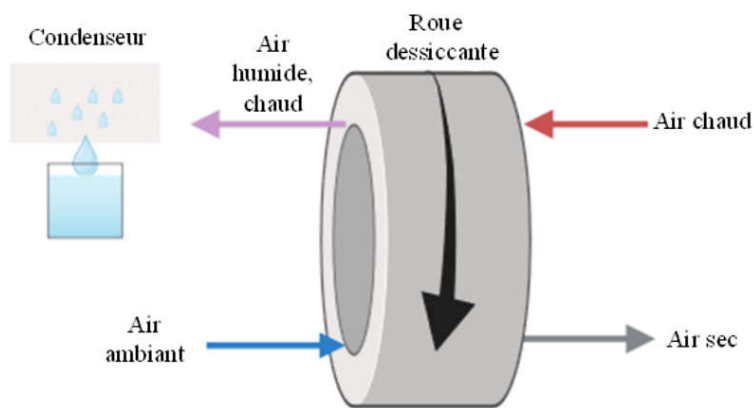


Figure 3. Principe de fonctionnement des dispositifs actuellement commercialisés pour la capture d'eau par zéolite (d'après Tashtoush et al. 2023). La roue composée de matériau dessiccant tourne sur son axe et se trouve exposée alternativement à un flux d'air humide venu de l'extérieur (phase de capture de la vapeur d'eau, en bas du schéma) puis à un chauffage qui permet à la vapeur d'eau capturée d'être libérée (en haut du schéma). La vapeur d'eau est ensuite condensée par contact avec une surface froide.

La collecte d'eau atmosphérique par adsorption est une technologie émergente. En raison de la faible pression de vapeur d'équilibre du milieu adsorbant, ces systèmes peuvent fonctionner dans des conditions arides, jusqu'à 10 % d'humidité relative d'après certaines études (Hanikel et al., 2019 ; Hong et al., 2019a et b), ce qui les rend plus efficaces que les systèmes par condensation directe sur surface froide. En effet, dans des conditions arides, le point de rosée est souvent à une température négative, ce qui empêche le recours aux procédés classiques par condensation directe sur une surface froide.

2.4 Procédés de traitement de l'eau

Il existe peu de connaissances sur l'efficacité opérationnelle en termes de qualité d'eau produite lors de l'utilisation d'AWG en conditions réelles. La qualité de l'eau collectée avant traitement a seulement été évaluée dans de petits systèmes passifs utilisant des matériaux déshydratants novateurs, mais pas dans des systèmes commerciaux préexistants (Li et al., 2018). De plus, les rares données analytiques disponibles se limitent à une liste réduite de polluants, principalement bactériens et minéraux (voir 4.1.1.3).

En raison de la vaste diversité des AWG actuellement présents sur le marché, fournir une description exhaustive de chacun d'eux est donc un défi. Bien que les informations recueillies lors des auditions et les documents disponibles sur internet soient imprécis, les différentes technologies employées en traitement de l'eau et retrouvées dans les AWG ont habituellement pour objectif :

- dans le cas des procédés de microfiltration et d'ultrafiltration, l'abattement des matières en suspension (MES) et des micro-organismes ;
- dans le cas de l'osmose inverse (OI), l'abattement des matières organiques (MO) solubles, des micropolluants organiques, des éléments traces métalliques et des micro-organismes ;
- en ce qui concerne le charbon actif, l'adsorption de micropolluants et d'éléments traces métalliques ;
- dans le cas de l'ozonation, la désinfection de l'eau ;
- pour ce qui est du recours à l'irradiation UV, la désinfection ou la maîtrise de la formation de biofilms, selon les protocoles utilisés.

Le recours à l'ozone (identifié dans un seul dossier) pose la question de la possible formation de sous-produits par un processus d'oxydation des molécules organiques présentes dans les eaux traitées.

Ces aspects sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2. Récapitulatif des technologies de traitement des eaux utilisées dans les AWG et de leurs effets attendus par les fabricants.

Méthode de traitement	Ammonium	Matières en suspension (MES)	Matières organiques (MO) solubles	Micro-polluants organiques	Éléments traces métalliques	Bactéries	Virus	Ajustement de la charge minérale
Zéolite	√							
Microfiltration		√				√		
Ultrafiltration		√				√	√	
Osмосe inverse (OI)	√	√	√	√	√			
Échange d'ions					√			
Ozonation						√	√	
Reminéralisation								√
Irradiation UV						√	√	
Charbon actif				√	√			

Le schéma de principe de traitement des eaux généralement retrouvé dans les systèmes AWG est représenté sur la figure 4. Ces systèmes sont très proches des traitements domestiques d'appoint. La filière de traitement des eaux est constituée de quatre parties :

- le stockage du condensat brut (avec ou sans oxydation) ;
- la filtration et l'adsorption ;
- la reminéralisation ;
- la désinfection UV.

Sur certains systèmes, des boucles de recirculation sont prévues (voir figure 5).

Le schéma présenté dans la figure 4 n'est pas représentatif de tous les AWG car de nombreuses différences existent selon les fabricants. En particulier, la reminéralisation est parfois réalisée après la désinfection. Par ailleurs, des traitements complémentaires par UV sont souvent appliqués au cours du stockage de l'eau traitée (cf. tableau 1). Enfin, des boucles de recirculation sont souvent présentes mais leurs configurations varient selon les dispositifs.

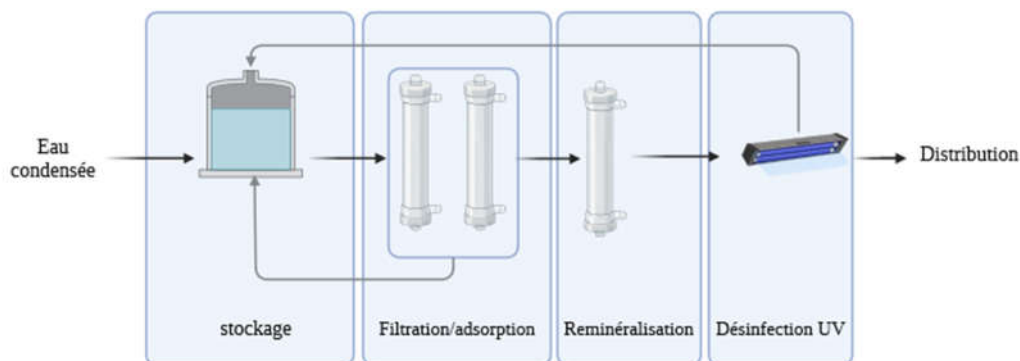


Figure 4. Schéma de principe des systèmes de traitement des condensats bruts avec les différents types de boucles de recirculation (recyclage des concentrats de filtration et/ou retour des eaux stockées en tête de filière).

Les AWG commercialisés comportent tous une filière de traitement de l'eau plus ou moins complexe selon les équipements.

Une description synthétique des informations disponibles pour chaque étape de traitement est donnée dans les sections suivantes.

2.4.1 Stockage des condensats bruts

La cuve de stockage réceptionne les condensats bruts. Les cuves sont le plus souvent constituées d'inox.

Parmi les AWG recensés (cf. 2.1), seul le projet d'usine d'embouteillage identifié au cours de l'expertise prévoit une ozonation des condensats bruts, que l'industriel a présenté lors de son audition comme un procédé destiné à limiter le développement microbien lors du stockage de l'eau avant traitement.

2.4.2 Adsorption sur filtres à charbon actif en grains

Toutes les filières de traitement des eaux mises en œuvre dans les AWG recensés comprennent un ou plusieurs filtres à charbon actif en grains. La filtration sur charbon actif est un procédé d'emploi très courant en traitement de l'eau (Legube, 2021). Dans les filières classiques de production d'EDCH, les filtres à charbon actif sont généralement employés en raison de leur capacité à adsorber des polluants organiques. Ce procédé a donc une double utilité : éliminer certains polluants toxiques et améliorer les qualités gustatives de l'eau.

Dans le cas des AWG, ces filtres sont généralement positionnés avant les étapes de filtration membranaire.

Pour les AWG de faible capacité de production, les filtres à charbon se présentent sous la forme de cartouches, tandis que dans le projet d'installation industrielle, pour lequel la DGS a reçu un dossier de demande d'autorisation, l'eau circule dans une citerne métallique contenant les grains de charbon. Le remplacement du charbon peut alors être planifié au vu des résultats du suivi analytique de la qualité des eaux.

2.4.3 Filtration sur filtre à sédiments et sur membrane

Dans les AWG recensés, les filtres à sédiments utilisés sont majoritairement en fibres de polypropylène. Ils sont utilisés pour arrêter les éléments particulaires d'une taille de l'ordre de 10 µm et sont placés en amont de filtres ayant des seuils de coupure plus faibles afin de limiter les phénomènes de colmatage. Un seul fabricant recensé lors de l'expertise utilise ces filtres comme unique procédé de filtration de l'eau.

De manière générale, les AWG ont recours à l'ultrafiltration ou à l'osmose inverse. L'osmose inverse est l'option choisie par plusieurs fabricants d'AWG car elle garantit des performances très supérieures en termes d'élimination des polluants chimiques dissous.

Le plus souvent, la filtration est réalisée de manière frontale. Cette option est retenue dans la mesure où la charge particulaire et colloïdale, ainsi que la concentration en sels des condensats bruts, sont faibles en comparaison de celles des eaux de surfaces ou souterraines, de sorte que le colmatage des filtres est lent. De plus, cette technique permet d'optimiser le rendement en évitant de rejeter une partie de l'eau produite et permet de s'affranchir d'un

raccordement de l'AWG à un réseau d'évacuation des eaux usées. Aucune étape de lavage de membrane n'a été mentionnée au cours des auditions.

Dans le cas particulier de l'osmose inverse, un seul fabricant identifié propose une filtration tangentielle et le recyclage des concentrats vers le réservoir à condensat brut. Il est à noter qu'un recyclage permanent des concentrats peut conduire à un enrichissement progressif des eaux brutes en polluants, pouvant remettre en cause l'efficacité de la filière de traitement à terme. Cependant, aucune fréquence de vidange du dispositif n'est spécifiée par le fabricant concerné.

Les filtres sont à remplacer périodiquement pour éviter un colmatage excessif et une perte de charge significative. Un défaut d'intégrité des membranes de filtration peut ne pas être détecté par l'utilisateur en l'absence de dispositif de surveillance adapté (par exemple, un conductimètre en sortie d'osmoseur).

2.4.4 Désinfection

La désinfection est systématiquement effectuée à l'aide de rayons UV. Les seules variations concernent le nombre de lampes UV et leur emplacement : au niveau de la filière de traitement, du réservoir de stockage et, éventuellement, du robinet de distribution.

La désinfection s'effectue au moyen de réacteurs équipés de lampes à vapeur de mercure, à basse ou moyenne pression, émettant des rayonnements UV dans une gamme de longueurs d'onde de 240 à 290 nm. Ces matériels sont positionnés dans le flux d'eau à traiter.

L'effet biocide des rayonnements UV (UVB et UVC : gamme 200 – 315 nm) est principalement lié au fait qu'ils sont absorbés par l'ADN et l'ARN, molécules qui supportent les fonctions répliquatives et métaboliques. En effet, l'ADN et l'ARN sont constitués d'un enchaînement de nucléotides qui inclut des bases puriques (adénine, guanine) et des bases pyrimidiques (cytosine, thymine ou uracile). Les spectres d'absorption des quatre nucléotides de l'ADN montrent un maximum d'absorption autour de 260 nm (Anses, 2010a).

Pour les AWG commercialisés, l'emploi des UV est systématique, quelle que soit la nature de la filière de traitement des eaux en amont. Cette étape vise à assurer la désinfection des eaux mais peut aussi être destinée, lors de la phase de stockage de l'eau traitée, à limiter la colonisation des réservoirs de stockage par une flore microbienne banale et la formation de biofilms. La faible charge initiale des condensats bruts en éléments particuliers et les étapes de filtration permettent de considérer que l'eau soumise au traitement UV est très peu turbide, de sorte que la diffusion des rayonnements UV n'est pas perturbée par la présence de matière particulaire.

Dans le cas des AWG actuellement commercialisés, faute d'attestation de conformité sanitaire (ACS), l'efficacité des réacteurs n'est pas garantie. De plus, il n'est jamais prévu de radiomètres de travail pour s'assurer de leur bon fonctionnement²⁷.

Le vieillissement des lampes est pris en compte de manière empirique par l'indication d'une fréquence conseillée de remplacement ; aucun système de nettoyage des gaines de quartz n'est prévu.

²⁷ En France, la mise sur le marché de ces réacteurs est assujettie à l'obtention d'une attestation de conformité sanitaire selon des modalités prévues par l'arrêté du 9 octobre 2012 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets utilisés pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine pris en application de l'article R. 1321-50 (I et II) du code de la santé publique). L'article 9 de cet arrêté précise que « le réacteur UV doit disposer d'un ou plusieurs radiomètres de travail disposant d'un certificat d'étalonnage ».

2.4.5 Reminéralisation, neutralisation

Si la reminéralisation de l'eau n'est pas systématique, elle est le plus souvent proposée par les fabricants. Son inconvénient est de favoriser la formation de dépôts minéraux dans les installations ; son avantage est avant tout organoleptique. La reminéralisation est habituellement réalisée au moyen de cartouches filtrantes contenant des substrats minéraux (généralement des calcaires). Concernant les projets industriels, l'injection directe d'un soluté hydrominéral peut être préférée car ce procédé permet une meilleure maîtrise de la concentration finale en minéraux.

Les rares données analytiques disponibles auprès des fabricants de dispositifs domestiques recensés montrent que lorsqu'une reminéralisation est réalisée, la charge minérale de l'eau demeure très faible. La conductivité reste inférieure à $150 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. L'étape de reminéralisation est souvent associée à une modification du pH de l'eau, amenant généralement celui-ci à des valeurs proches de 7. Certains fabricants visent des valeurs de pH plus élevées, en revendiquant des bénéfices pour la santé. Ainsi, un matériel actuellement commercialisé produit de l'eau à pH 9,2.

2.4.6 Stockage de l'eau traitée

Le stockage de l'eau en fin de processus de traitement se fait dans des cuves équipées généralement de lampes UV pour garantir la stabilité de la qualité microbiologique de l'eau, comme cela a été signalé précédemment.

L'eau traitée, stockée en attente de consommation, subit le plus souvent une recirculation. Celle-ci peut correspondre à deux approches technologiques :

- dans certains cas, l'eau est renvoyée en tête de filière de traitement de manière périodique et subit de ce fait à nouveau l'ensemble des étapes de traitement ;
- le plus souvent, la recirculation consiste à renvoyer l'eau vers un réacteur UV afin de la désinfecter à nouveau.

Dans les deux cas, le principe est d'éviter une stagnation de l'eau traitée, la consommation de l'eau pouvant être interrompue (par exemple, lorsque l'utilisateur s'absente de son domicile durant plusieurs jours).

Afin de distribuer de l'eau froide, tempérée ou chaude selon les attentes des consommateurs, des équipements, généralement en option, sont proposés. La température de l'eau est régulée soit dans le réservoir principal, soit dans des réservoirs annexes dédiés.

Si les plus petits dispositifs disposent d'un réservoir de stockage intégré, pour les plus gros équipements, il est prévu une citerne de stockage externe. Un fabricant propose en option une citerne équipée d'un injecteur de chlore.

2.4.7 Matériaux

Les matériaux utilisés dans les AWG recensés sont indiqués dans le tableau 1 en 2.1. Les garanties apportées en ce qui concerne ces matériaux sont très diverses. Les fabricants font référence à des normes et des réglementations variées en fonction notamment du lieu de fabrication et des demandes de leur clientèle. La plupart renvoient la conformité des matériaux utilisés à des normes agro-alimentaires et non à des exigences spécifiques du contact avec l'eau.

2.4.8 Autres options techniques

Certains fabricants d'AWG utilisent des filtres de zéolite dans le but de fixer les ions ammonium. Les rares résultats d'analyse des eaux issues d'AWG disponibles révèlent en effet de possibles dépassements de la référence de qualité réglementaire²⁸ pour l'ammonium ($0,10 \text{ mg.L}^{-1}$) lorsque la filière de traitement ne comporte pas d'étape d'osmose inverse.

Parmi les zéolites naturelles proposées pour cet usage, les clinoptilolites sont les plus étudiées. Elles présentent une structure cristalline au sein de laquelle divers cations sont présents, principalement Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} (Karadag *et al.*, 2006), ce qui leur confère des propriétés d'échange de cations, avec une affinité particulière pour l'ammonium. Elles sont proposées comme alternative aux résines échangeuses d'ions pour diverses applications, notamment le traitement des EDCH, mais aussi en aquaculture et en traitement des eaux usées. La capacité de fixation de l'ammonium des clinoptilolites naturelles varie en fonction de leur lieu d'extraction et des traitements « dopants » qui peuvent leur être appliqués. Ainsi, Vassileva et Voikova (2009) ont rapporté des capacités maximales d'adsorption (Q_{max}) de l'ammonium²⁹ de $7,85 \text{ mg}$ par gramme de zéolite (mg.g^{-1}), pouvant atteindre $18,4 \text{ mg.g}^{-1}$ après traitement au chlorure de sodium.

Le recours aux zéolites peut donc être une option pertinente en complément d'une filière d'ultrafiltration pour respecter les exigences réglementaires en termes de concentration en ammonium. Il demeure important de noter que les performances sont fonction de la composition de la zéolite utilisée et de la température notamment, ce qui implique une phase de validation du procédé pour définir les conditions de sa mise en œuvre et la durée de vie des filtres de zéolite utilisés.

2.4.9 Entretien, maintenance

Les indications disponibles (notice d'emploi, site du fabricant) en ce qui concerne l'entretien et la maintenance des AWG sont parcellaires. Certains dossiers industriels présentent des protocoles de nettoyage en place des équipements sans donnée de validation. Les notices d'emploi des matériels fournissent des informations relatives à leur entretien mais de nombreuses indications sont imprécises et inadaptées pour un utilisateur non averti (par exemple : « Nettoyez le plateau avec des produits n'endommageant pas l'acier inoxydable du plateau et qui ne soient pas nocifs pour la santé »).

La fréquence de remplacement des filtres est fournie à titre indicatif, sachant que, comme l'indiquent les notices des matériels, pour les filtres à air « dans les environnements poussiéreux, la fréquence de remplacement peut augmenter » et que pour les filtres à eau « la fréquence de remplacement varie en fonction de la consommation d'eau ».

Aucun matériel destiné au grand public n'est équipé de capteurs permettant d'apprécier les éventuels dysfonctionnements ou d'adapter la fréquence des opérations de maintenance. Les alarmes prévues ne concernent pas l'efficacité du système de traitement de l'eau mais uniquement son fonctionnement hydraulique (i.e le volume d'eau récolté).

²⁸ Arrêté du 11 janvier 2007 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.

²⁹ Quantité d'ammonium fixée à l'équilibre sur la zéolite, pour une solution initialement concentrée à 250 mg.L^{-1} d'ion ammonium.

Une maintenance professionnelle est prévue et est assurée par un technicien spécialisé et agréé en réfrigération. Les compétences spécifiques requises restent à définir.

La maintenance spécialisée implique non seulement l'entretien du dispositif de condensation mais aussi le démontage et le nettoyage des cuves de stockage de l'eau, ainsi que le remplacement des filtres ou des pièces défectueuses. Elle est à réaliser tous les douze mois selon les fabricants, ce qui implique que le nettoyage des réservoirs de stockage n'est réalisé qu'à cette occasion.

2.5 Aperçu global d'une filière de traitement existante

Un exemple de brochure commerciale décrivant le système de production et de purification d'eau d'une société est présenté sur la figure 5.

L'air est filtré et dirigé sur une surface froide afin de provoquer la condensation de la vapeur d'eau. Le système comporte une cuve de stockage récupérant l'eau condensée. À ce niveau, il est possible de réaliser des ajouts d'eau, par exemple depuis une source naturelle locale (de type puits privé ou eau de pluie). Cette eau brute est, dans un premier temps, soumise à une irradiation UV, vraisemblablement dans le but d'éviter la colonisation bactérienne du réservoir. L'eau est ensuite acheminée par une pompe vers trois filtres à charbon, une membrane d'osmose inverse et une cartouche de reminéralisation. L'eau ainsi traitée est alors envoyée dans la boucle de distribution comportant une cuve de stockage équipée d'une lampe UV et une boucle de recirculation d'eau froide où l'eau traitée est soumise à une nouvelle irradiation UV. Elle peut aussi être dirigée vers un réservoir annexe où elle est chauffée.

Il est important de noter que les concentrats de l'osmose inverse sont renvoyés dans la cuve de stockage d'eau condensée.

Ce système de traitement est le système le plus complet retrouvé pour les AWG domestiques.

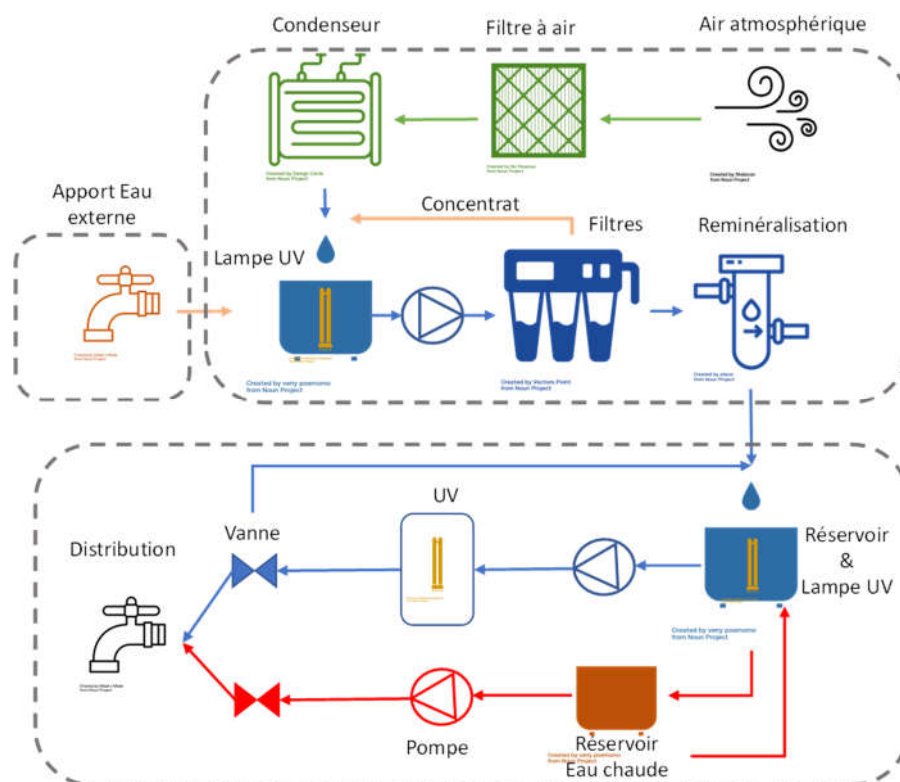


Figure 5. Système de traitement des eaux des dispositifs de la marque Puairwater®.

2.6 Revendications et allégations des responsables de la mise sur le marché

2.6.1 Revendications et allégations concernant l'impact des AWG sur la qualité de l'air intérieur

Les documents commerciaux des fabricants d'AWG mettent en avant un rôle bénéfique en matière de qualité de l'air lorsque l'AWG est installé en intérieur. L'impact des AWG sur l'hygrométrie est détaillé en 4.1.3.1. La filtration de l'air en entrée d'AWG peut aussi permettre de réduire la charge de l'air en poussières, pollens ou spores fongiques.

2.6.2 Revendications et allégations concernant la santé des consommateurs d'eau issue d'AWG

Les éléments minéraux ajoutés à l'eau sont principalement du calcium et du magnésium, mais les concentrations obtenues sont généralement très faibles, de sorte que l'intérêt nutritionnel de ces apports est très limité. Il est par contre noté qu'une gamme d'AWG distribue des eaux enrichies en strontium³⁰, lithium, sélénium³¹, zinc et acide métasilicique que le fabricant présente comme indispensables à la santé des consommateurs sans en apporter la preuve.

Très exceptionnellement, les eaux produites par AWG font l'objet de traitements originaux, présentés comme bénéfiques pour la santé des consommateurs, non autorisés en France. C'est le cas par exemple de l'emploi de cartouches de billes de céramique « à infrarouges lointains » dont les bienfaits allégués restent à démontrer.

2.6.3 Revendications et allégations sur le coût de production de l'eau

Les fabricants d'AWG insistent, dans leur documentation commerciale, sur le faible coût de production de l'eau issue de la condensation par comparaison, le plus souvent, au coût des eaux conditionnées du commerce. Leur argumentaire économique repose fondamentalement sur la faible consommation électrique des AWG (exprimée en litres d'eau produits par kWh consommé).

Peeters *et al.* (2021) soulignent cependant que le bilan énergétique des différents procédés de production d'eau n'est pas en faveur de la production d'eau à partir de l'atmosphère. La figure 6 classe les différentes technologies de production d'eau de la plus énergivore (les technologies utilisant des dessiccants) à la plus efficace énergétiquement (prélèvement et traitement d'eau de surface). Cette forte différence d'efficacité entre les procédés AWG et les procédés de production d'eau à partir d'eau liquide vient principalement de l'étape de condensation de la vapeur d'eau. L'efficacité est exprimée en litres d'eau produits par kWh consommé. Le bilan conclut que les AWG sont les dispositifs les moins rentables en termes de coût énergétique.

Ces techniques ne doivent donc pas être perçues comme une alternative économiquement rentable au regard des autres technologies. Elles peuvent cependant trouver leur intérêt dès

³⁰ Anses. 2013. « Avis de l'Anses relatif à une évaluation des risques sanitaires liés à la présence de strontium dans les eaux destinées à la consommation humaine ». 2012-SA-0262.

³¹ Anses. 2012b. « Avis de l'Anses relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés aux dépassements de la limite de qualité du sélénium dans les eaux destinées à la consommation humaine - Actualisation de l'avis de l'agence française de sécurité sanitaire des aliments de septembre 2004 ». 2011-SA-0220.

lors que la consommation énergétique n'est pas un critère déterminant, en particulier pour pallier l'absence de ressource en eau liquide ou réduire la pression exercée sur les ressources traditionnelles en eau. Elles peuvent aussi s'inscrire dans une perspective d'autonomie de la production d'eau dans des structures sensibles (ambassades, sites militaires stratégiques, etc.) ou au niveau de sites ne disposant pas d'un raccordement à un réseau public d'adduction d'eau.

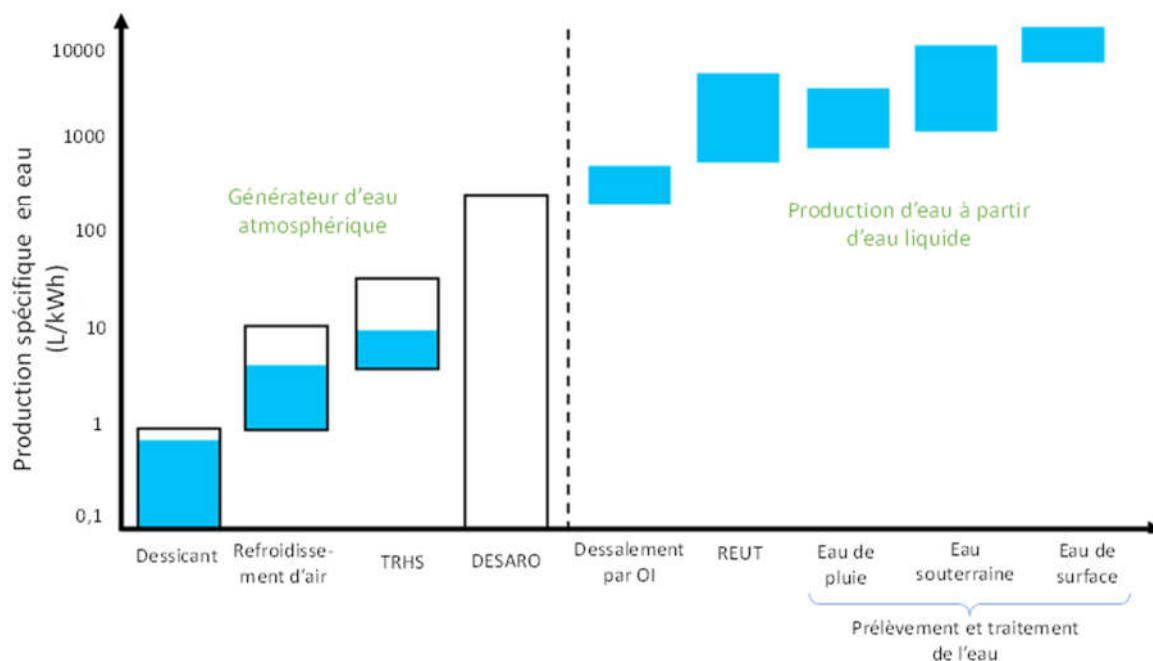


Figure 6. Rentabilité (litres d'eau par kWh consommé) des différentes approches utilisables pour produire de l'eau (d'après Peeters et al. 2021). DESARO : osmose inverse après capture de la vapeur d'eau par un sel ; OI : osmose inverse ; REUT : Réutilisation des eaux usées traitées ; TRHS : Tray Ration Heating System ou Système de chauffage en plateau.

Dans la partie de gauche, les carrés noirs représentent la productivité théorique du procédé alors que les rectangles bleus sont tracés à partir des valeurs de la littérature.

2.6.4 Revendications et allégations sur l'impact environnemental

Les fabricants d'AWG mettent en avant le bénéfice écologique de leurs matériels, par comparaison aux approches traditionnelles. Concernant la question de la consommation énergétique évoquée précédemment, des solutions « écoresponsables » sont proposées, qui consistent à associer les AWG à des sources autonomes d'électricité « verte » telles que des panneaux solaires ou des éoliennes (Solis-Chavez et al., 2018). Cette approche permet d'installer les AWG en tout lieu, sans aucune contrainte d'alimentation électrique par un réseau de distribution et de concevoir des matériels mobiles. Un autre argument est que les AWG offrent une solution alternative à l'emploi d'eaux embouteillées, ce qui réduit la production de déchets plastiques et améliore le bilan carbone du transport de l'eau.

Si ces arguments sont recevables, les fabricants ne font aucune mention de la production de déchets par les AWG, en particulier les cartouches de filtration usagées. Aucun ne propose également d'analyse de cycle de vie (ACV) de ces dispositifs.

3 Réglementations et normes existantes en France et dans d'autres pays

La production d'EDCH par des dispositifs de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique n'est pas explicitement prévue dans la réglementation française actuelle. Ainsi, d'un point de vue réglementaire et législatif, les dispositions du code de la santé publique (CSP) relatives à la sécurité sanitaire des eaux (articles L.1321-1 et suivants, et R.1321-1 et suivants) ne s'appliquent pas toutes *de facto* à ce type de dispositif.

Les AWG sont des dispositifs originaux dans la mesure où :

- ils utilisent une ressource en eau non conventionnelle, la vapeur d'eau atmosphérique condensée par un dispositif spécifique ;
- il s'agit de dispositifs autonomes de production d'EDCH qui mettent en œuvre plusieurs étapes de traitement, ce qui les différencie de la plupart des fontaines à eau traditionnelles (fontaines alimentées en eau depuis un réseau EDCH ou via des bonbonnes d'eau) ;
- ils assurent, pour certains, des fonctions de fontaines à eau, à l'échelle individuelle ou collective, mais peuvent aussi être destinés à une production d'eau à grande échelle alimentant des installations de distribution d'eau collectives (par exemple, l'alimentation en eau d'une cuisine collective) ou une chaîne de conditionnement d'eau.

Pour toutes ces raisons, les obligations législatives et réglementaires qui s'imposent aux responsables de la mise sur le marché, ainsi qu'aux utilisateurs des AWG, appellent à des questionnements. Par ailleurs, les auditions des professionnels du secteur ont montré qu'ils sont confrontés à des difficultés pratiques, notamment en raison des incertitudes réglementaires, qui constituent un frein à la commercialisation de leurs produits ou à des projets industriels. Ces difficultés seront soulignées dans chaque sous-partie suivante.

3.1 Réglementation en France

3.1.1 Dispositions du code de la consommation

La protection de la santé du consommateur face aux produits dangereux fait partie des exigences générales de la réglementation européenne, en particulier, la directive 2001/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 3 décembre 2001 relative à la sécurité générale des produits. Ce principe est pris en compte dans le code de la consommation, qui indique qu'il appartient à tout responsable de la mise sur le marché de produits de s'assurer que ceux-ci sont propres à l'usage qui en sera fait, qu'ils respectent les prescriptions en vigueur et ne sont pas susceptibles de constituer un danger pour la santé des consommateurs. Le code de la consommation stipule en effet que :

- article L.121-2 : « Une pratique commerciale est trompeuse [...] lorsqu'elle repose sur des allégations, indications ou présentations fausses ou de nature à induire en erreur » ;
- article L.411-1 : « dès la première mise sur le marché, les produits et les services doivent répondre aux prescriptions en vigueur relatives à la **sécurité et à la santé des personnes**, à la loyauté des transactions commerciales et à la protection des

consommateurs. Le responsable de la première mise sur le marché d'un produit ou d'un service vérifie que celui-ci est conforme aux prescriptions en vigueur » ;

- article L.411-2 : « Tout opérateur ayant connaissance, après avoir acquis ou cédé des produits, d'une non-conformité à la réglementation portant sur une qualité substantielle de tout ou partie de ces produits, en informe sans délai, par tous moyens dont il peut justifier, celui qui lui a fourni ces produits et ceux à qui il les a cédés » ;
- article L.421-3 : « Les produits et les services doivent présenter, dans des conditions normales d'utilisation ou dans d'autres conditions raisonnablement prévisibles par le professionnel, la sécurité à laquelle on peut légitimement s'attendre et **ne pas porter atteinte à la santé des personnes** » ;
- article L.423-1 : « Le producteur fournit au consommateur les informations utiles qui lui permettent **d'évaluer les risques** inhérents à un produit pendant sa durée d'utilisation normale ou raisonnablement prévisible et de s'en prémunir, lorsque ces risques ne sont pas immédiatement perceptibles par le consommateur sans un avertissement adéquat ».

3.1.2 Dispositions du code de la santé publique relatives à la sécurité sanitaire des eaux

Cette réglementation est conçue par rapport à un schéma de production d'EDCH reposant sur l'exploitation de ressources naturelles en eau à l'état liquide, telles que les eaux superficielles ou d'origine souterraine, dites « conventionnelles ». Même si les évolutions réglementaires récentes ont conduit à autoriser le recours à des ressources en eau « non conventionnelles », actuellement limitées à l'eau de pluie et aux eaux usées traitées³² pour des utilisations précises, l'emploi de ces ressources n'est pas autorisé pour la production d'eau de boisson.

3.1.2.1 Dispositions générales

Un principe de base qui fonde la réglementation sanitaire en matière d'EDCH est précisé par l'article L.1321-1 du code de la santé publique (CSP) : « *toute personne qui met à la disposition du public de l'eau destinée à la consommation humaine, à titre onéreux ou à titre gratuit et sous quelque forme que ce soit, y compris sous forme de glace alimentaire, est tenue de s'assurer que cette eau est propre et salubre* ». Cet article renvoie à la notion de « public », de sorte que les AWG utilisés dans un cadre strictement privé ne sont pas concernés.

De plus, conformément à l'article L.1321-4 du CSP, « *toute personne publique ou privée responsable d'une production ou d'une distribution au public d'eau destinée à la consommation humaine sous quelque forme que ce soit, qu'il s'agisse de réseaux publics ou de réseaux intérieurs, ainsi que toute personne privée responsable d'une distribution privée autorisée en application de l'article L.1321-7, est un fournisseur d'eau. Elle est tenue de :*

- 1° *Surveiller la qualité de l'eau qui fait l'objet de cette production ou de cette distribution ;*
- 2° *Se soumettre au contrôle sanitaire ;*
- 3° *Prendre toutes mesures correctives nécessaires en vue d'assurer la qualité de l'eau, et en informer les consommateurs en cas de risque sanitaire ;*

³² Arrêté du 21 août 2008 relatif à la récupération des eaux de pluie et à leur usage à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires).

Décret n° 2023-835 du 29 août 2023 relatif aux usages et aux conditions d'utilisation des eaux de pluie et des eaux usées traitées.

4° *N'employer que des produits et procédés de traitement de l'eau, de nettoyage et de désinfection des installations qui ne sont pas susceptibles d'altérer la qualité de l'eau distribuée ;*

5° *Respecter les règles de conception et d'hygiène applicables aux installations de production et de distribution ;*

6° *Se soumettre aux règles de restriction ou d'interruption, en cas de risque sanitaire, et assurer l'information et les conseils aux consommateurs dans des délais proportionnés au risque sanitaire ;*

7° *Élaborer et mettre en œuvre un plan de gestion de la sécurité sanitaire de l'eau sur toute partie de la chaîne de production et de distribution de l'eau destinée à la consommation humaine dont elle est responsable ou, pour les personnes responsables de la distribution intérieure de locaux ou établissements où l'eau est fournie au public, une évaluation des risques liés aux installations intérieures de distribution d'eau. ».*

3.1.2.2 Dispositions réglementaires applicables aux ressources en eau

3.1.2.2.1 Réglementation

Les AWG utilisent les condensats formés par un dispositif spécifique de capture de la vapeur d'eau atmosphérique.

■ Origine

En ce qui concerne les ressources en eau pour la production d'EDCH, l'article R.1321-6 du CSP stipule que « *l'utilisation d'une eau ne provenant pas du milieu naturel ne peut être autorisée* ». Dans la mesure où la vapeur d'eau utilisée par les AWG provient du milieu naturel, cet article ne semble pas interdire son utilisation.

■ Protection

Dans le cas des ressources conventionnelles en eau, le CSP met en place une obligation de protection environnementale en instaurant des périmètres de protection définis sur la base d'une étude hydrogéologique et environnementale (article L.1321-2). À l'intérieur de ces périmètres de protection, certaines activités susceptibles de contaminer la ressource en eau sont interdites ou réglementées. Ces dispositions sont adaptées au cas des ressources conventionnelles, mais perdent leur pertinence dans le cas des AWG : la qualité des condensats bruts ne dépend pas du contexte hydrologique et géologique local mais de la qualité de l'air au niveau du site d'implantation de l'AWG. Il est à noter que si le CSP ne définit par de périmètres de protection des zones de captage de l'air, par analogie à ceux des eaux conventionnelles, le code de l'environnement (notamment son article R.222-13) spécifie que certaines zones doivent bénéficier d'un plan de protection de l'atmosphère.

■ Exigences de qualité

Les eaux brutes utilisées pour la production d'EDCH sont soumises à des limites de qualité. Ces critères sont définis au regard des types de polluants d'intérêt dans le cas d'eaux provenant de ressources conventionnelles mais n'ont pas de pertinence en ce qui concerne les condensats bruts dont la qualité est directement liée à celle de l'air au niveau de la zone de production.

■ Surveillance de la qualité de l'eau

La réglementation intègre, dans les plans de contrôle analytique réglementaires, des analyses périodiques des eaux brutes, à la charge de l'exploitant du captage.

3.1.2.2 *Constats concernant les dispositifs existants*

Les points suivants sont à retenir au vu des données disponibles :

- un projet industriel d'embouteillage prévoit un suivi de la qualité de l'air via le dispositif local de surveillance et un arrêt de la production en cas de pic de pollution. Par contre, il n'est pas prévu de mesures applicables au voisinage de l'usine, dans une « zone de protection » où des activités pourraient être interdites, limitées ou contrôlées (épandages agricoles, notamment) sur la base d'un contrat entre l'industriel et les riverains de l'usine ;
- pour les produits destinés au grand public, les fabricants auditionnés recommandent à leurs clients de placer de préférence les AWG à l'extérieur des locaux (terrasse, balcon) sans disposer d'arguments scientifiques pour justifier ce choix ;
- aucun fabricant auditionné n'a pu fournir de résultats d'analyses de condensats bruts ;
- aucun fabricant auditionné ne dispose de données concernant les transferts air-eau des polluants atmosphériques.

3.1.2.3 Dispositions relatives à l'autorisation des installations collectives fixes

3.1.2.3.1 *Réglementation*

La production d'EDCH à partir de ressources conventionnelles est soumise à une double procédure d'autorisation, en lien d'une part avec le code de l'environnement (article L.214-1 - procédure IOTA) et d'autre part avec le CSP (article L.1321-7 en particulier).

En ce qui concerne l'autorisation au titre du CSP, délivrée par le préfet du département, elle concerne :

« 1° *La production* ;

2° *La distribution par un réseau public ou privé, à l'exception de la distribution à l'usage d'une famille mentionnée au III et de la distribution par des réseaux particuliers alimentés par un réseau de distribution public* ;

3° *Le conditionnement*. ».

Les AWG étant des dispositifs de production d'EDCH, il peut être considéré qu'ils sont concernés par l'obligation d'autorisation préalable prévue pour la production au 1° de l'article L.1321-7. Cependant, la procédure actuellement définie est inadaptée, principalement du fait des exigences en termes d'hydrogéologie ou d'hydrologie.

3.1.2.3.2 *Constats concernant les dispositifs existants*

Les points suivants sont à retenir au vu des données disponibles :

- de nombreux AWG sont déjà commercialisés en France, principalement en outre-mer, sans avoir fait l'objet d'aucune procédure administrative spécifique ;
- un dossier de demande d'autorisation de mise sur le marché d'un AWG et un dossier de demande d'autorisation d'exploiter une eau rendue potable par traitement pour une installation industrielle d'embouteillage sont en cours d'instruction respectivement par la DGS et l'ARS compétente.

3.1.2.4 Dispositions réglementaires relatives aux matériaux

3.1.2.4.1 *Réglementation*

La mise sur le marché des matériaux et objets destinés à entrer au contact d'EDCH d'une part, et leur utilisation dans les installations de production, de distribution et de conditionnement d'eau d'autre part, sont soumises aux dispositions réglementaires des articles R.1321-48 et 49 du CSP. De plus, des textes nationaux définissent les conditions d'évaluation de l'innocuité sanitaire des matériaux au contact de l'eau (MCDE) (cf. arrêtés du 29 mai 1997 modifié, du 25 juin 2020 et du 18 janvier 2018 modifié ; circulaires d'application adoptées entre 1999 et 2006 ; avis au Journal officiel de la République française (JORF) du 24 février 2012 modifié par l'avis du 23 janvier 2018).

Les preuves de conformité sanitaire, attestant du respect des exigences réglementaires, dépendent du groupe de matériaux et objets considéré (métalliques, organiques, minéraux, à base de ciment, accessoires). Elles relèvent soit d'un laboratoire habilité par le ministre chargé de la santé en application de l'article R.1321-52 du CSP (attestation de conformité sanitaire ou ACS, certificat de conformité aux listes positives ou CLP, certificat d'aptitude sanitaire ou CAS), soit du responsable de la mise sur le marché (déclaration sur l'honneur de conformité)³³.

Toutefois, ces dispositions sont amenées à évoluer rapidement au regard de la publication des six textes de la Commission européenne du 23 janvier 2024 (trois règlements délégués et trois décisions d'exécution) qui complètent les dispositions relatives aux MCDE de l'article 11 et de l'annexe V de la directive (UE) n° 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. La majorité de ces nouvelles dispositions entreront en vigueur le 31 décembre 2026.

L'ensemble des dispositions réglementaires relatives aux MCDE s'appliquent aux installations de production. Seuls les conditionnements des eaux (bouteilles, cannettes, etc.) relèvent de la réglementation relative aux matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA).

L'étape de condensation n'est pas un procédé de traitement des eaux mais un procédé de traitement de l'air. Elle n'est donc pas concernée par ces dispositions, ce qui pose la question des exigences de qualité à avoir vis-à-vis des matériaux adsorbants utilisés, notamment les zéolites, mais aussi vis-à-vis des matériaux constituant les surfaces de condensation de l'eau (plaques, ailettes, etc.).

3.1.2.4.2 *Constats concernant les dispositifs existants*

Les points suivants sont à retenir au vu des données disponibles :

- les fabricants d'AWG se réfèrent généralement à la réglementation alimentaire (MCDA) pour les matériaux utilisés au contact de l'eau ;
- la nature des matériaux utilisés au niveau des surfaces de condensation est rarement indiquée dans la documentation disponible ;
- certains fabricants ont une connaissance très imparfaite du cadre réglementaire en vigueur dans ce domaine en France ;
- certains fabricants renvoient à la réglementation en vigueur dans divers pays du monde, en fonction des marchés sur lesquels ils cherchent à s'implanter, ou aux normes NSF ;

³³ <https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/article/reglementation-nationale-applicable-a-la-mise-sur-le-marche-et-a-l-utilisation>.

- certains matériaux utilisés sont explicitement non autorisés par la réglementation française (par exemple, l'aluminium³⁴).

3.1.2.5 Dispositions réglementaires relatives aux produits et procédés de traitement des eaux

3.1.2.5.1 Réglementation

L'article R.1321-50-I du CSP précise que : « *les produits et procédés mis sur le marché et destinés au traitement de l'eau destinée à la consommation humaine [...] doivent, dans les conditions normales ou prévisibles de leur emploi [...], être conformes à des dispositions spécifiques définies par arrêté du ministre chargé de la santé, visant à ce que :*

1° Ils ne soient pas susceptibles, intrinsèquement ou par l'intermédiaire de leurs résidus :

- d'être à l'origine, directement ou indirectement, d'un risque pour la santé humaine ;
- d'altérer la couleur, l'odeur ou la saveur de l'eau ;
- de favoriser involontairement le développement de la flore microbienne ;
- de libérer des contaminants dans les eaux à des niveaux pouvant engendrer un non-respect des exigences de qualité de l'eau destinées à la consommation humaine.

2° Ils soient efficaces au regard de l'usage auquel ils sont destinés.

Ces dispositions s'appliquent en tout ou partie, selon les groupes de produits et procédés de traitement et en fonction de leurs usages [...].

Par ailleurs, l'article R.1321-51 du CSP stipule que « *la personne responsable de la production, de la distribution ou du conditionnement d'une eau, autre que l'eau de source, utilise des produits et procédés de traitement d'eau destinée à la consommation humaine, conformes aux dispositions de l'article R.1321-50* ».

La circulaire DGS/VS4 n° 2000-166 du 28 mars 2000 liste les produits et procédés de traitement des eaux approuvés de façon « générique » pour la potabilisation des eaux de distribution publique et privée et ne nécessitant pas d'autorisation au « cas par cas » par le ministère en charge de la santé ou un laboratoire habilité. L'annexe II de la circulaire DGS/VS4 du 7 mai 1990 (non abrogée par la circulaire du 28 mars 2000) précise les règles de pureté applicables aux produits de traitement des eaux ne disposant pas de norme CEN (comité Européen de normalisation).

Les modules de filtration membranaire (arrêté du 22 juin 2012), les réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultra-violet (arrêté du 9 octobre 2012) et les résines organiques échangeuses d'ions (arrêté du 22 avril 2022) doivent être titulaires d'une attestation de conformité sanitaire (ACS) délivrée par l'un des laboratoires habilités par le ministère en charge de la santé. Ces dispositions ne s'appliquent toutefois pas aux modules de filtration membranaire n'entrant pas dans le champ d'application de l'arrêté du 22 juin 2012, aux échangeurs minéraux d'ions, aux échangeurs d'ions contenant intentionnellement des nanoparticules qui sont considérés comme des dispositifs « innovants ».

Dans le cas où une personne morale souhaite mettre sur le marché un produit ou un procédé de traitement ne correspondant pas à un groupe ou à un usage prévu en application de l'article R.1321-50-I du CSP, le produit ou le procédé est considéré comme « innovant » ; sa mise sur le marché et son utilisation sont alors soumises à une autorisation préalable du ministère en

³⁴ L'aluminium n'est pas autorisé par l'arrêté du 25 juin 2000 mais il figure sur la liste positive européenne publiée le 23 avril 2024 (Décision d'exécution (UE) 2024/367 de la Commission du 23 janvier 2024) avec des restrictions d'usage.

charge de la santé, donnée après avis de l'Anses (cf. article R.1321-50-IV). L'arrêté du 17 août 2007 modifié précise les preuves d'innocuité et d'efficacité à fournir.

Les zéolites, souvent utilisées dans les AWG, ne sont mentionnées dans la circulaire du 28 mars 2000 que pour la modification de la minéralisation et, plus particulièrement, la déferrisation et la démanganisation de l'eau. Cependant, il existe une norme européenne NF EN 16070 (2014) applicable aux zéolites naturelles (ou silico-aluminates de magnésium, calcium, potassium, sodium hydraté) utilisées pour le traitement de l'EDCH. Seules trois zéolites naturelles (la clinoptilolite, la chabasite et la phillipsite/analcime) peuvent être utilisées pour les emplois suivants :

- échangeur cationique pour éliminer les polluants dissous tels que l'ammonium, les composés radioactifs et les métaux lourds ;
- matériau filtrant pour la filtration mécanique de l'eau ;
- adsorbant pour éliminer les composés tels que l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène, certains organo-halogénés et composés radioactifs.

3.1.2.5.2 *Constats concernant les dispositifs existants*

Les points suivants sont à retenir au vu des données disponibles :

- les fabricants d'AWG ont, en règle générale, recours à des dispositifs de traitement de l'eau largement utilisés par ailleurs en production d'EDCH, mais ces dispositifs ne sont pas toujours autorisés en France ;
- les zéolites sont utilisées à l'étape de condensation pour permettre la capture de la vapeur d'eau ou des ions ammonium. Cet usage n'est pas actuellement prévu dans la réglementation française (circulaire du 28 mars 2000) ;
- les dossiers consultés ne mentionnent pas toujours les données permettant d'apprécier la conformité à la réglementation française des produits et procédés utilisés.

3.1.2.6 Dispositions réglementaires relatives aux fluides caloporteurs

L'arrêté du 14 janvier 2019 relatif aux conditions de mise sur le marché des produits introduits dans les installations utilisées pour le traitement thermique des EDCH définit les dispositions s'appliquant aux fluides caloporteurs, en vue de garantir l'innocuité des produits vis-à-vis de la qualité des EDCH.

3.1.2.7 Dispositions réglementaires relatives au pilotage et à la surveillance de la production

3.1.2.7.1 *Réglementation*

■ **Maîtrise des risques**

La réglementation fixe une obligation de maîtrise des risques structurée sous la forme d'un « Plan de Gestion de la Sécurité Sanitaire des Eaux (PGSSE) » (article R.1321-22-1 du CSP) applicable à toutes les installations de production-distribution d'eau « *de la zone de captage jusqu'en amont des installations privées de distribution* » à l'exception des « *eaux destinées à la consommation humaine vendues en bouteilles ou dans des contenants et les eaux utilisées dans les entreprises alimentaires* » (arrêté du 3 janvier 2023 relatif au plan de gestion de la sécurité sanitaire de l'eau réalisé de la zone de captage jusqu'en amont des installations privées de distribution). La surveillance du processus de production et de distribution d'eau est imposée par l'arrêté du 30 décembre 2022 relatif au programme de tests et d'analyses à réaliser dans le cadre de la surveillance exercée par la personne responsable de la production

ou de la distribution d'eau et aux conditions auxquelles doivent satisfaire les laboratoires réalisant ce programme, en application des articles R.1321-23 et R.1321-24 du CSP. Une liste de paramètres à surveiller *a minima* figure dans cette réglementation.

Ces obligations ne sont pas directement transposables au cas des AWG (par exemple, comme démontré en 3.1.2.2.1, la ressource d'un AWG ne bénéficie pas de « zone de captage ») mais le principe d'une analyse des risques conduisant à la mise en place de moyens de traitement adaptés et à une surveillance des procédés devrait rester la règle en toute situation.

■ Entretien hygiénique

En application de l'article R.1321-54 du CSP, les produits utilisés pour le nettoyage et la désinfection des installations de production, de distribution et de conditionnement d'EDCH doivent être composés de constituants autorisés dans les conditions fixées par l'article 11 du décret n° 73-138 du 12 février 1973 portant application de la loi du 1er août 1905 sur les fraudes et falsifications en ce qui concerne les procédés et produits utilisés pour le nettoyage des MCDA. Sinon, ils doivent disposer d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) préalable du ministère en charge de la santé, donnée après avis favorable de l'Anses.

Les produits biocides doivent disposer d'une AMM en application du règlement (UE) n° 528/2012 du 22 mai 2012. Toutefois, durant la période de régime transitoire définie par l'article 89 de ce même règlement, les dispositions nationales s'appliquent (cf. article R.1321-50-IV).

Les AWG étant, pour de nombreux modèles, comparables en de nombreux points à des fontaines à eau, certaines dispositions réglementaires spécifiques de ces matériels peuvent s'avérer pertinentes (circulaire du 30 décembre 1986) sous réserve de la prise en compte des spécificités technologiques des AWG.

En particulier, le responsable de l'établissement équipé d'une fontaine à eau doit :

- assurer la mise en œuvre régulière d'opérations de nettoyage et d'entretien de la fontaine, dans les conditions précisées par la circulaire DGS/PGE/1D n° 2058 du 30 décembre 1986 relative à l'utilisation des fontaines réfrigérantes et celles fixées par les articles R.1321-55 et suivants du CSP ;
- éviter une stagnation prolongée lors du stockage de l'eau ;
- maintenir le bon état d'entretien et de fonctionnement des appareils, dont les systèmes de filtration.

La circulaire de 1986 recommande de :

- laisser s'écouler les premières eaux en quantité au moins égale à la capacité de stockage de l'appareil si la fontaine n'a pas été utilisée depuis 24 heures ;
- mettre en place un dispositif de vidange et une fréquence de vidange d'au moins une fois par mois.

3.1.2.7.2 *Constats concernant les dispositifs existants*

Les points suivants sont à retenir au vu des données disponibles :

- aucun fabricant n'a clairement pris en compte les risques de transferts de polluants de l'air vers l'eau. Les filières de traitement en place ne sont pas définies sur la base d'une évaluation des risques et leur efficacité n'est pas validée ;
- les appareils de type « fontaine à eau » ne sont pas équipés de sondes de mesure susceptibles d'indiquer à l'utilisateur une défaillance des dispositifs de traitement. Il n'y

a donc aucun pilotage possible par l'utilisateur de ce type d'AWG, notamment pour s'assurer de l'intégrité des filtres ou surveiller leur niveau réel de vieillissement ;

- les fabricants pallient cette difficulté en imposant des fréquences élevées de remplacement des consommables, sans que cette fréquence ne soit clairement justifiée. En effet, la durée de vie des filtres est calculée sur une moyenne d'utilisation du dispositif par les clients et du volume d'eau produit (à l'instar des carafes filtrantes) sans suivi en temps réel et personnalisé, et repose donc sur des prévisions purement théoriques ;
- l'entretien des dispositifs de petit format, à la charge des utilisateurs, fait le plus souvent l'objet de prescriptions très imprécises dans les notices d'utilisation, notamment quant aux produits à utiliser et aux protocoles à respecter.

3.1.2.8 Dispositions réglementaires relatives au contrôle de la qualité des eaux produites

L'article L.1321-4 du CSP indique que tout « fournisseur d'eau » est tenu de se soumettre au contrôle sanitaire, entre autres obligations, excepté dans le cas des « *eaux destinées à la consommation humaine provenant d'une source individuelle fournissant moins de 10 m³ par jour en moyenne ou approvisionnant moins de cinquante personnes, sauf si ces eaux sont fournies dans le cadre d'une activité commerciale ou publique* ». En l'état actuel de la réglementation, les AWG de petites dimensions ne sont donc pas concernés (moins de 10 m³ par jour) sauf si l'eau est fournie dans le cadre d'une « activité publique », ce qui semble correspondre au cas des AWG qui seraient mis en place dans des lieux publics (par exemple, université ou centre commercial), sous réserve d'être en mesure de les recenser. Cependant, les programmes d'analyses actuels du contrôle sanitaire, conçus pour des réseaux de distribution, apparaissent inadaptés au cas des AWG.

Le cas des fontaines à eau utilisées au sein des entreprises semble exclu et, *a fortiori*, celui des AWG installés dans l'habitat privé aussi. Enfin, les installations de toutes tailles à but commercial (par exemple, une usine d'embouteillage) sont concernées par le contrôle sanitaire.

Le contrôle sanitaire comprend deux volets, la réalisation d'analyses périodiques et des contrôles des dispositifs par des agents de l'État.

3.1.3 Cas particulier des eaux conditionnées

Comme recensé en 2.1 du présent rapport, un projet d'installation d'une usine d'embouteillage d'eaux rendues potables par traitement produite à partir d'eau atmosphérique a été répertorié en France. Au regard de la réglementation actuelle, ces eaux seraient considérées comme des eaux rendues potables par traitement conditionnées (ERPTC).

Plusieurs textes réglementaires régissent ces ERPTC :

- l'arrêté du 22 octobre 2013 modifié (contrôle sanitaire mis en œuvre par les ARS, surveillance par l'exploitant) ;
- l'arrêté du 14 mars 2007 modifié (exigences de qualité, traitements autorisés, mentions d'étiquetage) ;
- l'arrêté du 20 juin 2007 (demande d'autorisation d'exploiter d'une ressource à des fins de conditionnement en eau de source ou en eau rendue potable par traitements) ;
- l'arrêté du 4 mai 2007 (demande d'autorisation d'importation d'une eau conditionnée ou de glace alimentaire produites à l'étranger).

Il est également rappelé dans l'article R.1321-92 du CSP que l'appellation « *eau rendue potable par traitement* » doit figurer sur les contenants détenus en vue de la vente, mis à la vente, vendus ou distribués à titre gratuit. Un certain nombre d'interdictions est également stipulé pour éviter que toute confusion soit faite par les consommateurs avec des eaux de sources ou minérales conditionnées, « *notamment par l'indication de propriétés favorables à la santé, par la mention d'expressions comportant le mot minéral ou des dérivés de ce mot, par la mention d'expressions comportant le mot source ou des dérivés de ce mot, ou par la mise en exergue d'un ou de plusieurs éléments particuliers relatifs à la composition de l'eau* » (article R.1321-93).

Enfin, les ERPTC étant considérées comme des denrées alimentaires, si les matériaux de la filière de traitement relèvent de la réglementation MCDE, les conditionnements utilisés, en revanche, relèvent de la réglementation relative aux MCDA.

3.1.4 Dispositions du code de l'environnement relatives à la surveillance de la qualité de l'air

La qualité des condensats bruts est directement liée à celle de l'air au niveau de la zone de production. Les critères de qualité de l'air définis par la réglementation (avec une distinction faite entre la qualité de l'air intérieur et la qualité de l'air extérieur, dit « *ambiant* » dans le code de l'environnement³⁵) prennent en compte le risque lié à l'exposition par voie respiratoire et le risque pour l'environnement.

3.1.4.1 Cadre réglementaire et organisation de la surveillance de la qualité de l'air extérieur en France

La pollution de l'air en France fait l'objet d'une politique visant le développement et la mise en œuvre de moyens pour améliorer la qualité de l'air ambiant comme le contrôle des émissions de sources mobiles, la qualité des carburants et la surveillance et évaluation de la qualité de l'air.

La surveillance de la qualité de l'air est confiée par l'État à des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), dans le cadre de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996³⁶ fondée sur la Directive 96/62/CE relative à l'évaluation et à la gestion de la qualité de l'air ambiant suivies de plusieurs directives pour la fixation de valeurs limites à respecter dans l'air ambiant. Après une refonte en 2008³⁷, une nouvelle directive est en cours de révision et a fait l'objet d'un texte adopté par résolution du parlement européen le 24 avril 2024 qui devrait être votée sur le second semestre de l'année 2024. La coordination technique du dispositif de surveillance des polluants réglementés est assurée par le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA). Les polluants surveillés sont notamment ceux qui font l'objet d'une réglementation, au titre du code de l'environnement ou des directives européennes, auxquels sont associées des valeurs réglementaires : le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde d'azote (NO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), l'ozone (O₃), le benzène (C₆H₆), le benzo[a]pyrène (C₂₀H₁₂ ou B[a]P), les particules (de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm - PM₁₀ et

³⁵ Pour éviter toute confusion, le qualificatif « extérieur » sera préféré à « ambiant » dans l'ensemble du rapport.

³⁶ Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie.

³⁷ Directive 2008/50/CE du parlement européen et du conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

inférieur à 2,5 µm - PM_{2,5}^{38,39}), ainsi que le plomb, l'arsenic, le cadmium, le nickel et le mercure contenus dans les particules.

Les normes de qualité de l'air, conformément aux directives n° 2008/50/CE et 2004/107/CE et au décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 qui transpose ces directives, fixent les valeurs réglementaires à respecter définies en concentrations annuelles, journalières, voire horaire, en fonction des polluants réglementés (Article R.221-1 du code de l'environnement) (Annexe 6, tableau 5).

Les concentrations des polluants réglementés sont mesurées en différents points du territoire français dans 71 zones de surveillance. Le niveau de surveillance y est adapté en fonction des niveaux de concentration et des populations susceptibles d'être exposées. Les points de mesure sont positionnés dans différents types d'environnements, à proximité de sources d'émissions (trafic routier, industries, etc.), ainsi que dans des zones éloignées de ces sources (fond urbain ou rural). Les mesures de concentrations sont disponibles en temps réel sur Geod'air⁴⁰.

La France développe également différents réseaux de surveillance complémentaires à celui issue de la réglementation européenne transposée en droit français, ce qui constitue une spécificité au niveau français. Cela entre dans les missions de surveillances des AASQA pour une liste de « polluants d'intérêt national »^{41,42} qui comprend :

- Les pesticides (voir la liste en vigueur – Annexe 6, tableau 6) ;
- La composition chimique⁴³ des particules dans le cadre du programme CARA⁴⁴ et MERA⁴⁵ ;
- Les particules de diamètre inférieur ou égale à 0,1 µm, dites particules ultrafines (concentration en nombre par volume d'air et composition chimique).

Enfin, des travaux menés par différents organismes ou associations spécialisés existent au niveau national pour améliorer les connaissances sur la pollution de l'air et permettre de documenter la présence d'autres polluants dans l'air.

Dans le cadre de l'expertise de l'Anses sur les polluants qualifiés « d'émergents⁴⁶ », des laboratoires ou organismes de recherche, ainsi que des associations, spécialisés sur la thématique de la pollution atmosphérique avaient été consultés. Cette consultation avait fait ressortir 372 polluants différents mesurés par 22 organismes (16 AASQA et 6 laboratoires de recherche). Ce nombre ne tenait compte ni des polluants réglementés pour la surveillance, ni des pesticides, des polluants biologiques, des radioéléments et des gaz à effet de serre (Anses, 2018).

³⁸ Geod'air : données et statistiques sur la qualité de l'air en France (geodair.fr).

³⁹ Les appellations utilisées pour qualifier les particules dans l'air sont de type PM_x pour Particulate Matter (matière particulaire en suspension dans l'air) dont le "diamètre de coupure" est de x µm. Elles sont définies dans la norme NF EN 12341 (2014) comme correspondant, en conditions standardisées, à la matière particulaire en suspension dans l'air, de taille suffisamment petite pour traverser une tête de prélèvement sélective de fraction granulométrique, avec une efficacité de coupure de 50 % pour un diamètre aérodynamique de x µm.

³⁸ <https://www.geodair.fr/>.

⁴¹ Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

⁴² Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). 2021. « Liste des polluants d'intérêt national ». <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/liste-des-polluants-dinteret-national>.

⁴³ Sulfate, Ammonium, Nitrate, Matière organique, Carbone suie (black carbon).

⁴⁴ <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara>.

⁴⁵ <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-mera>.

⁴⁶ Polluants émergents = polluants pour lesquels sont disponibles suffisamment d'informations pour motiver une surveillance et qui n'appartiennent pas à la liste des polluants réglementés. La terminologie « polluants non réglementés » a été utilisée car considérée comme plus appropriée que celle de « polluants émergents » qui, dans le langage courant, laisse penser que l'on ne s'intéresse qu'à de nouveaux polluants.

Ces travaux ont permis de fournir une liste prioritaire de polluants de l'air extérieur, non pris en compte par la réglementation actuelle en matière de surveillance de la qualité de l'air et qui présentent un intérêt du point de vue de leurs enjeux potentiels en termes d'impact sur la santé humaine (Annexe 6, tableau 7). Ces polluants pourraient être pris en compte à l'avenir dans le cadre de l'évolution de la réglementation.

Lorsque les valeurs limites réglementaires sont dépassées ou risquent de l'être, ainsi que dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants, le code de l'environnement (articles L.222-4 à L.222-7) prévoit la mise en œuvre au niveau local d'un « plan de protection de l'atmosphère » définissant les objectifs et les mesures afin de maintenir ou ramener les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur aux valeurs limites réglementaires. Il existe également un dispositif de gestion des épisodes de pollution lorsque les concentrations dépassent les seuils d'information et de recommandation ou d'alerte qui relève du préfet. Selon le niveau de pollution, des recommandations peuvent être émises ou des mesures d'urgence contraignantes peuvent être prises pour limiter la pollution et ses effets sur les populations.

Les pollens et les moisissures font également l'objet d'une surveillance en application de l'arrêté du 5 août 2016⁴⁷. L'objectif de cette surveillance aérobiologique est l'étude du contenu de l'air en particules biologiques pouvant avoir une incidence sur le risque allergique pour la population, d'informer les personnes allergiques et de recueillir des données cliniques associées.

Par ailleurs, une surveillance de la radioactivité de l'atmosphère est effectuée par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) via le réseau OPERA⁴⁸ afin de détecter d'éventuels événements liés soit à des activités nucléaires (par exemple, l'accident de Tchernobyl), soit à des phénomènes naturels (par exemple, le passage de poussières du Sahara). La détection de tels événements peut donner lieu à la mise en place de mesures spécifiques par les pouvoirs publics (par exemple, distribution de comprimés d'iode à la population).

3.1.4.2 Cadre réglementaire et organisation de la surveillance de la qualité de l'air intérieur en France

La qualité de l'air intérieur (QAI) est une préoccupation de santé publique, prise en compte dans le quatrième plan national santé environnement (loi Grenelle II⁴⁹) et l'amélioration des connaissances a été confiée par l'État à l'Observatoire de la Qualité des Environnements Intérieurs (OQEI, anciennement OQAI)⁵⁰.

La surveillance de la QAI s'est mise en place progressivement notamment dans certains établissements recevant du public, et plus spécifiquement accueillant des enfants, comme prévu par le décret 2011-1728 du 2 décembre 2011. Elle est encadrée par les dispositions du code de l'environnement (articles R.221-30 à D.221-38) qui ont évolué au 1^{er} janvier 2023 par décret n° 2022-1689 du 27 décembre 2022. Ces dispositions sont complétées par le décret n° 2022-1690 du 27 décembre 2022 modifiant le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public et

⁴⁷ Arrêté du 5 août 2016 portant désignation des organismes chargés de coordonner la surveillance des pollens et des moisissures de l'air ambiant.

⁴⁸ https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/connaissances/environnement/surveillance-environnement/organisation/reseaux-surveillance/IRSN_Reseau-Opera-Air_201411.pdf.

⁴⁹ Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

⁵⁰ <https://www.oqai.fr/fr>.

l'arrêté du 27 décembre 2022 fixant les conditions de réalisation de la mesure à lecture directe de la concentration en dioxyde de carbone dans l'air intérieur au titre de l'évaluation annuelle des moyens d'aération et la réalisation de campagnes de mesure à certaines « étapes clés de la vie du bâtiment ». Différentes valeurs sont proposées dans le cadre de cette réglementation dont celles au-delà desquelles des investigations complémentaires sont à mener.

Le radon fait l'objet de dispositions réglementaires spécifiques depuis le début des années 2000 issues de la transposition en droit français de la directive européenne, la directive en vigueur étant la Directive 2013/59 Euratom du 5 décembre 2013⁵¹ (décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire ; décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants). Sa surveillance dans l'air intérieur est assurée au niveau de certains établissements recevant du public et lieux de travail. La valeur de référence d'activité du radon dans l'air intérieur des bâtiments est de 300 Bq.m⁻³ en moyenne annuelle. Au-dessus de ce niveau, des actions correctrices sont nécessaires.

Ainsi, seulement quatre polluants sont réglementés dans l'air intérieur : benzène, formaldéhyde, dioxyde de carbone pour évaluer le confinement⁵² et radon (Annexe 6, tableau 8).

Par ailleurs, l'Anses élabore depuis 2004, des valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAI) pour des polluants chimiques. Ces VGAI visent à définir et proposer un cadre de référence destiné à protéger la population des effets sanitaires liés à une exposition à la pollution de l'air intérieur (Annexe 6, tableau 9).

Les VGAI proposées par l'Anses constituent le socle initial du processus institutionnel visant à fixer des valeurs réglementaires de surveillance de la qualité de l'air intérieur.

3.2 Réglementation dans d'autres États membres de l'Union européenne

Les dispositions de la directive (UE) 2020/2184 du 16 décembre 2020 relative à la qualité des EDCH (refonte de la directive 98/83/CE) ne définissent que deux ressources potentielles : les eaux souterraines et superficielles (article 8), de sorte que cette directive ne s'applique pas *de facto* aux AWG.

Dans le cadre du réseau ENDWARE, une consultation des États membres (EM) de l'Union européenne a été initiée par l'Anses afin de collecter des informations sur les éventuelles réglementations/normes/lignes directrices applicables aux AWG. Six pays ont répondu à la sollicitation de l'Anses : la Lituanie, la Hongrie, le Luxembourg, l'Italie, la République tchèque et les Pays-Bas. À cette occasion, il est apparu que des dispositions spécifiques existaient dans certains EM mais ce recensement n'est pas exhaustif.

En Italie, des AWG de petites et moyennes capacités de production ont fait l'objet de demandes de mise sur le marché à destination des particuliers et des collectivités. L'agence sanitaire italienne a recommandé que les matériaux, les traitements chimiques et les filtres utilisés dans les dispositifs soient conformes aux dispositions du décret législatif n° 18/2023⁵³

⁵¹ Directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom

⁵² Accueil | Surveillance Air Intérieur (qai-erp.fr).

⁵³ <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2023:018>.

qui transpose la directive (EU) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. En effet, il n'existe pas de réglementation spécifique aux AWG en Italie et il n'est pas prévu d'en créer à ce jour.

En République tchèque, les dispositifs à destination de collectivités ou de bureaux dans des entreprises doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché. Une demande de mise sur le marché a été refusée par les experts de l'agence sanitaire pour le dispositif S.A.W.E.R[®] car l'eau produite n'était « *pas suffisamment minéralisée pour être consommable sans risque* ». En effet, la réglementation tchèque (décret n° 252/2004 fixant les exigences sanitaires pour l'eau potable et l'eau chaude, ainsi que la fréquence et l'étendue des contrôles de l'eau potable⁵⁴) impose des concentrations minimales en calcium, magnésium et solides totaux dissous (respectivement 30 mg.L⁻¹, 10 mg.L⁻¹ et 150 mg.L⁻¹). Par ailleurs, les matériaux au contact de l'eau doivent satisfaire aux prescriptions du décret n° 409/2005 relatif aux exigences en matière d'hygiène pour les produits entrant en contact direct avec l'eau et pour le traitement de l'eau (amendé par le décret n° 446/2021). À ce jour, seuls les particuliers peuvent utiliser de tels dispositifs en République tchèque, à condition qu'ils satisfassent aux dispositions relatives aux matériaux et respectent les concentrations minimales en éléments minéraux mentionnées ci-dessus.

En ce qui concerne la Lituanie, la Hongrie, le Luxembourg et les Pays-Bas, les AWG n'ont pas fait l'objet de demandes d'autorisation et il n'est pas prévu d'évolution des dispositions réglementaires pour les prendre en compte.

3.3 Normalisation des AWG

Deux normes d'essai, d'application non obligatoire (démarche volontaire des responsables de la mise sur le marché), ont été recensées.

La norme NSF P343 (2023) « *Exigences en matière de santé et d'hygiène pour les générateurs d'eau atmosphérique* » concerne les dispositifs AWG. Celle-ci stipule qu'afin « *de réduire l'impact des biais liés à la ressource en air et de normaliser le processus d'essai, ce protocole est conçu pour évaluer uniquement les composants en contact avec l'eau pour la sécurité des matériaux et la capacité de l'appareil à désinfecter l'eau produite dans des conditions de laboratoire contrôlées* ». La norme ne permet donc pas d'assurer que l'eau produite par les AWG est potable et sans risque pour le consommateur, ni d'évaluer l'efficacité du dispositif. Il est également stipulé que toute allégation d'abattement d'un polluant par de tels dispositifs doit être justifiée par l'application d'un protocole issu d'une autre norme NSF/ANSI.

Ainsi, la norme impose que les AWG remplissent également les critères des normes suivantes :

- NSF/ANSI 42 : Réduction des contaminants organoleptiques (goût, odeur, chlore, etc.) ;
- NSF/ANSI/CAN 50 : Équipement et produits chimiques pour piscines et spas ;

⁵⁴ info@aion.cz, AION CS-. s. d. « Vyhlaška č. 252/2004 Sb. Vyhlaška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody (décret n° 252/2004 fixant les exigences sanitaires pour l'eau potable et l'eau chaude, ainsi que la fréquence et l'étendue des contrôles de l'eau potable) ». Zákony pro lidi. <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2004-252> ou <https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC141277/>.

- NSF/ANSI 53 : Réduction des contaminants ayant des effets sur la santé (plomb, PFAS, Cryptosporidium, etc.) ;
- NSF/ANSI 55 : Performance des systèmes de traitement de l'eau par ultraviolets (UV) ;
- NSF/ANSI/CAN 61 : Produits chimiques de traitement de l'eau potable - Effets sur la santé ;
- NSF/ANSI 244 : Réduction des bactéries et des virus dans les dispositifs utilisés comme filtration supplémentaire dans les situations d'urgence ;
- NSF/ANSI 330 : Glossaire de la terminologie des unités de traitement de l'eau potable ;
- NSF/ANSI/CAN 372 : Composants du système d'eau potable – Teneur en plomb ;
- UL 867 : Purificateurs d'air électrostatiques.

La norme ASSE/ANSI 1090-2020e1 « *Exigences de performance pour les générateurs d'eau atmosphérique qui produisent de l'eau potable* » a pour objectif de tester :

- le taux de production d'eau potable ;
- le volume de remplissage et l'arrêt automatique pour les systèmes à réservoir ;
- l'efficacité énergétique - Eau potable produite par énergie consommée ;
- la protection contre les retours d'eau ;
- les exigences en matière de qualité microbiologique de l'eau potable (légionelles et coliformes totaux) ;
- les essais de performance des filtres inclus dans la conception du système en matière de réduction des produits chimiques ;
- le cycle de vie pour les systèmes raccordés en amont au réseau d'eau potable ;
- l'innocuité des matériaux (revue de leur formulation et essais de migration).

En revanche, la présente norme n'a pas, selon les termes employés, pour objet de vérifier les affirmations du fabricant concernant la « *pureté chimique, particulière ou autre de l'eau* ».

La norme impose de respecter les critères des normes suivantes :

- AHAM/ANSI DH-1-2008 : Déshumidificateurs ;
- ASSE 1087-2018 : Exigences de performance pour les équipements de traitement de l'eau des services commerciaux et de restauration utilisant de l'eau potable ;
- EPA 1664 Revision B: 418.1 : Matériau extractible au N-Hexane (HEM ; huile et graisse) et matériau extractible au N-Hexane traité au gel de silice (SGT-HEM ; matériau non polaire) par extraction et gravimétrie ;
- IAPMO PS 65-2019 : Unités Airgap pour l'installation d'équipements de conditionnement d'eau ;
- NSF/ANSI 14-2018 : Composants des systèmes de tuyauterie en plastique et matériaux associés ;
- NSF/ANSI 42-2019 : Réduction des contaminants organoleptiques (goût, odeur, chlore, etc.) ;
- NSF/ANSI 53-2019 : Réduction des contaminants ayant des effets sur la santé (plomb, PFAS, Cryptosporidium, etc.) ;
- NSF/ANSI 55-2019 : Performance des systèmes de traitement de l'eau par ultraviolets (UV) ;
- NSF/ANSI 58-2019 : Performance des systèmes d'osmose inverse ;

- NSF/ANSI 60-2019 : Effets sur la santé des produits chimiques présents dans l'eau potable ;
- NSF/ANSI/CAN 61-2019 : Produits chimiques de traitement de l'eau potable - Effets sur la santé ;
- NSF/ANSI 372-2016 : Composants du système d'eau potable - Teneur en plomb ;
- NSF/ANSI/CAN 600-2019 : Évaluation des effets sur la santé et critères pour les produits chimiques dans l'eau potable ;
- UL 969-2017 : Systèmes de marquage et d'étiquetage ;
- US-EPA Guide, norme et protocole pour tester les purificateurs d'eau microbiologiques.

Il est à noter que ni les dossiers des dispositifs recensés, ni les fabricants auditionnés, ne citent la norme NSF P343 (2023) et qu'un seul fabricant mentionne la norme ASSE/ANSI 1090-2020e1 sans toutefois revendiquer la conformité à cette dernière.

4 Évaluation de l'innocuité et de l'efficacité des dispositifs

Les AWG doivent permettre de produire une eau potable (conforme aux exigences de qualité en vigueur pour l'EDCH/ERPTC) quelle que soit la qualité de l'air, y compris en cas d'installation dans des enceintes confinées et/ou dans des atmosphères contaminées, sauf si des restrictions d'utilisation sont émises par le responsable de la mise sur le marché.

La principale originalité technologique de la production d'eau par un AWG est la capture de la vapeur d'eau atmosphérique, qui peut favoriser le transfert de polluants de l'air vers l'eau condensée. Il en résulte un changement de la voie d'exposition aux polluants (ingestion au lieu d'inhalation). Ainsi, en sus des substances indésirables ou toxiques pouvant provenir des matériaux et produits de traitement utilisés dans les AWG, ou pouvant se former dans l'eau lors des traitements, des contaminants de l'air (chimiques, biologiques, radiologiques) peuvent être transférés vers les condensats bruts. Les AWG peuvent être aussi l'objet d'une colonisation microbienne. **L'évaluation de leur innocuité implique donc la prise en compte de l'ensemble de ces dangers (dits dangers pertinents pour les AWG).**

En termes d'efficacité, les AWG doivent garantir un abattement suffisant des dangers présents dans les condensats bruts en vue de respecter les exigences de qualité réglementaires des EDCH/ERPTC. Par ailleurs, l'efficacité de ces systèmes peut être impactée sur la durée par leurs modalités d'utilisation et de maintenance. **Sur ces différents aspects, seules des considérations générales peuvent être formulées dans la mesure où les processus technologiques diffèrent selon les modèles d'AWG.**

4.1 Innocuité des dispositifs

4.1.1 Dangers liés à la pollution de l'air

L'air, qu'il soit intérieur ou extérieur, peut contenir divers polluants : des substances chimiques, des radioéléments qui peuvent se trouver à l'état gazeux, liquide ou particulaire et/ou des aérosols biologiques (particules d'origine microbienne, animale ou végétale en suspension dans l'air) pouvant avoir des effets néfastes sur la santé humaine⁵⁵ ou pour l'environnement. Les effets néfastes pour la santé de l'Homme par inhalation connus sont, par exemple, les effets respiratoires, cardiovasculaires et neurologiques. Ces polluants n'ont pas tous d'effets toxiques par voie orale⁵⁶ et ne sont donc pas nécessairement d'intérêt dans le domaine des eaux, à l'exemple du monoxyde de carbone.

Les concentrations de polluants dans l'air sont le plus souvent exprimées en microgrammes par mètre cube d'air ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ d'air). Les polluants gazeux sont soit des composés inorganiques (ozone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ammoniac, etc.), soit des composés organiques parmi lesquels on distingue principalement les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les composés organiques volatils (COV). Cette dernière famille regroupe un ensemble très large de molécules chimiques comme, par exemple, le benzène, l'acétone et le

⁵⁵ <https://www.anses.fr/fr/content/actions-qualite-de-lair-anses>.

⁵⁶ Certains polluants de l'air comme l'ozone ont aussi un effet irritant pour la muqueuse oculaire.

perchloroéthylène qui se trouvent à l'état de gaz ou s'évaporent facilement lors de leur utilisation, dans les conditions habituelles de température et de pression.

Par définition, les aérosols sont des particules solides ou liquides (gouttelettes) en suspension dans un flux d'air. Ceux qui restent en suspension dans l'air sont de diamètre aérodynamique équivalent (D_{ae}) inférieur à 100 µm, celui-ci pouvant aller de quelques nanomètres (pour les particules secondaires ou les nanoparticules manufacturées) à quelques centaines de microns. Les aérosols peuvent être issus de sources naturelles (embruns, envolées de sols, matériel biologique, etc.) ou anthropiques. Durant leur séjour dans l'atmosphère, ils peuvent subir des transformations physiques et/ou chimiques. Historiquement, la concentration des aérosols est évaluée en fonction de leur taille qui détermine leur capacité de pénétration dans l'appareil respiratoire et, dans certains cas, de leur composition chimique. Les études récentes montrent des effets sur la santé aux plus faibles concentrations, sans seuil discernable pour les particules, mais également des effets pour de nouveaux indicateurs de pollution tels que les particules ultrafines et le carbone suie et organique qui seraient à considérer en priorité dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air (Anses, 2019b).

Les aérosols biologiques, ou bioaérosols, incluent des micro-organismes, pouvant altérer la qualité microbiologique de l'eau et entraîner potentiellement un risque pour la santé des consommateurs. Ils seront considérés dans un paragraphe dédié (4.1.1.3).

Dans le cas des AWG, la question fondamentale est celle des éventuels transferts des espèces chimiques et ou biologiques présentes dans l'atmosphère vers l'eau. Les données de la littérature spécifique des AWG ne permettent pas d'apprécier l'impact réel de la qualité de l'air sur celle des condensats bruts car la qualité de l'air n'est que rarement caractérisée. Les analyses réalisées portent essentiellement sur les condensats bruts et ne sont pas exhaustives (cf. 4.1.1.4.2). Lors des auditions menées, aucun fabricant ou responsable de la mise sur le marché d'AWG n'a présenté d'études concernant l'impact de la qualité de l'air (et donc des polluants présents dans l'air) sur la qualité des condensats bruts. Le plus souvent, les données fournies concernent la qualité de l'eau en fin de processus de traitement, sans lien avec la qualité de l'air prélevé. Seul le projet d'usine d'embouteillage transmis par la DGS prévoit une collaboration avec l'association ATMOSUD (Observatoire de la qualité de l'air en Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur agréé par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires) ; un centre de surveillance de la qualité de l'air va être installé au niveau de cette usine⁵⁷. L'objectif de ce partenariat est de corréliser la qualité de l'air et la qualité des condensats bruts, et de prévoir des procédures d'interruption de la production d'eau en cas de pic de pollution de l'air. Les porteurs de projet interrogés lors de l'audition sont conscients que les analyses présentées dans leur dossier ne sont pas représentatives de la variabilité temporelle et spatiale de la qualité de l'air.

Le faible nombre de données disponibles ne permet pas d'apprécier dans quelle mesure les espèces chimiques, radiologiques ou agents biologiques présents dans l'atmosphère sont susceptibles d'altérer la qualité de l'eau brute condensée et, *in fine*, de l'eau produite.

Le GT s'est donc attaché à établir, au vu des données de surveillance de la qualité de l'air disponibles, un bilan des polluants de l'air extérieur et intérieur, et à évaluer les facteurs influant le transfert de ces polluants dans les condensats bruts produits par les AWG.

⁵⁷ Il n'est pas précisé dans le dossier du pétitionnaire si la liste des polluants surveillés se limitera à la liste des polluants réglementés ou intégrera d'autres polluants.

4.1.1.1 Polluants de l'air extérieur : composés gazeux et particules

Les substances chimiques à l'état gazeux et les particules potentiellement apportées par l'air utilisé dans les AWG peuvent être en partie identifiées et/ou quantifiées grâce aux données fournies par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air mis en place en France (3.1.4.1).

Malgré des progrès importants en termes de qualité de l'air, la France demeure confrontée à des dépassements récurrents des seuils réglementaires pour la protection de la santé humaine dans certaines agglomérations (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, 2023). En 2022, elle a dû faire face à de nombreux épisodes de pollution à l'ozone et aux particules en métropole, en raison de l'apport important de poussières sahariennes, mais aussi dans les Antilles. En 2022, des dépassements des seuils réglementaires ont été observés en France pour quatre polluants réglementés à l'échelle européenne : NO₂, PM₁₀, O₃ et nickel⁵⁸. Cette même année, les valeurs guides de l'OMS publiées en 2021 (plus contraignantes que les critères européens) pour le NO₂, l'O₃, les PM₁₀ et les PM_{2,5} n'ont pas été respectées dans 72 à 97 % des agglomérations françaises, selon le polluant considéré.

En ce qui concerne les pesticides dans l'air extérieur, la campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant, réalisée par l'Anses (Anses, 2020b) entre 2018 et 2019, a généré plus de 100 000 résultats d'analyses de détection dans l'air extérieur pour 75 substances pesticides recherchées sur 50 sites selon une méthodologie harmonisée à l'échelle du territoire national. Cette campagne visait à représenter le milieu rural comme le milieu urbain. Les données collectées permettent d'établir que les concentrations moyennes annuelles sont très variables mais majoritairement inférieures à 0,12 ng.m⁻³. Seules sept molécules font exception. Parmi celles-ci, les moyennes annuelles les plus élevées en métropole sont associées au prosulfocarbe (2,61 ng.m⁻³) et au folpel (ou folpet)⁵⁹ (1,03 ng.m⁻³). Dans les DROM, il s'agit du S-métolachlore et de la pendiméthaline (respectivement 0,29 ng.m⁻³ et 0,14 ng.m⁻³). Le chlorothalonil, le chlorpyrifos méthyl et le triallate sont aussi mis en évidence avec des moyennes annuelles de concentration élevées. Les substances quantifiées sont très diverses et variables selon les sites.

La base Phytatmo⁶⁰ compile les résultats des mesures de la concentration en pesticides dans l'air extérieur réalisées par les AASQA. 321 substances actives sont recherchées sur 176 sites français depuis 2002.

Sur la période 2018-2022, le bilan des 468 859 résultats analytiques permet d'observer que les concentrations mesurées sont, pour la plupart (98,50 %), inférieures à 0,40 ng.m⁻³.

La concentration moyenne (m) dans l'air est pour la quasi-totalité des molécules inférieure à 0,05 ng.m⁻³ avec quelques exceptions :

- le prosulfocarbe (m = 2,36 ng.m⁻³) ;
- la pendiméthaline (m = 0,67 ng.m⁻³) ;
- le folpel (m = 0,58 ng.m⁻³) ;
- l'antraquinone (m = 0,33 ng.m⁻³) ;
- le triallate (m = 0,22 ng.m⁻³) ;
- la fenpropidine (m = 0,18 ng.m⁻³).

⁵⁸ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-de-la-qualite-de-lair-exterieur-en-france-en-2022>.

⁵⁹ Folpet est le nom ISO. Folpel est la dénomination officielle en France pour les produits phytopharmaceutiques.

⁶⁰ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-de-surveillance-de-pesticides-dans-l-air-par-les-aasqa-a-partir-de-2002/>.

Des maxima de concentration sont observés de manière ponctuelle. La concentration maximale mesurée est de 267,97 ng.m⁻³ (prosulfoarbe - novembre 2021 – Nouvelle-Aquitaine). Les six molécules citées ci-dessus sont responsables de 97,6 % des valeurs de concentration dans l'air supérieures à 10 ng.m⁻³ et de 70,5 % des valeurs supérieures à 0,40 ng.m⁻³.

Les maxima de concentration en pesticides dans l'air surviennent principalement au printemps mais peuvent être aussi observés en octobre-novembre, période de traitement des cultures hivernales. Par ailleurs, les données des AASQA démontrent que des pesticides sont retrouvés dans l'air extérieur en zone agricole comme en zone urbaine.

Il est aussi noté de très fortes variations au cours du temps, pour un site donné, liées principalement aux activités agricoles et conditions météorologiques. La distance entre le point de prélèvement et la source des pesticides a probablement un impact sur les concentrations mesurées mais les résultats obtenus ne permettent pas d'identifier clairement une relation directe et proportionnelle entre le niveau de concentration et la distance du point de mesure à la première parcelle traitée.

Il faut donc retenir de ces bilans de surveillance que des dépassements ponctuels des valeurs réglementaires de qualité de l'air extérieur peuvent être observés en France, de même que des maxima de concentration pour certains polluants non réglementés comme les pesticides. Cette pollution n'est que partiellement prévisible et peut fluctuer de manière importante dans le temps et dans l'espace en fonction notamment des activités humaines et des conditions météorologiques.

De plus, la surveillance de la qualité de l'air ne concerne pas l'ensemble des polluants d'intérêt dans le domaine des EDCH.

4.1.1.2 Polluants de l'air intérieur : composés gazeux et particules

Les AWG actuellement commercialisés sont en majorité des dispositifs de type « fontaine à eau » destinés à être installés en intérieur. Aux polluants de l'air extérieur s'ajoute souvent une grande diversité de polluants spécifiques de l'air intérieur qui n'ont pas fait l'objet d'étude dans la littérature consacrée aux AWG.

La qualité de l'air intérieur est, en effet, influencée à la fois par la qualité de l'air extérieur (et l'emplacement des prises d'air), le bâti (par exemple, charpentes traitées avec des pesticides, matériaux isolants, etc.), la présence de dispositifs spécifiques de purification de l'air, l'usage des locaux (activités générant des vapeurs et/ou des fumées, etc.), leur équipement (appareils de chauffage, mobilier, etc.), leur occupation (présence de nombreux occupants, d'animaux, etc.), le comportement de leurs occupants (tabagisme, en particulier), leur gestion (utilisation de produits d'entretien, renouvellement de l'air, etc.), ainsi que la présence de micro-organismes producteurs de polluants volatils (CH₄, CO₂, NH₃, etc.).

Même si une surveillance de la qualité de l'air intérieur est mise en place dans certains établissements recevant du public (ERP) (3.1.4.2) et qu'il existe des VGAI sur des polluants d'intérêt fixées par l'Anses (Annexe 6, tableaux 8 et 9), les concentrations en polluants sont spécifiques à chaque environnement intérieur. Des campagnes nationales de mesures conduites par l'OQEI (anciennement OQAI), ont permis de documenter la qualité de l'air intérieur par la mesure de nombreux paramètres - composés organiques volatils (COV), pesticides (dans l'air et les poussières), composés organiques semi-volatils (COSV), particules (fraction PM_{2,5}), dioxyde d'azote (NO₂), paramètres de confort (CO₂, température, humidité),

radon - entre autres dans les logements, écoles, bureaux et établissements sanitaires et médico-sociaux.

4.1.1.3 Aérosols biologiques

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de valeurs réglementaires encadrant la présence de micro-organismes dans l'air⁶¹, que ce soit en air intérieur ou en air extérieur.

Au vu de la revue bibliographique réalisée, il apparaît que les travaux menés pour apprécier l'impact des aérosols biologiques sur la qualité des condensats bruts produits par les AWG sont peu nombreux et non exhaustifs (cf. 4.1.2.1). De plus, les auditions ont permis de constater que les fabricants d'AWG se limitent à la réalisation d'une désinfection systématique des eaux en fin de traitement sans avoir clairement précisé la nature des agents microbiens à inactiver ni les conditions de mise en œuvre de cette désinfection.

La pollution de l'air par les aérosols biologiques est pourtant bien caractérisée dans la littérature. Les aérosols biologiques peuvent représenter une fraction importante des particules en suspension dans l'air intérieur et extérieur : jusqu'à environ 30 % du nombre de particules de plus de 0,4 µm de diamètre. Leur gamme de taille (diamètre aérodynamique) est très large et s'étend de la dizaine de nanomètres à la dizaine de micromètres : protéines, virus, bactéries sporulées ou non, archées, spores fongiques, pollens, fragments animaux et végétaux (toutes tailles), sous forme de particules simples ou d'agrégats avec de la matière organique et/ou inorganique (Fröhlich-Nowoisky *et al.*, 2016).

Une grande diversité microbienne est observée dans l'air, à une concentration pouvant atteindre, pour les bactéries, environ 10⁸ cell.m⁻³. Les multiples sources de ces agents biologiques peuvent être naturelles (végétation, sols, milieux aquatiques, animaux, etc.) et anthropiques (en particulier, activités agricoles et industrie alimentaire). L'Homme et les animaux sont aussi des sources non négligeables d'émission de micro-organismes pathogènes ou pathogènes opportunistes (i.e. pouvant avoir des effets pathogènes chez certaines personnes vulnérables). Ces micro-organismes sont présents en fortes concentrations dans des zones à forte densité de population humaine et/ou animale. Ainsi, des lieux comme les centres médicaux (hôpitaux, cabinets médicaux, centres de soins et de prélèvements, etc.) (Cabo Verde *et al.*, 2015), les élevages d'animaux, les zones de traitement de produits d'origine animale (abattoirs, boucheries, laiteries, industries agro-alimentaires, etc.) ou encore les centres de traitement des déchets et les stations de traitement des eaux usées sont connus pour avoir de hauts niveaux de contamination aéroportée. Les aérosols de la taille des micro-organismes pouvant être dispersés depuis une source d'émission lointaine, le risque associé est à considérer, au moins comme potentiel, en tout lieu.

Aucun lien direct n'a pu être établi entre la qualité de l'air en ville (taux de particules PM₁₀ et PM_{2,5}) et la biodiversité bactérienne dans l'air dans les travaux de Chen *et al.* (2021). Cependant, *Legionella pneumophila*, bactérie responsable de la légionellose, a pu être détectée dans l'air jusqu'à des distances de plusieurs centaines de mètres autour de stations de traitement des eaux usées (Blatny *et al.*, 2008), et les données épidémiologiques démontrent un impact sanitaire dans un rayon allant jusqu'à 10 km (Blatny *et al.*, 2011). Les tours aéroréfrigérantes (TAR) représentent également des sources potentielles avérées de *Legionella pneumophila* dans l'air. Notamment, une épidémie de Légionellose imputée à une telle installation a été documentée, avec 113 cas identifiés (correspondant à une prévalence de près de 400 cas pour 100 000 habitants), dont 74% dans un rayon de 500 mètres autour

⁶¹ L'INRS a proposé en 2023 des valeurs guides pour les lieux de travail (<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20109>).

de la tour. Dans cette zone, la probabilité d'infection par voie aérienne est accrue d'un facteur 55 par rapport à des zones plus distantes (> 1000 m) (Sabria *et al.*, 2006). De même, Rouil *et al.* (2004) indiquent à partir de simulations que des sources d'émission puissantes telles que les TARs pourraient être à l'origine de la diffusion aéroportée de bactéries sur des distances supérieures à 10 km lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

Des virus entériques (norovirus) et hépatiques (hépatite E) ont également été détectés dans l'air au-dessus et autour de stations de traitement des eaux usées ; le risque sanitaire associé décroît très rapidement avec la distance mais n'est pas négligeable dans un rayon de 500 m (Courault *et al.*, 2017). Par ailleurs, des virus respiratoires à réplication entérique ont été mesurés dans l'air de locaux individuels ou hospitaliers (Tao *et al.*, 2022).

La pollution biologique de l'air ne faisant pas l'objet d'une surveillance, il n'est pas possible d'établir, comme pour les polluants chimiques, une cartographie des zones polluées et des niveaux de pollution rencontrés en France. Seule la liste des types d'installations polluantes évoquée plus haut permet, en première approche, d'identifier des zones potentiellement à risque.

En résumé, les aérosols biologiques peuvent contaminer les condensats bruts générés par les AWG. Ils sont formés à partir de sources diverses, dont certaines sont identifiées et ont fait l'objet d'études d'impact. Ce type de pollution de l'air ne fait pas l'objet d'une surveillance systématique en France.

4.1.1.4 Transferts de polluants chimiques ou radiologiques de l'air à l'eau au cours de la phase de condensation

Les polluants de l'air, sous forme de gaz ou d'aérosols, entrent en contact dans les AWG avec les dispositifs de capture de l'eau et peuvent se déposer, être adsorbés/absorbés ou se condenser sur ces dispositifs. La connaissance de ces mécanismes de transfert est fondamentale pour apprécier la possibilité d'une contamination des condensats bruts par les polluants de l'air. En ce qui concerne les aérosols, les transferts air-eau sont le résultat de dépôts sur les surfaces de condensation et éventuellement de solubilisation des particules, pour lesquels aucune donnée spécifique n'a été identifiée dans la littérature relative aux AWG. Le transfert des polluants gazeux peut être lié aux mécanismes diffusionnels (modification d'état) et réactionnels (modification chimique) qui seront détaillés ci-après. Les différents travaux réalisés sur les AWG restent fondamentalement dans une approche qualitative, faute de réalisation d'analyses de l'air entrant dans les appareils.

De nombreuses questions restent posées, notamment en ce qui concerne les dispositifs réalisant une première étape d'adsorption sur zéolite et du comportement des aérosols dans ce type de dispositif, auxquelles les auditions n'ont pas permis de répondre.

4.1.1.4.1 Mécanisme des transferts air-eau

Les éléments de réflexion rapportés ici concernent la question des transferts air-eau des composés gazeux, qui sont déterminés par des lois de la thermodynamique détaillées ci-dessous.

Une définition précise d'un composé organique volatil (COV) est celle de la directive européenne n° 1999/13/CE⁶² qui repose sur la pression de vapeur saturante. Pour rappel, la pression de vapeur saturante est la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est

⁶² <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/reducing-the-emissions-of-volatile-organic-compounds-vocs.html>.

en équilibre avec sa phase liquide ou solide à une température donnée dans un système fermé. Cette directive définit un composé organique volatil comme « *un composé organique ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K [c'est-à-dire 20 °C] ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières* ». Une autre façon de définir les COV est celle du décret n° 2006-623⁶³ qui repose sur la température d'ébullition. D'après ce décret, les COV regroupent tous les composés organiques dont le point d'ébullition, mesuré à la pression standard de 101,3 kPa (pression atmosphérique au niveau de la mer), est inférieur ou égal à 250°C. De même, la norme NF ISO 16000-6 définit les COV selon leur température d'ébullition et distingue, d'après la classification adoptée par l'OMS en 1989, les composés organiques très volatils, volatils et semi-volatils. Ainsi, des composés sont considérés comme des composés organiques semi-volatils (COSV) si leur point d'ébullition est compris entre 240 à 260 °C et 380 à 400 °C avec une pression de vapeur saturante comprise entre 10⁻² et 10⁻⁸ kPa. Plus la pression de vapeur saturante d'un composé sera faible, moins le composé sera volatil (Jaubert *et al.*, 1997). Ainsi, un composé ayant atteint une pression de vapeur suffisante peut former, par processus de nucléation homogène ou hétérogène, une particule : on parle alors d'aérosol secondaire.

La relation entre les variations de pression et la température est donnée par l'équation de Clapeyron. Cette équation permet de prédire une diminution de la pression de vapeur saturante ($P_2 < P_1$) d'un composé avec la diminution de température ($T_2 < T_1$) (Harvey *et al.*, 2007 ; Sander *et al.*, 2023⁶⁴) :

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{\Delta H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

avec ΔH_{vap} : enthalpie ou chaleur latente de changement d'état et R la constante des gaz parfaits ($R = 0,08206 \text{ L.atm.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

La loi de Henry permet de relier la pression partielle d'un composé dans une phase gaz à la concentration (ou fraction molaire) du soluté en phase aqueuse en équilibre. Le partage d'un composé dans une phase aqueuse pure se fera selon la loi suivante :

$$H_s^{cp} = \frac{C_L^*}{p_i}$$

avec C_L^* la concentration de l'espèce considérée dans la phase aqueuse en équilibre avec la phase gaz, H_s^{cp} la constante de Henry en $\text{mol.m}^{-3}.\text{Pa}^{-1}$ et p_i la pression partielle de i dans la phase gaz. Il est important de noter que la loi de Henry ne s'applique pas lorsque les espèces réagissent ou se dissocient dans l'eau et est dépendante de la température.

La constante de Henry combine donc la pression de vapeur saturante symbolisant la volatilité du composé au coefficient d'activité à dilution infinie symbolisant l'affinité avec l'eau pour déterminer l'aptitude d'un composé à être absorbé dans une phase aqueuse (mécanisme diffusionnel). La constante de Henry peut être également exprimée comme étant le rapport des concentrations de l'espèce en phase gaz et en phase liquide :

$$H_s^{cc} = \frac{C_L^*}{C_g}$$

La relation reliant les deux formes s'exprime alors comme :

$$H_s^{cc} = H_s^{cp} \times R \times T$$

⁶³ Décret n° 2006-623 du 29 mai 2006 relatif à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules.

⁶⁴ <https://www.henrys-law.org/henry/>.

avec R la constante des gaz parfait ($R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et T la température en Kelvin.

Pour être absorbé dans une phase aqueuse, selon le mécanisme diffusionnel, un composé doit être peu volatil et/ou avoir une grande affinité avec l'eau. Plus la constante de Henry est faible, plus le composé est absorbé dans la phase aqueuse. En termes de comparaison, les constantes de Henry (H_s^{cc} adimensionnelle) de l'oxygène et de l'ammoniac sont égales respectivement à 29,9 et 0,00059 à 20°C, donc l'ammoniac sera plus facilement transféré dans la phase aqueuse que l'oxygène pour toutes conditions égales. Le transfert de matière entre gaz et liquide doit prendre en compte les phénomènes se produisant au voisinage de l'interface gaz-liquide (films de faible épaisseur). Le modèle le plus simple reporté dans la littérature est le modèle du double film de Lewis et Whitman (1924) (Roustan, 2003).

La figure 8 représente de manière schématique le modèle du double film. Ce modèle représente une phase gazeuse comprenant un composé à une concentration C_G en contact avec une phase liquide à une concentration C_L . La concentration de l'espèce gazeuse diminue jusqu'à l'interface pour atteindre une concentration $C_{G,i}$ en équilibre avec la concentration $C_{L,i}$ donnée par la relation de Henry. La concentration dans le liquide diminue jusqu'à la valeur C_L au cœur du liquide. Au cœur du liquide, les concentrations sont considérées constantes suivant la distance de l'interface du fait des phénomènes d'agitation convectif. Au niveau des films liquide et gazeux les concentrations diminuent linéairement du fait des phénomènes de transport diffusif.

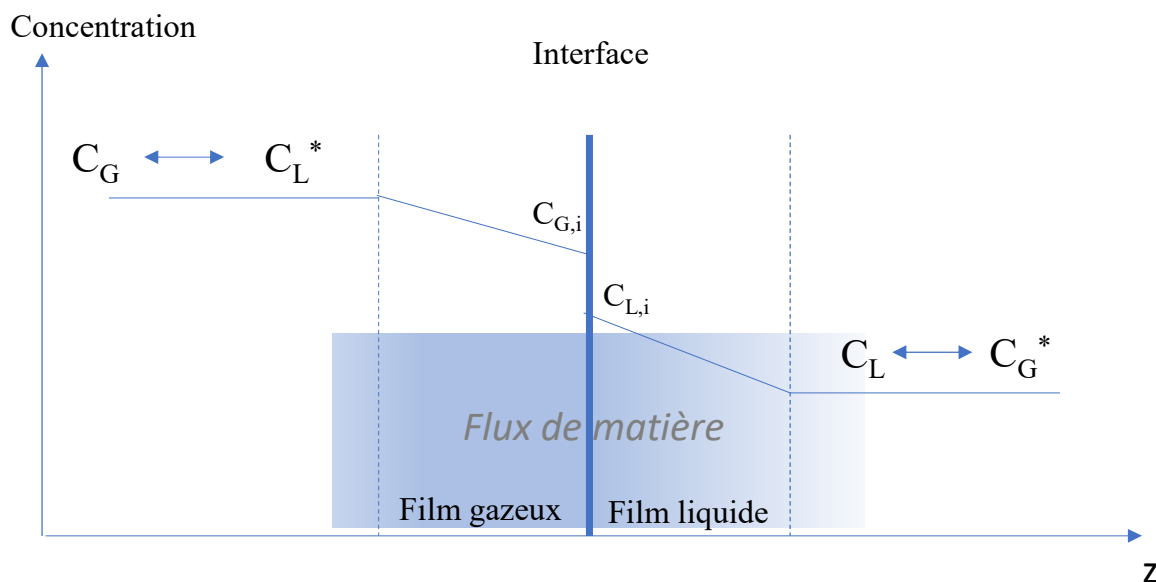


Figure 7 : Schéma du double film de Lewis et Whitman (1924).

Il y a continuité du flux de matière du côté gaz vers le côté liquide. Le flux de matière peut donc s'écrire comme suit :

$$N = K_G (C_G - C_G^*) = K_L (C_L^* - C_L)$$

avec N le flux de matière transféré de la phase gaz vers la phase liquide par unité de surface de l'interface en $\text{kmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, C_G la concentration du composé au sein du gaz (kmol.m^{-3}), C_L la concentration du composé au sein du liquide (kmol.m^{-3}), C_G^* la concentration dans un gaz à l'équilibre avec la phase liquide et C_L^* la concentration d'un liquide en équilibre avec la phase gaz. Les coefficients K_G et K_L sont les coefficients de transfert de matière, respectivement du côté liquide (m. s^{-1}) et du côté gazeux (m. s^{-1}).

Plus les coefficients de transfert seront élevés, plus les résistances seront faibles et plus les composés absorbables seront concentrés dans la phase liquide.

Le rendement de l'opération d'absorption d'un polluant gazeux vers une phase liquide sera dépendant des paramètres qui régissent la diffusion comme la température, la surface de contact gaz/liquide ou le temps de contact. La solubilité dans l'eau d'un polluant gazeux dépend de la température, le transfert pourra donc être favorisé dans les étapes de condensation des AWG (fonctionnant à la température de rosée).

Pour les composés facilement transférables dans l'eau (par exemple l'ammoniac), la résistance au transfert sera située dans le film gazeux (faible valeur de K_G en comparaison de K_L) (figure 7). Ainsi, un fort débit de gaz associé à une grande surface d'échange diminuera l'épaisseur du film liquide et favorisera le transfert vers le liquide ; cependant, au regard des auditions, il ne semble pas que ces aspects soient pris en compte dans le dimensionnement des AWG.

Ces considérations théoriques ne prennent pas en compte les transformations (mécanismes réactionnels) qui peuvent se produire pour certains composés lors de la dissolution dans l'eau pouvant aboutir à un changement de forme chimique ou à une transformation en d'autres composés (par exemple, le NH_3 qui forme des ions ammonium dans l'eau). La présence d'une réaction chimique modifie le transfert de matière au niveau de l'interface (Roustan, 2016).

Les AWG peuvent être considérés comme des contacteurs gaz-liquide au sein desquels se produisent des transferts de matière entre la phase gaz et la phase liquide dont les compositions chimiques sont différentes. Dans une première approche, la constante de Henry sera un paramètre déterminant pour identifier les composés les plus susceptibles d'être transférés dans les condensats bruts. Il importe aussi de prendre en compte les éventuels mécanismes réactionnels qui pourraient potentiellement accélérer les transferts.

4.1.1.4.2 Données disponibles sur la nature des composés transférés de l'air à l'eau

Les études disponibles dans la littérature concernant la qualité des condensats bruts produits par les AWG et les facteurs susceptibles de l'influencer sont récapitulés dans l'annexe 7. Il s'agit de données essentielles à la réflexion d'analyse des risques, en vue de justifier la filière de traitement des eaux mise en œuvre. Cependant, aucune étude rapportée ici ne permet une approche quantitative des transferts air-eau. Les auditions réalisées ont, par ailleurs, permis de constater que les fabricants ne disposent généralement pas de données sur les condensats bruts et limitent leur approche à des analyses de l'eau en aval de la filière de traitement. Seul un dossier de projet industriel présente des données comparatives entre les condensats bruts et l'eau traitée. Ces données permettent de constater la présence de deux métabolites de pesticides dans les condensats bruts (chloridazone-desphényl : 160 ng.L^{-1} ; AMPA : 301 ng.L^{-1}), sans lien établi avec leur concentration dans l'air extérieur.

Les travaux présentés dans ce qui suit n'abordent jamais la question des contaminants des condensats bruts sous un angle sanitaire, mais visent uniquement à établir des listes de composés chimiques ou d'agents microbiens qu'il a été possible d'identifier dans des condensats bruts en conditions réelles. De plus, les méthodes d'analyse utilisées par les différents auteurs sont diverses et la représentativité des échantillons analysés n'est pas garantie, de sorte qu'il convient d'interpréter ces données avec précaution.

Parmi les travaux publiés, l'étude de Kaplan *et al.* (2023) est l'une des plus complètes. Elle porte sur 99 paramètres analysés dans 83 échantillons. Elle concerne des condensats bruts produits en conditions réelles, dans une zone (baie de Haïfa, Israël) à forte pollution atmosphérique du fait de nombreuses activités industrielles (56 échantillons), ainsi que dans

une zone urbaine (Kiryat Tivon) connue pour des hauts niveaux de pollution atmosphérique (27 échantillons).

Des analyses de l'air extérieur (SO₂, NO_x, O₃, PM_{2,5}, PM₁₀ et benzène) sont aussi réalisées au cours de la même période. De plus, les résultats de la surveillance officielle de la qualité de l'air pour ces mêmes paramètres sont comparés aux résultats des analyses de condensats bruts. Les paramètres retenus sont 27 composés organiques volatils, 32 autres composés organiques (composés organiques semi-volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques, polychlorobiphényles), 19 métaux, 10 anions, 4 cations, le carbone organique total (COT) et l'ammonium (NH₄⁺). Les échantillons provenant d'Haïfa ont fait l'objet d'analyses microbiologiques (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, coliformes, coliformes « fécaux »). Le formaldéhyde a été recherché uniquement dans les échantillons prélevés à Kiryat Tivon.

Sur l'ensemble des résultats, l'ammonium est un polluant fréquemment mis en évidence dans les condensats bruts à des concentrations excédant 0,5 mg.L⁻¹ dans 61 % des échantillons⁶⁵ et pouvant atteindre 2,3 mg.L⁻¹. La concentration en COT dans les condensats bruts est en moyenne inférieure à la référence de qualité en vigueur en France (2 mg.L⁻¹), mais avec une concentration maximale mesurée de 3 mg.L⁻¹. Par ailleurs, quelques dépassements des critères réglementaires de potabilité de l'eau sont observés pour le dichlorométhane⁶⁶ (deux échantillons ; maximum de 6,4 µg.L⁻¹) et le nickel (concentration supérieure à 20 µg.L⁻¹ dans 15 échantillons ; maximum de 610 µg.L⁻¹). Concernant le nickel, les auteurs émettent l'hypothèse qu'il provient des matériaux utilisés dans l'AWG. De plus, d'une manière générale, les condensats bruts contiennent peu d'éléments minéraux, les concentrations moyennes en calcium et en magnésium étant respectivement de 1,1 et 0,3 mg.L⁻¹. Enfin, aucune flore microbienne n'a été détectée.

Dans cette étude, les auteurs constatent que l'exploitation des données de surveillance de l'air extérieur ne permet pas d'établir de corrélation entre la qualité de l'air et celle des condensats bruts, ni de comparer les résultats d'analyse des échantillons d'air prélevés et d'eau condensée. Cependant, les auteurs observent que, même dans un environnement où l'air est considéré comme pollué par des COV, ces composés ne sont que très exceptionnellement retrouvés dans les condensats bruts.

Ces résultats suggèrent que les taux de transfert des composés organiques et minéraux de l'air vers les condensats bruts sont vraisemblablement faibles, avec cependant une exception pour l'ammonium.

De son côté, l'étude réalisée par Inbar *et al.* (2020) porte sur 64 échantillons de condensats bruts produits en zone urbaine. Les analyses concernent un nombre important de paramètres, soit 24 métaux, 8 ions inorganiques, 32 composés organiques semi-volatils et 27 composés organiques volatils. Les éléments métalliques sont en règle générale non détectés dans les condensats bruts ou présents à des concentrations très largement inférieures aux valeurs limites réglementaires, lorsqu'elles existent. Le seul métal pour lequel des dépassements ponctuels de la limite de qualité réglementaire (20 µg.L⁻¹) sont constatés est le nickel. Cependant, comme dans l'étude de Kaplan *et al.* (2023), les auteurs s'interrogent sur l'origine du nickel, qui pourrait provenir de l'AWG lui-même, la cuve de stockage du condensat brut étant constituée d'un alliage métallique contenant 10% de nickel.

⁶⁵ Les auteurs se réfèrent à la valeur de 0,5 mg.L⁻¹ fixée par la réglementation israélienne ; en France, la référence de qualité est de 0,1mg.L⁻¹ (sauf eaux d'origine souterraine si l'ammonium est d'origine naturelle).

⁶⁶ Paramètre non réglementé dans l'eau en France. Les auteurs appliquent une limite de qualité de 5 µg.L⁻¹.

L'ammonium est détecté dans 89 % des échantillons avec une concentration moyenne de 0,76 mg.L⁻¹, ce qui confirme que ce polluant est souvent présent en concentrations importantes dans les condensats bruts. Les composés organiques sont dans l'ensemble très rarement détectés. Le benzo[a]pyrène est présent dans deux échantillons à des concentrations (respectivement de 0,67 µg.L⁻¹ et 0,19 µg.L⁻¹) excédant la limite de qualité réglementaire (0,010 µg.L⁻¹).

Ces travaux montrent également que le pH des condensats bruts varie de 6,5 à 7,9 et qu'il n'y a pas de différence significative de concentration dans les condensats bruts entre le jour et la nuit pour les polluants d'origine anthropique.

Inbar *et al.* (2021) reprennent les résultats obtenus précédemment (Inbar *et al.*, 2020) et s'attachent à évaluer l'impact de la pollution de l'air sur la présence de certains composés minéraux dans les condensats bruts d'AWG. Pour cela, ils utilisent principalement les données issues des stations de surveillance de la qualité de l'air. La proximité de la mer est considérée par ces auteurs comme favorisant la présence d'ions sodium et chlorure dans les condensats bruts, même si ces éléments restent à des concentrations faibles (120 µg.L⁻¹ et 69 µg.L⁻¹, respectivement). La présence d'ions calcium, magnésium et sulfate dans les condensats bruts est principalement attribuée par les auteurs à des poussières véhiculées par le vent, en provenance notamment de zones désertiques d'Afrique du Nord. Des variations saisonnières sont observées en lien avec les changements d'orientation des vents.

Bautista-Olivas *et al.* (2014) étudient la présence d'éléments traces métalliques dans les eaux produites par des AWG au niveau de trois sites au Mexique (108 échantillons au total). Les concentrations supérieures aux valeurs réglementaires concernent le fer, le plomb et le cadmium. De fortes variations saisonnières sont notées. Les variations entre les différents sites sont attribuées au contexte industriel local. Les valeurs de pH enregistrées varient de 7,15 à 8,25 selon les sites et les périodes de l'année. La conductivité des condensats bruts est de 45,8 à 588,2 µS.cm⁻¹.

Hassan *et al.* (2023) ont utilisé un prototype d'AWG à condensation sur surface froide, équipé de six modules Peltier et d'un filtre à air. Une seule analyse de condensat brut a été réalisée sur un nombre de paramètres très limité : le pH est de 7,58, la turbidité de 0,43 NTU et la concentration en ammonium est de 0,43 mg.L⁻¹.

Mulchandani *et al.* (2022) utilisent trois dispositifs d'AWG : un fonctionnant par condensation sur surface froide et les deux autres avec un dessiccant. Ils comparent la composition des condensats bruts produits par ces deux types de technologies : l'eau collectée par les deux systèmes a un pH de 6 à 7,5 ; la conductivité des condensats est basse (respectivement 15-60 µS.cm⁻¹ et 15-80 µS.cm⁻¹ - maximum 180 µS.cm⁻¹).

En l'absence de filtration efficace de l'air, des valeurs de turbidité élevées, pouvant atteindre 190 NTU (pour le système à compresseur), ont été observées dans les analyses de condensats bruts. En moyenne, la turbidité des condensats bruts est plus faible (0,25 NTU) dans le cas des systèmes à dessiccants que dans le cas des systèmes à compresseur (6 NTU). Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que lors du passage de l'air, les poussières qui se déposent sur le dessiccant sont retenues par le matériau durant la phase de désorption et ne migrent pas dans le condensat brut.

La concentration en carbone organique dissous (COD) est le plus souvent comprise entre 0,06 mg.L⁻¹ et 7,5 mg.L⁻¹ (moyenne de 2,1 à 2,2 mg.L⁻¹ selon le type de dispositif) mais des pics jusqu'à 12 mg.L⁻¹ sont observés. Des variations saisonnières existent avec les systèmes à compresseurs, contrairement aux systèmes à dessiccant. Le COD est essentiellement représenté par des acides carboxyliques (en moyenne 34 % du COD pour les systèmes à

compresseur et 46 % du COD pour les systèmes à dessiccant) principalement identifiés comme formate-isobutyrate, acétate-glycolate et oxalate. Les auteurs attribuent ce constat à la présence de ces acides à forte concentration dans l'air en zone industrielle ou urbaine et à leur forte solubilité dans l'eau. Les auteurs observent que les systèmes à dessiccant produisent une eau contenant globalement moins de composés organiques, mais avec une proportion plus élevée d'aldéhydes (principalement du formaldéhyde, représentant jusqu'à 25 % du COD).

Les résultats mettent également en évidence la présence de méthylglyoxal, glyoxal, acétaldéhyde et propanal dans les condensats bruts issus des deux systèmes, ces composés étant reconnus comme des mutagènes possibles (Richardson *et al.*, 2007). Parmi les 27 éléments traces métalliques recherchés dans les condensats bruts, les concentrations les plus élevées sont celles du fer et de l'aluminium (jusqu'à 1000 µg.L⁻¹) mais elles restent très faibles comparées aux critères de qualité des eaux. Seule la concentration en antimoine (jusqu'à 4 µg.L⁻¹) est proche de la limite de qualité réglementaire (5 µg.L⁻¹). Les auteurs considèrent que l'antimoine est probablement issu des matériaux en plastique qui constituent le réservoir principal des AWG utilisés. Les dénombrements des bactéries hétérotrophes (*Heterotrophic plate count*) sont en moyenne de plus de 5700 UFC.mL⁻¹ avec le système à condensation et de 620 pour les AWG à dessiccant. Cette différence n'est pas expliquée par les auteurs mais pourrait être due à la fixation d'une partie de la flore sur le dessiccant.

L'inventaire des connaissances met en évidence un manque de données. Des travaux supplémentaires seraient indispensables pour mener à bien une analyse des risques, mais il est important de retenir de ces études que :

- les polluants de l'air peuvent contaminer les condensats bruts d'AWG. Pour les polluants chimiques, les taux de transfert varient selon les composés. Si l'air utilisé est très fortement pollué, des niveaux de contamination élevés peuvent être observés dans les eaux. Un constat identique a été dressé dans d'autres études pour les rosées formées selon des mécanismes naturels (Hong *et al.*, 2019a et b). La qualité des condensats bruts produits peut aussi subir des variations importantes selon les lieux, les périodes de l'année et la situation météorologique. Ce constat pose la question de l'usage des AWG dans certains environnements industriels (ateliers de mécanique, entrepôts de solvants, etc.) où l'air peut renfermer des concentrations élevées en certains polluants et de l'efficacité des filières de traitement mises en œuvre ;
- l'ammonium est souvent retrouvé dans les condensats bruts à des concentrations élevées, dépassant la référence de qualité réglementaire dans l'EDCH mais pas celle de l'eau brute (respectivement 0,10 mg.L⁻¹ et 4 mg.L⁻¹)⁶⁷. Cela implique l'utilisation d'un traitement adapté pour éliminer ce contaminant ;
- les eaux de condensation sont très pauvres en éléments minéraux (notamment calcium, magnésium, sodium, chlorure). Leur pH est variable selon les études, généralement compris entre 6 et 8, et elles ont une faible conductivité souvent inférieure à la référence de qualité réglementaire pour les EDCH (< 180 µS.cm⁻¹ à 20 °C ou < 200 µS.cm⁻¹ à 25 °C) ;
- les éléments métalliques parfois retrouvés (Ni, Fe, Pb, Cd, Sb) seraient relargués dans certains cas par des matériaux constitutifs des AWG (Ni notamment) ;
- certains composés fréquemment présents dans l'air et ne figurant pas dans les canevas analytiques réglementaires pour les eaux sont susceptibles de subir un transfert air-eau. Il importe d'identifier quels sont ceux qui sont toxiques par ingestion et de prévoir une stratégie adaptée de traitement des eaux, en particulier vis-à-vis des composés organiques.

⁶⁷ S'il est démontré que l'ammonium a une origine naturelle, la référence de qualité est de 0,50 mg.L⁻¹ pour les eaux souterraines.

Le principal frein à l'analyse des risques et à la définition d'une filière pertinente de traitement des condensats bruts est que les études mentionnées ici n'apportent aucun élément de quantification des transferts air-eau. Ces données quantitatives sont pourtant indispensables, en particulier l'évaluation des taux de transfert, pour relier le niveau de pollution de l'air à un niveau de pollution attendu des condensats bruts.

4.1.1.4.3 Données quantitatives disponibles sur le transfert de contaminants de l'air à l'eau

Une seule étude, portant sur un AWG à condensation directe sur surface froide, a été identifiée et apporte des éléments de quantification des transferts entre l'air et l'eau. Réalisée par Kinder *et al.* (2017), elle porte sur des échantillons de condensats bruts produits dans une chambre de simulation dans laquelle la concentration en benzène dans l'air est maîtrisée. Le benzène est réglementé à la fois dans l'air⁶⁸, dans les EDCH⁶⁹ et dans les ERPTC⁷⁰.

Les résultats de cette étude montrent que la présence de benzène dans l'air conduit à la contamination des condensats bruts par ce composé chimique ; néanmoins, les taux de transfert sont faibles. La concentration en benzène dans le condensat brut excède la limite de qualité réglementaire des EDCH/ERPTC ($1 \mu\text{g.L}^{-1}$) pour des concentrations en benzène dans l'air de 106 et de $768 \mu\text{g.m}^{-3}$ à 25°C et de $847 \mu\text{g.m}^{-3}$ à 35°C (respectivement $1,13 \mu\text{g.L}^{-1}$, $12 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $7,07 \mu\text{g.L}^{-1}$). À 35°C , pour une concentration dans l'air de $115 \mu\text{g.m}^{-3}$, la concentration en benzène dans le condensat brut ne dépasse pas $0,76 \mu\text{g.L}^{-1}$. Deux paramètres paraissent donc déterminants : la concentration en benzène dans l'air et la température. La concentration en benzène dans le condensat brut est positivement corrélée à la concentration en benzène dans l'air et négativement corrélée à la température. Les auteurs observent que ces constats sont globalement cohérents avec les valeurs calculées par la loi de Henry sous réserve d'une estimation correcte de la température de condensation.

Cette étude permet donc bien de démontrer l'existence de transferts air-eau de composés gazeux au niveau d'un AWG mais aussi la nécessité d'évaluer ces transferts d'un point de vue quantitatif, dans une démarche d'évaluation des risques, afin d'apprécier l'impact de la pollution de l'air sur la qualité des condensats bruts, pour chaque catégorie de polluants. Sans éléments d'appréciation suffisants dans ce domaine, il n'est pas possible d'identifier les nécessités en termes de traitement des condensats bruts dans les AWG pour garantir que l'eau produite soit conforme aux exigences de qualité en vigueur pour l'EDCH/ERPTC.

Dans une perspective d'analyse des risques, les résultats de cette étude sont à mettre en correspondance avec les concentrations habituelles en benzène dans l'air en France. En 2022⁷¹, le seuil réglementaire annuel, fixé en Europe à $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour la qualité de l'air extérieur⁷², a été respecté en France sur l'ensemble des stations de mesure. L'objectif de qualité fixé au niveau français ($2 \mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne annuelle⁷³) a été également respecté. Les concentrations moyennes annuelles ont été comprises entre 1,1 et $2 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour 39 % des stations et étaient inférieures ou égales à $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour 61 % d'entre elles. Les sites les

⁶⁸ Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène.

⁶⁹ 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.

⁷⁰ Arrêté du 14 mars 2007 relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées ainsi que de l'eau minérale naturelle distribuée en buvette publique.

⁷¹ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-pollution-de-lair-par-le-benzene-c6h6>.

⁷² Directive 2008/50/CE du parlement européen et du conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

⁷³ Article R.221-1 du code de l'environnement.

plus fortement pollués sont à proximité de certaines industries et de zones à fort trafic routier. Au vu des taux de transfert mesurés, les travaux de Kinder *et al.* (2017), permettent de penser que, dans le cas d'une prise d'air sur l'extérieur, les transferts de benzène atmosphérique vers les condensats bruts d'AWG sont suffisamment faibles pour ne pas induire de dépassement de la limite réglementaire pour les EDCH/ERPTC, même en l'absence de traitement spécifique. En ce qui concerne l'air intérieur, les niveaux de concentration en benzène peuvent atteindre des valeurs plus élevées, en particulier dans certains ateliers industriels, garages, lieux de stockage d'hydrocarbures. L'article R. 4412-149 du code du travail fixe à $1,65 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ d'air la concentration maximale en benzène dans l'atmosphère des lieux de travail, dans la zone de respiration des travailleurs. Dans certains environnements professionnels caractérisés par des concentrations élevées en benzène dans l'air intérieur, les transferts air-eau pourraient donc induire des concentrations élevées en benzène dans les condensats bruts d'AWG et la qualité de l'eau devra être garantie par un procédé de traitement adapté.

4.1.1.4.4 Approche proposée par le GT

Le constat que dressent les experts à ce stade est que l'analyse des risques liés à la consommation d'eau issue d'AWG est très difficile à réaliser en raison de l'absence de données permettant de caractériser et quantifier les transferts air-eau de polluants, condition essentielle à la mise en place d'une filière adaptée de traitement des condensats bruts et à l'utilisation des AWG dans tous types d'environnements (intérieur, extérieur ; milieu urbain ou rural, etc.).

C'est pourquoi le GT propose une démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques pertinents liés à l'air pour les AWG qui repose sur l'établissement d'une liste de polluants de l'air, leur toxicité par voie orale, leur état physique dans l'air (aérosol versus gaz ; formes chimiques dans les conditions normales de pression et de température), leur potentiel de transfert air-eau (constante de Henry) et les possibles transformations chimiques lors du changement de milieu (Annexe 8). Le cas des dangers biologiques est développé en 4.1.2.5.

En ce qui concerne les aérosols, la réflexion sur les moyens de maîtrise du risque repose fondamentalement sur un choix de performances de la filtration de l'air réalisée en amont des AWG.

Pour les composés gazeux, un premier élément de sélection des composés susceptibles d'être transférés dans l'eau devrait reposer sur la valeur de la constante de Henry.

À titre d'exemple, un parallèle entre les contacteurs gaz-liquide et les AWG peut être réalisé en utilisant les données de Kinder *et al.* (2017). Les conditions de test de l'étude montrent qu'une exposition à un air présentant une concentration en benzène de $640 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (à 25°C et une humidité relative de 45 %) conduit à une concentration dans le condensat brut de $12 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ avec une température de condensation évaluée à 12°C . En considérant les débits d'air et d'eau fixés dans l'étude (respectivement $103 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ et $250 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ à 25°C), on peut considérer une droite opératoire de pente très faible (figure 8, droite de pente L/G). Par conséquent, on peut assimiler la situation observée au niveau d'un AWG à un système gaz liquide à l'équilibre et la concentration dans le liquide sera donc proche de la concentration prédite par la constante de Henry. Ainsi, dans les conditions des travaux de Kinder *et al.* (2017) la valeur de concentration en benzène prédite est de $5,08 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($C_G=640 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $T_{\text{air}}=25^\circ\text{C}$, 45 % d'humidité relative, $T_{\text{eau}}=12^\circ\text{C}$). Cependant, dans ces mêmes conditions la concentration retrouvée dans l'eau par Kinder *et al.* (2017) est de $12 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, valeur supérieure à la prédiction de la loi de Henry. Les auteurs suggèrent que cette concentration sous-estimée peut-être due à une surestimation de la température de la surface froide utilisée à l'étape de condensation.

En se basant sur les concentrations effectivement mesurées la température du bloc froid serait plutôt égale à 5°C au lieu de 12°C.

En conclusion, du fait des faibles débits liquides récoltés dans les AWG en comparaison des débits gazeux utilisés, les concentrations en polluants peuvent être estimées en se basant sur les constantes de Henry en prenant en compte la température du bloc froid.

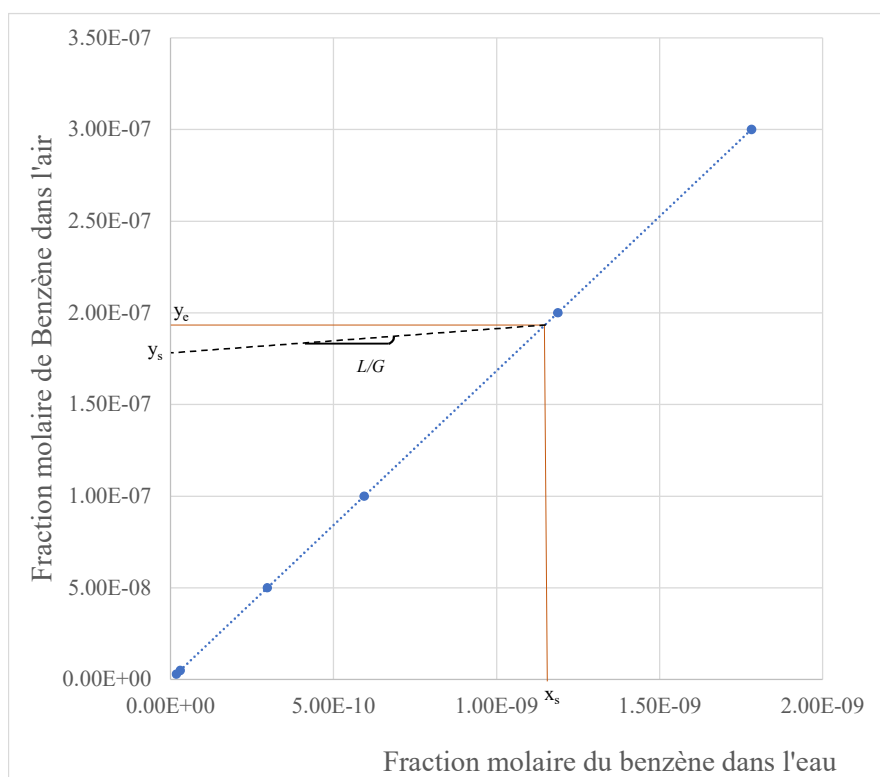


Figure 8. Droite d'équilibre gaz-liquide de l'air pollué en benzène au contact de l'eau.

Cette méthodologie peut être appliquée à tous les polluants présents dans l'atmosphère à l'état gazeux. Ainsi, dans le cas du formaldéhyde, une étude⁷⁴ de l'ARS Rhône-Alpes indique une concentration moyenne dans l'air, dans les écoles et les crèches, comprise entre 7,3 à 49,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Le formaldéhyde n'est pas un polluant recherché dans les EDCH (Annexe I de l'arrêté du 11 janvier 2007). En considérant l'étude de Allou *et al.* (2011), la constante de Henry du formaldéhyde dans l'eau pure (MilliQ water 18 M Ω .cm) peut être estimée à 61 +/- 3 à 5°C. Par conséquent, la concentration d'équilibre estimée dans le condensat brut peut être comprise entre 0,160 et 1 $\mu\text{g.L}^{-1}$ suivant les valeurs de concentration d'entrée explicitées ci-dessus.

Cette approche d'évaluation des transferts air/eau n'étant pas applicable à l'ensemble des dangers identifiés, des essais expérimentaux réalisés en chambre de simulation (ou réacteurs) seraient indispensables pour disposer d'éléments de réflexion complémentaires.

Ce mode de raisonnement reste aussi à valider pour les dispositifs utilisant un adsorbant/dessiccant, dans la mesure où des phénomènes d'adsorption puis de désorption de certains composés chimiques sur la zéolite pourraient modifier considérablement la concentration en polluant dans l'air au moment de la condensation sur surface froide. Néanmoins, la constante de Henry du composé chimique reste *in fine* un paramètre majeur.

⁷⁴ <https://www.auvergne-rhone-alpes.ars.sante.fr/media/10401/download>.

Si des exemples de mise en œuvre de la démarche de sélection des polluants chimiques et radiologiques⁷⁵ sont proposés par le GT (annexe 8), les professionnels devront réaliser un inventaire exhaustif des polluants pertinents adapté aux conditions de mise en œuvre de leurs équipements.

En résumé, la pollution de l'air peut induire une pollution des condensats bruts des AWG du fait du transfert dans l'eau de composés chimiques, radiologiques⁶³ et d'agents biologiques depuis les phases particulaire et gazeuse de l'air. Ces dangers sont multiples, en intérieur comme en extérieur, et la pollution de l'air est très variable d'un point de vue qualitatif et quantitatif sur de courtes échelles spatiales et temporelles, en relation avec les conditions météorologiques et le contexte environnemental dans lequel le dispositif d'AWG est installé : proximité d'activités industrielles et/ou agricoles, présence et fréquentation humaine et animale, etc.

Par ailleurs, les effets sanitaires liés aux composés chimiques, radiologiques ou aux agents biologiques étant souvent différents selon le mode d'exposition (inhalation ou ingestion), les paramètres suivis pour définir la qualité de l'air ne sont pas nécessairement pertinents, ni suffisants, pour prédire la qualité des condensats bruts et définir une filière de traitement permettant de garantir la qualité de l'EDCH/ERPTC produite en tout temps et en tout point, et ce quelle que soit la pollution de l'air.

Le risque de contamination par la phase particulaire, dans laquelle se trouvent notamment les métaux et les micro-organismes, est difficile à modéliser. Le transfert air/eau des composés gazeux dépend de leurs propriétés intrinsèques (solubilité, volatilité), de leur réactivité en phase aqueuse, ainsi que de paramètres tels que la température, le pH de l'eau ou encore la turbulence de l'air. En revanche, le transfert des composés organiques volatils peut être estimé à partir de leurs concentrations dans l'air, en utilisant la constante de Henry à la température de condensation de l'AWG (Annexe 8). Il est à noter qu'une seule étude est actuellement disponible pour le benzène qui est un composé peu soluble dans l'eau.

4.1.2 Innocuité des matériaux et procédés technologiques mis en œuvre

Les matériaux, produits et procédés de traitement utilisés dans les AWG peuvent être à l'origine de contaminations supplémentaires, comme cela a déjà été expliqué en 4.1.1 avec la contamination par le nickel ou l'antimoine. Ces risques ne sont pas spécifiques des AWG, puisqu'ils sont rencontrés dans toute filière de traitement d'eau, mais les eaux produites par les AWG peuvent avoir un caractère corrosif plus marqué (faible minéralisation, pH instable) vis-à-vis des matériaux métalliques.

4.1.2.1 Dispositifs de filtration de l'air

Les AWG recensés sont tous équipés de dispositifs assurant une filtration de l'air avant l'étape de condensation : filtres à particules ou filtres à charbon (cf. 2.2).

Ces dispositifs peuvent induire une contamination des condensats bruts en cas de défaut d'entretien, permettant la colonisation du média filtrant par des agents microbiens, notamment des moisissures en présence d'humidité (Yu *et al.*, 2009).

⁷⁵ Radon pour les AWG captant l'air à l'intérieur de locaux.

Il a aussi été décrit, en présence d'ozone dans l'air, la formation de produits de réaction entre l'ozone et les composés chimiques retenus sur les filtres, avec formation en particulier de formaldéhyde et d'acide formique (Zhang *et al.*, 2011 ; Yu *et al.*, 2009).

Les données recueillies lors de l'expertise permettent d'observer que ces aspects ne sont pas explicitement pris en compte par les fabricants d'AWG.

4.1.2.2 Matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement

Les garanties apportées par les fabricants d'AWG en ce qui concerne les matériaux utilisés au contact de l'eau, ainsi que sur les produits et procédés de traitement, sont très hétérogènes.

L'eau peut interagir avec les matériaux au contact desquels elle se trouve, selon différents mécanismes qui ne seront pas développés ici dans la mesure où ils ne sont pas spécifiques des AWG. Il peut en résulter la présence de composés chimiques toxiques dans l'eau, libérés par des matériaux organiques ou par des phénomènes de corrosion des métaux et alliages métalliques. Tous les équipements peuvent être concernés par ces phénomènes (filtres, canalisations, joints, etc.) depuis l'étape de condensation jusqu'à la distribution de l'eau. Ces transferts de polluants peuvent aussi être liés aux médias filtrants et dégrader de manière importante la qualité de l'eau, surtout s'ils interviennent lors du stockage après traitement.

Les condensats bruts sont des eaux très peu minéralisées et de faible conductivité, de pH variable selon les études (cf. 4.1.2.4). Les rares données disponibles permettent d'observer l'existence de phénomènes de corrosion des éléments métalliques au niveau des dispositifs produisant de l'eau par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, lorsque les alliages métalliques utilisés ne sont pas adaptés à entrer en contact avec des eaux agressives et/ou corrosives (Kaplan *et al.*, 2023 ; Mirandazeh *et al.*, 2022 ; Inbar *et al.*, 2020). La question des risques associés aux matériaux employés au contact de l'eau doit donc être considérée avec attention par les fabricants d'AWG.

L'emploi de zéolites pour des usages originaux appelle une attention particulière. En effet, comme cela a été développé précédemment (cf. 2.3.2), les zéolites peuvent avoir deux fonctions dans le cas des AWG, qui ne sont pas actuellement prises en compte par la réglementation relative aux procédés de traitement des EDCH/ERPTC. Dans certains cas, elles sont utilisées pour capter la vapeur d'eau avant une étape de chauffage permettant la libération des molécules d'eau, qui sont alors condensées sur une surface froide. Certains AWG mettent en œuvre des filtres à zéolites, dans le but de piéger les ions ammonium. Les zéolites utilisées, généralement d'origine naturelle, peuvent contenir des impuretés, additifs ou sous-produits formés lors de leur production, et pouvant être libérés dans l'eau lors de leur utilisation ; il est aussi possible qu'elles soient accidentellement contaminées lors de leur commercialisation. Les principales impuretés connues sont l'arsenic, le cadmium, le chrome, le mercure, le nickel, le plomb, l'antimoine et le sélénium (NF EN 16070, AFNOR, 2014). Les preuves de leur aptitude au traitement de l'EDCH/ERPTC doivent être apportées (conformité à une norme existante, pureté, etc.).

4.1.2.3 Reminéralisation et correction du pH de l'eau

Généralement, une reminéralisation de l'eau en fin de filière de traitement est réalisée dans les AWG (cf. 2.4 .5). Elle consiste principalement à utiliser des filtres de carbonate de calcium, autorisés par la circulaire DGS/VS4 n° 2000-166 du 28 mars 2000 sous réserve de conformité

à la norme NF EN 1018⁷⁶, qui assure à la fois une augmentation de la charge minérale de l'eau (apport d'ions calcium et d'ions hydrogénocarbonate) et une neutralisation du pH.

Concernant le pH, la réglementation française fixe une référence de qualité pour les eaux de source et les eaux rendues potables par traitement conditionnées⁷⁷ (pH compris entre 4,5 et 9), ainsi que pour les eaux de réseau⁷⁸ (pH compris entre 6,5 et 9).

4.1.2.4 Enrichissement de l'eau

En complément, si les opérations de reminéralisation et de correction du pH mentionnées ci-dessus se justifient pour améliorer le goût de l'eau ou corriger son agressivité si elle doit être transportée dans un réseau, certains industriels enrichissent les eaux produites en substances minérales non autorisées pour le traitement des EDCH/ERPTC.

Il a été identifié une gamme d'AWG qui distribue des eaux volontairement enrichies en strontium, lithium, sélénium, zinc et acide métasilicique et dont le pH est de 9,2. Le fabricant attribue à cette composition physico-chimique de l'eau des bénéfices pour la santé des consommateurs, sans argumentaire scientifique.

Le sélénium est un oligo-élément essentiel chez l'homme mais des cas d'intoxication chronique ont été décrits, associant des troubles digestifs et des lésions des phanères et de la peau (OMS, 2022). Il fait l'objet en France d'une limite de qualité dans les EDCH (20 µg.L⁻¹) ainsi que dans les eaux minérales naturelles, les eaux de source et les ERPTC (10 µg.L⁻¹) (Anses, 2012b). Le strontium, le lithium, le zinc⁷⁹ ne sont pas réglementés dans les eaux en France mais leur toxicité chronique est connue (OMS, 2022 ; INRS, 2021b ; Santé Canada, 2019 ; Anses, 2013).

Une utilisation non maîtrisée de composés minéraux pour assurer l'enrichissement des eaux issues des AWG est susceptible d'exposer les consommateurs à des surdosages chroniques pouvant avoir un impact négatif sur leur santé, surtout en cas de consommation exclusive d'eau d'AWG pour la boisson.

Par ailleurs, certaines allégations santé (concernant notamment les bienfaits pour la santé de la consommation d'une eau alcaline) ne sont pas étayées par les responsables de la mise sur le marché. Les eaux enrichies en minéraux au-delà de la stricte reminéralisation et faisant l'objet d'allégations de santé ne relèvent pas de la réglementation sur les EDCH ou ERPTC mais de celle des BSA. Elles n'entrent pas dans le champ de cette expertise.

4.1.2.5 Contamination et/ou colonisation de la filière de traitement par des agents biologiques

Concernant la qualité microbiologique des eaux produites dans le cadre de l'utilisation d'AWG, plusieurs aspects sont à considérer. Le premier concerne la qualité microbiologique initiale des condensats bruts. Celle-ci peut être impactée par la qualité de l'air et l'ensemble de la partie amont du dispositif comprenant le dispositif de condensation et le réservoir d'eau brute avant traitement. À ce stade, une colonisation microbienne est possible.

⁷⁶ NF EN 1018 (2013). Produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine - Carbonate de calcium.

⁷⁷ Arrêté du 14 mars 2007 relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées ainsi que de l'eau minérale naturelle distribuée en buvette publique.

⁷⁸ 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.

⁷⁹ Une concentration maximale de 0,10 mg.L⁻¹ est fixée pour une eau minérale naturelle destinée à des nourrissons.

Les dispositifs de traitement, notamment les filtres à charbon, peuvent aussi être le siège d'une colonisation microbienne.

Enfin, un dernier point à prendre en compte concerne la maîtrise et le maintien de la qualité microbiologique de l'eau pendant la phase de stockage, après traitement, jusqu'à sa distribution et sa consommation. A ce stade, c'est la conception du dispositif et sa capacité à endiguer la prolifération microbienne qui seront déterminantes.

4.1.2.5.1 *Condensats bruts*

Dans la première partie du processus, la qualité microbiologique des eaux produites est dépendante du niveau de contamination microbiologique de l'air entrant (et donc du lieu d'implantation de l'AWG), ainsi que des capacités du système à réduire le transfert des micro-organismes depuis l'air vers l'eau. Les systèmes classiquement utilisés pour filtrer l'air entrant visent à retenir la majorité des particules et des aérosols. Bien que ces filtres n'aient pas toujours pour principal objectif de constituer une barrière physique visant à piéger les micro-organismes, ils peuvent contribuer à réduire leur concentration plus ou moins efficacement, en fonction de leurs caractéristiques initiales (maille, propriétés électrostatiques), et sous réserve d'un entretien périodique adéquat (cf. 2.2 et 4.1.2.1).

De manière générale, les condensats bruts ne font pas l'objet de traitement lors de leur stockage, mais un dossier de projet industriel fourni par la DGS mentionne l'emploi d'ozone pour garantir le maintien de la qualité microbiologique des condensats bruts avant traitement.

Au-delà d'une potentielle contamination microbiologique initiale du condensat brut, le traitement et le stockage apparaissent comme des étapes critiques pour garantir la qualité microbiologique des eaux. La concentration en micro-organismes est dépendante de l'efficacité des traitements désinfectants appliqués, de la qualité de l'eau (notamment la présence de matière organique biodégradable), de la durée de la phase de stockage, de la température et du taux de renouvellement de l'eau au sein du système, ces deux paramètres étant eux-mêmes fonction de la capacité de production de l'appareil et de la rapidité à laquelle l'eau est consommée.

4.1.2.5.2 *Filière de traitement des condensats bruts*

La filière de traitement des condensats bruts intègre toujours une étape de désinfection finale, indispensable au vu notamment des limites d'efficacité de la filtration de l'air. En-dehors de l'usage du chlore, décrit comme optionnel dans le cadre de la mise en œuvre d'un réservoir auxiliaire, et de l'utilisation de l'ozonation mentionnée ci-dessus, les étapes de désinfection utilisées par les constructeurs d'AWG n'utilisent pas d'oxydants. Des dispositifs alternatifs ont été préférés : le recours aux lampes UV est systématique et leur action désinfectante est fréquemment complétée par la présence de systèmes d'ultrafiltration ou d'osmose inverse (cf. tableau 2). Ces dispositifs sont parfois présents en plusieurs exemplaires au sein de la filière de traitement (cf. 2.4).

Les cartouches de filtration à charbon actif sont susceptibles d'accumuler de la matière organique et offrent, par ailleurs, une surface colonisable importante : elles ont été identifiées comme une source de contamination bactérienne des eaux filtrées et leur présence est, dans certains cas, considérée comme un paramètre favorable à une contamination des eaux par des micro-organismes pathogènes (US-EPA, 2006 ; Ministère de la Santé et des Solidarités, 2005). En particulier, en cas d'arrêt prolongé de l'AWG, la stagnation de l'eau peut favoriser

une colonisation importante du filtre par une microflore qui pourra être libérée dans l'eau au moment de la remise en service de l'AWG.

De ce fait, la présence d'une filière de traitement efficace dans la durée, intégrant notamment une étape de désinfection de l'eau stockée, est nécessaire.

4.1.2.5.3 Stockage des eaux après traitement

Concernant le stockage des eaux, des réservoirs fermés sont utilisés pour éviter les apports de contaminations extérieures. Les surfaces de ces réservoirs peuvent aussi être colonisées par des biofilms. Le plus souvent, ces réservoirs sont équipés de lampes UV dans le but de maîtriser la qualité microbiologique de l'eau en attente de consommation. Afin d'assurer une meilleure résistance au vieillissement, les réservoirs sont habituellement constitués d'acier inoxydable. Dans certains cas, afin de limiter la stagnation des eaux stockées et d'améliorer l'efficacité de l'exposition au rayonnement UV, des boucles de recirculation sont réalisées.

En dernier point, il doit être souligné que certains équipements parmi ceux de faible capacité, permettent la réfrigération des eaux stockées et distribuées (cf. 2.4), ce qui peut contribuer à contenir les risques de prolifération microbienne, même si l'objectif initial recherché est la mise à disposition d'eau rafraîchie.

À l'analyse de l'ensemble de ces éléments, il apparaît que la conception et les moyens de maîtrise utilisés dans les parties des AWG qui permettent le stockage, la recirculation et la distribution de l'eau de consommation, sont similaires à ceux classiquement mis en œuvre dans les fontaines à eau qui sont connectées au réseau d'eau de consommation et qui disposent d'une réserve. En effet, l'eau des fontaines réfrigérantes à usage de boisson est classiquement abaissée à une température comprise entre 8 et 12°C, et peut faire l'objet de divers traitements basés sur la filtration, l'utilisation de charbon actif et l'utilisation de lampes à ultraviolet, notamment dans les modèles dits « sécurisés⁸⁰ » (Squinazi *et al.*, 2011 ; Squinazi et Pellet, 2010).

4.1.2.5.4 Bilan des dangers microbiologiques

Les publications relatives à la qualité microbiologique des eaux produites dans les générateurs d'eau atmosphérique sont peu nombreuses (cf. 4.1.1.4.1). Elles se focalisent sur les micro-organismes indicateurs de la qualité microbiologique des eaux classiquement analysés dans le cadre du contrôle sanitaire des eaux de consommation (micro-organismes aérobies revivifiables, bactéries coliformes dont *E. coli*, Entérocoques intestinaux, spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices). *Pseudomonas aeruginosa* a également été ponctuellement étudiée. Des bactéries pathogènes par voie respiratoire telles que *Legionella* spp. (en particulier *L. pneumophila*) et certaines mycobactéries non tuberculeuses (parfois qualifiées d'atypiques) ont également été recherchées dans plusieurs études et font également l'objet de préconisations normatives (norme NSF P343, cf. 3.3). Au cours de cette expertise, très peu d'analyses bactériologiques ont été mises à disposition par les fournisseurs de générateurs d'eau. Du fait de leur faible nombre, de leur caractère parfois incomplet et ponctuel, ces analyses ne peuvent être utilisées pour alimenter une réflexion sur la qualité microbiologique des eaux en sortie des générateurs. Face à cela et au regard des similitudes de conception observées entre certains AWG et les fontaines réfrigérantes, les études et recommandations

⁸⁰ Qualificatif utilisé par les fabricants de fontaines à eau équipées de divers dispositifs assurant un traitement de l'eau du réseau public, l'argument commercial étant que ces fontaines peuvent pallier les éventuels défauts qualitatifs des eaux de réseau.

relatives aux fontaines à eau apportent des éléments de réflexion transposables au cas des AWG. Dans le contexte de la surveillance des eaux de fontaines réfrigérantes, plusieurs bactéries pathogènes hydriques complémentaires à celles recensées dans le cadre des générateurs d'eau atmosphérique ont été identifiées : *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica*, *Escherichia coli* vérotoxino-gène. Le tableau 3 ci-après recense les paramètres microbiologiques qui ont été ciblés par les travaux académiques du domaine ou qui sont déjà concernés par des dispositions normatives ou par des recommandations.

Tableau 3. Liste de micro-organismes pathogènes ou indicateurs, ciblés dans la littérature scientifique, les préconisations normatives ou les recommandations visant à évaluer la qualité microbiologique des eaux produites par les générateurs d'eau atmosphérique et celles des fontaines réfrigérantes.

	Micro-organismes	Dispositif considéré	Références
Pathogènes (opportunistes)	<i>Legionella spp</i> dont <i>L. pneumophila</i>	AWG	Jahne <i>et al.</i> , 2018 ; Norme NSF P343
		Fontaines réfrigérantes	AFIFAE, 2015.
	Mycobactéries non tuberculeuses dont <i>M. avium</i> et <i>M. intracellulare</i>	AWG	Jahne <i>et al.</i> , 2018
		Fontaines réfrigérantes	Lalande <i>et al.</i> , 2001
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	AWG	Kaplan <i>et al.</i> , 2023
		Fontaines réfrigérantes	AFIFAE, 2015 ; Ministère de la Santé et des Solidarités, 2005
	<i>Yersinia enterocolitica</i>	Fontaines réfrigérantes	Ministère de la Santé et des Solidarités, 2005
	<i>Listeria monocytogenes</i>	Fontaines réfrigérantes	Ministère de la Santé et des Solidarités, 2005
<i>E. coli</i> vérotoxino-gènes	Fontaines réfrigérantes	AFIFAE, 2015.	
Indicateurs de la qualité microbiologique des eaux	Micro-organismes aérobies revivifiables	AWG	Jahne <i>et al.</i> , 2018
	Bactéries coliformes dont <i>E. coli</i>	AWG	Jahne <i>et al.</i> , 2018 ; Kaplan <i>et al.</i> , 2023 ; Norme NSF P343
		Fontaines réfrigérantes	AFIFAE, 2015.
	Entérocoques intestinaux	AWG	Jahne <i>et al.</i> , 2018
		Fontaines réfrigérantes	AFIFAE, 2015.
Bactéries anaérobies sulfito-réductrices	Fontaines réfrigérantes	AFIFAE, 2015.	

Les travaux conduits par Jahne *et al.* (2018) apparaissent comme étant les plus complets. Ils présentent les résultats obtenus dans le cadre d'une étude basée sur un seul modèle de générateur (Watergen GEN-350), d'une capacité maximale de production de 600 litres par jour et dont la filière de traitement s'articule autour d'une recirculation de l'eau condensée au travers d'un filtre à sédiments (cf. 2.4.3), d'un filtre à charbon et d'une étape de désinfection UV. Les conclusions de l'étude s'appuient sur une utilisation en conditions réelles en milieu intérieur. Au cours de ces travaux, la recherche de *Legionella* spp. et de mycobactéries atypiques est restée infructueuse dans le condensat brut comme dans l'eau traitée. Il en est de même pour les bactéries indicatrices de contamination fécale, telles que les bactéries coliformes dont *E. coli* ou encore les entérocoques intestinaux. En revanche, une surveillance hebdomadaire de l'eau produite pendant une période de trois mois a révélé la présence abondante de micro-organismes aérobies revivifiables dans l'eau traitée avec des concentrations régulièrement supérieures à 1 000 UFC.mL⁻¹ et pouvant dépasser ponctuellement 5 000 UFC.mL⁻¹ (dénombrement sur milieu R2A⁸¹, 25 °C pendant 7 jours).

À l'issue de cette étude, les auteurs rappellent que si leurs travaux ne peuvent être considérés comme transposables à l'évaluation de la qualité microbiologique de l'ensemble des AWG, ils soulignent néanmoins que les condensats bruts ne sont pas des eaux stériles et qu'elles devraient faire l'objet d'un traitement désinfectant avant consommation.

Parallèlement, l'étude de Kaplan *et al.* (2023) confirme que les condensats bruts contiennent du COT (jusqu'à 1,5 mg.L⁻¹), qui peut favoriser une prolifération microbienne. Dans leur étude, qui repose sur 12 échantillons prélevés pendant une période de 24 semaines en extérieur à proximité de la côte en Israël, Kaplan *et al.* (2023) n'ont pas mis en évidence de bactéries coliformes ni de *Pseudomonas aeruginosa* dans les eaux condensées obtenues à partir d'un AWG pourtant dépourvu d'étape de traitement après condensation. Ce résultat isolé ne permet toutefois pas d'écarter l'intérêt de rechercher ces bactéries.

Bien que mentionnées dans des recommandations concernant les établissements de santé (Ministère de la santé et des solidarités, 2005), la recherche des bactéries psychrotrophes telles que *Listeria monocytogenes* et *Yersinia enterocolitica* dans les eaux de fontaines réfrigérantes n'est pas documentée ; de même que la survenue de contaminations suite à la consommation d'eau de fontaines réfrigérantes n'est pas clairement recensée dans la bibliographie (Tetillon, 2012).

Seule l'étude de Kaplan *et al.* (2023) décrit une surveillance des concentrations de *P. aeruginosa* dans le contexte des eaux produites par les AWG. *P. aeruginosa* est fréquemment identifié comme un contaminant potentiel des fontaines réfrigérantes (Sabourin *et al.*, 2011 ; Costa *et al.*, 2015). En raison de ces caractéristiques, les professionnels de santé considèrent *P. aeruginosa* comme un indicateur complémentaire de la qualité bactériologique de l'eau permettant la surveillance de l'entretien du réseau d'eau intérieur et des fontaines réfrigérantes (Loveday *et al.*, 2014) ; c'est pourquoi le guide de l'eau dans les établissements de santé recommande un niveau cible inférieur à 1 UFC. 100mL⁻¹, ainsi qu'une fréquence de contrôle trimestrielle (Ministère de la santé et des solidarités, 2005). Néanmoins, les conclusions de l'étude conduite par l'Anses en 2010 indiquent qu'il n'existe aucune preuve que l'usage normal d'eau de boisson contaminée par *P. aeruginosa* puisse être une source d'infection dans la population générale par voie orale (Anses, 2010b). Il y est également précisé que les cas rapportés sont liés à des populations sensibles et des usages particuliers dans des établissements de santé. En s'appuyant sur l'analyse conduite par Mena et Gerba (2009), il

⁸¹ La gélose R2A (pour *Reasoner's 2A Agar*) est un milieu de culture développé afin de cultiver des bactéries qui vivent habituellement dans l'eau potable.

apparaît que, par voie orale, la dose médiane infectante est de l'ordre de 10^{10} UFC chez l'Homme sain. Enfin cette même étude souligne que les concentrations en *P. aeruginosa* et *Pseudomonas* spp. ne sont pas corrélées à la concentration en flore totale et ce, quelle que soit la méthode d'analyse utilisée. La flore totale ne peut être considérée comme un bon indicateur de la présence ou des niveaux de contamination en *Pseudomonas*.

Enfin, il est à noter l'absence d'analyse visant à rechercher la présence de virus dans les eaux issues d'AWG. Considérant que les virus entériques constituent le principal risque de contamination virale hydrique et, qu'à l'inverse de certaines bactéries, ces derniers ne sont pas en mesure de se multiplier de manière autonome (sans leur hôte) dans l'environnement, il en résulte que le niveau de contamination des condensats bruts sera directement lié à la concentration de ces virus dans l'air filtré. Les capacités de rétention des filtres à air sont moindres pour les aérosols de petites tailles de sorte que les particules virales pourraient être moins efficacement retenues que les bactéries. Le filtre le plus performant (maille la plus fine) détermine la taille des particules susceptibles d'être retrouvées *in fine* dans les condensats bruts ; néanmoins les propriétés électrostatiques de certains filtres sont également en mesure de contribuer à la rétention des particules virales. Les filières de traitement des condensats bruts au sein des générateurs, en particulier les lampes germicides à UV, sont théoriquement en mesure d'inactiver les particules virales présentes.

En résumé, les données permettant d'évaluer le niveau de contamination microbiologique des eaux produites par les AWG sont peu nombreuses et basées exclusivement sur la recherche d'une liste non harmonisée de bactéries. Ces bactéries ont été ciblées soit du fait de leur capacité à initier ou contribuer à la formation de biofilms (mycobactéries atypiques, *Pseudomonas aeruginosa*), soit du fait de leur caractère pathogène (*Legionella* spp. et en particulier *L. pneumophila*, *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica*), soit du fait qu'il s'agit d'indicateurs bactériens usuels du contrôle sanitaire des eaux (flore aérobie revivifiable, bactéries coliformes dont *E. coli*, Entérocoques intestinaux, spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices). Il semble que la recherche ciblée des bactéries pathogènes ait été justifiée par certaines configurations liées à la température des eaux : *Legionella* spp. et en particulier *L. pneumophila* dans le cas d'eau tempérée à chaude, et *Listeria monocytogenes* et *Yersinia enterocolitica* dans le cas d'eau réfrigérée. Néanmoins, les cas identifiés de contaminations par ces agents pathogènes ne concernent que les fontaines et ils sont peu documentés et restent rares.

En conclusion, les paramètres bactériens usuels du contrôle sanitaire (flore aérobie revivifiable, bactéries coliformes dont *E. coli*, entérocoques intestinaux, spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices) doivent, en cohérence avec la réglementation, être utilisés pour évaluer les risques de dégradation de la qualité microbiologique des eaux produites. En complément du dénombrement de la flore aérobie revivifiable, celui des *Pseudomonas aeruginosa*⁸² permettrait d'évaluer la bonne maîtrise de la prolifération microbienne au sein de l'AWG. D'autres paramètres, identifiés lors de l'analyse des dangers, pourraient être à intégrer dans les canevas d'analyses en fonction des équipements.

Au-delà de la réalisation éventuelle d'analyses de l'eau, il importe d'insister sur le fait que le risque de colonisation des installations devrait être en priorité géré au moment de la conception des équipements (efficacité des filtres à air, validation de la filière de désinfection, validation de l'efficacité des lampes UV mises en place dans les cuves de stockage, etc.) et par un

⁸² Les experts considèrent que le dénombrement des *Pseudomonas* spp. serait en théorie préférable à celui des *Pseudomonas aeruginosa* mais constatent l'absence de méthode officielle d'analyse des eaux pour ce paramètre.

entretien minutieux et régulier des filtres à air, du dispositif de condensation et des cuves de stockage de l'eau. La fréquence de remplacement des filtres devrait tenir compte de ce risque. Actuellement, les fabricants conseillent de réaliser cette maintenance spécialisée tous les six à douze mois. Or, le nettoyage des réservoirs de stockage n'est réalisé qu'à cette occasion. Une durée aussi longue entre deux nettoyages interroge au regard du risque de développement de biofilms. Enfin, aucune règle précise n'est indiquée aux utilisateurs en cas de mise hors service prolongée de l'AWG.

4.1.3 Autres enjeux concernant les AWG

4.1.3.1 Impact sur l'hygrométrie

Aucune étude bibliographique n'a été menée sur l'impact des AWG sur le taux d'hygrométrie de l'air. Pourtant, le principe de fonctionnement des AWG repose sur une capture de la vapeur d'eau présente dans l'air. Des conséquences de l'emploi des AWG en termes de taux d'hygrométrie sont donc possibles. Il importe cependant de distinguer le cas des équipements dont la prise d'air se fait à l'extérieur, de ceux qui utilisent l'air intérieur.

4.1.3.1.1 *Dispositifs utilisant l'air extérieur*

L'atmosphère terrestre contient l'équivalent de $12\,642 \cdot 10^{12}$ litres d'eau, sous forme de vapeur (Li *et al.*, 2018).

D'un point de vue global et dans l'état actuel, au vu des réserves considérables d'eau disponibles sous forme de vapeur, l'impact environnemental de l'exploitation de cette ressource par des AWG peut être considéré négligeable au vu des performances des équipements mis sur le marché. Au niveau local, dans le cas d'un dispositif d'AWG de grandes dimensions, il est difficile d'apprécier l'impact des rejets d'air sec sur l'environnement. Il importe cependant de ne pas considérer l'atmosphère comme une masse d'air statique, de sorte que la variation locale du taux d'hygrométrie induite par un AWG sera vraisemblablement fugace. Des calculs réalisés sur un site mettant en œuvre des AWG dans le cadre d'un projet en cours d'autorisation sont détaillés dans l'annexe 9. Ils témoignent du fait qu'à grande échelle, les AWG ne sont pas une source significative de spoliation de l'eau pour l'environnement. Ce constat serait à revoir si le dimensionnement des sites de production, ainsi que leur nombre, prenaient de l'ampleur ; des études de simulation seraient alors nécessaires.

4.1.3.1.2 *Dispositifs utilisant l'air intérieur*

L'utilisation des AWG en intérieur pose la question de l'impact de ces dispositifs sur la santé des occupants de ces locaux du fait des variations d'hygrométrie induites par la capture de vapeur d'eau.

De forts taux d'hygrométrie dans les locaux de vie et de travail sont connus pour avoir des impacts néfastes sur la santé des personnes (Anses, 2016b). La conséquence principale est le développement de moisissures dans les locaux, à l'origine de dégradations du bâti et des équipements. Les moisissures présentes dans les environnements intérieurs sont à l'origine d'effets avérés sur la santé de l'enfant et, en particulier, sur le développement et l'exacerbation de l'asthme. En population générale, les données épidémiologiques ne permettent pas de conclure sur l'association entre l'exposition aux moisissures dans les environnements

intérieurs et le risque d'asthme chez l'adulte. Néanmoins, les études concernant les adultes exposés sur leur lieu de travail (bâtiments ayant connu d'importants dégâts des eaux) indiquent l'existence d'une association entre l'exposition à l'humidité et aux moisissures, et l'incidence et la prévalence de l'asthme.

L'impact d'un air trop sec sur la santé des personnes reste assez peu documenté (Wolkoff, 2018). Certaines études montrent qu'un taux d'hygrométrie trop bas favorise notamment des réactions inflammatoires au niveau des yeux (Wolkoff, 2018), avec sensation de sécheresse (< 30 %), voire une rougeur de la conjonctive (< 10 %). Une irritation des voies respiratoires est possible (Freed et Davis, 1999). Une irritation cutanée est parfois évoquée, ainsi qu'une aggravation des symptômes d'allergie et d'asthme (Chou *et al.*, 2007 ; Norbäck *et al.*, 2006).

En France, la réglementation fixe une exigence dans l'habitat, à savoir qu'il est attendu que « *les dispositifs d'ouverture et les éventuels dispositifs de ventilation des logements [...] permettent un renouvellement de l'air et une évacuation de l'humidité adaptés aux besoins d'une occupation normale du logement* »⁸³. Bien qu'aucune valeur ne soit fixée réglementairement, il est admis que le taux d'hygrométrie dans les lieux de travail devrait être maintenu entre 30 et 70 % (INRS, 2021a). Le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail constate aussi l'absence de valeurs réglementaires ou normatives mais rappelle qu'un taux d'humidité relative inférieur à 20 % peut causer un inconfort en raison de l'assèchement des muqueuses et de la peau, tandis qu'une valeur supérieure à 70 % peut permettre le développement de moisissures et de champignons et rend aussi la pièce étouffante (CCHST, 2024).

Dans un environnement totalement clos, un AWG est en théorie susceptible de faire varier rapidement le taux d'hygrométrie⁸⁴. Cependant, les données disponibles auprès des fabricants témoignent du fait que ces dispositifs n'ont une production d'eau significative que pour des taux d'hygrométrie, à 20 °C, supérieurs à 30 %, voire plus. En effet, à 20 °C, le point de rosée pour un taux d'hygrométrie de 30 % est de 6 °C, ce qui constitue une température difficilement compatible avec les performances de la technologie utilisée. Pour un taux d'hygrométrie inférieur, les appareils cessent de capter la vapeur d'eau. Il est donc possible de considérer que ce type de dispositif n'est pas en mesure de réduire le taux d'hygrométrie de l'air intérieur à des valeurs inférieures à 30 %. Seuls les appareils utilisant des zéolites pour la capture de vapeur d'eau sont actuellement susceptibles de réduire le taux d'hygrométrie à des valeurs inférieures à 30%.

Certains matériels sont munis d'un capteur d'humidité relative, l'information étant affichée sur la façade de la fontaine. Cela permet en théorie à l'utilisateur de suivre ce paramètre et, éventuellement, de veiller à aérer le local où l'AWG est installé. Cette approche implique cependant que des consignes figurent dans la notice d'utilisation.

Les AWG utilisés en intérieur peuvent donc avoir un effet bénéfique du point de vue de l'hygrométrie dans les locaux, en jouant le rôle de déshumidificateurs d'air, mais n'ont pas vocation à être installés dans des locaux mal ventilés : sans renouvellement de l'air intérieur, la concentration en polluants dans l'air pourrait augmenter et potentiellement impacter la

⁸³ Décret n° 2002-120 du 30 janvier 2002 relatif aux caractéristiques du logement décent pris pour l'application de l'article 187 de la loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains.

⁸⁴ À titre d'exemple, si l'on considère un local totalement clos d'un volume de 200 m³ dans lequel serait placé un AWG, à une température ambiante de 20°C et pour une hygrométrie de 80% (soit environ 13,6 g d'eau par m³), on observe que le volume total d'eau présente sous forme de vapeur dans ce volume d'air est de 2,720 litres. Cette valeur est à comparer à la productivité théorique des AWG, soit 10 litres par jour pour les plus petits modèles du commerce.

qualité de l'eau produite par les AWG ; le taux d'hygrométrie pourrait devenir trop bas dans le local, ce qui pourrait être une source d'inconfort pour les occupants.

Des recommandations dans ce sens devraient figurer dans la notice destinée aux utilisateurs de ce type d'équipements, spécialement ceux qui utilisent des zéolites pour la capture de la vapeur d'eau.

4.1.3.2 Impact de la faible minéralisation de l'eau produite

Les eaux produites par des AWG sont en règle générale peu minéralisées (cf. 2.4.5). Il importe donc de s'interroger sur les effets à long terme de la consommation d'une telle eau en termes d'apports nutritionnels en éléments minéraux. Ni la littérature concernant les AWG, ni les fabricants auditionnés ne se sont penchés sur la question.

Dans son rapport de 2011, l'Anses indique que « *pour le calcium, le fer, le magnésium et le cuivre, des pourcentages élevés de la population présentent des apports inférieurs à leurs besoins nutritionnels* ». Le risque d'insuffisance d'apports est souligné pour certains groupes de consommateurs (Cuivre : enfants, Calcium : adolescents, Fer : femmes et jeunes filles, Magnésium : adultes et enfants avec les apports les plus faibles). Pour ces éléments minéraux, il importe que l'évolution des habitudes alimentaires n'aggrave pas cette situation. Dans son rapport de 2017 (Anses, 2017c), l'Agence identifie les principales familles de denrées alimentaires contributrices des apports en minéraux et indique les pourcentages des apports totaux amenés par l'eau de boisson (tableau 4).

Tableau 4. Contribution des eaux aux apports alimentaires en calcium, magnésium, fer et cuivre (% des apports totaux) (d'après Anses, 2017c).

Tranche d'âge	Type d'eau	Calcium	Magnésium	Fer	Cuivre
1-10 ans	Conditionnée	3,8	2,2	0,4	1,1
	Robinet	2,4	1,3	1	4,8
11-17 ans	Conditionnée	3,5	1,9	0,3	0,8
	Robinet	3,4	1,7	1,4	5,9
18-79 ans	Conditionnée	8,4	3,7	0,5	1,1
	Robinet	3,7	1,4	1,4	4,8

Même si les eaux du robinet et conditionnées sont un des contributeurs importants aux apports calciques de la population adulte française (les contributions moyennes des eaux conditionnées et de l'eau du robinet étant respectivement de 8,4 % et 3,7 % sur un total moyen d'apport en calcium de 929 mg/j), il n'y a toutefois pas lieu de redouter, au sein de la population française, que la consommation d'eau faiblement minéralisée induise un risque d'insuffisance d'apports (pas de risque identifié pour le calcium dans la population adulte).

En ce qui concerne le cadre réglementaire relatif à la minéralisation des EDCH (eaux de réseau), les concentrations en ions minéraux sont pour l'essentiel limitées par une valeur maximale à ne pas dépasser, sans valeur minimale définie. Le seul paramètre auquel peut être rapportée une concentration minimale en éléments minéraux dans les EDCH est la

conductivité (arrêté du 11 janvier 2007 modifié) : ≥ 180 et $\leq 1\,000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $20\text{ }^\circ\text{C}$ ou ≥ 200 et $\leq 1\,100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Pour l'ERPTC, l'eau minérale naturelle et l'eau de source⁸⁵, la conductivité est limitée à $2500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $20\text{ }^\circ\text{C}$ ou $2800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $25\text{ }^\circ\text{C}$. Il n'est pas fixé de valeur minimale. Une concentration en calcium inférieure à $100 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ et une concentration en magnésium inférieure à $50 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ sont exigées pour l'alimentation des nourrissons⁷⁷.

Il n'existe donc pas en France de disposition réglementaire interdisant la commercialisation d'eaux conditionnées très faiblement minéralisées, à l'instar de certaines eaux minérales naturelles⁸⁶. Comme le précise l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié, les valeurs minimales de conductivité fixées pour les eaux de réseau sont destinées à éviter de distribuer une eau corrosive, ce qui pourrait entraîner des dégradations des installations de distribution. Les eaux issues des AWG étant principalement destinées à une consommation directe en sortie de machine, il n'y a pas de motif sanitaire pour imposer des exigences minimales en termes de minéralisation à ces eaux.

Néanmoins, l'Académie nationale de médecine précise que « *les eaux rendues potables par traitement, si elles sont trop purifiées par osmose inverse et trop peu reminéralisées, peuvent exposer à des carences minérales encore mal évaluées* » (Roques-Latrille et al., 2022).

4.2 Efficacité des dispositifs

L'efficacité des AWG en tant que dispositifs permettant de capter la vapeur d'eau atmosphérique n'est plus à démontrer, même si les performances des différents équipements disponibles sont très variables et que les conditions nécessaires pour une productivité optimale, en termes de température et d'hygrométrie, sont relativement contraignantes. De plus, d'un point de vue économique et énergétique, la production d'eau via un AWG s'avère coûteuse.

En ce qui concerne la capacité des AWG à produire des eaux propres à la consommation humaine, peu de données existent concernant la qualité des condensats bruts, de sorte qu'il est difficile d'évaluer l'efficacité des filières de traitement mises en œuvre. Or, la plupart des AWG sont destinés à être utilisés par le grand public, dans des conditions très diverses et sans réelle maîtrise des pollutions de l'air.

Les AWG constituant un ensemble hétérogène de dispositifs associant divers procédés de traitement des eaux, il n'est pas possible d'évaluer l'efficacité réelle de tous les dispositifs commercialisés. Les éléments rapportés dans ce qui suit ne visent qu'à préciser les points à considérer dans l'évaluation de l'efficacité en rappelant l'intérêt et les limites des différents procédés de traitement de l'eau susceptibles d'être intégrés dans un AWG.

⁸⁵ Arrêté du 14 mars 2007 relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées ainsi que de l'eau minérale naturelle distribuée en buvette publique.

⁸⁶ Certaines eaux minérales naturelles commercialisées en France sont « oligominérales ou faiblement minéralisées » (ce qui signifie qu'elles ont une teneur en sels minéraux, calculée comme résidu sec (à $180\text{ }^\circ\text{C}$), inférieure à $500 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

4.2.1 Filtration de l'air sur filtres à particules et/ou à charbon

4.2.1.1 Performances attendues

La présence de particules et de polluants volatils dans l'air rend indispensable une filtration pour limiter notamment l'empoussièrement des surfaces de condensation et leur colonisation microbienne. Les filtres les plus performants, de type HEPA, classiquement utilisés dans l'industrie, ont une efficacité de collecte supérieure à 99 % pour les particules dont le diamètre est supérieur à 0,3 µm mais restent d'une efficacité limitée vis-à-vis des particules fines (< 2,5 µm) et ultrafines (< 0,1 µm), également appelées nanoparticules. Leur emploi pose problème en pratique car il s'agit de filtres coûteux et rapidement colmatés, dont le remplacement fréquent serait à prévoir. De plus, la filtration n'a pas vocation à être stérilisante, puisque des procédés sont prévus pour désinfecter l'eau après condensation. Il importe donc de trouver un juste compromis entre performances de filtration et longévité des filtres.

Les COV présents dans l'air en phase gazeuse peuvent être efficacement adsorbés par des filtres à charbon actif (INRS, 2005). Par conséquent, la filtration de l'air sur charbon peut être une approche d'intérêt pour éliminer les COV avant la récupération d'eau atmosphérique et réduire ainsi les concentrations en acides organiques solubles et en aldéhydes dans l'eau. Une autre stratégie peut être de filtrer l'eau sur charbon actif (cf. 4.2.2).

En l'absence de traitement adapté, les champignons et bactéries susceptibles de se multiplier et former des biofilms dans le système d'AWG représentent un risque élevé de contamination microbienne de l'eau produite. Afin de limiter leur pénétration dans les systèmes d'AWG, et donc leur prolifération potentielle dans l'eau condensée, il convient donc en premier lieu d'en débarrasser l'air duquel est extraite la vapeur d'eau. La filtration est une solution dont l'efficacité est variable suivant le type de filtre (matériau, porosité). Les maillages de fibre de verre, cellulose ou quartz ou les membranes de porosité définie (0,22 µm, 0,47 µm ou autre), en polycarbonate ou esters de cellulose, utilisés pour capturer les particules en suspension (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀) sont efficaces dans la captation de l'ensemble des micro-organismes en suspension dans l'air (Burton *et al.*, 2007 ; Verreault *et al.*, 2008 ; Amato *et al.*, 2017). En conditions relativement sèches (moins de 80 % d'humidité relative), les filtres type F6 et F7⁸⁷ retiennent seulement environ 70 % des bactéries et plus de 80 % et champignons de l'air (Möriz *et al.*, 2001). La viabilité des spores bactériennes (*Bacillus subtilis*) et fongiques (*Aspergillus niger*) n'est pas affectée, et, bien que l'absence de nutriments limite la prolifération microbienne (Maus *et al.*, 2001), des taux d'humidité élevés (> 80 %) pendant des périodes de plusieurs jours peuvent conduire à une prolifération microbienne sur ces filtres et représenter une source de contamination (Möriz *et al.*, 2001).

Les filtres HEPA sont considérés comme étant les plus efficaces pour l'abattement de la concentration microbienne dans l'air, mais la viabilité des spores bactériennes (*B. atropheus*) n'est pas affectée pendant au moins 210 jours (Mittal *et al.*, 2011). Celle de phages (MS-2 coliphage), de spores fongiques (*Aspergillus brasiliensis*) est maintenue pendant au moins six jours, alors que celle de bactéries Gram-positives non-sporulantes (*Staphylococcus epidermidis*) est réduite de 5 log ; celle des bactéries Gram-négatives (*Escherichia coli*, *Brevundimonas diminuta*) est inférieure à deux jours (Mittal *et al.*, 2011).

⁸⁷ Les filtres F6 et F7 sont des catégories de filtres définies anciennement par la norme EN 779. Un filtre F6 (désormais M6) a une efficacité de filtration pour les particules de taille PM₁ entre 30 et 50%. Les filtres F7 sont, selon la norme ISO 16890, de type ePM_{2,5}.

Ainsi, la filtration en amont de l'air utilisé pour produire l'eau atmosphérique ne garantissant pas l'absence totale de micro-organismes dans les condensats bruts, il reste indispensable de désinfecter l'eau produite.

4.2.1.2 Limites d'efficacité liées aux modalités d'utilisation

En ce qui concerne les filtres à particules, leurs performances sont essentiellement affectées par le phénomène de colmatage qui limite progressivement le passage de l'air et peut générer une perte de rendement de l'AWG via une réduction du flux d'air (US-EPA, 2018). Ce phénomène n'induit pas de risque de contamination de l'eau de condensation mais limite la quantité d'eau produite. La concentration en contaminants dans l'air, le taux d'humidité et la température sont des paramètres influant sur les performances des filtres. En particulier, l'humidité peut agglomérer les particules solides et induire leur colmatage rapide, favoriser la corrosion des éléments métalliques du filtre et réduire la capacité d'adsorption du charbon actif (US-EPA, 2018).

Les filtres à charbon actif ont aussi une durée de vie limitée du fait de la saturation progressive des sites d'adsorption. Ils peuvent donc devenir inefficaces, voire relarguer les polluants adsorbés (Yu *et al.*, 2009 ; Yao *et al.*, 2009).

La fréquence de remplacement des filtres à air devrait donc être adaptée aux conditions de leur mise en œuvre. Cependant, les données recueillies lors de cette expertise mettent en avant une grande imprécision des recommandations des fabricants d'AWG en ce qui concerne la périodicité des opérations de remplacement de filtres et l'absence d'indicateur objectif permettant d'adapter la fréquence des interventions de maintenance à la qualité de l'air au niveau du site d'installation de l'AWG.

4.2.2 Filtration de l'eau sur charbon actif

4.2.2.1 Performances attendues

Tous les modèles d'AWG recensés dans cette étude ont recours à une ou plusieurs étapes de filtration de l'eau sur charbon actif.

Les charbons actifs sont principalement efficaces vis-à-vis de composés organiques de poids moléculaire élevé, non polaires ou faiblement polaires. En pratique courante, les pesticides constituent la principale famille de composés pour lesquels les filtres à charbon actif sont utilisés, dans le domaine de l'eau, mais ils s'avèrent également efficaces vis-à-vis des solvants aromatiques (benzène, toluène, nitrobenzènes), des composés aromatiques chlorés (polychlorobiphényles (PCB), chlorobenzènes, chloronaphthalène), des phénols et chlorophénols, des trihalométhanes, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (acénaphthène, benzopyrènes), du tétrachlorure de carbone et des hydrocarbures de haut poids moléculaire (Legube, 2021). Les taux d'abattement obtenus diffèrent selon les molécules et sont aussi dépendants des conditions de mise en œuvre du charbon (débit et température, en particulier).

Des limites d'efficacité majeures sont connues, notamment vis-à-vis de pesticides polaires de faible poids moléculaire, comme par exemple le glyphosate, ou les composés alkyl-perfluorés. De même, le charbon actif est peu efficace vis-à-vis de contaminants tels que les alcools, acides, aldéhydes et cétones de faible poids moléculaire et les composés carbonés aliphatiques de faible poids moléculaire.

Les performances des charbons actifs dépendent également de la matière première utilisée (houille, lignite, anthracite, schistes bitumineux, noix de coco, tourbe, etc.) et leur mode de fabrication (protocole de séchage, de carbonisation et d'oxydation ménagée) qui donnent au matériau sa grande porosité et déterminent ses performances en termes d'adsorption.

Dans le cas des AWG, si l'on considère la grande diversité des polluants organiques susceptibles d'être présents de manière significative dans l'air et donc dans les condensats bruts, le recours à une filtration sur charbon apparaît indispensable, d'autant qu'il s'agit d'un procédé simple à mettre en œuvre et peu coûteux. Le choix d'un type de charbon devrait être clairement orienté en fonction d'objectifs de performances identifiés par l'analyse des risques.

Si le charbon actif est couramment utilisé dans les fontaines à eau réfrigérantes pour éliminer le chlore et les sous-produits de désinfection et améliorer la qualité organoleptique de l'eau, la pertinence de l'utilisation de filtres à charbon et de leur emplacement dans la filière des AWG n'a pas été justifiée lors des auditions des fabricants, notamment par une analyse des abattements des polluants.

4.2.2.2 Limites d'efficacité liées aux modalités d'utilisation

La principale limite d'efficacité des filtres à charbon tient à la saturation progressive des sites d'adsorption du fait de la rétention de polluants. De plus, la matière organique présente dans l'eau peut limiter l'adsorption de composés organiques sur le charbon actif par le biais de l'obstruction progressive des pores et/ou d'une compétition pour les sites d'adsorption. La matière organique peut également favoriser le développement d'un biofilm qui peut renforcer le phénomène d'obstruction des pores et les mécanismes de compétition directe, mais également modifier l'affinité des surfaces pour les molécules cibles (Legube, 2021), rendant le traitement par charbon actif moins efficace. Plusieurs études ont ainsi montré une réduction de plus de 50 % des capacités d'adsorption des lits de charbons actifs pour différents micropolluants organiques (pesticides et composés pharmaceutiques) après quelques mois d'utilisation (Ye *et al.*, 2019 ; Ding *et al.*, 2006).

La saturation des filtres à charbon est donc une cause possible de perte d'efficacité de la filière de traitement, voire d'un relargage des polluants adsorbés. Ce constat n'est en rien spécifique aux AWG et les concentrations en matières organiques mesurées dans les condensats bruts sont très faibles comparées à celles observées dans des eaux brutes superficielles. Comme cela a été évoqué précédemment (cf. 2.4.9), il serait indispensable que les fabricants d'AWG à destination du grand public fixent des fréquences de renouvellement de ces filtres sur la base de données objectives, reposant sur des études en situation réelle. Les auditions n'ont pas permis d'apprécier la pertinence des fréquences actuellement définies.

4.2.3 Filtration membranaire de l'eau

4.2.3.1 Performances attendues

Dans le cas d'une eau produite par AWG, les dispositifs de filtration utilisés relèvent de : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) ou l'osmose inverse (OI).

Une filière incluant une préfiltration sur charbon, une MF puis une désinfection, peut s'avérer suffisante pour éliminer les agents biologiques et une grande partie de la pollution chimique. Cependant, son efficacité sur le long terme ne pourrait être garantie que si l'on disposait d'une eau brute de qualité stable dans le temps. Les AWG étant destinés à être installés dans des lieux très divers, une filière de traitement de ce type n'est pas adaptée.

La NF et l'OI apportent des garanties très supérieures en termes d'élimination des composés chimiques. Cependant, en l'absence de données suffisantes pour caractériser les types et niveaux de pollution chimique des condensats bruts, il n'est pas possible de juger de la pertinence de l'un ou l'autre de ces procédés.

Parmi les trois procédés de filtration utilisés dans les systèmes AWG, l'UF et l'OI assurent une rétention virale et microbienne suffisante pour une production d'EDCH/ERPTC sous réserve de pouvoir garantir en permanence l'intégrité des membranes. Usuellement, les fournisseurs de membranes d'UF affichent des taux de rétention / d'abattement viral (bactériophage MS2) de 4 log (*Log reduction value* : $\log_{10}(N/N_0) = 4$ avec respectivement N_0 et N les concentrations virales avant / après filtration) et des taux de rétention / d'abattement bactérienne (*Pseudomonas diminuta*) à 6 log₁₀. Toutefois, ces performances sont théoriques, obtenues dans conditions standards éloignés d'un fonctionnement réel.

4.2.3.2 Limites d'efficacité liées aux modalités d'utilisation

Un vieillissement des membranes de traitement de l'eau peut être dû aux contraintes mécaniques liées aux cycles de fonctionnement, au colmatage progressif ou aux produits de nettoyage utilisés. Ce vieillissement peut entraîner une diminution des performances hydrauliques pouvant aller jusqu'à une rupture d'intégrité impliquant un défaut de rétention des polluants.

Pour les AWG à usage domestique, il n'est pas prévu de cycles de nettoyage des membranes, celles-ci étant en principe remplacées régulièrement (cf. 2.4.9) mais les auditions de fabricants ont montré que la fréquence théorique de remplacement ne repose pas sur des arguments techniques étayés. L'utilisateur ne disposant d'aucun indicateur de bon état des dispositifs membranaires, il ne lui est pas possible de détecter des pertes d'intégrité des membranes. Il pourrait en résulter une perte d'efficacité des membranes et éventuellement un risque sanitaire si l'eau produite dans de telles circonstances était consommée.

Dans le cas des dispositifs industriels, le projet d'usine de conditionnement d'eau prévoit aussi un remplacement des membranes sans cycle de nettoyage. Pour d'autres développements industriels, si des procédures d'entretien des membranes sont prévues, le choix des protocoles de nettoyage des membranes et des produits utilisés à cette étape doit être adapté à la nature des membranes utilisées. Ainsi, l'utilisation de solutions de nettoyage des membranes à base d'hypochlorite de sodium (NaOCl) peut provoquer une augmentation de la perméabilité et une diminution de la rétention pour les membranes en PVDF (polyfluorure de vinylidène) ou en PES (polyéthersulfone) (Li *et al.*, 2021). Certains procédés utilisés en amont des étapes de filtration peuvent aussi avoir un impact sur l'intégrité des membranes. Dans le cas du projet d'usine d'embouteillage dont le dossier a été fourni par la DGS, les condensats bruts seront soumis à un traitement par l'ozone avant filtration. Li *et al.*, (2022) ont montré qu'après un contact prolongé avec l'ozone (exposition à des concentrations comprises entre 0,05 et 0,20 mg.L⁻¹ jusqu'à 240 heures), certains additifs hydrophiles, tels que la polyvinylpyrrolidone (PVP), étaient progressivement dégradés et libérés de la membrane d'ultrafiltration, tandis que la matrice PVDF de la membrane présentait une assez bonne résistance à l'ozone. L'ozonation a entraîné une augmentation de la taille des pores et des modifications des performances, notamment une augmentation de la perméabilité de la membrane de 34 %, une diminution de la capacité de rétention de 21,8 % et une augmentation de la propension au colmatage par les matières organiques. Il existe donc dans ce type d'installation un risque de baisse des performances des membranes en cas d'emploi de

procédés inadaptés en amont de la filtration ou du recours à des procédures de maintenance inadéquates.

Ces préoccupations doivent impérativement être prises en compte dès la conception de tout projet industriel.

4.2.4 Désinfection UV

Le recours à des lampes UV est systématique dans les AWG avec un objectif annoncé de désinfection des eaux. Néanmoins, il n'a pas été possible de disposer auprès des fabricants d'AWG de données techniques en ce qui concerne les types des lampes UV utilisées, les conditions de leur mise en œuvre, notamment les doses utilisées, et les modalités de validation de l'efficacité des protocoles utilisés pour la désinfection des eaux ou le maintien de leur qualité microbiologique lors du stockage.

Pour que cette désinfection soit efficace, il faudrait que soient respectées les conditions d'utilisation des réacteurs UV fixées par la réglementation (Arrêté du 9 octobre 2012 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets utilisés pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine pris en application de l'article R. 1321-50 (I et II) du code de la santé publique). Leur fonctionnement intermittent dans les AWG, le positionnement de certains réacteurs et l'absence de sonde de contrôle de l'irradiation UV-C interrogent sur le respect de ces dispositions et donc sur l'efficacité de la désinfection.

4.2.5 Autres remarques

Le bilan des dispositifs commercialisés a permis d'identifier des options techniques qui posent question quant à leur pertinence et devraient faire l'objet d'une attention particulière. Il s'agit notamment du recyclage en circuit fermé des concentrats d'osmose inverse, de l'ozonation des condensats bruts et de l'ajout de minéraux dont la toxicité est connue.

Le recours aux adsorbants appelle d'autres questions auxquelles il n'a pas été trouvé de réponse dans la littérature scientifique, concernant :

- l'effet du chauffage de l'adsorbant sur la flore microbienne apportée par l'air, notamment un éventuel effet létal vis-à-vis des agents microbiens les plus thermosensibles (mis en avant mais non démontré par certains fabricants d'AWG) ou une activation de spores ;
- l'éventualité que l'adsorbant capte de manière sélective les composés organiques volatils et les libère ensuite dans le condensat brut.

Il appartient aux fabricants d'AWG à adsorbants d'y apporter des réponses argumentées.

Par ailleurs, il a été observé l'absence de dispositifs permettant à l'utilisateur de s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs de traitement de l'eau de l'AWG. Enfin, les protocoles de maintenance sont très imprécis.

5 Conclusions et recommandations du GT

5.1 Conclusions

De nombreux dispositifs produisant de l'EDCH/ERPTC par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sont actuellement commercialisés en France. Utilisant selon les cas l'air extérieur ou intérieur, ils peuvent être destinés, selon leur dimensionnement, à un usage par des particuliers ou à l'échelle collective, voire à la production d'eau conditionnée ou l'alimentation d'un réseau public de distribution.

Face à la diversité des AWG commercialisés et de leurs usages, au manque de données pour caractériser les dangers (dans la littérature et lors des audits) et au manque de preuves suffisantes de la capacité des dispositifs à produire une eau conforme aux exigences de qualité réglementaires en vigueur pour l'EDCH/ERPTC, le GT n'a pas pu réaliser une évaluation exhaustive des risques sanitaires associés à l'utilisation de ces dispositifs.

Ainsi, les AWG pourraient s'avérer inefficaces à produire de l'EDCH/ERPTC dans des environnements pollués en fonction des moyens de traitement mis en œuvre.

Les experts soulignent :

- le manque de données relatives à l'impact de la qualité de l'air sur celle de l'eau condensée et, *in fine*, celle de l'eau produite, ne permet pas de garantir l'efficacité en toutes circonstances des filières de traitement mises en œuvre. Ce constat appelle à des études complémentaires ;
- le manque de données analytiques sur la qualité des eaux produites par les AWG au regard des limites et références de qualité réglementaires applicables aux EDCH/ERPTC ;
- l'absence de mise en œuvre, par les industriels, de protocoles de validation des AWG avant commercialisation, en se plaçant dans des conditions « pire cas » de pollution de l'air ou des conditions de pollution de l'air maîtrisée (chambre de simulation) ;
- l'absence de définition précise et de validation des modalités de maintenance des appareils ;
- l'absence de capteurs permettant à l'utilisateur de s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs de traitement de l'eau dans le temps ;
- que si les eaux produites étaient ensuite enrichies, elles ne relèveraient plus de la réglementation sur les EDCH/ERPTC mais de celle des BSA, ces dernières n'entrant pas dans le champ de l'expertise. Elles devraient alors faire l'objet d'une évaluation correspondant à cet usage (cf. 4.1.2.4).

En réponse aux questions posées par la DGS dans la saisine, le GT émet les conclusions suivantes :

1/ « Statuer sur la possibilité de considérer la condensation comme un procédé de traitement remplissant les dispositions prévues à l'article R. 1321-50 du code de la santé publique » : la seule étape technologique réellement originale au niveau des AWG est la condensation de la vapeur d'eau, réalisée sur surface froide, avec ou sans recours à des adsorbants pour améliorer les rendements. **Même si cette étape ne constitue pas un traitement de l'eau au sens de l'article R.1321-50 du code de la santé publique**, elle doit faire l'objet d'une évaluation de son innocuité (MCDE et/ou produit et procédé de traitement de l'eau).

2/ « Identifier les dangers microbiologiques et chimiques liés à l'hétérogénéité de la qualité de l'air et des condensats en résultant, ainsi que des variations d'un site à l'autre, pouvant impacter la qualité de l'eau produite en vue d'une distribution » : les dangers susceptibles d'être présents dans l'air, extérieur comme intérieur, sont très divers. Leur nature et leur concentration dans l'air peuvent varier de manière très sensible d'un site à un autre et dans le temps, en fonction des activités humaines, de phénomènes naturels et des conditions météorologiques. La qualité de l'air utilisé par les AWG a un impact direct sur la qualité des condensats bruts produits et doit être prise en compte dans la conception/validation des filières de traitement mises en œuvre en vue de produire des EDCH/ERPTC. Les modalités actuelles de surveillance de la qualité de l'air en France ne sont pas suffisantes pour garantir une qualité de l'air adaptée aux AWG. Par ailleurs, les exigences de qualité réglementaires actuellement applicables aux eaux brutes d'origines conventionnelles utilisées pour la production d'EDCH/ERPTC ne conviennent pas forcément pour les condensats bruts d'AWG. Par ailleurs, les risques sanitaires ne dépendent pas uniquement de la qualité de l'air prélevé mais également de la nature des matériaux au contact de l'eau, ainsi que des performances et des conditions d'utilisation des procédés de traitement utilisés.

Ainsi, un canevas analytique spécifique pour les eaux produites par des AWG serait à prévoir dans la réglementation relative aux EDCH/ERPTC pour la mise en œuvre du contrôle sanitaire et/ou de la surveillance exercée par l'exploitant. En effet, des polluants présents dans l'air et pouvant être de potentiels dangers ne sont pas pris en compte dans la réglementation actuelle. Des travaux montrent que certains polluants dans l'air peuvent se retrouver dans les condensats bruts à des concentrations supérieures aux limites fixées pour les EDCH/ERPTC. Une démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques pertinents liés à l'air pour les AWG est proposée par le GT (annexe 8).

Concernant les paramètres microbiologiques, ceux du contrôle sanitaire (flore aérobie revivifiable, bactéries coliformes dont *E. coli*, Entérocoques intestinaux, spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices) doivent, en cohérence avec la réglementation, être utilisés pour évaluer les risques de dégradation de la qualité microbiologique des eaux produites. En complément du dénombrement de la flore aérobie revivifiable, celui des *Pseudomonas aeruginosa* permettrait d'évaluer la bonne maîtrise de la prolifération microbienne au sein de l'AWG. D'autres paramètres, identifiés lors de l'analyse des dangers, pourraient être à intégrer dans les canevas d'analyses en fonction des traitements utilisés dans les AWG.

3/ « Disposer d'éléments d'expertise utiles à l'instruction des dossiers de demande de mise sur le marché de ces procédés innovants » : des pièces constitutives d'un dossier de demande d'autorisation par le Préfet d'un dispositif industriel fixe ou d'un dossier de demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) pour un dispositif destiné à un usage domestique ou collectif sont proposées par le GT (annexe 10). L'évaluation de tels dossiers devrait prendre tout particulièrement en considération la pertinence et l'exhaustivité de la liste des dangers identifiés au vu des données de pollution de l'air, la capacité de la filière de traitement de l'air et de l'eau à abattre ces polluants et la validation de l'ensemble de l'AWG réalisée sur la base de simulations en atmosphère polluée. En complément, l'évaluation des dispositifs devrait s'appuyer sur des tests d'épreuves microbiologiques permettant de vérifier que leur conception est compatible avec la maîtrise des risques de prolifération microbienne dans les conditions d'usage prévues.

4/ « Identifier des usages alternatifs de l'eau produite par ces dispositifs, notamment dans les territoires sujets à la problématique de l'accès à l'eau potable » : les AWG ne constituent une source d'eau alternative intéressante que dans des situations où les ressources classiques sont très rares ou inexistantes, sachant que les volumes d'eau produits restent réduits même en conditions optimales. Compte-tenu du coût de production de l'eau par les AWG, lié à l'acquisition, la maintenance, le suivi et la consommation électrique de ces appareils, le recours à des AWG devrait être réservé à la production d'eau de boisson. Si d'autres usages (domestiques, agricoles, industriels) venaient à être autorisés, une évaluation économique, environnementale et sanitaire spécifique à chaque usage serait nécessaire.

Le GT souligne les points suivants :

- les procédés utilisés pour assurer le traitement de l'air et de l'eau sont très divers selon les fabricants d'AWG, et leur pertinence doit être évaluée au cas par cas selon les conditions de mise en œuvre ;
- les fabricants auditionnés n'apportent pas de garanties suffisantes d'innocuité des eaux produites, faute notamment d'une analyse des risques adaptée et d'une validation des processus de traitement utilisés. L'efficacité des filières de traitement de l'air et de l'eau mises en place par les fabricants d'AWG n'est, de ce fait, jamais clairement établie ;
- les données scientifiques relatives aux transferts de polluants entre l'air et l'eau au cours de la phase de condensation sont parcellaires mais témoignent de la réalité de tels transferts, avec cependant des taux de transfert souvent faibles ;
- le risque pour le consommateur d'eau d'AWG est lié non seulement à la qualité de l'air au niveau du lieu d'implantation de l'AWG, mais aussi aux matériaux utilisés au contact de l'eau, à l'éventuelle inefficacité ou mauvaise utilisation de filtres à charbon, de membranes ou de réacteurs UV ;
- les modalités actuelles de surveillance de la qualité de l'air mises en place en France ne sont pas suffisantes pour garantir une qualité d'air adaptée à la production d'eau par condensation. Cette question est particulièrement critique pour les AWG utilisant de l'air intérieur ;
- de nombreux polluants de l'air peuvent constituer des dangers supplémentaires que la réglementation actuelle sur les EDCH/ERPTC ne prend pas en compte ;
- même si la réglementation française ne prend pas clairement en compte la possibilité de produire des eaux pour la consommation humaine par condensation de vapeur d'eau atmosphérique, de nombreuses dispositions applicables aux EDCH ou aux ERPTC sont pertinentes dans le cas des eaux d'AWG ;
- les AWG étant majoritairement destinés au grand public, les conditions de leur entretien, de leur maintenance et de leur surveillance revêtent une importance majeure afin de ne pas induire de risque sanitaire inacceptable pour les consommateurs mais ne sont pas détaillées et validées par les fabricants ;
- certains fabricants d'AWG mettent en avant des arguments commerciaux concernant des bénéfices pour la santé de la consommation d'eau issue de l'air, sans éléments scientifiques de preuve ;
- certains fabricants d'AWG réalisent un enrichissement de l'eau avec des oligoéléments aux vertus non prouvées et pouvant présenter une toxicité en cas d'exposition chronique des consommateurs. Dans ce cas, l'eau produite n'est plus une EDCH ou ERPTC mais relève de la catégorie réglementaire des BSA.

5.2 Recommandations

5.2.1 Recommandations à destination de la DGS

Les experts considèrent que dans un souci de protection de la santé publique, il importe d'encadrer la mise sur le marché des AWG par des procédures réglementaires adaptées. Un aménagement du cadre réglementaire actuel est indispensable (i) pour clarifier les attendus sanitaires en matière d'AWG, notamment en termes de validation, d'entretien et de maintenance de ces dispositifs et de suivi de la qualité des eaux produites, et (ii) pour encadrer les procédures d'autorisation préfectorales de projets industriels dans ce domaine et les demandes d'AMM pour les dispositifs mobiles.

Les principaux aspects de la réglementation à prendre en considération pour encadrer la mise sur le marché et l'utilisation des AWG sont commentés ci-après.

5.2.1.1 Dispositions réglementaires applicables aux ressources en eau

- le GT considère qu'il serait utile qu'un cadre réglementaire adapté soit mis en place pour l'exploitation de la vapeur d'eau atmosphérique comme ressource pour la production d'EDCH/ERPTC ;
- la transposition *in extenso* au cas des AWG des dispositions relatives aux périmètres de protection n'est pas adaptée, mais le GT recommande de prévoir :
 - pour les particuliers utilisant des AWG, des recommandations concernant le choix d'un lieu d'implantation de ces dispositifs (ou au minimum de la prise d'air) en évitant des locaux où l'atmosphère est particulièrement polluée (ateliers, garages, etc.). La mise hors service des AWG devrait être conseillée en cas de pollution ponctuelle de l'air (alerte à la pollution, épandage de produits phytosanitaires à proximité, incendie, etc.). Ces recommandations relèvent de la notice d'emploi de ces dispositifs ;
 - pour les installations industrielles fixes (par exemple, usine d'embouteillage), de choisir un site peu exposé aux pollutions atmosphériques (en particulier, éloigné de grands axes de circulation, de stations de traitement des eaux usées, de zones de grandes cultures ou de vignobles), de prévoir un suivi de la qualité de l'air extérieur, de définir des dispositions en cas de pollution ponctuelle de l'air (par exemple, incendie à proximité immédiate de l'AWG), voire de fixer des règles spécifiques dans un périmètre à définir autour du site prenant en compte en particulier le risque associé aux épandages agricoles (lisiers, boues, produits phytosanitaires, etc.). Ces exigences pourraient s'inscrire dans une procédure d'autorisation préfectorale des installations (cf. infra) ;
- les exigences de qualité réglementaires actuellement applicables aux eaux brutes « de toutes origines »⁸⁸ utilisées pour la production d'EDCH ne conviennent pas pour les condensats bruts d'AWG. La prise en compte des polluants de l'air relève de l'analyse des risques et est spécifique de chaque situation. En l'état actuel, le GT n'est pas en mesure de proposer des critères de qualité pour les condensats bruts d'AWG ;
- pour les installations de type industriel, la réalisation d'analyses des condensats bruts dans le cadre d'un plan de surveillance mis en œuvre sous la responsabilité de l'exploitant peut présenter un intérêt au vu des éléments d'analyse des risques. Le GT recommande que la nécessité et la nature de telles analyses soient évaluées au cas par cas par l'exploitant ;

⁸⁸ Arrêté du 11 janvier 2007 modifié relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

- en-dehors des essais de validation des performances des AWG, qui impliquent que le pétitionnaire identifie les polluants d'intérêt provenant de l'air, le GT ne considère pas nécessaire de fixer par voie réglementaire une obligation de réalisation d'analyses d'air périodiques au niveau de la prise d'air des AWG. Pour les installations industrielles, l'opportunité, la nature et la fréquence de telles analyses devrait être laissée à l'appréciation du pétitionnaire, au vu des éléments de l'analyse des dangers et notamment en fonction du contexte local (sources de pollution identifiées, conditions météorologiques, etc.) et des procédés technologiques mis en œuvre pour le traitement des condensats bruts.

5.2.1.2 Dispositions relatives à l'autorisation administrative des AWG

Le GT observe que les AWG actuellement commercialisés sont, selon les modèles, des dispositifs mobiles de type « fontaines à eau » destinés à un usage domestique ou à des entreprises et petites collectivités, des dispositifs de type unités mobiles pour des usages spécifiques (intervention humanitaire, sécurité civile, forces armées, etc.), ou des installations fixes industrielles.

Différentes approches sont donc nécessaires selon les modèles pour garantir la sécurité des consommateurs par des procédures administratives d'autorisation adaptées :

- pour une installation fixe de type industriel, spécifique d'une application donnée, réalisant, par exemple, l'embouteillage et la commercialisation à grande échelle de sa production, les procédures actuelles d'autorisation par arrêté préfectoral au cas par cas semblent pouvoir, au prix de quelques adaptations quant à la nature des informations demandées, être applicables ;
- pour les autres dispositifs, par nature mobiles, l'encadrement pourrait prendre la forme d'une autorisation de mise sur le marché nationale instruite par la DGS, permettant au minimum de garantir que, placé dans des conditions d'ambiance adaptées et entretenu conformément aux prescriptions du fabricant, le dispositif permettra de délivrer une eau conforme aux exigences de qualité relatives aux EDCH. Un protocole de test de validation pouvant s'appuyer sur la démarche de sélection des polluants pertinents proposée par le GT en annexe 8 sera à établir. Le dossier de demande d'AMM devra comporter *a minima* les pièces proposées en annexe 10.

Le GT observe que la procédure d'autorisation préalable ne vise qu'à s'assurer que toutes les précautions ont été prises lors de la conception des équipements, mais devra être complétée par la réalisation par l'exploitant / le propriétaire d'AWG d'un ensemble d'actions de maintenance, de surveillance et de vérification dont les modalités seront à définir et à justifier par le fabricant d'AWG dans le cadre de la demande d'autorisation.

Considérant le peu de recul actuel dans le domaine de la production d'eau atmosphérique, le GT recommande que les installations industrielles bénéficiant d'une autorisation préfectorale fassent l'objet d'un contrôle renforcé de la part des services de l'État durant au minimum leur première année de fonctionnement.

5.2.1.3 Dispositions réglementaires relatives aux matériaux

Le GT considère que la réglementation actuelle relative aux MCDE s'applique à tout matériel assurant la production d'eau, donc *de facto* aux AWG. Il considère cependant souhaitable que l'obligation de recourir aux MCDE concerne aussi les surfaces sur lesquelles l'eau est condensée, afin de limiter l'altération de ces surfaces et la pollution des condensats bruts.

Pour les conditionnements unitaires de type cannette ou bouteille, l'obligation de respecter la réglementation MCDA est rappelée par le GT.

Ces dispositions devraient être rappelées aux fabricants qui commercialisent déjà des AWG en France.

Les AWG contenant des composants organiques pourraient obtenir une ACS « Accessoire » ou les preuves de conformité propres à chaque composant de l'appareil. Il est cependant à noter que dans le nouveau système européen, la possibilité d'avoir une ACS « Accessoire », propre à la norme française, n'existera pas en l'absence de l'existence d'une norme d'essai de migration européenne pour les accessoires.

5.2.1.4 Dispositions réglementaires relatives aux produits et procédés de traitement des eaux

Les experts considèrent que les dispositions relatives aux produits et procédés de traitement des EDCH s'appliquent sans réserve aux produits et procédés de traitement mis en œuvre dans les AWG après l'étape de condensation de l'eau. Ces dispositions devraient être rappelées aux fabricants qui commercialisent déjà des AWG en France directement ou par internet. Une consultation des professionnels de cette filière pourrait permettre d'identifier des difficultés spécifiques nécessitant des adaptations réglementaires. Les informations recueillies lors des auditions témoignent que les filières de traitement mises en place au sein des AWG font appel à des procédés classiquement utilisés dans le domaine du traitement des EDCH et ne sont en pratique qu'une juxtaposition de dispositifs ni spécifiques, ni innovants. Il importe en particulier que des recommandations concernant le choix des produits d'entretien – utilisés notamment pour le nettoyage et la désinfection périodiques des AWG – figurent de manière détaillée dans les notices d'utilisation. Ces informations sont particulièrement critiques dans le cas des AWG détenus par des particuliers, peu au fait des contraintes liées aux techniques utilisées et des dispositions réglementaires applicables à la production d'EDCH.

Par ailleurs, le cas particulier des matériaux adsorbants (actuellement les zéolites) doit être pris en compte dans la réglementation afin que des garanties soient apportées quant à leur innocuité (par exemple, par un renvoi à des normes de pureté).

5.2.1.5 Dispositions réglementaires relatives aux fluides caloporteurs

Le GT considère que les dispositions de l'arrêté du 14 janvier 2019 relatif aux conditions de mise sur le marché des produits introduits dans les installations utilisées pour le traitement thermique des EDCH, devraient s'appliquer à l'ensemble des dispositifs frigorifiques des AWG, de l'étape de condensation à la distribution.

5.2.1.6 Dispositions réglementaires relatives au pilotage et à la surveillance de la production

Le GT considère que :

- le cadre réglementaire relatif aux EDCH/ERPTC devrait être aménagé afin que les dispositions actuelles relatives à l'analyse des dangers et des risques, au pilotage et à la surveillance des procédés soient étendues de manière explicite au cas des AWG. En particulier, la pertinence de la filière de traitement de l'eau doit être justifiée par le responsable de la mise sur le marché ;
- pour les dispositifs de type fontaine à eau, les fabricants doivent être encouragés à développer des capteurs permettant à l'utilisateur de détecter, le cas échéant, les dysfonctionnements de l'AWG ; à défaut, la fréquence de remplacement des différents consommables doit être validée par des tests en se plaçant dans les pires conditions

d'installation des AWG (par exemple, atmosphère poussiéreuse ou grasse pour les filtres à air) ;

- des recommandations concernant le choix des produits d'entretien – utilisés notamment pour le nettoyage et la désinfection périodiques des AWG – et des protocoles à respecter doivent figurer de manière détaillée dans les notices d'utilisation. Les fabricants pourraient utilement intégrer des produits d'entretien conformes aux dispositions relatives aux produits utilisés pour le nettoyage et la désinfection des installations de production, de distribution et de conditionnement d'EDCH, à leur catalogue de consommables et veiller à former leurs clients lors de la mise en service d'un AWG ;
- la notice d'utilisation des AWG doit intégrer un ensemble de procédures à respecter par l'utilisateur en termes d'entretien. Ces procédures devraient être inspirées de celles applicables aux fontaines à eau tout en prenant en compte les spécificités des AWG, notamment la présence de dispositifs mettant en jeu des rayonnements UV au niveau des réservoirs de stockage ; leur intégration dans un document réglementaire spécifique pourrait être opportune ;
- la réglementation devrait imposer, pour les dispositifs mobiles, une obligation d'entretien technique au moins annuel par un professionnel spécialisé, comme c'est déjà le cas pour de nombreux autres dispositifs (par exemple, les dispositifs de protection des réseaux au titre de l'arrêté du 10 septembre 2021 relatif à la protection des réseaux d'adduction et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine contre les pollutions par retours d'eau). Cette disposition devrait s'appliquer au minimum aux AWG installés dans des lieux ouverts au public, ERP et lieux de travail.

5.2.1.7 Dispositions réglementaires relatives au contrôle de la qualité des eaux produites

Le GT considère que :

- pour les installations fixes visées par la procédure d'autorisation préfectorale, le contrôle sanitaire s'impose. Il demeure nécessaire de définir des programmes analytiques pertinents pour les eaux issues des AWG, en lien avec l'analyse des risques (et en particulier les polluants amenés par l'air) et des fréquences d'analyses adaptées ;
- pour les autres installations, il serait souhaitable d'imposer, dans le cadre de la visite d'entretien annuel par un professionnel qualifié, la réalisation d'analyses d'eau au minimum pour les paramètres microbiologiques des EDCH. La réalisation d'analyses supplémentaires serait laissée à l'initiative du propriétaire de l'AWG, seul responsable *in fine* de la qualité des eaux.

5.2.2 Recommandations à destination des fabricants d'AWG

Le GT considère que :

- les fabricants des AWG doivent procéder à une analyse des risques sanitaires associés aux équipements qu'ils commercialisent, et pouvoir justifier les choix technologiques réalisés ; ils doivent pouvoir démontrer l'aptitude de ces équipements à produire une eau conforme à la réglementation relative aux EDCH/ERPTC (selon les usages des AWG) en lien avec la qualité de l'air et des condensats bruts produits. Ils doivent s'assurer en particulier que les matériaux, les produits et procédés employés et les procédures d'entretien des équipements n'induisent pas de risque pour les consommateurs (en particulier, choix des produits d'entretien, couplage UV-ozone, etc.) ;

- une évaluation spécifique des agents biologiques, radiologiques (radon pour les AWG captant l'air à l'intérieur de locaux) et chimiques susceptibles d'être présents dans l'air est indispensable, notamment pour une utilisation des AWG en intérieur ;
- les AWG ne devraient être commercialisés en France que dans la mesure où les utilisateurs peuvent disposer d'une notice d'utilisation et d'entretien en français, détaillée et suffisamment explicite pour être comprise par un utilisateur non spécialiste. Parmi les recommandations à intégrer à la notice devraient figurer notamment :
 - un rappel au détenteur qu'il est responsable de la qualité de l'eau produite par l'AWG ;
 - la nécessité de ne pas utiliser un AWG dans un local confiné (veiller à une aération suffisante) en s'assurant notamment que l'hygrométrie soit supérieure à 30 % (cf. 4.1.3.1) ;
 - des recommandations relatives à l'implantation des AWG, loin de sources évidentes de pollution de l'air (locaux où sont entreposés/utilisés des solvants en particulier) ;
 - des indications précises sur les protocoles de maintenance (en particulier, produits à utiliser, instructions pour le nettoyage et la désinfection, fréquence de remplacement des consommables) ;
 - des règles précises en cas d'arrêt prolongé (notamment pour prévenir la colonisation du dispositif par une microflore) ;
 - le suivi analytique de l'eau par le détenteur conseillé suivant le débit d'eau produite)
- les fabricants devraient proposer aux détenteurs d'AWG mobile de souscrire, lors de l'achat, à un contrat d'entretien et de maintenance par du personnel qualifié. Ce type de contrat devrait en particulier prévoir la réalisation d'au minimum une analyse microbiologique annuelle de l'eau ;
- les AWG destinés à un usage domestique devraient être équipés de dispositifs d'alarme, de capteurs, de systèmes automatiques permettant d'interrompre la production d'eau en cas de dysfonctionnement ayant un impact sur la qualité de l'eau, afin de garantir la sécurité des consommateurs ;
- l'analyse de cycle de vie (ACV) des dispositifs mis sur le marché devrait être établie ;
- les fabricants doivent définir des filières de recyclage-valorisation des consommables à l'attention de leurs clients.

5.2.3 Recommandations à destination des exploitants d'installations fixes

Le GT considère que :

- les exploitants d'installations fixes doivent organiser et mettre en œuvre un ensemble d'actions de maîtrise de la qualité des eaux produites, selon les principes définis pour les plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux ;
- ces actions doivent notamment définir une procédure de suivi de la qualité de l'air extérieur en se référant aux données de la surveillance réglementaire (Atmo France⁸⁹) et en ayant recours éventuellement à des capteurs (COV et particules). Cette procédure doit prendre en compte en particulier la gestion des maxima de concentration en polluants dans l'air le cas échéant (arrêt de la production, protection du dispositif de condensation, etc.) ;
- la définition d'une zone de protection autour du site de production est à prévoir afin de limiter les activités susceptibles de générer des pollutions de l'air extérieur au voisinage

⁸⁹ <https://www.atmo-france.org/>.

de l'usine. Si une telle zone n'est pas imposée par voie réglementaire, le GT encourage sa mise en place via un contrat avec les riverains (agriculteurs notamment).

5.2.4 Recommandations à destination des utilisateurs particuliers

Le GT considère que :

- les utilisateurs particuliers (y compris les responsables d'établissements disposant d'AWG) doivent veiller à ne pas installer d'AWG dans des locaux confinés ou pollués ;
- la souscription d'un contrat d'entretien et de maintenance est à privilégier, auprès d'un professionnel qualifié ;
- la réalisation annuelle d'analyses (au minimum microbiologiques) des eaux issues des AWG est à prévoir (paramètres du contrôle sanitaire et *Pseudomonas aeruginosa*) ;
- en cas de raccordement de l'AWG sur un réseau public de distribution d'EDCH, afin de prévenir tout risque de retour d'eau, il est primordial que les prescriptions techniques de la norme NF EN 1717 soient respectées.

5.2.5 Recommandations en matière de recherche scientifique

Le GT recommande que des études soient menées pour pallier le manque de données relatives :

- à la quantification des transferts air-eau de polluants dans les conditions de fonctionnement des AWG ;
- à l'identification des polluants atmosphériques d'intérêt à suivre dans les condensats bruts ;
- aux dispositifs utilisant des adsorbants au vu de la complexité des mécanismes impliqués (capture des particules, impact du chauffage, transferts air-eau-adsorbant).

6 Bibliographie

6.1 Publications

- Abd Elwaddood, Samar N., Ludovic F. Dumée, Yasser Al Wahedi, Ali Al Alili, et Georgios N. Karanikolos. 2022. « Aluminophosphate - Based adsorbents for atmospheric water generation ». *Journal of Water Process Engineering* 49 (octobre) : 103099. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103099>.
- Abd Elwaddood, Samar N., K. Suresh Kumar Reddy, Yasser Al Wahedi, Ali Al Alili, Andreia S. F. Farinha, Geert-Jan Witkamp, Ludovic F. Dumée, et Georgios N. Karanikolos. 2023. « Hybrid salt-enriched micro-sorbents for atmospheric water sorption ». *Journal of Water Process Engineering* 52 (avril) : 103560. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103560>.
- AFIFAE. 2015. « Guide des bonnes pratiques d'hygiène à suivre pour la distribution, l'installation et l'entretien sanitaire de fontaines réseau ». Guide. AFIFAE. <https://www.afifae.fr/wp-content/uploads/2016/10/Guide-des-bonnes-pratiques-dhygiene-fontaines-reseau-20150527.pdf>.
- Alezi, Dalal, Julius J. Oppenheim, Patrick J. Sarver, Andrei Iliescu, Bhavish Dinakar, et Mircea Dincă. 2023. « Tunable Low-Relative Humidity and High-Capacity Water Adsorption in a Bibenzotriazole Metal-Organic Framework ». *Journal of the American Chemical Society* 145 (46) : 25233-41. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c08335>.
- Allou, Lyassine, Lahcen El Maimouni, et Stéphane Le Calvé. 2011. « Henry's law constant measurements for formaldehyde and benzaldehyde as a function of temperature and water composition ». *Atmospheric Environment* 45 (17) : 2991-98. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.044>.
- Amato, P., E. Brisebois, M. Draghi, C. Duchaine, J. Fröhlich-Nowoisky, J.a. Huffman, G. Mainelis, E. Robine, et M. Thibaudon. 2017. « Sampling Techniques ». Dans *Microbiology of Aerosols*, 23-48. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119132318.ch1b>.
- Anses. 2010a. « Evaluation de l'innocuité des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets et de l'efficacité de ces procédés pour la désinfection des eaux destinées à la consommation humaine ». 2013-SA-0190. <https://www.anses.fr/fr/content/evaluation-de-linnocuite-des-reacteurs-equipés-de-lampes-rayonnements-ultraviolets-et-de>.
- . 2010b. « Évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition par ingestion de *Pseudomonas* dans les eaux destinées à la consommation humaine (hors eaux conditionnées) ». 2008-SA-0117. <https://www.anses.fr/fr/content/evaluation-des-risques-sanitaires-lies-lexposition-par-ingestion-de-pseudomonades-dans-les>.
- . 2011. « Etude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) - Tome 1 : contaminants inorganiques, minéraux polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes ». 2006-SA-0361. <https://www.anses.fr/fr/content/%C3%A9tude-de-l%E2%80%99alimentation-totale-eat-2-l%E2%80%99anses-met-%C3%A0-disposition-les-donn%C3%A9es-de-son-analyse>.
- . 2012a. « Avis et rapport d'expertise de l'Anses relatifs à « la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries » ». 2009-SA-0329. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-dexpertise-de-l%E2%80%99anses-relatifs-%C3%A0-%C2%ABla-r%C3%A9utilisation-des-eaux-us%C3%A9es-trait%C3%A9es-0>.

- . 2012b. « Avis de l'Anses relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés aux dépassements de la limite de qualité du sélénium dans les eaux destinées à la consommation humaine - Actualisation de l'avis de l'agence française de sécurité sanitaire des aliments de septembre 2004 ». 2011-SA-0220. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-de-lanses-relatif-levaluation-des-risque-sanitaires-lies-aux-depassement-de-la-limite>.
- . 2013. « Avis de l'Anses relatif à une évaluation des risques sanitaires liés à la présence de strontium dans les eaux destinées à la consommation humaine ». 2012-SA-0262. Anses. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-de-l%E2%80%99agence-nationale-de-s%C3%A9curit%C3%A9-sanitaire-de-l%E2%80%99alimentation-de-l%E2%80%99environnement-et-303>.
- . 2016a. « Utilisation de l'eau de pluie pour le lavage du linge chez les particuliers : les recommandations de l'Anses ». 2015-SA-0037. <https://www.anses.fr/fr/content/utilisation-de-l%E2%80%99eau-de-pluie-pour-le-lavage-du-linge-chez-les-particuliers-les>.
- . 2016b. « Avis et rapport de l'Anses relatif aux moisissures dans le bâti ». Avis et rapport de l'Anses 2014-SA-0016. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-aux-moisissures-dans-le-b%C3%A2ti>.
- . 2017a. « Avis de l'Anses relatif aux normes de qualité de l'air ambiant ». 2016-SA-0092. <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2016SA0092Ra.pdf>.
- . 2017b. « Avis et rapport de l'Anses relatif à l'identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes ». 2012-SA-0236. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-%C3%A0-lidentification-et-analyse-des-diff%C3%A9rentes-techniques>.
- . 2017c. « INCA 3 : Evolution des habitudes et modes de consommation, de nouveaux enjeux en matière de sécurité sanitaire et de nutrition ». 2014-SA-0234. <https://www.anses.fr/fr/content/inca-3-evolution-des-habitudes-et-modes-de-consommation-de-nouveaux-enjeux-en-mati%C3%A8re-de>.
- . 2018. « Polluants « émergents » dans l'air ambiant : identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air ». 2015-SA-0216. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0216Ra.pdf>.
- . 2019a. « Avis et rapport de l'Anses relatif à une caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments ». 2016-SA-0068. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-%C3%A0-une-caract%C3%A9risation-des-transferts-de-pollution-de-lair>.
- . 2019b. « Particules de l'air ambiant extérieur - Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie ». 2014-SA-0156. <https://www.anses.fr/fr/content/rapport-de-lanses-particules-de-lair-ambiant-exterieur-effets-sanitaires-des-particules-de>.
- . 2020a. « État des connaissances relatif à l'impact sanitaire de l'exposition aux moisissures présentes dans l'air ambiant sur la population générale française et recommandations en matière de surveillance nationale ». 2018-SA-0011. <https://anses.hal.science/anses-04515215>.
- . 2020b. « Premières interprétations des résultats de la Campagne Nationale Exploratoire des Pesticides (CNEP) dans l'air ambiant - Mise en perspective avec les données historiques des Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) et premiers éléments d'interprétation sanitaire ». 2020-SA-0030. <https://www.anses.fr/fr/content/pesticides-dans-lair-exterieur-lanses-identifie-les-substances-necessitant-une-evaluation>.

- . 2021a. « Note d'appui scientifique et technique de l'Anses relative au bilan de la qualité de l'air en France en 2020 ». <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2021AST0151.pdf>.
- . 2021b. « Valeurs Guides de qualité d'Air Intérieur (VGAI) ». <https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualite-dair-interieur-vgai>.
- . 2023. « Analyse des fractions granulométriques utilisées pour l'évaluation des expositions par inhalation d'aérosols - Pertinence et comparaison des fractions environnementales - PM10, PM2,5 - et professionnelles - inhalable, thoracique, alvéolaire ». 2018-SA-0076. <https://anses.hal.science/anses-04170323>.
- . 2024. « Avis et rapport de l'Anses relatifs à l'actualisation des valeurs guides de qualité d'air intérieur du benzène (CAS n°71-43-2) ». 2021-MPEX-0006.
- ASTEE. 2017. « Protection des installations d'eau potable vis-à-vis des actes de malveillance ». <https://www.astee.org/publications/protection-des-installations-deau-potable-vis-a-vis-des-actes-de-malveillance/>.
- . 2021. « Initier, mettre en place, faire vivre un PGSSE ». <https://www.astee.org/publications/initier-mettre-en-place-faire-vivre-un-pgsse/>.
- Auerbach, Scott M., Kathleen A. Carrado, et Prabir K. Dutta. 2003. *Handbook of Zeolite Science and Technology*. Boca Raton : CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203911167>.
- Baskaran, Divya, Duraisami Dhamodharan, Uma Sankar Behera, et Hun-Soo Byun. 2024. « A comprehensive review and perspective research in technology integration for the treatment of gaseous volatile organic compounds ». *Environmental Research* 251 (Pt 1) : 118472. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118472>.
- Bautista-Olivas, A.L., J.L. Tovar-Salinas, O.R. Mancilla-Villa, H. Flores-Magdaleno, C. Ramírez-Ayala, R. Arteaga-Ramírez, et M. Vázquez-Peña. 2014. « Trace metals concentration in condensed water from the atmospheric humidity in the valley of Mexico ». *Interciencia* 39 (4) : 234-40.
- Bergmair, D., S. J. Metz, H. C. de Lange, et A. A. van Steenhoven. 2014. « System analysis of membrane facilitated water generation from air humidity ». *Desalination* 339 (avril) : 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.007>.
- Bhushan, Bharat. 2020. « Design of water harvesting towers and projections for water collection from fog and condensation ». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 378 (2167) : 20190440. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0440>.
- Blatny, Janet Martha, Bjørn Anders P. Reif, Gunnar Skogan, Oyvind Andreassen, E. Arne Høiby, Eirik Ask, Viggo Waagen, Dag Aanonsen, Ingeborg S. Aaberge, et Dominique A. Caugant. 2008. « Tracking Airborne Legionella and Legionella pneumophila at a Biological Treatment Plant ». *Environmental Science & Technology* 42 (19) : 7360-67. <https://doi.org/10.1021/es800306m>.
- Blatny, Janet Martha, Hannibal Fossum, Jim Ho, Murat Tutkun, Gunnar Skogan, Oyvind Andreassen, Else Marie Fykse, Viggo Waagen, et Bjorn Anders Pettersson Reif. 2011. « Dispersion of Legionella-containing aerosols from a biological treatment plant, Norway ». *Frontiers in Bioscience (Elite Edition)* 3 (4) : 1300-1309. <https://doi.org/10.2741/e333>.
- Burton, Nancy Clark, Sergey A. Grinshpun, et Tiina Reponen. 2007. « Physical collection efficiency of filter materials for bacteria and viruses ». *The Annals of Occupational Hygiene* 51 (2) : 143-51. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mel073>.

- Cabo Verde, Sandra, Susana Marta Almeida, João Matos, Duarte Guerreiro, Marcia Meneses, Tiago Faria, Daniel Botelho, Mateus Santos, et Carla Viegas. 2015. « Microbiological assessment of indoor air quality at different hospital sites ». *Research in Microbiology*, Special Issue: Trends in Environmental Microbiology for Public Health, 166 (7) : 557-63. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2015.03.004>.
- Cattani, Lucia, Anna Magrini, et Paolo Cattani. 2018. « Water Extraction from Air by Refrigeration— Experimental Results from an Integrated System Application ». *Applied Sciences* 8 (11) : 2262. <https://doi.org/10.3390/app8112262>.
- Cattani, Lucia, Paolo Cattani, et Anna Magrini. 2023. « Air to Water Generator Integrated System Real Application: A Study Case in a Worker Village in United Arab Emirates ». *Applied Sciences* 13 (5) : 3094. <https://doi.org/10.3390/app13053094>.
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). 2024. « CCHST: Confort thermique au bureau ». https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/thermal_comfort.html.
- Chen, Hanlin, Rui Du, Yongtao Zhang, Sujian Zhang, Weishan Ren, et Pengrui Du. 2021. « Survey of background microbial index in inhalable particles in Beijing ». *Science of The Total Environment* 757 (février) : 143743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143743>.
- Chou, Tzu-Chieh, Kuen-Huei Lin, Hamm-Min Sheu, Shih-Bin Su, Chia-Wei Lee, How-Ran Guo, Trong-Neng Wu, et Ho-Yuan Chang. 2007. « Alterations in health examination items and skin symptoms from exposure to ultra-low humidity ». *International Archives of Occupational and Environmental Health* 80 (4) : 290-97. <https://doi.org/10.1007/s00420-006-0133-4>.
- Clus, Owen. 2007. « Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce ». Phdthesis, Université Pascal Paoli. <https://theses.hal.science/tel-00320450>.
- Costa, D., A. Bousseau, S. Thevenot, X. Dufour, C. Laland, C. Burucoa, et O. Castel. 2015. « Nosocomial outbreak of *Pseudomonas aeruginosa* associated with a drinking water fountain ». *Journal of Hospital Infection* 91 (3) : 271-74. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2015.07.010>.
- Courault, D., I. Albert, S. Perelle, A. Fraisse, P. Renault, A. Salemkour, et P. Amato. 2017. « Assessment and risk modeling of airborne enteric viruses emitted from wastewater reused for irrigation ». *Science of The Total Environment* 592 (août) : 512-26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.105>.
- Ding, Li, Benito J. Mariñas, Lance C. Schideman, Vernon L. Snoeyink, et Qilin Li. 2006. « Competitive Effects of Natural Organic Matter: Parametrization and Verification of the Three-Component Adsorption Model COMPSORB ». *Environmental Science & Technology* 40 (1) : 350-56. <https://doi.org/10.1021/es050409u>.
- Educational, United Nations, et Scientific and Cultural Organization. 2019. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019: Ne laisser personne pour compte*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/42f64a51-fr>.
- . 2020. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020: L'eau et les changements climatiques*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/ed8b1d0f-fr>.
- . 2024. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024: L'Eau pour la prospérité et la paix*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/9789213589120>.

- Entezari, Akram, Mojtaba Ejeian, et Ruzhu Wang. 2019. « Modifying water sorption properties with polymer additives for atmospheric water harvesting applications ». *Applied Thermal Engineering* 161 (octobre) : 114109. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114109>.
- Fathieh, Farhad, Markus J. Kalmutzki, Eugene A. Kapustin, Peter J. Waller, Jingjing Yang, et Omar M. Yaghi. 2018. « Practical water production from desert air ». *Science Advances* 4 (6) : eaat3198. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3198>.
- Feng, An, Nawshad Akther, Xiaofei Duan, Shuhua Peng, Casey Onggowarsito, Shudi Mao, Qiang Fu, et Spas D. Kolev. 2022. « Recent Development of Atmospheric Water Harvesting Materials: A Review ». *ACS Materials Au* 2 (5) : 576-95. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.2c00027>.
- Freed, Arthur N., et Michael S. Davis. 1999. « Hyperventilation with Dry Air Increases Airway Surface Fluid Osmolality in Canine Peripheral Airways ». *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 159 (4) : 1101-7. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.159.4.9802072>.
- Fröhlich-Nowoisky, Janine, Christopher J. Kampf, Bettina Weber, J. Alex Huffman, Christopher Pöhlker, Meinrat O. Andreae, Naama Lang-Yona, et al. 2016. « Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions ». *Atmospheric Research* 182 (décembre) : 346-76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>.
- Gimeno, Luis, Jorge Eiras-Barca, Ana María Durán-Quesada, Francina Dominguez, Ruud van der Ent, Harald Sodemann, Ricardo Sánchez-Murillo, Raquel Nieto, et James W. Kirchner. 2021. « The residence time of water vapour in the atmosphere ». *Nature Reviews Earth & Environment* 2 (8) : 558-69. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00181-9>.
- Gschneidner, Jr, V. K. Pecharsky, David Jiles, et Carl B. Zimm. 2001. « Development of vehicle magnetic air conditioner (VMAC) technology. Final report ». Iowa State University, Ames, Iowa (US); Astronautics Corporation of America, Astronautics Technology Center, Madison, WI (US). <https://doi.org/10.2172/771244>.
- Guisnet, Michel, et Ludovic Pinard. 2018. « Zéolithes - De la synthèse aux applications ». *Techniques de l'Ingénieur*, J6675 v2, , juillet. <https://doi.org/10.51257/a-v2-j6675>.
- Habeebullah, Badr A. 2009. « Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas ». *Desalination*, Issue 1: Water Resources Management: New Approaches and Technologies, 237 (1) : 330-45. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.01.025>.
- Hanikel, Nikita, Mathieu S. Prévot, Farhad Fathieh, Eugene A. Kapustin, Hao Lyu, Haoze Wang, Nicolas J. Diercks, T. Grant Glover, et Omar M. Yaghi. 2019. « Rapid Cycling and Exceptional Yield in a Metal-Organic Framework Water Harvester ». *ACS Central Science* 5 (10) : 1699-1706. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00745>.
- Harvey, Allan H., et Francis L. Smith. 2007. « Avoid Common Pitfalls when using Henry's Law ». *NIST* 103 (9) : 33-39.
- Hassan, Muhd Hazwan Hisyam Bin Abu, Ali Riahi, Mohd Remy Rozainy Mohd Arif Zainol, Nor Azazi Zakaria, Azman Mat Jusoh, Mohd Fazly Yusof, et Syafiq Shaharuddin. 2023. « Daily fresh water production from Malaysia's urban atmosphere using 6 thermoelectric cooling units ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1238 (1) : 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1238/1/012013>.
- Hong, Lei, Bin Zhu, Xingna Yu, Shuangshuang Shi, Kui Chen, et Li Xia. 2019a. « Chemical composition of dew water at a suburban site in Nanjing, China, during the 2016–2017 winter ». *Atmospheric Environment* 211 (août) : 226-33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.008>.

- . 2019b. « Chemical composition of dew water at a suburban site in Nanjing, China, during the 2016–2017 winter ». *Atmospheric Environment* 211 (août) : 226-33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.008>.
- Inbar, Offir, Alexandra Chudnovsky, Kevin Ohneiser, Albert Ansmann, Stanislav Ratner, Roman Sirota, Yaron Aviv, et Dror Avisar. 2021. « Air-water interactions: The signature of meteorological and air-quality parameters on the chemical characteristics of water produced from the atmosphere ». *Science of The Total Environment*, vol. 790, p. 147940. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147940>.
- Inbar, Offir, Igal Gozlan, Stanislav Ratner, Yaron Aviv, Roman Sirota, et Dror Avisar. 2020. « Producing Safe Drinking Water Using an Atmospheric Water Generator (AWG) in an Urban Environment ». *Water* 12 (10) : 2940. <https://doi.org/10.3390/w12102940>.
- INERIS. 2010. « Bilan des mesures et perspectives pour la surveillance du mercure dans l'air ambiant en France au titre de la Directive Européenne | LCSQA ». 2024. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2010/ineris/bilan-mesures-perspectives-surveillance-mercure-air-ambiant-france-titre-directi>.
- . 2015. « Paramètres physico-chimiques des substances prédéfinies dans le logiciel MODUL'ERS ». Rapport d'appui/Guides. <https://www.ineris.fr/fr/parametres-physico-chimiques-substances-predefinies-logiciel-modul-ers>.
- INRS. 2005. « Adsorption - Fiche - Traitement des gaz dangereux captés sur les lieux de travail ». <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204263>.
- . 2021a. « Conception des lieux et des situations de travail ». <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20950>.
- . 2021b. « Lithium et composés (FT 183). Généralités - Fiche toxicologique ». https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_183.
- Institut national de santé publique du Québec. 2019. *Analyse de l'efficacité des dispositifs d'épuration de l'air intérieur en milieu résidentiel* | INSPQ. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2543>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. « AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 ». Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Jahne, M, S Pfaller, J Garland, et C Impellitteri. 2018. « Evaluation of Atmospheric Water Generation Technology: Microbial Water Quality ». EPA/600/R-18/379. United States Environmental Protection Agency. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryId=343997&Lab=NERL.
- Jaubert, Jean-Noël, et Louis Schuffenecker. 1997. « Pressions de vapeur saturantes des composés organiques ». *Techniques de l'Ingénieur*, juin 1997. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/caracterisations-thermodynamiques-42341210/pressions-de-vapeur-saturantes-des-composes-organiques-k670/>.
- Kaplan, Aviv, Gefen Ronen-Eliraz, Stanislav Ratner, Yaron Aviv, Yitzhak Wolanov, et Dror Avisar. 2023. « Impact of industrial air pollution on the quality of atmospheric water production ». *Environmental Pollution* 325 (mai) : 121447. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121447>.
- Karadag, Doğan, Yunus Koc, Mustafa Turan, et Bulent Armagan. 2006. « Removal of ammonium ion from aqueous solution using natural Turkish clinoptilolite ». *Journal of Hazardous Materials* 136 (3) : 604-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.042>.

- Kim, Hyunho, Sameer R. Rao, Eugene A. Kapustin, Lin Zhao, Sungwoo Yang, Omar M. Yaghi, et Evelyn N. Wang. 2018. « Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates ». *Nature Communications* 9 (1) : 1191. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03162-7>.
- Kinder, Katherine M., Christopher A. Gellasch, James S. Dusenbury, Thomas C. Timmes, et Thomas M. Hughes. 2017. « Evaluating the impact of ambient benzene vapor concentrations on product water from Condensation Water From Air technology ». *Science of The Total Environment* 590-591 (juillet) : 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.171>.
- KWR Water Research Institute. 2019. « VO Alternatieve bronnen voor drinkwater. Achtergronddocument inventarisatie alternatieve bronnen ». BTO rapport BTO 2019.017. KWR Water Research Institute. <https://library.kwrwater.nl/publication/59515504/vo-alternatieve-bronnen-voor-drinkwater-achtergronddocument-inventarisatie-alternatieve-bronnen/>.
- Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). 2021. « Liste des polluants d'intérêt national ». <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/liste-des-polluants-dinteret-national>.
- Lalande, V., F. Barbut, A. Varnerot, M. Febvre, D. Nesa, S. Wadel, V. Vincent, et J. -C. Petit. 2001. « Pseudo-outbreak of *Mycobacterium gordonae* associated with water from refrigerated fountains ». *Journal of Hospital Infection* 48 (1) : 76-79. <https://doi.org/10.1053/jhin.2000.0929>.
- Legube, Bernard. 2021. *Production d'eau potable - 2e édition - Procédés de traitement, paramètres de qualité, impacts du changement climatique*. Dunod. Technique et ingénierie. <https://www.dunod.com/sciences-techniques/production-d-eau-potable-procedes-traitement-parametres-qualite-impacts-du>.
- Lewis, W. K., et W. G. Whitman. 1924. « Principles of Gas Absorption. » *Industrial & Engineering Chemistry* 16 (12) : 1215-20. <https://doi.org/10.1021/ie50180a002>.
- Li, Renyuan, Yusuf Shi, Mossab Alsaedi, Mengchun Wu, Le Shi, et Peng Wang. 2018. « Hybrid Hydrogel with High Water Vapor Harvesting Capacity for Deployable Solar-Driven Atmospheric Water Generator ». *Environmental Science & Technology* 52 (19) : 11367-77. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02852>.
- Li, Kai, Qian Su, Shu Li, Gang Wen, et Tinglin Huang. 2021. « Aging of PVDF and PES ultrafiltration membranes by sodium hypochlorite: Effect of solution pH ». *Journal of Environmental Sciences* 104 (juin) : 444-55. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.12.020>.
- Li, Kai, Weihua Xu, Gang Wen, Zhipeng Zhou, Min Han, Shujia Zhang, et Tinglin Huang. 2022. « Aging of polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane due to ozone exposure in water treatment: Evolution of membrane properties and performance ». *Chemosphere* 308 (décembre) : 136520. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136520>.
- Lindblom, Jenny, et Bo Nordell. 2006. « Water production by underground condensation of humid air ». *Desalination*, Selected paper from the 10th Aachen Membrane Colloquium, 189 (1) : 248-60. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.08.002>.
- Logan, Matthew W., Spencer Langevin, et Zhiyong Xia. 2020. « Reversible Atmospheric Water Harvesting Using Metal-Organic Frameworks ». *Scientific Reports* 10 (1) : 1492. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58405-9>.
- Loo, Siew-Leng, Lía Vásquez, Athanassia Athanassiou, et Despina Fragouli. 2021. « Polymeric Hydrogels—A Promising Platform in Enhancing Water Security for a Sustainable Future ». *Advanced Materials Interfaces* 8 (24) : 2100580. <https://doi.org/10.1002/admi.202100580>.

- Loveday, H. P., J. A. Wilson, K. Kerr, R. Pitchers, J. T. Walker, et J. Browne. 2014. « Association between healthcare water systems and *Pseudomonas aeruginosa* infections: a rapid systematic review ». *Journal of Hospital Infection* 86 (1) : 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2013.09.010>.
- Lyu, Tong, Zhaoyang Wang, Ruonan Liu, Kun Chen, He Liu, et Ye Tian. 2022. « Macroporous Hydrogel for High-Performance Atmospheric Water Harvesting ». *ACS applied materials & interfaces* 14 (28) : 32433-43. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c04228>.
- Magrini, A., L. Cattani, M. Cartesegna, et L. Magnani. 2015. « Integrated Systems for Air Conditioning and Production of Drinking Water – Preliminary Considerations ». *Energy Procedia*, Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015), 75 (août) : 1659-65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.406>.
- Mandal, Chandra Sekhar, Mandira Agarwal, Vijaybhaskar Reddy, et Vamsi Krishna Kudapa. 2021. « Water from air – A sustainable source of water ». *Materials Today: Proceedings*, International Conference on Materials, Manufacturing and Mechanical Engineering for Sustainable Developments-2020 (ICMSD 2020), 46 (janvier) : 3352-57. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.477>.
- Maus, R, A Goppelsröder, et H Umhauer. 2001. « Survival of bacterial and mold spores in air filter media ». *Atmospheric Environment* 35 (1) : 105-13. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00280-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00280-6).
- Mena, Kristina D., et Charles P. Gerba. 2009. « Risk assessment of *Pseudomonas aeruginosa* in water ». *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 201 : 71-115. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0032-6_3.
- Metz, S. J., W. J. C. van de Ven, M. H. V. Mulder, et M. Wessling. 2005. « Mixed gas water vapor/N₂ transport in poly(ethylene oxide) poly(butylene terephthalate) block copolymers ». *Journal of Membrane Science* 266 (1) : 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.05.010>.
- Milani, Dia, Abdul Qadir, Anthony Vassallo, Matteo Chiesa, et Ali Abbas. 2014. « Experimentally validated model for atmospheric water generation using a solar assisted desiccant dehumidification system ». *Energy and Buildings* 77 (juillet) : 236-46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.041>.
- Ming, Tingzhen, Tingrui Gong, Renaud K. de Richter, Yongjia Wu, et Wei Liu. 2017. « A moist air condensing device for sustainable energy production and water generation ». *Energy Conversion and Management* 138 (avril) : 638-50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.012>.
- Ministère de la santé et des solidarités. 2005. « Guide technique de l'eau dans les établissements de santé ». Ministère de la santé et des solidarités. <https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/article/qualite-de-l-eau-dans-les-etablissements-de-sante>.
- Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. 2023. *THÉMA - La France face aux neuf limites planétaires*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/avant-propos>.
- Miranzadeh, Mohammad Bagher, Davarkhah Rabbani, Gholamreza Mostafaii, Hossein Akbari, Mohsen Hesami Arani, et Fatemeh Mohebbi. 2022. « A study on quantitative and qualitative characteristics of water obtained from the air conditioning systems ». *Desalination and Water Treatment* 261 (juin) : 249-55. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28539>.

- Mittal, Himanshu, Simon R. Parks, Thomas Pottage, James T. Walker, et Allan M. Bennett. 2011. « Survival of Microorganisms on HEPA Filters ». *Applied Biosafety* 16 (3) : 163-66. <https://doi.org/10.1177/153567601101600305>.
- Mollard, Éric, et Annie Walter, dir. 2008. « Chapitre 7. Freiner l'évaporation et retenir les brouillards ». Dans *Agricultures singulières*. Guides illustrés. Marseille : IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.2865>.
- Möritz, Martin, Hans Peters, Bettina Nipko, et Hennin Rüden. 2001. « Capability of air filters to retain airborne bacteria and molds in heating, ventilating and air-conditioning (HVAC) systems ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 203 (5) : 401-9. <https://doi.org/10.1078/1438-4639-00054>.
- Mulchandani, Anjali, Justin Edberg, Pierre Herckes, et Paul Westerhoff. 2022. « Seasonal atmospheric water harvesting yield and water quality using electric-powered desiccant and compressor dehumidifiers ». *Science of The Total Environment* 825 (juin) : 153966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153966>.
- Muselli, Marc. 2007. « Systèmes énergétiques pour la production d'eau douce potable et d'électricité », septembre.
- Nikkhah, Hasan, Wan Mujiburahman Bin Wan Azmi, Ali Nikkhah, Amir Mohammad Najafi, Mohsen Mesbahi Babaei, Chua Siew Fen, Alireza Nouri, et al. 2023. « A comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies: From thermodynamic concepts to mechanism and process development ». *Journal of Water Process Engineering* 53 (juillet) : 103728. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103728>.
- Norbäck, Dan, Torsten Lindgren, et Gunilla Wieslander. 2006. « Changes in ocular and nasal signs and symptoms among air crew in relation to air humidification on intercontinental flights ». *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 32 (2) : 138-44. <https://doi.org/10.5271/sjweh.989>.
- Organisation Mondiale de la Santé. 2021. « Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air - Particules (PM_{2,5} et PM₁₀), ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone ». <https://www.who.int/fr/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>.
- . 2022. *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>.
- Pan, Fusheng, Huiping Jia, Shizhang Qiao, Zhongyi Jiang, Jingtao Wang, Baoyi Wang, et Yurong Zhong. 2009. « Bioinspired fabrication of high performance composite membranes with ultrathin defect-free skin layer ». *Journal of Membrane Science* 341 (1) : 279-85. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.06.020>.
- Peeters, Robin, Hannah Vanderschaeghe, Jan Rongé, et Johan A. Martens. 2020. « Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour ». *Environmental Science: Water Research & Technology* 6 (8) : 2016-34. <https://doi.org/10.1039/D0EW00128G>.
- . 2021. « Fresh water production from atmospheric air: Technology and innovation outlook ». *iScience* 24 (11) : 103266. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103266>.
- Potreck, Jens, Kitty Nijmeijer, Thomas Kosinski, et Matthias Wessling. 2009. « Mixed water vapor/gas transport through the rubbery polymer PEBAX® 1074 ». *Journal of Membrane Science* 338 (1) : 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.03.051>.

- Qian, Qihui, Patrick A. Asinger, Moon Joo Lee, Gang Han, Katherine Mizrahi Rodriguez, Sharon Lin, Francesco M. Benedetti, Albert X. Wu, Won Seok Chi, et Zachary P. Smith. 2020. « MOF-Based Membranes for Gas Separations ». *Chemical Reviews* 120 (16) : 8161-8266. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00119>.
- Richardson, Susan D., Michael J. Plewa, Elizabeth D. Wagner, Rita Schoeny, et David M. Demarini. 2007. « Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research ». *Mutation Research* 636 (1-3) : 178-242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>.
- Roques-Latrille, C. -F., J. Hubert, Y. Lévi, J. -M. Bourre, R. Ardaillou, C. Buffet, C. Géraut, et al. 2022. « Rapport sur les mentions d'étiquetage des eaux conditionnées (Saisine Direction générale de la santé – DGS – du 16 juin 2021) ». *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 206 (5) : 579-90. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2022.03.003>.
- Rouil, L, G Gardenas, et F Marcel. 2004. « Evaluation de la dispersion atmosphérique d'aérosols potentiellement contaminés lors de l'épidémie de légionellose de la région de Lens. » *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire*, Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire, n° 36-37 : 182-84.
- Roustan, Michel. 2003. *Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux*. Tec et Doc - Lavoisier. <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/transferts-gaz-liquide-dans-les-procedes-de-traitement-des-eaux-et-des-effluents-gazeux-9782743006051/>.
- . 2016. « Absorption en traitement d'air ». *Techniques de l'Ingénieur*, 2016. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/traitements-de-l-air-42600210/absorption-en-traitement-d-air-g1750/>.
- Sabourin, Nadine, Akram Kabani, Wajdi Mobarak, Jean-Christophe Rollo, et Dominique Huchon-Bécel. 2011. « Maîtrise de la contamination des fontaines réfrigérantes par *Pseudomonas aeruginosa* dans un hôpital de gériatrie ». *Cahiers de l'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé* 16 (1) : 1-5. <https://doi.org/10.1051/asees/2011204>.
- Sabria, M., J. Alvarez, A. Dominguez, A. Pedrol, G. Sauca, L. Salleras, A. Lopez, M. A. Garcia-Nuñez, I. Parron, et M. P. Barrufet. 2006. « A community outbreak of Legionnaires' disease: evidence of a cooling tower as the source ». *Clinical Microbiology and Infection: The Official Publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases* 12 (7) : 642-47. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2006.01447.x>.
- Salehi, Ali Akbar, Mohammad Ghannadi-Maragheh, Meisam Torab-Mostaedi, Rezvan Torkaman, et Mehdi Asadollahzadeh. 2020. « A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120 (mars) : 109627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109627>.
- Sander, Rolf. 2023. « Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 23 (19) : 10901-440. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023>.
- Santé Canada. 2019. « Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Document technique - Le strontium ». Document technique. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-strontium.html>.
- Shan, He, Quanwen Pan, Chengjie Xiang, Primož Poredoš, Qiuming Ma, Zhanyu Ye, Guodong Hou, et Ruzhu Wang. 2021. « High-yield solar-driven atmospheric water harvesting with ultra-high salt content composites encapsulated in porous membrane ». *Cell Reports Physical Science* 2 (12) : 100664. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100664>.

- Shemelin, Viacheslav, Nikola Pokorny, et Jiri Novotny. 2022. « Experimental investigation of silica gel and zeolite coated fin-tube heat exchangers under arid climatic conditions ». *Energy Reports*, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 8 (novembre) : 331-41. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.115>.
- Sidheswaran, Meera A., Hugo Destailats, Douglas P. Sullivan, Sebastian Cohn, et William J. Fisk. 2012. « Energy efficient indoor VOC air cleaning with activated carbon fiber (ACF) filters ». *Building and Environment*, International Workshop on Ventilation, Comfort, and Health in Transport Vehicles, 47 (janvier) : 357-67. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.002>.
- Sirota Ryan, Gidon Winters, Oren Levy, Joseane Marques, Adina Paytan, Jack Silverman, Guy Sisma-Ventura, Eyal Rahav, Gilad Antler, et Edo Bar-Zeev. 2024. « Impacts of Desalination Brine Discharge on Benthic Ecosystems ». *Environmental Science & Technology* 58 (13) : 5631-45. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07748>.
- Solís-Chaves, J. S., C. M. Rocha-Osorio, A. L. L. Murari, Valdemir Martins Lira, et Alfeu J. Sguarezi Filho. 2018. « Extracting potable water from humid air plus electric wind generation: A possible application for a Brazilian prototype ». *Renewable Energy* 121 (juin) : 102-15. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.039>.
- Somashekar, V., A. Vivek Anand, V. Hariprasad, Emad M. Elsehly, et Mofwe Kapulu. 2023. « Advancements in saline water treatment: a review ». *Journal of Water Reuse and Desalination* 13 (3) : 475-91. <https://doi.org/10.2166/wrd.2023.065>.
- Song, Woochul, Zhiling Zheng, Ali H. Alawadhi, et Omar M. Yaghi. 2023. « MOF water harvester produces water from Death Valley desert air in ambient sunlight ». *Nature Water* 1 (7) : 626-34. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00103-7>.
- Squinazi, F., et X. Pellet. 2010. « La sécurisation microbiologique de l'eau à son point d'usage : l'apport de la technologie Behring™ ». *Hygiènes XVIII* (3) : 235-38.
- Squinazi, F., K. Vandermeulen, et X. Pellet. 2011. « Étude d'une fontaine réfrigérante sécurisée dans quinze établissements de santé ». *Hygiènes, Hygiènes, XIX* (4) : 221-26.
- Sultan, Muhammad, Muhammad Bilal, Takahiko Miyazaki, Uzair Sajjad, Fiaz Ahmad, Muhammad Sultan, Muhammad Bilal, Takahiko Miyazaki, Uzair Sajjad, et Fiaz Ahmad. 2021. « Adsorption-Based Atmospheric Water Harvesting: Technology Fundamentals and Energy-Efficient Adsorbents ». Dans *Technology in Agriculture*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97301>.
- Tao, Yile, Xiaole Zhang, Guangyu Qiu, Martin Spillmann, Zheng Ji, et Jing Wang. 2022. « SARS-CoV-2 and other airborne respiratory viruses in outdoor aerosols in three Swiss cities before and during the first wave of the COVID-19 pandemic ». *Environment International* 164 (juin) : 107266. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107266>.
- Tashtoush, Bourhan, et Anas Alshoubaki. 2023. « Atmospheric water harvesting: A review of techniques, performance, renewable energy solutions, and feasibility ». *Energy* 280 (octobre) : 128186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128186>.
- Tchoryk, Carl. 2011. « Analyse de l'impact des incertitudes du procédé de bio-séchage sur sa viabilité économique ». Masters, École Polytechnique de Montréal. <https://publications.polymtl.ca/662/>.
- Tetillon, Arnaud. 2012. « Les risques sanitaires des fontaines réfrigérantes. » Ecole des hautes études en santé publique (EHESP). https://documentation.ehesp.fr/index.php?lvl=notice_display&id=246220.

- Thavalengal, Mohammed Sanjid, Muhammad Ahmad Jamil, Muhammad Mehroz, Ben Bin Xu, Haseeb Yaqoob, Muhammad Sultan, Nida Imtiaz, et Muhammad Wakil Shahzad. 2023. « Progress and Prospects of Air Water Harvesting System for Remote Areas: A Comprehensive Review ». *Energies* 16 (6): 2686. <https://doi.org/10.3390/en16062686>.
- UNESCO. 2019. *The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306.locale=fr>.
- . 2020. *The United Nations world water development report 2020: water and climate change*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985>.
- . 2024. *The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>.
- UNESCO et UN-Water. 2022. *The United Nations World Water Development Report 2022: groundwater: making the invisible visible*. UNESCO. <https://digitallibrary.un.org/record/3967679>.
- US-EPA. 2006. « 2006 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories ». United States Environmental Protection Agency. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1004X78.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006+Thru+2010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C06thru10%5C Txt%5C00000009%5CP1004X78.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Result%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>.
- . 2018. « Residential Air Cleaners - A Technical Summary - 3rd Edition ». EPA 402-F-09-002. EPA Indoor Environments Division. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-07/documents/residential_air_cleaners_-_a_technical_summary_3rd_edition.pdf.
- Vassileva, Paunka, et Dimitrinka Voikova. 2009. « Investigation on natural and pretreated Bulgarian clinoptilolite for ammonium ions removal from aqueous solutions ». *Journal of Hazardous Materials* 170 (2) : 948-53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.062>.
- Verreault, Daniel, Sylvain Moineau, et Caroline Duchaine. 2008. « Methods for sampling of airborne viruses ». *Microbiology and molecular biology reviews: MMBR* 72 (3) : 413-44. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00002-08>.
- Wahlgren, Roland V. 2001. « Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: a review ». *Water Research* 35 (1) : 1-22. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00247-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00247-5).
- . 2016. *Water-from-Air Quick Guide: Second Edition*. CreateSpace Independent Publishing Platform. <https://www.atmoswater.com/>.
- Wang, Menglu, Enke Liu, Tao Jin, Saud-uz Zafar, Xurong Mei, Marie-Laure Fauconnier, et Caroline De Clerck. 2024. « Towards a better understanding of atmospheric water harvesting (AWH) technology ». *Water Research* 250 (février) : 121052. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121052>.
- Wolkoff, Peder. 2018. « Indoor air humidity, air quality, and health – An overview ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221 (3) : 376-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.015>.

- Yan, T. S., T. X. Li, J. X. Xu, et R. Z. Wang. 2019. « Water sorption properties, diffusion and kinetics of zeolite NaX modified by ion-exchange and salt impregnation ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 139 (août) : 990-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.080>.
- Yao, Meng, Qiong Zhang, David W. Hand, David L. Perram, et Roy Taylor. 2009. « Investigation of the Treatability of the Primary Indoor Volatile Organic Compounds on Activated Carbon Fiber Cloths at Typical Indoor Concentrations ». *Journal of the Air & Waste Management Association*, juillet. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3155/1047-3289.59.7.882>.
- Ye, Ni, Nicolas Cimetiere, Véronique Heim, Nils Fauchon, Cédric Feliers, et Dominique Wolbert. 2019. « Upscaling fixed bed adsorption behaviors towards emerging micropollutants in treated natural waters with aging activated carbon: Model development and validation ». *Water Research* 148 (janvier) : 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.029>.
- Yu, B. F., Z. B. Hu, M. Liu, H. L. Yang, Q. X. Kong, et Y. H. Liu. 2009. « Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health ». *International Journal of Refrigeration* 32 (1) : 3-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.05.004>.
- Zhang, Yinping, Jinhan Mo, Yuguo Li, Jan Sundell, Pawel Wargocki, Jensen Zhang, John C. Little, et al. 2011. « Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review ». *Atmospheric Environment* 45 (26) : 4329-43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.041>.
- Zhang, Yufei, Lei Wu, Xianfeng Wang, Jianyong Yu, et Bin Ding. 2020. « Super hygroscopic nanofibrous membrane-based moisture pump for solar-driven indoor dehumidification ». *Nature Communications* 11 (1) : 3302. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17118-3>.
- Zhang, Zhibin, Yajun Wang, Zheng Li, Hiroshi Fu, Jianying Huang, Zhiwei Xu, Yuekun Lai, Xiaoming Qian, et Songnan Zhang. 2022. « Sustainable Hierarchical-Pored PAAS–PNIPAAm Hydrogel with Core–Shell Structure Tailored for Highly Efficient Atmospheric Water Harvesting ». *ACS Applied Materials & Interfaces* 14 (49) : 55295-306. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c19840>.
- Zhao, Fei, Xingyi Zhou, Yi Liu, Ye Shi, Yafei Dai, et Guihua Yu. 2019. « Super Moisture-Absorbent Gels for All-Weather Atmospheric Water Harvesting ». *Advanced Materials* 31 (10) : 1806446. <https://doi.org/10.1002/adma.201806446>.
- Zhao, Huizhong, Zhaoyang Wang, Qianwen Li, Tianhao Wu, Min Zhang, et Qiqi Shi. 2020. « Water sorption on composite material “zeolite 13X modified by LiCl and CaCl₂” ». *Microporous and Mesoporous Materials* 299 (juin) : 110109. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110109>.

6.2 Normes

- AFNOR. 1993. « NF EN 481. Atmosphères des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air ». <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-481/atmospheres-des-lieux-de-travail-definition-des-fractions-de-taille-pour-le/fa023869/14589>.
- . 1996. « NF ISO 7708. Qualité de l'air - Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé ». <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-iso-7708/qualite-de-lair-definitions-des-fractions-de-taille-des-particules-pour-lec/fa027572/14601>.
- . 2012. « Norme NF EN 779. Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration. » <https://www.boutique.afnor.org/fr>

[fr/norme/nf-en-779/filtres-a-air-de-ventilation-generale-pour-lelimination-des-particules-de/fa157934/39920](https://www.boutique.afnor.org/fr-norme/nf-en-779/filtres-a-air-de-ventilation-generale-pour-lelimination-des-particules-de/fa157934/39920).

- . 2013. « Norme NF EN 1018. Produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine - Carbonate de calcium. » <https://www.boutique.afnor.org/fr-norme/nf-en-1018/produits-chimiques-utilises-pour-le-traitement-de-leau-destinee-a-la-consom/fa174983/41571>.
- . 2014a. « NF EN 12341. Air ambiant - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2,5 de matière particulaire en suspension. » <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12341/air-ambiant-methode-normalisee-de-mesurage-gravimetrique-pour-la-determinat/fa156445/43417>.
- . 2014b. « NF EN 16070. Produits utilisés pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine - Zéolite naturelle ». <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-16070/produits-utilises-pour-le-traitement-de-leau-destinee-a-la-consommation-hum/fa179067/43023>.
- . 2017. « NF EN ISO 16890-1. Filtres à air de ventilation générale - Partie 1 : spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension (ePM). » <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-168901/filtres-a-air-de-ventilation-generale-partie-1-specifications-techniques-ex/fa171284/59143>.
- . 2018. « NF EN ISO 22000. Systèmes de management de la sécurité des denrées alimentaires - Exigences pour tout organisme appartenant à la chaîne alimentaire ». <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-22000/systemes-de-management-de-la-securite-des-denrees-alimentaires-exigences-po/fa188363/1748>.
- American Society of Sanitary Engineering (ASSE). 2020. « ASSE/ANSI 1090-2020e1. Performance Requirements for Drinking Water Atmospheric Water Generators (AWG) ». https://store accuristech.com/standards/asse-plumbing-1090-2020e1?product_id=2202836&srsId=AfmBOoq4BiWNIkV2BdHlsxNpVd07BiZg5pXLkY47OmP_4u4i8veCdCyV.
- NSF. 2023. « NSF P343. Health and Sanitation Requirements for Atmospheric Water Generators. » <https://info.nsf.org/Certified/protocols/listings.asp?standard=P343>.

6.3 Législation et réglementation

- European Union Law. 1996. *Directive 96/62/CE du conseil du 27 septembre 1996 concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant*. OJ L. Vol. 296. <http://data.europa.eu/eli/dir/1996/62/oj/fra>.
- . 1998. *Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine*. OJ L. Vol. 330. <http://data.europa.eu/eli/dir/1998/83/oj/fra>.
- . 1999. *Directive 1999/13/CE du Conseil du 11 mars 1999 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations*. OJ L. Vol. 085. <http://data.europa.eu/eli/dir/1999/13/oj/fra>.
- . 2001. *Directive 2001/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 3 décembre 2001 relative à la sécurité générale des produits (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*. OJ L. Vol. 011. <http://data.europa.eu/eli/dir/2001/95/oj/fra>.

- . 2004. Directive 2004/107/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant. OJ L. Vol. 023. <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj/fra>.
- . 2008. Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. OJ L. Vol. 152. <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/fra>.
- . 2012. Règlement (UE) n ° 528/2012 du Parlement européen et du Conseil du 22 mai 2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. OJ L. Vol. 167. <http://data.europa.eu/eli/reg/2012/528/oj/fra>.
- . 2013. Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom - Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000028525741>.
- . 2020. Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (refonte) (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). OJ L. Vol. 435. <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/fra>.
- . 2024. 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. http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2024/365/oj/fra.
- . 2024. 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. http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2024/367/oj/fra.
- . 2024. Décision d'exécution (UE) 2024/368 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 procédures et méthodes d'essai et d'acceptation des matériaux finaux utilisés dans les produits entrant en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine. http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2024/368/oj/fra.
- . 2024. Règlement délégué (UE) 2024/369 de la Commission du 23 janvier 2024 complétant la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en établissant la procédure d'inscription sur les listes positives européennes, ou de retrait de celles-ci, de substances de départ, de compositions et de constituants. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2024/369/oj/fra.
- . 2024. Règlement délégué (UE) 2024/370 de la Commission du 23 janvier 2024 complétant la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en établissant des procédures d'évaluation de la conformité pour les produits entrant en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine, ainsi que des règles relatives à la désignation des organismes d'évaluation de la conformité qui participent à ces procédures. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2024/370/oj/fra.
- . 2024. Règlement délégué (UE) 2024/371 de la Commission du 23 janvier 2024 complétant la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en établissant

des spécifications harmonisées pour le marquage des produits entrant en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2024/371/oj/fra.

Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie. s. d. JORF n°0001 du 1 janvier 1997. Consulté le 4 octobre 2024. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000381337>.

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (1). 2010. 2010-788. <https://www.legifrance.gouv.fr/dossierlegislatif/JORFDOLE000020078758/>.

Décret n° 73-138 du 12 février 1973 portant application de la loi du 1er août 1905 sur la répression des fraudes en ce qui concerne les produits chimiques dans l'alimentation humaine et les matériaux et objets au contact des denrées, produits et boissons destinés à l'alimentation de l'homme et des animaux ainsi que les procédés et produits utilisés pour le nettoyage de ces matériaux et objets - Légifrance. 1973. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000696195>.

Décret n° 2002-120 du 30 janvier 2002 relatif aux caractéristiques du logement décent pris pour l'application de l'article 187 de la loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains. 2002. JORF n°26 du 31 janvier 2002. Vol. Texte n° 32. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000217471/>.

Décret n°2006-623 du 29 mai 2006 relatif à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules. 2006. JORF n°124 du 30 mai 2006. Vol. Texte n° 59. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000268393>.

Décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air. 2010. 2010-1250. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022941254>.

Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène. 2011. 2011-1727. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000024909119>.

Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public. 2011. 2011-1728. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000024909128>.

Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire. 2018. 2018-434. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000036984723>.

Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants. 2018. 2018-437. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000036985602>.

Décret n° 2022-1690 du 27 décembre 2022 modifiant le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public. 2022. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046829352>.

Arrêté du 29 mai 1997 relatif aux matériaux et objets utilisés dans les installations fixes de production, de traitement et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine. 1997. NOR: MESP0030145C. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000749834>.

Arrêté du 14 mars 2007 relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées

ainsi que de l'eau minérale naturelle distribuée en buvette publique. 2007. JORF n°81 du 5 avril 2007. Vol. Texte n° 46. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000274485>.

Arrêté du 4 mai 2007 relatif à l'importation des eaux conditionnées. 2007. JORF n°115 du 19 mai 2007. Vol. Texte n° 54. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000276770>.

Arrêté du 20 juin 2007 relatif à la constitution du dossier de la demande d'autorisation d'utilisation d'eau destinée à la consommation humaine mentionnée aux articles R. 1321-6 à R. 1321-12 et R. 1321-42 du code de la santé publique. 2007. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000274726>.

Arrêté du 17 août 2007 relatif à la constitution du dossier de demande de mise sur le marché d'un produit ou d'un procédé de traitement d'eau destinée à la consommation humaine mentionné à l'article R. 1321-50-IV du code de la santé publique. 2007. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000279278>.

Arrêté du 22 juin 2012 relatif aux conditions de mise sur le marché et de mise en œuvre des modules de filtration membranaire utilisés pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine pris en application de l'article R. 1321-50 (I et II) du code de la santé publique. 2012. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026087753/>.

Arrêté du 9 octobre 2012 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets utilisés pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine pris en application de l'article R. 1321-50 (I et II) du code de la santé publique. 2012. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026503744>.

Arrêté du 22 octobre 2013 relatif aux analyses de contrôle sanitaire et de surveillance des eaux conditionnées et des eaux minérales naturelles utilisées à des fins thérapeutiques dans un établissement thermal ou distribuées en buvette publique. 2013. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000028220863>.

Arrêté du 5 août 2016 portant désignation des organismes chargés de coordonner la surveillance des pollens et des moisissures de l'air ambiant. 2016. JORF n°0186 du 11 août 2016. Vol. Texte n° 33. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000033011638>.

Arrêté du 18 janvier 2018 relatif aux matériaux et objets étamés destinés aux installations de production, de distribution et de conditionnement qui entrent en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine. 2018. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000036543941>.

Arrêté du 14 janvier 2019 relatif aux conditions de mise sur le marché des produits introduits dans les installations utilisées pour le traitement thermique des eaux destinées à la consommation humaine. 2019. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000038006926>.

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. 2020. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000042045659>.

Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant. s. d. JORF n°0092 du 18 avril 2021. Vol. Texte n° 9. Consulté le 4 octobre 2024. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043388197>.

Arrêté du 22 avril 2022 relatif aux conditions de mise sur le marché et de mise en œuvre des résines organiques échangeuses d'ions utilisées pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine pris en application de l'article R. 1321-50 (I et II) du code de la santé publique. 2022. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045668734>.

Arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 21 novembre 2007 relatif aux modalités de prise en compte de la surveillance des eaux destinées à la consommation humaine dans le cadre du contrôle sanitaire, pris en application de l'article R. 1321-24 du code de la santé publique. 2022. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046849508>.

Arrêté du 3 janvier 2023 relatif au plan de gestion de la sécurité sanitaire de l'eau réalisé de la zone de captage jusqu'en amont des installations privées de distribution. 2023. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000046968001.

Circulaire DGS/PGE/1 D n° 2058 du 30 décembre 1986 relative aux fontaines réfrigérantes. 1986.

Circulaire du 7 mai 1990 relative aux produits et procédés de traitement des eaux destinées à la consommation humaine. 1990. JORF n°121 du 26 mai 1990. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000525727>.

Circulaire DGS/VS4/2000/166 du 28 mars 2000 relative aux produits de procédés de traitement des eaux destinées à la consommation humaine. 2000. <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/20457>.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2022-SA-0239

**Direction générale de
la santé**

SOUS-DIRECTION PREVENTION DES RISQUES LIES
A L'ENVIRONNEMENT ET A L'ALIMENTATION
BUREAU QUALITE DES EAUX
DGS/JEA4 – N° 1026
Personne chargée du dossier :
C. PROVINI
☎ : 01.40.56.70.89
Claire.provini2@sante.gouv.fr
N° D-22-024913

Paris, le **26 DEC. 2022**

Le Directeur général adjoint de la santé

à

Monsieur le Directeur général de l'Agence
nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,
de l'environnement et du travail – Direction de
l'Evaluation des Risques (DER) - UERE

Objet : Produits et procédés de traitement d'eau destinée à la consommation humaine
Procédés générateurs d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats

N/Réf. : DGS EA4 N° 220016 (Numéro de dossier à rappeler dans toute correspondance)

PJ : Exemple de dossier de demande de mise sur le marché d'un procédé de production d'eau potable à partir de l'air ambiant

La Direction générale de la santé (DGS) est depuis quelques années sollicitée par l'industrie (essentiellement des revendeurs) concernant la mise sur le marché de dispositifs autonomes de production d'eau destinée à la consommation humaine à partir de condensats afin notamment de concurrencer le marché des fontaines à eau en bonbonnes, en particulier sur les territoires ultramarins.

Compte tenu de l'évolution des pratiques et des attentes tant sociétales que politiques, de plus en plus de projets ayant recours à des ressources alternatives sont adressés aux agences régionales de santé ou à la DGS. Le contexte récent (sécheresse) et les travaux de planification écologique actuellement en cours sont venus confirmer, encore récemment, l'importance de ce sujet.

Les dispositifs dont il est question visent à recueillir des condensats (obtenus à partir de la condensation de l'air ambiant ou provenant de systèmes de climatisation) et à traiter l'eau brute ainsi obtenue par des procédés tels que la filtration sur charbon actif, la désinfection aux UV, l'osmose inverse, la reminéralisation qui sont des étapes autorisées par la réglementation nationale.

D'un point de vue réglementaire et législatif, les dispositions prévues par le code de la santé publique ne s'appliquent pas toutes de facto à ce type de dispositifs. En vue de traiter les demandes des industriels, la DGS a procédé à une analyse réglementaire afin de statuer sur les obligations qui s'imposent au metteur sur le marché ainsi qu'aux utilisateurs de ces dispositifs. Vous trouverez cette analyse détaillée en annexe de cette saisine.

La DGS a jusqu'à présent considéré ces dispositifs comme innovants malgré l'utilisation de procédés autorisés. A ce titre, pour pouvoir être mis sur le marché, l'innocuité et l'efficacité du dispositif doivent être démontrées conformément à l'arrêté du 17 août 2007¹, après avis de votre agence.

¹ Arrêté du 17 août 2007 (modifié par l'arrêté du 4 juin 2009) relatif à la constitution du dossier de demande de mise sur le marché d'un produit ou d'un procédé de traitement d'eau destinée à la consommation humaine, mentionné à l'article R. 1321-50-IV du code de la santé publique.

14 avenue Duquesne – 75350 Paris 07 SP
Tél. 01 40 56 60 00 - www.social-sante.gouv.fr

Le traitement de vos données est nécessaire à la gestion de votre demande et entre dans le cadre des missions confiées aux ministères sociaux.
Conformément au règlement général sur la protection des données (RGPD), vous pouvez exercer vos droits à l'adresse dgs-rgpd@sante.gouv.fr ou par voie postale.
Pour en savoir plus : <https://solidarites.sante.gouv.fr/ministere/article/donnees-personnelles-et-cookies>

2

A ce jour, la DGS n'a reçu aucun dossier dont la complétude a permis de solliciter votre expertise afin de démontrer l'innocuité et l'efficacité de tels dispositifs.

Cependant, compte tenu du nombre croissant de sollicitations, des éléments de réponses scientifiques à ces questions de sécurité sanitaire s'avèrent nécessaires pour s'assurer de l'aptitude de ces dispositifs à délivrer une eau de qualité « potable » compte tenu de leur installation dans des enceintes confinées, et potentiellement contaminées.

Aussi, je sollicite votre expertise afin d'identifier les risques sanitaires liés à ces dispositifs (production d'eau potable à partir de condensats d'air atmosphérique ou autres) dans l'objectif de :

- statuer sur la possibilité de considérer la condensation comme un procédé de traitement remplissant les dispositions prévues à l'article R. 1321-50 du code de la santé publique ;
- identifier les dangers microbiologiques et chimiques liés à l'hétérogénéité de la qualité de l'air et des condensats en résultant ainsi que des variations d'un site à l'autre pouvant impacter la qualité de l'eau produite en vue d'une distribution ;
- disposer d'éléments d'expertise utiles à l'instruction de ces dossiers de demande de mise sur le marché de ces procédés innovants ;
- identifier des usages alternatifs de l'eau produite par ces dispositifs, notamment dans les territoires sujets à la problématique de l'accès à l'eau potable.

Vous trouverez ci-joint un exemple de dossier adressé récemment à mes services dans le cadre d'une demande d'autorisation de mise sur le marché d'un tel dispositif. Les dossiers précédemment reçus faisaient état du même type de procédés (filtration, désinfection...) pour traiter l'eau produite. Aussi, ce dossier peut servir de modèle concernant le fonctionnement de ces dispositifs, en partant du principe que les procédés et produits de traitement utilisés sont autorisés par la réglementation.

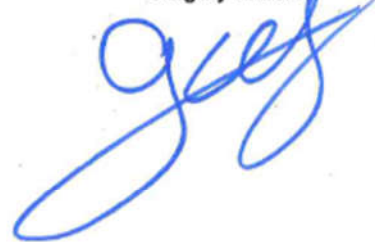
Le dossier est enregistré par mes services sous le numéro DGS EA4 N° 220016 et intitulé comme suit :

**PROCEDES GENERATEURS D'EAU DESTINEE A LA CONSOMMATION HUMAINE A PARTIR DE
CONDENSATS**

Cette expertise est inscrite dans le programme de travail 2023 de l'Anses.

Je vous remercie de bien vouloir me transmettre, dans les meilleurs délais, votre proposition de contrat d'expertise comprenant notamment les modalités de traitement et de restitution des travaux, dont le rendu final est attendu pour le 31 mai 2023.

Grégory EMERY



Annexe 2 : Principales pistes de recherche dans le domaine de la production d'eau à partir de l'atmosphère

La production d'eau atmosphérique fait l'objet de nombreux travaux de recherche visant à intégrer cette technologie dans une approche globale de conception des bâtiments et à mettre au point de nouvelles approches de capture de la vapeur d'eau.

■ Approches intégrées

Une variante par rapport aux AWG classiques, dont il existe de rares applications concrètes, est l'intégration des AWG dans des dispositifs que l'on qualifie alors d'« intégrés ». Il peut s'agir de coupler la production d'eau à un système de climatisation d'air. Dans ce cas, l'objectif est non seulement de valoriser l'eau de condensation pour des usages domestiques ou industriels, mais aussi de profiter de l'air froid et sec issu de l'AWG pour climatiser des locaux (Zhao *et al.*, 2019 ; Magrini *et al.*, 2015). Ce type d'équipement a été expérimenté mais ne constitue pas en soi une approche technique originale.

Une autre possibilité est liée au fait que les systèmes permettant de refroidir la surface des plaques du condenseur produisent aussi de la chaleur. Avec un module Peltier, l'une des faces du dispositif se réchauffe ; dans un cycle de compression-décompression, l'étape de compression du gaz frigorigène dégage aussi de la chaleur. Certains dispositifs « intégrés » récupèrent donc la chaleur produite pour divers usages, par exemple pour assurer le chauffage d'eau sanitaire (Cattani *et al.*, 2018). Des systèmes mixtes associant les fonctions de production d'eau, de climatisation d'air et de chauffage d'eau sanitaire ont aussi été expérimentés (Cattani *et al.*, 2023).

Les systèmes « intégrés » ne correspondent pas à des procédés originaux de production d'eau à partir de l'atmosphère mais proposent des approches d'optimisation de la rentabilité des AWG en termes de coût énergétique.

■ Emploi de membranes sélectives

La séparation sélective des molécules d'eau contenues dans l'air au moyen de membranes a été proposée dans certaines études (Nikkhah *et al.*, 2023). Il s'agit d'avoir recours à une membrane sélective pour séparer la vapeur d'eau des autres gaz atmosphériques (figure 9). Cette membrane est exposée au flux d'air humide. Une pompe à vide crée une différence de pression entre le côté alimentation et le côté perméat, ce qui permet à l'humidité de l'air de passer à travers la membrane. La perméabilité à l'eau de la membrane détermine l'efficacité de la technique par rapport aux autres gaz présents dans l'air. La vapeur concentrée peut alors subir un changement d'état par refroidissement au niveau d'un condenseur. Les conditions expérimentales sont définies afin que les gaz autres que l'eau qui ont traversé la membrane ne puissent pas se liquéfier au niveau du condenseur.

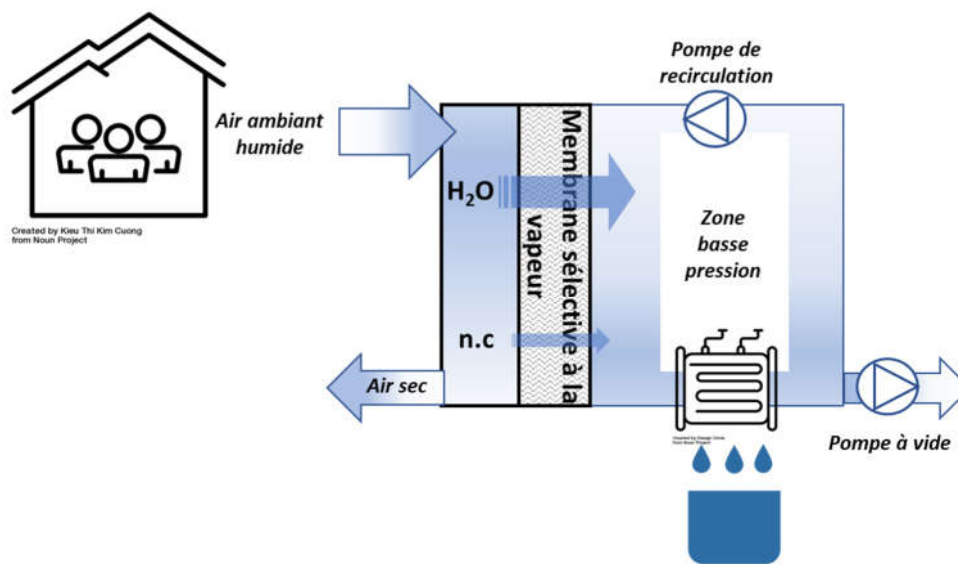


Figure 9. Principe d'un dispositif de production d'eau à partir de l'atmosphère utilisant une membrane sélective (d'après Bergmair *et al.* 2014). n.c : gaz non condensables.

Un premier intérêt de cette technique est que la membrane peut permettre de bloquer le passage des polluants, de sorte que l'eau produite sera de meilleure qualité qu'avec un dispositif classique de condensation. L'impact réel de l'effet de filtre de la membrane vis-à-vis des polluants de l'air sur la qualité du condensat brut recueilli (Zhao *et al.*, 2019) reste à étudier en fonction des matériaux utilisés. Aucune étude structurée n'a été réalisée sur cette question. Les travaux de recherche dans ce domaine visent à associer au sein des membranes des matériaux adsorbants afin d'améliorer la capture de la vapeur d'eau (Shan *et al.*, 2021 ; Zhang *et al.*, 2020).

Un autre intérêt est lié à la consommation énergétique. D'une manière générale, la valeur élevée de la chaleur latente⁹⁰ de condensation de l'eau explique que les procédés réalisant la condensation active de vapeur soient relativement coûteux en énergie, comparés à des processus classiques de production d'eau à partir de ressources traditionnelles. C'est pourquoi on considère actuellement que la production d'eau à partir de l'atmosphère ne peut être rentable que dans la mesure où l'on dispose d'une source d'énergie peu coûteuse ou lorsque l'exploitation d'une ressource en eau liquide locale n'est pas possible. Les procédés utilisant des membranes ont un intérêt en termes d'économies d'énergie lié au fait qu'il n'est pas nécessaire de refroidir la totalité de la masse d'air au sein de laquelle l'eau est prélevée. En effet, Zhao *et al.* (2019) observent que si un mètre-cube d'air à 50% d'humidité relative est refroidi de 30°C à 2°C, la consommation d'énergie associée correspond pour seulement 43,6 % au refroidissement de la vapeur d'eau, le reste étant consacré au refroidissement des autres gaz. Ils constatent que la consommation énergétique des dispositifs utilisant des membranes peut être de 50 % inférieure à celle de dispositifs classiques de condensation par réfrigération. Les calculs réalisés montrent que le condenseur ainsi développé, d'une puissance de 62 kW, permettrait de produire 9,19 m³ d'eau par jour contre 4,45 pour un condenseur classique de même puissance (température ambiante de 26,3 °C en moyenne, point de rosée moyen de 16,3 °C).

⁹⁰ La chaleur latente de condensation de l'eau est la quantité d'énergie qu'il faut extraire de 1 kg d'eau sous forme de vapeur (dans des conditions de température et de pression données) pour la liquéfier. Dans les dispositifs étudiés ici, le système réfrigérant doit avoir la capacité d'absorber cette énergie pour obtenir la condensation de la vapeur d'eau.

La nature et les propriétés des membranes utilisées déterminent les performances de ce type de procédé. Il importe de disposer d'un matériau très perméable à la vapeur d'eau et peu perméable aux autres gaz, à forte hydrophilie. Différents types de polymères ont été expérimentés en vue de ce type d'application mais qui n'ont pas, à ce jour, donné lieu à des développements commerciaux (Pan *et al.*, 2009 ; Potreck *et al.*, 2009 ; Metz *et al.*, 2005).

■ Autres pistes de recherche

De nombreuses recherches actuelles portent sur l'optimisation de la productivité et la réduction de la consommation énergétique des AWG. Pour cela, des travaux sont en cours portant notamment sur les adsorbants, ainsi que sur l'amélioration du processus de condensation et des échanges thermiques. Les polymères à commutation d'hydrophilie thermosensible (TRHS : *thermo-responsive hydrophilicity switching polymers*) sont des matériaux utilisés pour capter la vapeur d'eau (Peeters *et al.*, 2020) en associant des phénomènes d'absorption et d'adsorption. Ils changent de configuration lorsqu'ils sont chauffés et deviennent hydrophobes, de sorte que l'eau absorbée est expulsée directement sous forme liquide (figure 10). Les rendements observés expérimentalement sont de $9,28 \text{ L.kWh}^{-1}$ (90 % d'HR) et $3,71 \text{ L.kWh}^{-1}$ (60 % HR), soit respectivement 0,11 et 0,27 kWh.L⁻¹.

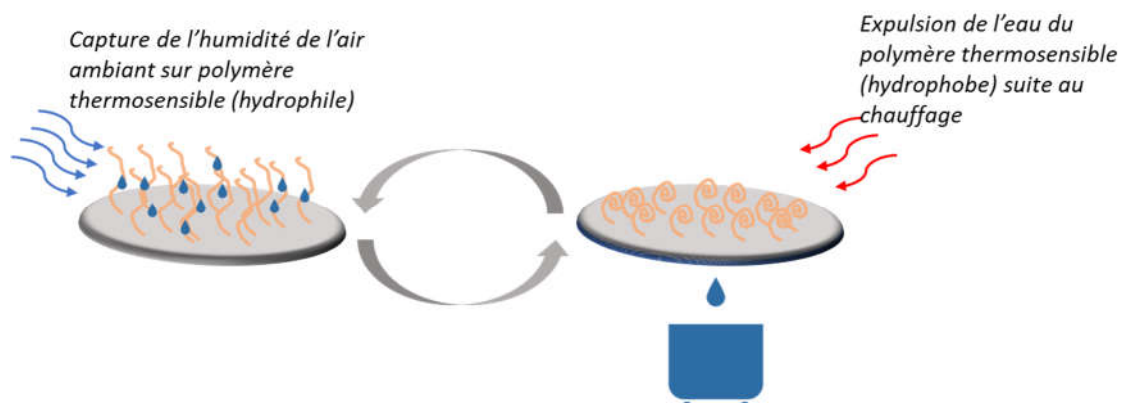


Figure 10. Principe du procédé de capture de vapeur d'eau par un TRHS (d'après Peeters *et al.*, 2021).

Des études ont aussi porté sur la conception de prototypes utilisant des « cheminées solaires », dispositifs utilisés par ailleurs pour la production d'électricité (Ming *et al.*, 2017). D'autres travaux ont exploré la production d'eau à partir d'air humide et chaud injecté dans le sol, où il subit un refroidissement permettant la condensation de la vapeur d'eau (Lindblom et Nordell, 2006).

La réfrigération électromagnétique a été proposée pour la production d'eau (Gschneidner *et al.*, 2001). Il s'agit d'exploiter les propriétés magnétiques de certains matériaux pour produire du froid. L'effet magnéto-calorique se manifeste lorsqu'un matériau magnétique est exposé à un champ magnétique variable. Selon les conditions appliquées, le matériau s'échauffe ou se refroidit. Les matériaux les plus utilisés sont des alliages de gadolinium, de fer, de nickel et de cobalt. Cette technologie reste d'un coût élevé.

Annexe 3 : Procédés passifs de capture d'eau atmosphérique

L'énergie mise en œuvre peut servir de base pour classer les techniques de capture de la vapeur d'eau atmosphérique, ce qui conduit à distinguer des procédés passifs, alimentés en énergie par le rayonnement solaire direct, et les procédés actifs pour lesquels une source d'énergie, le plus souvent électrique, est mise en œuvre.

Les procédés passifs fonctionnent essentiellement sur des cycles jour-nuit. Durant la nuit, la Terre émet, principalement sous forme de rayonnement infra-rouge, de l'énergie accumulée au cours de la journée. Elle se refroidit plus vite que l'air qui se trouve au niveau du sol : la différence de température qui se crée génère des surfaces froides, ici le sol, au contact d'un air plus chaud. C'est ainsi que le phénomène de condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air peut se produire sous réserve que le taux d'hygrométrie de l'air soit suffisant et que le point de rosée soit atteint. Il ne s'agit donc que de reproduire à grande échelle la formation naturelle de la rosée. L'eau condensée est récupérée à la fin de la nuit et le dispositif se réchauffe au cours de la journée pour libérer à nouveau de l'énergie dès le coucher du soleil. L'exploitation du refroidissement radiatif de la Terre permet donc au mieux de réaliser un cycle de condensation par 24 heures, ce qui limite la productivité totale. En revanche, le coût de fonctionnement est nul.

Lorsque le procédé implique le recours à des adsorbants, le cycle jour-nuit est là encore mis à profit : durant la nuit, l'adsorbant capture de la vapeur d'eau ; le jour, l'énergie solaire chauffe l'adsorbant qui libère la vapeur d'eau qu'il a emmagasinée (Fatieh *et al.*, 2018 ; Kim *et al.*, 2018). Ces procédés supposent cependant de créer dans un second temps une surface froide pour assurer la condensation de la vapeur d'eau ainsi libérée, de sorte qu'ils ne sont généralement pas totalement passifs. Parfois, la baisse de la température au cours de la nuit suffit cependant pour atteindre le point de rosée. La productivité de ces dispositifs est très limitée du fait de ce mode de fonctionnement : à titre d'exemple, Kim *et al.* (2018) observent une production de l'ordre de 0,25 litre d'eau par jour par kilogramme de MOF (*Metal-organic frameworks*) dans le désert d'Arizona.

Si les procédés membranaires ont vocation à être actifs, des dispositifs utilisant l'énergie solaire ont aussi été développés. Dans ce cas, la capture de la vapeur d'eau a lieu la nuit et la condensation le jour (Kim *et al.*, 2021). Les tours à convection ont aussi été développées pour la production d'eau dans un contexte d'aide aux populations défavorisées (Wahlgren, 2001 ; Bhushan, 2020). Dans ces dispositifs, l'air chaud est dirigé en altitude dans une tour et se refroidit brutalement, ce qui permet la condensation de la vapeur d'eau sur des surfaces disposées à cet effet⁹¹.

⁹¹ <https://warkawater.org/>

Annexe 4 : Notions physiques associées à la production d'eau à partir de l'atmosphère

L'air est un mélange gazeux principalement composé d'azote et d'oxygène, au sein duquel différents gaz, dont la vapeur d'eau, sont présents en proportions variables.

La présence d'eau sous forme de vapeur dans l'air est caractérisée par l'humidité absolue, masse de vapeur d'eau présente dans un mètre-cube d'air ; il s'agit donc de la quantité d'eau susceptible d'être extraite dans des conditions données. L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique⁹², correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante de l'eau (ou tension de vapeur) à la même température (exprimé en %). Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions et ne peut excéder 100 %. La pression de vapeur saturante est elle-même fonction de la température (figure 11).

En conséquence, plus la température augmente et plus la quantité d'eau qu'un volume d'air est susceptible de contenir est importante, toutes les autres variables restant inchangées. Par exemple, à 20 °C ($P_s = 2,337$ kPa), un mètre cube d'air peut contenir au maximum environ 17 g de vapeur d'eau. Si on refroidit ce même volume d'air à 5 °C ($P_s = 0,5719$ kPa), l'air ne peut plus contenir qu'environ 5 g de vapeur d'eau⁹³.

Si la température d'un volume d'air diminue, toutes les autres variables restant constantes, la pression de vapeur saturante diminue ; l'humidité absolue ne variant pas, la valeur de l'humidité relative augmente au fur et à mesure que la température diminue, jusqu'à atteindre la valeur de 100 % : l'air est alors saturé en vapeur d'eau et le phénomène de condensation débute. La température à partir de laquelle est observé le phénomène de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique est qualifiée de point de rosée. La valeur du point de rosée est elle-même fonction de l'humidité absolue. On peut donc aussi reproduire le phénomène de condensation à température constante en augmentant l'humidité absolue jusqu'à saturer l'air.

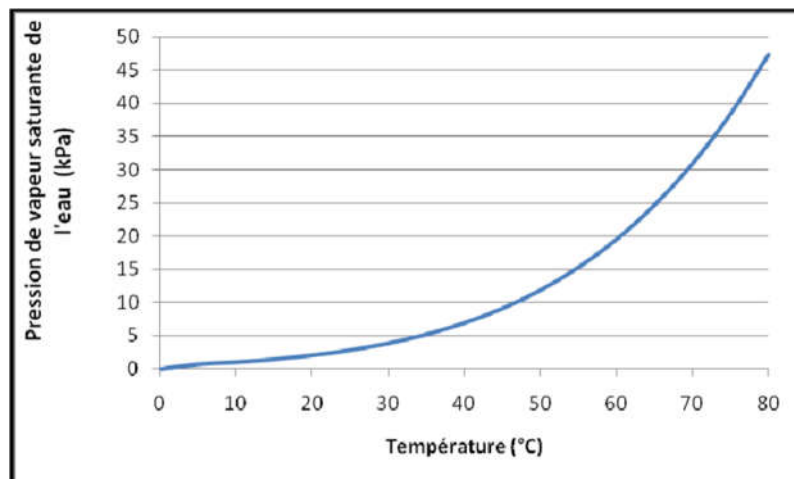


Figure 11. Variations de la pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air en fonction de la température (d'après Tchoryk, 2011).

⁹² On parle aussi de taux d'hygrométrie.

⁹³ La pression partielle P_e de vapeur d'eau se calcule à partir de la pression de vapeur saturante P_s et l'humidité relative ϕ selon la formule $P_e = \phi \cdot P_s$.

En appliquant la formule des gaz parfaits, on obtient la quantité n_e (moles) d'eau par mètre-cube d'air : $n_e = P_e V / RT$, avec T la température (K) et $R = 8,31$ J mol⁻¹ K⁻¹. La masse molaire de l'eau est de 18 g.

Il est possible de calculer une valeur approximative du point de rosée grâce à la formule de Heinrich Gustav Magnus-Tetens :

$$Tr = \frac{b \cdot \alpha(T, \varphi)}{a - \alpha(T, \varphi)}$$

Avec :

Tr : point de rosée (°C) ;

T : température de la masse d'air (°C) ;

φ : humidité relative telle que :

$$\alpha(T, \varphi) = \frac{aT}{b+T} + \ln \varphi$$

$$a = 17,27$$

$$b = 237,7^{\circ}\text{C}.$$

Cette formule est valide pour : $0 < T < 60^{\circ}\text{C}$;

$0,01 < \varphi < 1$;

$0 < Tr < 50^{\circ}\text{C}$.

L'emploi de cette formule permet de prédire la valeur du point de rosée pour toutes les gammes de température et de taux d'hygrométrie. La figure 12 illustre la relation entre la valeur du point de rosée et celle de la température dans différentes gammes d'hygrométrie.

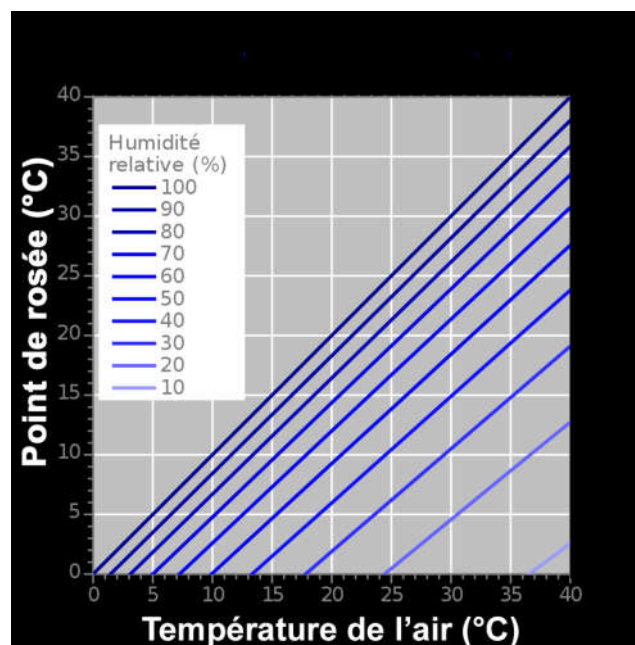


Figure 12. Valeur estimée du point de rosée en fonction de la température de l'air et du taux d'hygrométrie (d'après <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-pression-atmospherique-et-l-humidite-relative-s1362>). L'apparente linéarité de la relation entre la température et la valeur du point de rosée résulte d'approximations liées à la formule de calcul utilisée (approximations d'August-Roche-Magnus).

La figure 13 permet aussi d'observer l'impact de l'humidité relative sur la valeur du point de rosée.

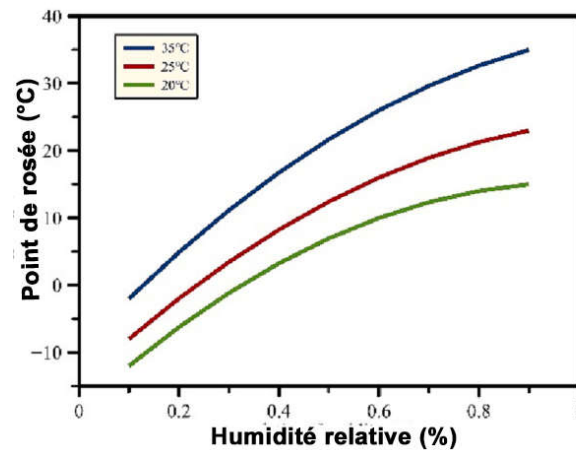


Figure 13. Variations de la valeur du point de rosée en fonction de l'humidité relative, pour différentes valeurs de température (d'après Nikkhah *et al.*, 2023).

En résumé, la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique est optimale si la température et le taux d'hygrométrie sont élevés et impossible pour de faibles valeurs de ces paramètres. Ces derniers ne sont cependant pas totalement indépendants dans le milieu naturel. De nombreux auteurs rapportent des variations inverses de la température et de l'hygrométrie au cours de la journée (Hassan *et al.*, 2023), le taux d'hygrométrie étant maximal le matin alors que la température est minimale.

Annexe 5 : Aperçu des différentes approches de capture de la vapeur d'eau par emploi d'adsorbants

Les procédés par adsorption utilisent des matériaux qui fixent la vapeur d'eau présente dans l'air puis la libèrent lorsqu'ils sont chauffés. L'air est alors « enrichi » en vapeur d'eau, ce qui revient à majorer l'hygrométrie en entrée de condenseur (figure 14). La vapeur d'eau est ensuite liquéfiée, généralement sur une surface froide, selon un processus identique à celui décrit au paragraphe précédent. La phase de condensation n'est pas spécifique, mais le dispositif permet en pratique d'obtenir des rendements majorés même si l'hygrométrie est faible (Thavalengal *et al.*, 2023 ; Tashtoush et Alshoubaki, 2023).

Actuellement, seules les zéolites font l'objet de développements industriels dans le domaine des AWG mais de nombreux matériaux ont fait l'objet de travaux expérimentaux. Les matériaux utilisés pour la capture de vapeur d'eau contiennent invariablement des liaisons ioniques polaires fortes, des liaisons covalentes de coordination ou des groupes fonctionnels, qui sont essentiels pour attirer les molécules d'eau, elles-mêmes polaires. Les cavités dans la structure de ces matériaux permettent aux molécules d'eau de s'adsorber, se condenser et s'écouler, sous l'effet de la gravité et de la tension superficielle, de la surface vers l'intérieur, où l'eau est finalement stockée (Feng *et al.*, 2022).

Certains de ces matériaux sont largement utilisés comme desséchants de l'air dans des dispositifs destinés par exemple à la production d'air comprimé sec pour l'industrie.

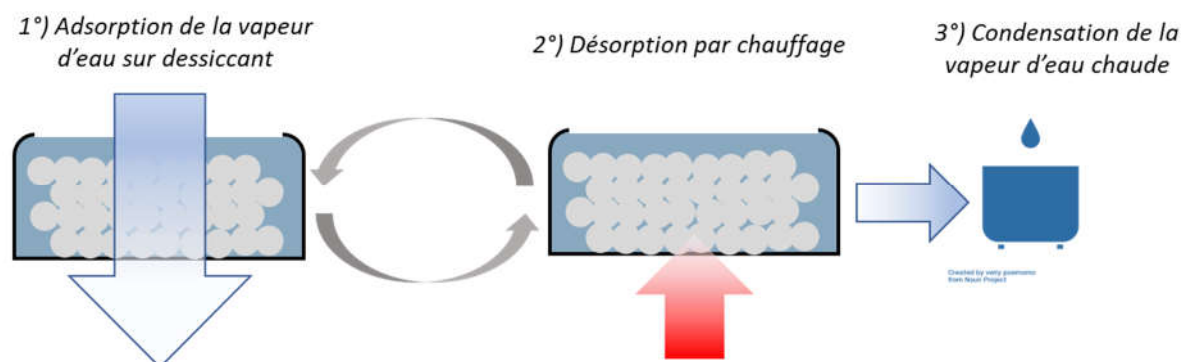


Figure 14. Principe du procédé de capture de vapeur d'eau par un adsorbant (d'après Peeters *et al.*, 2021).

Parmi les adsorbants utilisés, notamment dans le cadre d'expérimentations, on trouve des matériaux nombreux et très divers (Wang *et al.*, 2024), principalement à base de charbon actif (Nikkah *et al.*, 2023), de gel de silice (Sultan *et al.*, 2021 ; Milani *et al.*, 2014), de zéolites, de complexes métallo-organiques (MOF : *Metal-organic frameworks*) et de polymères. Les sels hygroscopiques (LiCl, CaCl, LiBr par exemple) font aussi l'objet d'études mais leur dissolution en présence d'eau rend nécessaire le recours à un procédé secondaire pour traiter la solution saline qui se forme et récupérer l'eau. Les procédés utilisés sont soit le séchage par chauffage, soit l'osmose inverse. Les saumures peuvent être recyclées et utilisées à nouveau pour capturer la vapeur d'eau (Peeters *et al.*, 2021).

■ Les gels de silice et les zéolites

Ils sont considérés comme la première génération de matériaux adsorbants, les sites de capture de l'eau étant situés respectivement au niveau de groupements hydroxyle ou d'atomes d'aluminium.

Des associations de matériaux ont été étudiées afin d'améliorer la capacité de capture et de régénération, notamment des complexes associant des gels de silice, des sels de chlorure de lithium et des fibres de polyvinylpyrrolidone (Entezari *et al.*, 2019). Le matériau ainsi constitué a une capacité d'adsorption de 0,43 g d'eau par gramme. En ce qui concerne les zéolites, diverses études ont permis d'en améliorer les propriétés, principalement par imprégnation avec des sels de chlorure de lithium, de chlorure de calcium ou de chlorure de magnésium (Zhao *et al.*, 2020 ; Yan *et al.*, 2019). Les capacités d'absorption obtenues vont jusqu'à 1,1 g d'eau par gramme de matériau.

Une approche originale est proposée par Shemelin *et al.* (2022), qui consiste à recouvrir la surface d'un échangeur eau – air d'une fine couche d'adsorbant (gel de silice, zéolite) et à associer en série deux échangeurs ainsi revêtus, le condenseur étant intercalé entre les deux échangeurs. Dans ce type de système, le premier élément adsorbant est chauffé ce qui permet d'enrichir l'air en vapeur d'eau, alors que le second est froid et capte la vapeur d'eau qui n'a pas pu être condensée ; puis le sens de circulation de l'air s'inverse et le cycle reprend selon le même principe. L'objectif est d'améliorer la capacité de capture de la vapeur d'eau par la réalisation de deux phases successives d'adsorption.

■ Les aluminophosphates

Ils sont des matériaux assez comparables aux zéolites en termes de structure, de résistance et de stabilité (Abd Elwadood *et al.*, 2022). Leurs propriétés peuvent être améliorées notamment par l'insertion ou la substitution d'atomes au sein de la structure cristalline, avec principalement pour objectifs d'améliorer l'hydrophilie et l'acidité des structures. Les matériaux obtenus permettent de capter de la vapeur d'eau même pour des taux d'hygrométrie de l'ordre de 5 à 10 % (Abd-Elwadood *et al.*, 2022). La conception de matériaux composites associant des aluminophosphates avec des polymères à température de régénération basse ou à des polymères possédant des groupes hydrophiles forts pour améliorer la capacité, la cinétique de sorption/désorption et la récupération de l'eau est actuellement une piste de recherche majeure. Abd-Elwadood *et al.* (2023) ont ainsi montré qu'une matrice poreuse formée de silicoaluminophosphate, dopée avec des sels très hydrophiles (LiCl, CaCl₂), pouvait capter jusqu'à quatre fois plus d'eau qu'en l'absence de dopage.

■ Les MOF (Metal-organic frameworks)

Ils sont des matériaux nanoporeux cristallins assemblés par des clusters inorganiques (ions métalliques) et des ligands organiques assurant la stabilité de leur structure. Ils ont fait l'objet de nombreux travaux en raison notamment de leur surface spécifique importante (Song *et al.*, 2023 ; Logan *et al.*, 2020), de l'ordre de 500 à 7000 m².g⁻¹ (Qian *et al.*, 2020). L'optimisation des capacités de capture de la vapeur d'eau est recherchée, notamment en les associant à des gels hydrophiles (Alezi *et al.*, 2023 ; Zhao *et al.*, 2019), de même que la rapidité avec laquelle l'eau peut être libérée du matériau. Actuellement, l'emploi des MOF reste cependant limité du fait de leur coût.

■ Les polymères

Le recours à des matériaux polymères pour la capture d'eau est aussi l'objet de nombreux travaux (Lyu *et al.*, 2022 ; Zhang *et al.*, 2022 ; Loo *et al.*, 2021 ; Salehi *et al.*, 2020). Ils forment un réseau au sein duquel la vapeur d'eau est piégée. Les hydrogels ont une structure moléculaire spécifiquement adaptée à la capture de l'eau, comprenant des groupes

fonctionnels hydrophiles et des sites ioniques, et gonflent lors de l'absorption de l'eau. Les structures formées sont conçues pour maximiser la surface de contact air-matrice.

Les qualités attendues pour ces matériaux sont fondamentalement les suivantes :

- une stabilité dans le temps, après un nombre important de cycles d'adsorption-désorption ;
- un fonctionnement dans des conditions de faible humidité relative ;
- une importante capacité de capture de l'eau ;
- un faible besoin d'énergie pour assurer la désorption.

Un inconvénient majeur des procédés utilisant des adsorbants est leur cycle de fonctionnement alternant des phases de capture de l'eau, puis des phases de production. Pour pallier cet inconvénient et améliorer la productivité, le système de roue dessiccante rotative, proposé dans les années 1950 et actuellement commercialisé, utilise un adsorbant/dessiccant solide tel que le gel de silice ou la zéolite, pour adsorber l'humidité de l'air, ce qui assure une capacité de déshumidification efficace. La roue de zéolite tourne sur elle-même, exposant alternativement sa surface à l'air humide (phase de capture) et à un dispositif de chauffage (phase de désorption). La production d'eau est ainsi continue.

La collecte d'eau atmosphérique par adsorption est une technologie émergente. En raison de la faible pression de vapeur d'équilibre du milieu adsorbant, ces systèmes peuvent fonctionner dans des conditions arides (jusqu'à 20 % d'humidité relative). Dans ce type de contexte, le point de rosée est souvent négatif, ce qui interdit le recours aux procédés classiques par condensation sur une surface froide. L'adsorbant a ici pour fonction d'enrichir l'air en vapeur d'eau de telle sorte que le point de rosée puisse être atteint plus facilement à l'étape de condensation.

Annexe 6 : Polluants recherchés dans l'air et valeurs réglementaires

Tableau 5. Tableaux des normes de la qualité de l'air⁹⁴.

OMS / UE / FR = origines des valeurs

DIOXYDE d'AZOTE (NO ₂)		
Objectif de qualité	40 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	200 µg/m ³ (UE)	en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an
	40 µg/m ³ (UE)	en moyenne annuelle
Niveau critique pour la protection de la végétation (NO _x)	30 µg/m ³ (UE)	en moyenne annuelle d'oxydes d'azote
Seuil d'information et de recommandation	200 µg/m ³ (FR)	en moyenne horaire
Seuils d'alerte	400 µg/m ³ (UE)	moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
		ou si 200 µg/m ³ en moyenne horaire à J-1 et à J et prévision de 200 µg/m ³ à J+1 (FR)

OXYDES D'AZOTE (NO _x)		
Niveau critique pour la protection de la végétation	30 µg eq NO ₂ .m ⁻³	en moyenne annuelle

PARTICULES (PM ₁₀)		
Objectif de qualité	30 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	50 µg/m ³ (UE)	en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours par an
	40 µg/m ³ (UE)	en moyenne annuelle
Seuil d'information et de recommandation	50 µg/m ³ (FR)	en moyenne sur 24 heures
Seuil d'alerte	80 µg/m ³ (FR)	en moyenne sur 24 heures

PARTICULES (PM _{2,5})		
Objectif de qualité	10 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeur cible pour la protection de la santé humaine	20 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeur limite 2015 pour la protection de la santé humaine	25 µg/m ³ (UE)	en moyenne annuelle

⁹⁴ Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires.
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/01_Tableau-Normes-Seuils%20r%C3%A9glementaires.pdf.

DIOXYDE de SOUFRE (SO ₂)		
Objectif de qualité	50 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	350 µg/m ³ (UE)	en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 24 heures par an
	125 µg/m ³ (UE)	en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 3 jours par an
Niveau critique pour la protection des écosystèmes	20 µg/m ³ (UE)	en moyenne annuelle et en moyenne sur la période du 1er octobre au 31 mars
Seuil d'information et de recommandation	300 µg/m ³	en moyenne horaire
Seuil d'alerte	500 µg/m ³	en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives

OZONE (O ₃)		
Objectif de qualité pour la protection de la santé humaine	120 µg/m ³	pour le maximum journalier de la moyenne sur 8 heures par an
Objectif de qualité pour la protection de la végétation	6 000 µg/m ³ .h.	en AOT40, calculée à partir des valeurs sur 1 heure de mai à juillet entre 8h et 20h
Valeur cible pour la protection de la santé humaine	120 µg/m ³	maximum journalier de la moyenne sur 8 heures à ne pas dépasser plus de 25 jours par an (en moyenne sur 3 ans)
Valeur cible pour la protection de la végétation	18 000 µg/m ³ .h. (UE)	en AOT40, calculée à partir des valeurs sur 1 heure de mai à juillet entre 8h et 20h (en moyenne sur 5 ans)
Seuil d'information et de recommandation	180 µg/m ³	en moyenne horaire
Seuil d'alerte pour une protection sanitaire pour toute la population	240 µg/m ³	en moyenne horaire
Seuils d'alerte nécessitant la mise en œuvre progressive de mesures d'urgence	1 ^{er} seuil : 240 µg/m ³	moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
	2 ^{ème} seuil : 300 µg/m ³	moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
	3 ^{ème} seuil : 360 µg/m ³	en moyenne horaire

MONOXYDE de CARBONE (CO)		
Valeur limite pour la protection de la santé humaine	10 mg/m ³ soit 10 000 µg/m ³ (FR)	pour le maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures

BENZÈNE (C ₆ H ₆)		
Objectif de qualité	2 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeur limite pour la protection de la santé humaine	5 µg/m ³ (UE)	en moyenne annuelle

MÉTAUX LOURDS			
Objectif de qualité	Plomb (Pb)	0,25 µg/m ³ (FR)	en moyenne annuelle
Valeur limite pour la protection de la santé humaine		0,5 µg/m ³ (UE)	
Valeur cible à compter de 2013	Arsenic (As)	6 ng/m ³ (UE)	en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM ₁₀
	Cadmium (Cd)	5 ng/m ³ (UE)	
	Nickel (Ni)	20 ng/m ³ (UE)	
BENZO(A)PYRÈNE (B[A]P)			
Valeur cible à compter de 2013	1 ng/m ³ (UE)	en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM ₁₀	

■ Définitions des normes Qualité de l'Air

Objectif de qualité : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère à atteindre à long terme, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble ;

Valeur cible : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble, à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné ;

Valeur limite : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère fixé sur la base des connaissances scientifiques à ne pas dépasser dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble ;

Seuil d'information et de recommandation : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine des groupes particulièrement sensibles de la population, rendant nécessaires des informations immédiates et adéquates ;

Seuil d'alerte : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

Tableau 6. Liste des substances prises en compte dans le cadre du suivi pérenne des pesticides dans l'air ambiant (Autosaisine Anses n° 2020-SA-0030) - Liste des 70 substances détectées dans la campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant (CNEP) pour lesquelles il existe des valeurs de référence sanitaires.

2,4-D (2-éthylhexyl ester)	Diuron	Oxadiazon
2,4-DB (2-éthylhexyl ester)	Endrine	Oxyfluorène
Acétochlore	Epoxiconazole	Pendiméthaline
Acide aminométhylphosphonique (AMPA)	Ethion	Pentachlorophénol
Bifenthrine	Ethoprophos	Perméthrine
Boscalid	Etofenprox	Phosmet
Bromadiolone	Fenarimol	Piperonyl butoxide
Bromoxynil octanoate	Fenpropidine	Prochloraz
Butraline	Fipronil	Propyzamide
Carbetamide	Fluazinam	Prosulfocarbe
Chlordane	Flumetraline	Pyrimethanil
Chlordécone	Fluopyram	Pyrimicarbe
Chlorothalonil	Folpel	S-métolachlore
Chlorprophame	Glufosinate	Spiroxamine
Chlorpyrifos-éthyl	Glyphosate	Tébuconazole
Chlorpyrifos-méthyl	Heptachlore	Tébuthiuron
Clomazone	Iprodione	Terbutryne
Cyperméthrine (alpha, bêta, théta, zéta)	Lambda-cyhalothrine	Tolyfluanide
Cyproconazole	Lénacil	Triadimenol
Cyprodinil	Lindane	Triallate
Deltaméthrine	Linuron	Trifloxystrobine
Diclorane	Métamitrone	
Dieldrine	Métazachlore	
Difénoconazole	Metribuzine	
Diflufénicanil	Mirex	
Diméthénamide-p	Myclobutanil	
Diméthoate	Oryzalin	

Tableau 7. Résultat de la hiérarchisation des polluants prioritaires en vue d'une surveillance (Anses, 2018).

Rang de classement	Score de risque	Polluant	Numéro CAS
1	5,1	1,3-butadiène	106-99-0
2	1,4	Manganèse	7439-96-5
3	0,9	Sulfure d'hydrogène	7783-06-4
4	0,88	Acrylonitrile	107-13-1
5	0,86	1,1,2-trichloroéthane	79-00-5
6	0,7	Cuivre	7440-50-8
7	0,4	Trichloroéthylène	79-01-6
8	0,3	Vanadium	7440-62-2
9	0,2	Cobalt	7440-48-4
10	0,088	Antimoine	7440-36-0
11	0,087	Naphtalène	91-20-3

Polluants de la catégorie 1 ne pouvant être hiérarchisés selon la méthode retenue

Particules ultrafines (PUF)

Carbone suie

Tableau 8. polluants réglementés dans l'air intérieur^{95,96}.

Réglementation	Substance	N° CAS	Valeur-guide pour l'air intérieur*
Annexe de l'article R.221-29 du code de l'environnement	Formaldéhyde	50-00-0	100 µg.m ⁻³ pour une exposition à court terme
	Benzène**	71-43-2	2 µg.m ⁻³ pour une exposition de longue durée

⁹⁵ Décret n° 2022-1690 du 27 décembre 2022 modifiant le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.

⁹⁶ Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.

Réglementation	Substance	N° CAS	Valeur pour laquelle des investigations complémentaires sont menées
Article 10 du Décret n° 2012-14 (R.221-30 du code de l'environnement)	Formaldéhyde	50-00-0	30 µg.m ⁻³
	Benzène**	71-43-2	10 µg.m ⁻³
Réglementation	Substance	N° CAS	Niveau de référence pour le radon dans les bâtiments***
Annexe de l'article R.221-29 du code de l'environnement	Radon	10043-92-2	300 Bq. m ⁻³
Réglementation	Substance	N° CAS	Indice de confinement****
Article 11 du Décret n° 2022-1690 du 27 décembre 2022	Dioxyde de carbone		5

*niveau de concentration de polluants dans l'air intérieur fixé, pour un espace clos donné, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine, à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné.

**les valeurs guides pour le benzène sont amenées à évoluer au regard des dernières recommandations de l'Anses⁹⁷.

***niveau d'activité volumique en radon dans l'air intérieur, pour un espace clos donné, au-dessus duquel il est jugé inapproprié de permettre l'exposition des personnes, même s'il ne s'agit pas d'une limite ne pouvant pas être dépassée.

****un indice de confinement de 5 correspond à des pics de concentration en CO₂ élevés, supérieurs à 4 000 ppm et à des valeurs moyennes pendant l'occupation supérieures à 2 000 ppm.

⁹⁷ Anses. 2024. « Avis et rapport de l'Anses relatifs à l'actualisation des valeurs guides de qualité d'air intérieur du benzène (CAS n° 71-43-2) ». 2021-MPEX-0006.

Tableau 9. Liste des valeurs guides de qualité de l'air intérieur de l'Anses (2021b)⁹⁸.

Substances	Année de parution	Type de valeurs	VGAI	Méthodes de mesure recommandées
Acétaldéhyde	2014	VGAI court terme : pour une exposition de 1 heure	3 000 µg.m ⁻³	Prélèvement par pompage sur un support imprégné, une désorption solvant et une analyse par chromatographie liquide avec détecteur UV/visible
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	160 µg.m ⁻³	Aucune méthode de mesure recommandée car nécessité de développement et de validation
Acide cyanhydrique (HCN)	2011	pas de VGAI court terme proposée	/	/
Acroléine	2013	VGAI court terme : pour une exposition de 1 heure	6,9 µg.m ⁻³	Prélèvement par canister avec une préconcentration et une analyse par chromatographie en phase gazeuse et détection par spectrométrie de masse
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	0,8 µg.m ⁻³	Aucune méthode de mesure recommandée car nécessité de développement et de validation
Ammoniac (NH ₃)	2021	VGAI court terme : pour une exposition de 24 heures	5 900 µg.m ⁻³	Prélèvement actif sur support (filtre ou tube) imprégné, désorption dans de l'eau ou H ₂ SO ₄ suivie d'une analyse par chromatographie ionique
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	500 µg.m ⁻³	
Benzène	2008	VGAI court terme : pour une exposition de 1 à 14 jours	30 µg.m ⁻³	/
		VGAI intermédiaire : pour une exposition de 14 jours à 1 an	20 µg.m ⁻³	
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10 µg.m ⁻³	
		VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁶	0,2 µg.m ⁻³	
		VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵	2 µg.m ⁻³	
Dioxyde d'azote (NO ₂)	2013	VGAI court terme : pour une exposition de 1 heure	200 µg.m ⁻³	Méthode de mesure directe par chimiluminescence Prélèvement par pompage sur support imprégné et analyse par spectrophotométrie ou chromatographie ionique
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	20 µg.m ⁻³	Prélèvement par diffusion passive et analyse par spectrophotométrie ou chromatographie ionique
Ethylbenzène	2016	VGAI court terme : pour une exposition de 24 heures	22 000 µg.m ⁻³	Prélèvement actif sur tube adsorbant, désorption solvant et analyse par chromatographie gazeuse et détection à ionisation de flamme
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	1 500 µg.m ⁻³	
Formaldéhyde	Mise à jour en 2018	VGAI court terme A respecter de manière répétée et continue pour toute la journée	100 µg.m ⁻³	Prélèvement actif sur tube de gel de silice imprégné de DNPH – Dosage par chromatographie en phase liquide détecteur UV/visible ou Prélèvement passif sur badge imprégné de DNPH/H ₃ PO ₄ (cartouche DSD-DNPH) – dosage par chromatographie en phase liquide avec détecteur UV/visible

⁹⁸ Anses. 2021b. Valeurs Guides de qualité d'Air Intérieur (VGAI). <https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualite-dair-interieur-vgai>.

Substances	Année de parution	Type de valeurs	VGAI	Méthodes de mesure recommandées
Monoxyde de carbone (CO)	2007	VGAI court terme - Pour une exposition de 8 heures - Pour une exposition de 1 heure - Pour une exposition de 30 minutes Pour une exposition de 15 minutes	10 mg.m ⁻³ 30 mg.m ⁻³ 60 mg.m ⁻³ 100 mg.m ⁻³	/
Naphtalène	2009	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10 µg.m ⁻³	/
Particules* (PM _{2,5} et PM ₁₀)	2010	pas de VGAI proposées	/	/
Trichloroéthylène	Mise à jour en 2019	VGAI intermédiaire : pour une exposition de 14 jours à 1 an	3200 µg.m ⁻³	**
		VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁶	1 µg.m ⁻³	Prélèvement <u>actif ou par diffusion passive</u> sur tube avec une désorption thermique suivie d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse et détection par à ionisation de flamme ou spectrométrie de masse Prélèvement par canister avec une préconcentration et une analyse par chromatographie en phase gazeuse et détection par spectrométrie de masse
		VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵	10 µg.m ⁻³	
Tétrachloroéthylène	2010	VGAI court terme : pour une exposition de 1 à 14 jours	1380 µg.m ⁻³	Prélèvement actif par pompage sur tube de charbon actif avec une désorption au disulfure de carbone et une analyse CPG/DIF ou CPG/SM
		VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	250 µg.m ⁻³	Prélèvement par diffusion passive sur tube contenant du charbon actif avec une désorption au disulfure de carbone suivie d'une analyse par CPG/DIF ou CPG/SM
Toluène	2018	VGAI A respecter pour une mesure sur le court terme ou le long terme	20 000 µg.m ⁻³	Prélèvement actif sur tube adsorbant, désorption solvant et analyse, en chromatographie en phase gazeuse couplée soit à un détecteur à ionisation de flamme, soit à un spectromètre de masse avec ou sans mode d'injection par Head space
<p>* Pour les particules présentes dans l'air intérieur, l'Anses ne propose pas de VGAI pour des expositions aiguës et chroniques mais elle recommande la mise en œuvre, par les politiques publiques, des valeurs guides de l'OMS pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sur 24 heures : 25 µg.m⁻³ pour les PM_{2,5} et 50 µg.m⁻³ pour les PM₁₀ • Sur le long terme : 10 µg.m⁻³ pour les PM_{2,5} et 20 µg.m⁻³ pour les PM₁₀ <p>** Méthodes mieux adaptées : <u>prélèvement actif ou par diffusion passive sur tube avec une désorption solvant suivie d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse et détection par à ionisation de flamme</u></p>				

Annexe 7 : Études disponibles sur la qualité des condensats bruts produits par les AWG

Référence	Type d'AWG	Site d'implantation de l'AWG	Conditions de production de l'eau	Durée de l'expérimentation	Paramètres physico-chimiques analysés	Polluants organiques recherchés	Autres polluants recherchés	Paramètres microbiologiques analysés
Kaplan <i>et al.</i> , 2023	Condensation sur surface froide (Watergen®)	Baie de Haïfa (zone industrielle) et ville de Kiryat Tivon (zone urbaine)	Air non filtré Pas de données sur les volumes produits	Baie de Haïfa : 24 semaines (mi-été à mi-printemps sauf mois d'hiver) Kiryat Tivon : 15 semaines, de mars à juin. Réalisation de 12 prélèvements d'air en parallèle.	/	27 COV – 32 SCOV Carbone organique total Ammonium	19 métaux 10 anions 4 cations Formaldéhyde (Kiryat Tivon)	Haïfa : <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , coliformes, coliformes « fécaux »
Kinder <i>et al.</i> , 2017	Condensation sur surface froide (Aquaboy®)	Dans une chambre de simulation avec concentration en benzène maîtrisée dans l'air [C6H6] = 106 à 847 µg.m ⁻³	Air non filtré Température de l'air de 25°C ou 35°C Température des plaques de condensation de l'ordre de 10°C (pour de l'air à 25°C) et de 22°C (pour de l'air à 35°C) Humidité relative de 45%	1 heure (soit une production de 200–250 mL à 25 °C et 300–400 mL à 35 °C)	/	Benzène	/	/

Inbar <i>et al.</i> , 2020	Condensation sur surface froide (Watergen®)	Tel Aviv (environnement très urbanisé)	Air non filtré	De juin à mars	pH	32 composés organiques semi-volatils 27 composés organiques volatils	24 métaux 8 ions inorganiques	
Hassan <i>et al.</i> , 2023	Condensation sur surface froide (prototype équipé de six modules Peltier)	Nibong Tebal Malaisie, (zone urbaine)	Air filtré	Trois jours consécutifs, par périodes de 12 heures Production de 353 mL en douze heures	pH, Matière en suspension, DCO, turbidité/		Ammonium Nitrate	
Inbar <i>et al.</i> , 2021	Condensation sur surface froide (Watergen®)	Tel Aviv (environnement très urbanisé)	Air non filtré	De juin à mars	pH	32 composés organiques semi-volatils 27 composés organiques volatils	24 métaux 8 ions inorganiques	/
Bautista-Olivas <i>et al.</i> , 2014	Condensation sur surface froide (prototype)	3 sites au Mexique : - 1 parc naturel - 1 site peu urbanisé - Mexico (zone urbaine)	Air non filtré	Etude sur 2x2 mois (saison sèche et saison humide)	pH, conductivité	/	As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn	/

Mulchandani <i>et al.</i> , 2022	Condensation sur surface froide (1 appareil)	Tempe - Arizona	Air non filtré Production : 33 L/j	1 an (température ambiante variant de 3,1°C à 43,7°C / hygrométrie de 6 à 85%)	pH, conductivité, COD, turbidité	Aldéhydes, acides carboxyliques	As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Pb, Sb, Se, Tl, Ag, Al, Fe, Mn, Zn, B, Ca, Co, K, Mg, Mo, Na, Ni, Si, Sr, Ti, V	Flore totale
	Capture de vapeur d'eau par dessiccant (2 appareils)		Air non filtré Production : 10 L/j et 7 L/j	3 jours par semaine Par périodes de 2 à 15h Jour et nuit				

Annexe 8 : Démarche de sélection des dangers chimiques et radiologiques pertinents liés à l'air pour les AWG

1^{ère} étape : établir une liste des polluants chimiques dans l'air (extérieur/intérieur), dite « liste longue », à partir des données suivantes :

- polluants réglementés dans l'air en France ou faisant déjà l'objet d'une surveillance nationale⁹⁹ par les organismes agréés par l'État (AASQA¹⁰⁰ ou OQEI¹⁰¹). Pour les pesticides, un critère de sélection supplémentaire est appliqué ;
- polluants d'intérêt ne faisant pas encore l'objet d'un suivi réglementaire ou d'une surveillance nationale (polluants dont la surveillance est recommandée dans les avis et rapports de l'Anses, par exemple¹⁰²) ;
- pesticides : molécules identifiées à une concentration moyenne dans l'air en France¹⁰³ supérieure à 0,4 ng.m⁻³¹⁰⁴.

Référence complémentaire : <https://www.airparif.fr/surveiller-la-pollution/les-polluants-surveilles>.

2^{ème} étape : retenir dans la liste précédente les polluants dont la toxicité par voie orale est avérée / suspectée (dite « liste courte ») et les polluants réglementés dans les EDCH/ERPTC.

Pour chacun de ces composés, rechercher dans la bibliographie :

- la limite/référence de qualité dans les EDCH (arrêté du 11 janvier 2007 modifié) ou les ERPTC (arrêté du 14 mars 2007) ;
- à défaut, les valeurs guides sanitaires pour les EDCH existantes (VGS EDCH) élaborées par l'Anses ou d'autres organismes (Organisation mondiale de la santé (OMS)¹⁰⁵ ; United States Environmental Protection Agency (US-EPA)¹⁰⁶ ; Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA)¹⁰⁷, Santé Canada¹⁰⁸, etc.) ;
- à défaut, les valeurs toxicologiques de référence (VTR) par voie orale existantes permettant de déterminer les valeurs sanitaires dans les EDCH correspondantes.

⁹⁹ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/le-dispositif-de-surveillance-de-la-qualite-de-lair-en-france#:~:text=La%20surveillance%20de%20la%20qualit%C3%A9%20de%20l'air%20est%20r%C3%A9alis%C3%A9e,suivis%20d'analyses%20en%20laboratoire>.

¹⁰⁰ <https://www.atmo-france.org/article/laasqa-de-votre-region>.

¹⁰¹ L'OQEI a succédé à l'OQAI au 1er janvier 2024, <https://www.oqai.fr/fr>.

¹⁰² <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0216Ra.pdf>.

¹⁰³ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-de-surveillance-de-pesticides-dans-l-air-par-les-aasqa-a-partir-de-2002/>.

¹⁰⁴ En considérant qu'un volume de 250 m³ d'air est utilisé pour produire 1 L de condensat brut, une concentration de 0,4 ng.m⁻³ dans l'air est insuffisante pour observer un dépassement de la limite de qualité pour les pesticides (0,1 µg.L⁻¹).

¹⁰⁷ <https://oehha.ca.gov/water>.

¹⁰⁸ <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/qualite-eau.html>.

Références : bases de données Anses^{109,110} ; guide Anses d'élaboration et de choix des valeurs de référence (saisine n° 2020-SA-0019) en cours de publication ; VR pour les eaux de boisson proposées par d'autres organismes : OMS ; US-EPA ; OEHHA ; Santé Canada ; *National health and medical research council* (NHMRC, Australie)¹¹¹ ; *Minnesota Department of Health* (MDH - USA)¹¹² ; Institut national de santé publique du Québec (INSPQ - Canada)¹¹³, *Massachusetts Department of Environmental Protection* (USA)¹¹⁴, *German Environment Agency* (*Umweltbundesamt* : UBA - Allemagne)¹¹⁵ ; RIVM (Pays-Bas)¹¹⁶, etc.

Réglementation :

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 publique¹¹⁷.

Arrêté du 14 mars 2007 relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées ainsi que de l'eau minérale naturelle distribuée en buvette publique¹¹⁸.

3^{ème} étape : établir pour chaque substance son état physique dans l'air (gaz, solide, liquide), puis établir si le passage air-eau est susceptible de s'accompagner d'un changement de forme chimique.

Référence : <https://echa.europa.eu/fr/information-on-chemicals/registered-substances>.

4^{ème} étape : pour les composés chimiques présents majoritairement dans l'air sous forme gazeuse et ne subissant pas de transformation chimique lors du passage dans l'eau, préciser la constante de Henry.

Référence : <http://henrys-law.org/henry/>.

5^{ème} étape : établir, d'après les données de la bibliographie, la concentration maximale observée pour chaque polluant dans l'air (extérieur/intérieur) en France. En l'absence de données spécifiques de la France, rechercher des informations dans la littérature « grise ».

Références :

- pour les polluants réglementés (<https://www.geodair.fr/donnees/consultation>) ;
- pour les pesticides (<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-de-surveillance-de-pesticides-dans-l-air-par-les-aasqa-a-partir-de-2002/>).

¹⁰⁹ <https://www.anses.fr/fr/content/les-valeurs-de-referance>.

¹¹⁰ https://www.anses.fr/system/files/BDD_VTR.xlsx.

¹¹¹ <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines#block-views-block-file-attachments-content-block-1>.

¹¹² <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/water/contaminants/index.html>.

¹¹³ <https://www.inspq.qc.ca/qualite-de-l-eau-et-sante/eau-potable>.

¹¹⁴ <https://www.mass.gov/guides/drinking-water-standards-and-guidelines#-guidelines->.

¹¹⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/water/drinking-water>.

¹¹⁶ <https://www.rivm.nl/en/soil-and-water/drinking-water/statutory-requirements-for-drinking-water>.

¹¹⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000465574/2023-11-21/>.

¹¹⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000274485/2022-11-28/>.

6^{ème} étape : sélection des dangers pertinents

Les dangers considérés pertinents sont déterminés à partir de la « *liste courte* » en distinguant deux cas :

- dangers pour lesquels il est possible de prédire une concentration maximale attendue dans l'eau condensée (C_{max}) à partir des données précédentes :
 - si la C_{max} est supérieure ou égale à la valeur seuil identifiée à l'étape n° 2, danger « pertinent » ;
 - si la C_{max} est inférieure à la valeur seuil identifiée à l'étape n° 2, danger « non pertinent ».
- dangers pour lesquels il n'est pas possible de prédire une concentration maximale attendue dans l'eau condensée (C_{max}) à partir des données précédentes : « pertinents ».

La C_{max} peut être évaluée en suivant diverses approches :

■ Eléments théoriques

Dangers présents dans l'air à l'état particulaire : évaluer (en se basant sur la concentration et la distribution de taille en matière particulaire dans l'air et la concentration du polluant dans cette matière particulaire) la concentration attendue (pire cas) dans l'eau ;

Il est proposé de faire l'hypothèse que 250 m³ d'air transitent dans le dispositif pour un litre d'eau produit (moyenne à ajuster en fonction des données fabricants) et d'utiliser le scénario « pire cas » pour lequel la concentration du polluant dans l'air est maximale et la totalité du polluant contenu dans les 250 m³ est transférée dans l'eau.

Exemples du mercure (CAS : 7439-97-6 ; polluant réglementé¹¹⁹) :

*Le mercure atmosphérique est essentiellement présent sous forme de vapeur, le mercure métallique Hg⁰ représentant plus de 90% du mercure total, alors que le mercure particulaire ne représente au plus **que 10 % du mercure total** présent dans l'air extérieur. Les niveaux de concentration du mercure gazeux généralement observés au niveau mondial sont de 2 à 10 ng.m⁻³ en milieu rural et de 10 à **20 ng.m⁻³** en milieu urbain (Ineris, 2010¹²⁰).*

Considérant que le mercure Hg⁰, forme très largement majoritaire du mercure dans l'atmosphère, est pratiquement insoluble dans l'eau, le transfert de ce métal aux condensats bruts d'AWG est presque exclusivement lié à des dépôts particuliers sur les surfaces de condensation.

Sur cette base, la quantité maximale de mercure susceptible d'être recueillie par m³ d'air entrant dans l'AWG est de 20/10 = 2 ng.

On en déduit que le mercure dans un litre de condensat brut peut être présent à hauteur de 2 x 250 = 500 ng.

Or, la limite réglementaire est de 1000 ng.L⁻¹.

Dans ces conditions, le mercure est classé en polluant « non pertinent ».

¹¹⁹ Code de l'environnement, Section 1 : Surveillance de la qualité de l'air ambiant ... (Articles R221-1 à R221-3).

¹²⁰ Ineris. 2010. Bilan des mesures et perspectives pour la surveillance du mercure dans l'air ambiant en France au titre de la Directive européenne.

Dangers subissant des transformations chimiques lors du passage air-eau : faute de données dans la littérature, ces dangers sont considérés comme pertinents jusqu'à démonstration que leur concentration dans l'air soit trop faible pour induire une concentration significative dans l'eau ;

Dangers présents sous forme gazeuse dans l'air et ne subissant pas de transformation chimique lors du passage air-eau : leur concentration théorique dans les condensats bruts est calculée à partir de données de concentration maximale dans l'air et de la constante de Henry.

Cette approche consiste à modéliser le scénario « pire cas » pour lequel il est considéré que l'équilibre gaz/liquide est atteint, de telle sorte que la quantité maximale de polluant a été transférée de la phase gaz vers la phase liquide condensée, à la pression d'utilisation de l'AWG¹²¹.

Dans cette démonstration, un transfert de la phase gaz (25 °C i.e 298 K) vers la phase liquide condensée (5 °C i.e 278 K), à pression atmosphérique, est considéré.

Exemple du benzène (CAS : 71-43-2 ; polluant réglementé dans le code de l'environnement)¹²² :

La démonstration s'appuie sur les équations et les données de Sander et al. (2023)¹²³. D'après la loi de solubilité de Henry, la constante s'écrit :

- suivant le ratio entre la concentration du composé dans la phase liquide en équilibre avec la phase gaz : $H_{scp} = \frac{C_L^*}{p_i}$ (mol.m⁻³.Pa⁻¹) ;
- ou suivant le ratio des concentrations dans la phase gaz et liquide : $H_{sc} = \frac{C_L^*}{C_G}$ (sans dimension) = $H_{scp} \times R \times T$

avec :

C_L^* : la concentration dans la phase liquide en équilibre avec la phase gaz (mol.m⁻³) ;

C_G : la concentration dans la phase gaz (mol.m⁻³) ;

p_i : la pression partielle du composé dans la phase gaz (en Pa) ;

R : la constante des gaz parfaits (8.314 J.mol⁻¹.K⁻¹) ;

T : la température du système (en K).

Dans le cas du benzène à 25 °C, $H_{scp} = 1,8 \cdot 10^{-3}$ mol.m⁻³.Pa⁻¹ d'après la base de données de Sander et al. (2023)¹²⁴. Cette valeur de H_{scp} est la valeur la plus reportée dans la littérature.

La constante de Henry d'un composé est fortement influencée par la température. Une correction de la température dérivée de l'équation de Clapeyron est proposée par Sander et al. (2023) telle que :

$$H_{scp}(278\text{ K}) = H_{scp}(298\text{ K}) \times \exp\left[-\frac{\Delta H_{sol}}{R} \times \left(\frac{1}{T(278\text{ K})} - \frac{1}{T(298\text{ K})}\right)\right]$$

avec ΔH_{sol} = enthalpie de dissolution (J.mol⁻¹).

¹²¹ Les températures et la pression seront à adapter en fonction des conditions de fonctionnement de l'AWG.

¹²² https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000022964539 et Annexe de l'article R.221-29 du code de l'environnement.

¹²³ Sander, R.: Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent, Atmos. Chem. Phys., 23, 10901–12440, <https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023>, 2023.

¹²⁴ <https://henrys-law.org/henry/casm/71-43-2>.

Dans le cas du benzène, Sander et al. (2023) reporte une valeur de $-\frac{\Delta H_{sol}}{R} = 3800 \text{ K}$ (deuxième colonne de la base de données de Sander concernant le benzène).

D'après les données de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI)¹²⁵ en 2023, la concentration en benzène dans l'air intérieur est de $2,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (au 95^e centile).

À $5 \text{ }^\circ\text{C}$, $Hs^{cc} = Hs^{cp} (278 \text{ K}) \times R \times T = 4,5 \cdot 10^{-3} \times 8,314 \times 278,15 = 10,41$.

Ainsi, $C_L^* = Hs^{cc} \times C_G = 10,41 \times 2,2 = 23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} = 23 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ à $5 \text{ }^\circ\text{C}$ or la limite de qualité du benzène dans les EDCH est de $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

D'après les données de GEOD'AIR¹²⁶, la concentration moyenne annuelle maximale en benzène dans l'air extérieur en 2023 est de $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Ainsi, à $5 \text{ }^\circ\text{C}$, $C_L^* = Hs^{cc} \times C_G = 10,41 \times 3 = 31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} = 31 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ à $5 \text{ }^\circ\text{C}$ or la limite de qualité du benzène dans les EDCH est de $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Dans les conditions du calcul, que ce soit dans l'air intérieur ou extérieur, la limite de qualité n'est pas dépassée, ainsi le benzène n'est pas un polluant « pertinent ».

Par ailleurs, dans la publication de Kinder et al. (2017), les conditions de test de l'étude montrent qu'une exposition à un air présentant une concentration en benzène de $640 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et une humidité relative de 45 %) conduit à une concentration expérimentale dans le condensat brut de $12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ et une concentration prédite de $5,08 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($C_G = 640 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $T_{air} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 45 % d'humidité relative, T_{eau} estimée à $12 \text{ }^\circ\text{C}$). Dans les conditions du calcul proposé ci-dessus ($C_G = 640 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $T_{eau} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$), une valeur de $6,7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ est obtenue, ce qui reste cohérent avec cette publication et, dans ce cas, le benzène est considéré comme un polluant « pertinent ».

Exemple de la fenpropidine (CAS : 67306-00-7 ; pesticide) :

Dans la base de données Sander¹²⁷, $Hs^{cp} (298 \text{ K}) = 7,1 \cdot 10^2 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$ et $-\frac{\Delta H_{sol}}{R} = 6200 \text{ K}$.

Ainsi, $Hs^{cp} (278 \text{ K}) = Hs^{cp} (298 \text{ K}) \times \exp\left[-\frac{\Delta H_{sol}}{R} \times \left(\frac{1}{T(278 \text{ K})} - \frac{1}{T(298 \text{ K})}\right)\right] = 7,1 \cdot 10^2 \times \exp\left[6200 \times \left(\frac{1}{278,15} - \frac{1}{298,15}\right)\right] = 3,1 \cdot 10^3 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$

À $5 \text{ }^\circ\text{C}$, $Hs^{cc} = Hs^{cp} (278 \text{ K}) \times R \times T = 3,1 \cdot 10^3 \times 8,314 \times 278,15 = 7,32 \cdot 10^6$.

En prenant en compte que la concentration moyenne dans l'air extérieur est de $0,18 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (AAQSA¹²⁸), $C_L^* = Hs^{cc} \times C_G = 7,32 \cdot 10^6 \times 1,8 \cdot 10^{-4} = 1318 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} = 1,3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ à $5 \text{ }^\circ\text{C}$ or la limite de qualité des pesticides dans les EDCH est de $0,1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Dans ces conditions, la fenpropidine est considérée comme un polluant pertinent.

¹²⁵ Anses. 2024. « Avis et rapport de l'Anses relatifs à l'actualisation des valeurs guides de qualité d'air intérieur du benzène (CAS n° 71-43-2) ». 2021-MPEX-0006.

¹²⁶ <https://www.geodair.fr/donnees/consultation>.

¹²⁷ <https://henrys-law.org/henry/casm/67306-00-7>.

¹²⁸ https://www.atmo-france.org/sites/federation/files/medias/documents/2024-03/pesticides_2002_2022_v03_2024_VF.xlsx - consultée le 18/08/2024.

Exemple du radon (CAS : 10043-92-2; polluant réglementé dans l'air intérieur) :

Dans la base de données Sander¹²⁹, $Hs^{cp} (298 K) = 9,1 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$ et $-\frac{\Delta H_{sol}}{R} = 2900 K$.

Ainsi, $Hs^{cp} (278 K) = Hs^{cp} (298 K) \times \exp\left[-\frac{\Delta H_{sol}}{R} \times \left(\frac{1}{T(278 K)} - \frac{1}{T(298 K)}\right)\right] = 9,1 \cdot 10^{-5} \times \exp\left[2900 \times \left(\frac{1}{278,15} - \frac{1}{298,15}\right)\right] = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$

À 5 °C, $Hs^{cc} = Hs^{cp} (278 K) \times R \times T = 1,8 \cdot 10^{-4} \times 8,314 \times 278,15 = 4,2 \cdot 10^{-1}$

La concentration moyenne en radon dans les habitations s'élève à $90 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ pour l'ensemble de la France avec des disparités importantes d'un département à l'autre et, au sein d'un département, d'un bâtiment à un autre. La moyenne obtenue à Paris est ainsi de $24 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ seulement, alors qu'elle est de $264 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ en Lozère¹³⁰.

$C_L^* = Hs^{cc} \times C_G = 4,2 \cdot 10^{-1} \times 90 = 37,8 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ soit $3,8 \cdot 10^{-2}$ à 5 °C or la limite de qualité du radon dans les EDCH est de $100 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$.

Dans ces conditions, le radon n'est pas un polluant « pertinent ».

■ Éléments expérimentaux

Dans tous les cas, des essais en conditions maîtrisées (cellule de simulation avec composition de l'air maîtrisée) peuvent être mis en œuvre pour disposer de données spécifiques des AWG.

7^{ème} étape : catégorisation des dangers pertinents

Les dangers pertinents sont classés, dans la mesure du possible, en catégories homogènes en termes de caractéristiques physico-chimiques (par exemple, « composés particuliers ») afin d'identifier les types de procédés de traitement à envisager pour maîtriser le risque.

¹²⁹ <https://henrys-law.org/henry/casrn/10043-92-2>.

¹³⁰ Livret d'information « Le radon », IRSN, <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/radon-librairie>.

Tableau 10. Données des exemples de l'annexe 8.

Catégorie	Substance	n° CAS ¹³¹	Valeurs réglementaires dans l'air	Réglementation dans les EDCH ¹³²	Toxicité par voie orale	Etat physique (dans des conditions normales de P et T de l'air)	Constante de Henry [mol/(m ³ Pa)] à 25°C ¹³³	Concentration dans l'air extérieur en France / Moyenne annuelle	Pertinence
Polluants réglementés : code de l'environnement, Section 1 : Surveillance de la qualité de l'air ambiant ... (Articles R221-1 à R221-3) + Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant	Mercure (Hg) dans les PM10	7439-97-6	Aucune valeur réglementaire	LQ = 1 µg.L ⁻¹	/	<10% solide et > 90% gazeux	1,3×10 ⁻³	< 20 ng.m ⁻³ (¹³⁴)	NON (présence dans l'air à des concentrations trop faibles pour induire un dépassement de la LQ pour les eaux produites)
Polluants réglementés : code de l'environnement, Section 1 : Surveillance de la qualité de l'air ambiant ... (Articles R221-1 à R221-3) + Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant	Benzène (air extérieur)	71-43-2	2 µg.m ⁻³ en moyenne annuelle (objectif de qualité) 5 µg.m ⁻³ en moyenne annuelle (valeur limite pour la protection de la santé humaine)	LQ = 1 µg.L ⁻¹	/	liquide volatil (20°C, 1013 hPa)	1,8 x 10 ⁻³	2,2 µg.m ⁻³	NON (dans le scénario pire cas)

¹³¹ <https://echa.europa.eu/fr>.¹³² Arrêté du 11 janvier 2007 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.¹³³ <https://henrys-law.org/henry>.¹³⁴ <https://www.geodair.fr/donnees/consultation>.

Polluants réglementés : Annexe de l'article R.221-29 du code de l'environnement; Article 11 du Décret n° 2022-1690 du 27 décembre 2022	Benzène (air intérieur)	71-43-2	2 µg.m ⁻³ pour une exposition de longue durée (> 1 an)	LQ = 1 µg.L ⁻¹	/	liquide volatil (20°C, 1013 hPa)	1,8 x 10 ⁻³	3 µg.m ⁻³	NON (dans le scénario pire cas)
Polluants surveillés non réglementés ou émergents (Pesticides) : Rapport de l'Anses relatif aux premières interprétations des résultats de la Campagne Nationale Exploratoire des Pesticides dans l'air ambiant (Autosaisine n° 2020-SA- 0030) + Données Phytatmo 2018-2022 ¹³⁵	Fenpropidine	67306- 00-7	/	LQ = 0,1 µg.L ⁻¹	/	/	7,1 x 10 ²	0,18 ng.m ⁻³	OUI (dans le scénario pire cas)

¹³⁵ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-de-surveillance-de-pesticides-dans-l-air-par-les-aasqa-a-partir-de-2002/>.

Annexe 9 : Exemple de calcul de l'impact des AWG sur l'hygrométrie

L'étude a été réalisée pour un site de production d'eau par condensation d'une capacité de production attendue de 100 m³ par jour en moyenne sur l'année. Les autres données d'entrée ont été les suivantes :

- le site industriel occupe une surface de 10 000 m² et on considère le cube de 100 m de côté ainsi formé ;
- en moyenne annuelle, la température est de 15,5 °C et le taux d'hygrométrie de 70 % ;
- la vitesse moyenne du vent sur l'année est d'environ 4 m.s⁻¹.

L'humidité absolue de l'air en entrée de la centrale est d'environ 9 grammes d'eau dans 1 m³ d'air (équivalant à 9.10⁻³ litres d'eau liquide) et le débit d'air entrant dans le cube est de 40 000 m³.s⁻¹ soit 3 456 000 000 m³ d'air par jour.

Ce volume d'air correspond donc à 31 104 m³ d'eau par jour.

Si le site produit en moyenne 100 m³ d'eau par jour, cela correspond à un prélèvement de l'ordre de 0,3 % du débit d'eau atmosphérique total. Dans ces conditions, il n'est pas considéré qu'il y a une spoliation de l'environnement.

Annexe 10 : Pièces constitutives d'un dossier de demande d'autorisation de la mise sur le marché (AMM) pour un dispositif destiné à un usage domestique ou collectif ou d'un dossier de demande d'autorisation par le Préfet d'un dispositif industriel fixe

I - AMM d'un dispositif mobile destiné à un usage domestique ou collectif :

Concerne :

- les dispositifs de type fontaines à eau destinés à un usage domestique ou destinés à des entreprises ou des petites collectivités ;
- les dispositifs de type unités mobiles de production d'EDCH.

Les pièces du dossier doivent être rédigées en langue française.

1/ Informations administratives (nom ou raison sociale du responsable de la mise sur le marché de l'AWG, adresse, appellation commerciale de l'AWG)

Composition à définir par l'administration.

2/ Description générale de l'installation

Il s'agit de préciser les conditions générales d'utilisation de l'AWG (localisation de l'installation, volume de production et type d'utilisation de l'eau prévus). Les informations minimales à fournir sont :

- la localisation prévue de l'installation (intérieur ou extérieur). Si intérieur : volume du local minimum et aération recommandés ;
- la quantité de production d'eau potable visée (L/j) ;
- les conditions environnementales nécessaires (valeurs minimale et optimale) à cette production (température, taux d'hygrométrie) ;
- les éventuelles allégations/précautions/recommandations générales du pétitionnaire concernant l'utilisation de l'eau produite.

3/ Descriptif technique de l'installation et des procédés utilisés pour la production d'eau

Le pétitionnaire doit fournir un schéma détaillé de l'installation, depuis l'étape de capture de l'air jusqu'au point d'usage. Pour tous les produits et procédés de traitement de l'air et de l'eau utilisés, des données descriptives précises sont attendues (données techniques fournies par les fabricants des différents dispositifs de traitement).

3.1 Mode de traitement de l'air

Les informations minimales à fournir sont :

- le débit d'air en entrée du dispositif ;
- le traitement éventuel de l'air : les types de filtres utilisés (par référence aux catégories définies par les normes en vigueur) et leur disposition les uns par rapport aux autres si plusieurs filtres sont utilisés.

3.2 Méthode de production des condensats bruts à partir de la vapeur d'eau

Les informations minimales à fournir sont :

- la (ou les) technique(s) de capture de la vapeur d'eau à partir de l'air utilisée(s) (condensation directe sur une surface froide, utilisation d'un adsorbant, etc.) ;
- la superficie de la surface de condensation ;
- le nom chimique et le numéro CAS de l'adsorbant utilisé le cas échéant.

3.3 Conditions de stockage des condensats bruts

Les conditions de stockage des condensats bruts sont à décrire. Si des traitements sont appliqués durant cette phase, les protocoles utilisés sont à développer (nature du procédé de traitement, dose, durée, conditions d'application, etc.).

3.4 Traitement des condensats bruts

Chaque étape de la filière de traitement des eaux doit être décrite, en précisant les protocoles utilisés (dose, durée et conditions d'application, etc.). Pour chaque étape, des données techniques doivent permettre de connaître l'objectif de traitement visé et l'utilité dans l'AWG.

3.5 Stockage des eaux traitées

Les conditions de stockage des eaux traitées doivent être décrites. Si des traitements sont appliqués à ce stade, les protocoles utilisés sont à préciser (nature du procédé de traitement, dose, durée, conditions d'application, etc.).

3.6 Conditionnement (le cas échéant)

Si tout ou partie des eaux traitées est destiné à être conditionné, les types de conditionnements utilisés et les modalités de conditionnement doivent être décrits.

3.7 Gestion des effluents et eaux de lavage

Si des effluents liquides ou des eaux de lavage sont produits, les modalités de leur recueil et de leur élimination doivent être décrites.

3.8 Autres

En cas de possibilité de raccordement à un réseau d'eau potable, les dispositifs de protection contre les retours d'eau doivent être décrits.

4/ Évaluation de l'innocuité

4.1 Conformité à la réglementation française des matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement, fluides caloporteurs et produits de nettoyage

Le dossier doit comporter les preuves de conformité sanitaire :

- de l'ensemble des matériaux au contact de l'eau, y compris à l'étape de condensation (cf. § 3.1.2.4.1 du rapport) ;
- des produits et procédés de traitement utilisés (cf. § 3.1.2.5.1 du rapport) ;
- des fluides caloporteurs (cf. § 3.1.2.6 du rapport) ;
- des produits utilisés pour le nettoyage et la désinfection des installations de production, de distribution et de conditionnement d'EDCH (cf. § 3.1.2.7.1 du rapport).

NB : en l'état actuel de la réglementation française, les zéolites naturelles ne sont pas autorisées pour les usages qui en sont faits dans les AWG (capture de vapeur et élimination de l'ammonium). Il est tolérable pour ce cas particulier de n'exiger que la seule conformité à la norme européenne NF EN 16070 (2014) applicable aux zéolites naturelles (ou silico-aluminates de magnésium, calcium, potassium, sodium hydraté) utilisées pour le traitement de l'EDCH. Dans le cas contraire, le fabricant devra apporter la preuve de l'innocuité des zéolites utilisées.

4.2 Éléments d'analyse des dangers

Le dossier doit décrire de manière précise les éléments de l'analyse des dangers réalisée par le pétitionnaire :

- la méthode utilisée : celle-ci n'est pas imposée mais il est possible de se référer aux principes définis pour l'élaboration des PGSSE (par exemple, guide de l'Astee « Initier, mettre en place, faire vivre un PGSSE » - <https://www.astee.org/publications/initier-mettre-en-place-faire-vivre-un-pgsse/>) ;
- la liste des dangers pris en compte dans le cadre de l'analyse des dangers : cette liste doit considérer les polluants de l'air susceptibles de contaminer le condensat brut ainsi que les polluants liés au processus de collecte, de traitement, de stockage. Elle ne doit pas se limiter aux seuls paramètres réglementés dans les EDCH. L'éventualité de la formation de métabolites et sous-produits au cours des étapes de traitement ou de biofilms doit être envisagée ;
- les éléments de caractérisation des dangers : nature, toxicité par voie orale, propriétés physico-chimiques ou biologiques, sources, niveaux de présence dans l'atmosphère, potentiel de transfert air-eau (concentration dans le condensat brut et l'eau produite, valeur cible à respecter dans l'eau produite si le paramètre n'est pas réglementé) ;
- l'argumentaire d'inclusion/d'exclusion des dangers de la liste précédente : cet argumentaire doit permettre d'identifier les polluants pour lesquels des mesures spécifiques de maîtrise et de suivi doivent être prévues.

Nota : la méthode de sélection des polluants pertinents proposée par le GT (annexe 8) pourra être utilisée.

5/ Évaluation de l'efficacité - Validation de la filière de production

Les performances de la filière de production doivent être validées afin de prouver que dans des conditions normales d'utilisation, l'eau produite est propre à la consommation humaine.

Il doit être démontré que la filière de traitement a été conçue pour éliminer les dangers identifiés (cf. étape 4.2) et qu'elle n'est pas susceptible d'être à l'origine de l'apparition d'autres dangers.

Pour l'ensemble des essais réalisés dans ce cadre, les prélèvements et analyses (air, eau) doivent être confiés à un laboratoire indépendant dont la compétence est reconnue par une accréditation portant sur les paramètres analysés et utilisant des méthodes d'analyse normalisées, ou validées et documentées conformément à la norme EN ISO/IEC 17025 (2017) ou à d'autres normes équivalentes reconnues à l'échelle internationale.

5.1 Concernant les polluants de l'air :

Des essais doivent être réalisés permettant de démontrer que la filière de traitement est capable d'abattre les concentrations de ces polluants dans des proportions suffisantes pour garantir la potabilité de l'eau en toutes circonstances. Ces essais doivent être mis en œuvre :

- dans les conditions les plus extrêmes d'utilisation du dispositif (« scénario pire cas ») en ce qui concerne les niveaux de pollution de l'air ;

- pour tous les dangers retenus comme pertinents à l'étape 4.2 ;
- selon des protocoles d'essais rigoureux, qui doivent être détaillés dans le dossier. Ils peuvent consister à placer l'AWG dans une chambre d'essais où la concentration en polluants dans l'air est maîtrisée ; il est aussi possible de réaliser des études de performances de la filière de traitement à partir de condensats bruts artificiellement contaminés. Les analyses réalisées doivent permettre de comparer la qualité des eaux traitées à celle des condensats bruts, afin de calculer des taux d'abattement pour les dangers pertinents.

5.2 Concernant les polluants susceptibles d'être apportés par le processus de traitement

Si malgré le respect des dispositions du 4.1, des dangers liés au processus de traitement sont identifiés, les essais de validation doivent apporter la preuve de la maîtrise du risque lié à l'apparition de ces dangers (maintien de leur concentration à un niveau suffisamment bas, compatible avec la sécurité sanitaire des consommateurs).

5.3 Concernant le risque de colonisation microbienne des réservoirs de stockage des eaux

Le pétitionnaire doit présenter des résultats de tests permettant de démontrer la stabilité de la qualité microbiologique de l'eau traitée au cours de la période de stockage, notamment vis-à-vis de la flore aérobique revivifiable et *Pseudomonas aeruginosa*. Ces essais peuvent s'inspirer du protocole défini par l'AFIFAE (2015).

5.4 Concernant les analyses d'eau traitée en fin de filière

En complément des analyses d'eau réalisées au titre des points précédents, le dossier doit comporter une série de résultats d'analyses de l'eau traitée en fin de filière illustrant la qualité de l'eau produite sur une période d'au moins trois mois de fonctionnement de l'installation (au minimum, une analyse hebdomadaire). Le canevas analytique utilisé pour ces analyses doit couvrir la totalité des paramètres réglementés au titre des EDCH (annexe I de l'arrêté du 11 janvier 2007 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).

6/ Conditions d'utilisation

6.1 Bonnes pratiques d'hygiène et maintenance

Les règles de bonnes pratiques d'hygiène à respecter par le responsable de l'installation sont à présenter de manière détaillée.

Les protocoles de maintenance préventive des équipements doivent être précisés : nature des interventions, fréquence, compétences de l'intervenant. Les choix réalisés dans ce domaine doivent être justifiés, notamment en ce qui concerne la fréquence de renouvellement des consommables (type filtre à charbon actif) et de vérification des capteurs si présents.

6.2 Pilotage et surveillance de la production d'eau

Les dispositifs mis en place et procédures à respecter pour garantir la sécurité sanitaire des eaux produites doivent être décrits :

- description des moyens retenus pour assurer que les points critiques pour la maîtrise de la qualité de l'eau sont maîtrisés en permanence (le cas échéant, sondes sur la prise d'air, capteurs d'analyse en continu, programme et fréquence de surveillance analytique de la qualité des condensats bruts et de l'eau produite). La réalisation

annuelle d'analyses (au minimum microbiologiques) des eaux issues des AWG est recommandée (paramètres du contrôle sanitaire et *Pseudomonas aeruginosa*) ;

- description des mesures de surveillance et d'alerte à mettre en œuvre par l'utilisateur : l'objectif est de détecter précocement les dysfonctionnements afin de les corriger dans les meilleurs délais : indicateurs suivis, seuils d'alerte, actions correctives ;
- description des procédures à mettre en œuvre en cas de pics de concentration en polluants dans l'air (de type incendie), en cas de découverte de non-conformité de l'eau produite, etc.

Lorsque des prélèvements et analyses sont réalisés, ils doivent être confiés à un laboratoire indépendant dont la compétence est reconnue par une accréditation portant sur les paramètres analysés et utilisant des méthodes d'analyse normalisées, ou validées et documentées conformément à la norme EN ISO/IEC 17025 (2017) ou à d'autres normes équivalentes reconnues à l'échelle internationale.

7/ Notice d'emploi à destination du détenteur de l'AWG

La notice d'emploi de l'AWG doit être fournie et son contenu doit être justifié au regard des éléments issus de l'analyse des dangers. Ce document doit être en langue française. Il doit à *minima* :

- rappeler au détenteur qu'il est responsable de la qualité de l'eau distribuée par l'AWG ;
- permettre au détenteur d'un AWG de disposer des informations nécessaires à une installation correcte, y compris la localisation du dispositif (restrictions éventuelles), l'entretien sur le terrain (maintenance préventive, fréquence de remplacement des consommables, instructions pour le nettoyage et/ou la désinfection, etc.) ;
- fixer des règles précises à respecter en cas d'arrêt prolongé (notamment pour prévenir la colonisation du dispositif par une microflore) ;
- mentionner les modalités de la surveillance à réaliser par le détenteur (capteurs éventuels, etc.) et la conduite à tenir en cas d'anomalie, de dysfonctionnement ou de pic de pollution de l'air ;
- préciser le suivi analytique de l'eau par le détenteur conseillé suivant le débit d'eau produite.

II - Autorisation par le Préfet d'un dispositif industriel fixe destiné à la production d'EDCH ou d'ERPT conditionnées

Concerne les dispositifs fixes conçus à la demande pour des installations industrielles (usines de conditionnement d'eaux rendues potables par traitement (ERPT), alimentation d'un réseau public ou privé de distribution d'EDCH, etc.).

Les dispositions prévues dans les arrêtés de demande d'autorisation (arrêtés du 20 juin 2007¹³⁶), en dehors de celles qui portent sur la ressource devraient s'appliquer en prenant en compte les éléments ci-dessous.

Les pièces du dossier doivent être rédigées en langue française.

1/ Informations administratives (nom ou raison sociale de l'exploitant de l'AWG, adresse)

Composition à définir par l'administration.

2/ Description générale de l'installation

Le pétitionnaire doit préciser les conditions générales d'utilisation de l'AWG. Les informations minimales à fournir sont :

- la localisation et l'inventaire des activités à proximité de l'installation pouvant influencer la qualité de l'air capté (ceci doit tenir compte des fluctuations météorologiques saisonnières) ;
- le volume de production d'eau potable visé (m³/j) et les conditions environnementales nécessaires (valeurs minimale et optimale) à cette production (température, taux d'hygrométrie) ;
- l'utilisation de l'eau produite (ERPT conditionnée, alimentation d'un réseau de distribution, alimentation d'une citerne, fabrication de BSA, etc.) ;
- le type et le volume des conditionnements (bouteilles, cannettes, bonbonnes, etc.). La capacité de production (en nombre de cols produits et en litres par heure, par jour et par an) ;
- les mentions d'étiquetage pour les ERPTC ;
- les délais de stockage des eaux traitées (DDM¹³⁷ pour les eaux conditionnées, durée de stockage maximal pour les eaux en citerne, etc.).

3/ Descriptif technique de l'installation et des procédés utilisés pour la production d'eau

Le pétitionnaire doit fournir un schéma détaillé de l'installation, depuis l'étape de capture de l'air jusqu'au point d'usage. Pour tous les produits et procédés de traitement de l'air et de l'eau utilisés, des données descriptives précises sont attendues (données techniques fournies par les fabricants des différents dispositifs de traitement).

¹³⁶ Arrêté du 20 juin 2007 relatif à la constitution du dossier de la demande d'autorisation d'utilisation d'eau destinée à la consommation humaine mentionnée aux articles R. 1321-6 à R. 1321-12 et R. 1321-42 du code de la santé publique : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000274726/> et arrêté du 20 juin 2007 modifié relatif à la constitution du dossier de demande d'autorisation d'exploiter une eau de source ou une eau rendue potable. par traitement à des fins de conditionnement : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000046849528>.

¹³⁷ DDM : date de durabilité minimale du produit, figurant sur son étiquetage.

3.1 Mode de traitement de l'air

Les informations minimales à fournir sont :

- le débit d'air en entrée du dispositif ;
- le traitement éventuel de l'air : les types de filtres utilisés (par référence aux catégories définies par les normes en vigueur) et leur disposition les uns par rapport aux autres si plusieurs filtres sont utilisés.

3.2 Méthode de production des condensats bruts à partir de la vapeur d'eau

Les informations minimales à fournir sont :

- la (ou les) technique(s) de capture de la vapeur d'eau à partir de l'air utilisée(s) (condensation directe sur une surface froide, utilisation d'un adsorbant, etc.) ;
- la superficie de la surface de condensation ;
- le nom chimique et le numéro CAS de l'adsorbant utilisé le cas échéant.

3.3 Conditions de stockage des condensats bruts

Les conditions de stockage des condensats bruts sont à décrire. Si des traitements sont appliqués durant cette phase, les protocoles utilisés sont à développer (nature du procédé de traitement, dose, durée, conditions d'application, etc.).

3.4 Traitement des condensats bruts

Chaque étape de la filière de traitement des eaux doit être décrite, en précisant les protocoles utilisés (dose, durée et conditions d'application, etc.). Pour chaque étape, des données techniques doivent permettre de connaître l'objectif de traitement visé et l'utilité dans l'AWG.

3.5 Stockage des eaux traitées

Les conditions de stockage des eaux traitées doivent être décrites. Si des traitements sont appliqués à ce stade, les protocoles utilisés sont à préciser (nature du procédé de traitement, dose, durée, conditions d'application, etc.).

3.6 Conditionnement (le cas échéant)

Si tout ou partie des eaux traitées est destiné à être conditionné, les types de conditionnements utilisés et les modalités de conditionnement doivent être décrits.

3.7 Gestion des effluents et eaux de lavage

Si des effluents liquides ou des eaux de lavage sont produits, les modalités de leur recueil et de leur élimination doivent être décrites.

3.8 Autres

En cas de possibilité de raccordement à un réseau d'eau potable, les dispositifs de protection contre les retours d'eau doivent être décrits.

4/ Évaluation de l'innocuité

4.1 Conformité à la réglementation française des matériaux au contact de l'eau, produits et procédés de traitement, fluides caloporteurs et produits de nettoyage

Le dossier doit comporter les preuves de conformité sanitaire :

- de l'ensemble des matériaux au contact de l'eau, y compris à l'étape de condensation (cf. 3.1.2.4.1 du rapport) ;
- des produits et procédés de traitement utilisés (cf. 3.1.2.5.1 du rapport) ;
- des fluides caloporteurs (cf. 3.1.2.6 du rapport) ;
- des produits utilisés pour le nettoyage et la désinfection des installations de production, de distribution et de conditionnement d'EDCH (cf. 3.1.2.7.1 du rapport).

NB : en l'état actuel de la réglementation française, les zéolites naturelles ne sont pas autorisées pour les usages qui en sont faits dans les AWG (capture de vapeur et élimination de l'ammonium). Il est tolérable pour ce cas particulier de n'exiger que la seule conformité à la norme européenne NF EN 16070 (2014) applicable aux zéolites naturelles (ou silico-aluminates de magnésium, calcium, potassium, sodium hydraté) utilisées pour le traitement de l'EDCH. Dans le cas contraire, le fabricant devra apporter la preuve de l'innocuité des zéolites utilisées.

4.2 Éléments d'analyse des dangers

Le dossier doit décrire de manière précise les éléments de l'analyse des dangers réalisée par le pétitionnaire :

- la méthode utilisée : celle-ci n'est pas imposée mais il est possible de se référer aux principes définis pour l'élaboration des PGSSE (par exemple, guide de l'Astee¹³⁸) ;
- la liste des dangers pris en compte dans le cadre de l'analyse des dangers : cette liste doit considérer les polluants de l'air susceptibles de contaminer le condensat brut ainsi que les polluants liés au processus de collecte, de traitement, de stockage. Elle ne doit pas se limiter aux seuls paramètres réglementés dans les EDCH. L'éventualité de la formation de métabolites et sous-produits au cours des étapes de traitement ou de biofilms doit être envisagée ;
- les éléments de caractérisation des dangers : nature, toxicité par voie orale, propriétés physico-chimiques ou biologiques, sources, niveaux de présence dans l'atmosphère, potentiel de transfert air-eau, (concentration dans le condensat brut et l'eau produite, valeur cible à respecter dans l'eau produite si le paramètre n'est pas réglementé) ;
- l'argumentaire d'inclusion/d'exclusion des dangers de la liste précédente : cet argumentaire doit permettre d'identifier les polluants pour lesquels des mesures spécifiques de maîtrise et de suivi doivent être prévues.

Nota : la méthode de sélection des polluants pertinents proposée par le GT (annexe 8) pourra être utilisée.

5/ Évaluation de l'efficacité - Validation de la filière de production

Les performances de la filière de production doivent être validées afin de prouver que dans des conditions normales d'utilisation, l'eau produite est propre à la consommation humaine.

¹³⁸ ASTEE. 2021. « Initier, mettre en place, faire vivre un PGSSE ». <https://www.astee.org/publications/initier-mettre-en-place-faire-vivre-un-pgsse/>.

Il doit être démontré que la filière de traitement a été conçue pour éliminer les dangers identifiés (cf. étape 4.2) et qu'elle n'est pas susceptible d'être à l'origine de l'apparition d'autres dangers.

Pour l'ensemble des essais réalisés dans ce cadre, les prélèvements et analyses (air, eau) doivent être confiés à un laboratoire indépendant dont la compétence est reconnue par une accréditation portant sur les paramètres analysés et utilisant des méthodes d'analyse normalisées, ou validées et documentées conformément à la norme EN ISO/IEC 17025 (2017) ou à d'autres normes équivalentes reconnues à l'échelle internationale.

5.1 Concernant les polluants de l'air :

Des essais doivent être réalisés permettant de démontrer que la filière de traitement est capable d'abattre les concentrations de ces polluants dans des proportions suffisantes pour garantir la potabilité de l'eau en toutes circonstances. Ces essais doivent être mis en œuvre :

- dans les conditions les plus extrêmes d'utilisation du dispositif (« scénario pire cas ») en ce qui concerne les niveaux de pollution de l'air ;
- pour tous les dangers retenus comme pertinents à l'étape 4.2 ;
- selon des protocoles d'essais rigoureux, qui doivent être détaillés dans le dossier. Ils peuvent consister à placer l'AWG dans une chambre d'essais où la concentration en polluants dans l'air est maîtrisée ; il est aussi possible de réaliser des études de performances de la filière de traitement à partir de condensats bruts artificiellement contaminés. Les analyses réalisées doivent permettre de comparer la qualité des eaux traitées à celle des condensats bruts, afin de calculer des taux d'abattement.

5.2 Concernant les polluants susceptibles d'être apportés par le processus de traitement

Si malgré le respect des dispositions du 4.1, des dangers liés au processus de traitement sont identifiés, les essais de validation doivent apporter la preuve de la maîtrise du risque lié à l'apparition de ces dangers (maintien de leur concentration à un niveau suffisamment bas, compatible avec la sécurité sanitaire des consommateurs).

5.3 Concernant le risque de colonisation microbienne des réservoirs de stockage des eaux

Le pétitionnaire doit présenter des résultats de tests permettant de démontrer la stabilité de la qualité microbiologique de l'eau traitée au cours de la période de stockage, notamment vis-à-vis de la flore aérobie revivifiable et *Pseudomonas aeruginosa*.

5.4 Concernant les analyses d'eau traitée en fin de filière

En complément des analyses d'eau réalisées au titre des points précédents, le dossier doit comporter une série de résultats d'analyses de l'eau traitée en fin de filière illustrant la qualité de l'eau produite sur une période d'au moins trois mois (au minimum, une analyse hebdomadaire) ou, idéalement, un an (au minimum, une analyse mensuelle)¹³⁹ de fonctionnement de l'installation. Le canevas analytique utilisé pour ces analyses doit couvrir la totalité des paramètres réglementés au titre des EDCH (annexe I de l'arrêté du 11 janvier 2007 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) ou des ERPTC (annexe I de l'arrêté du 14 mars 2007 relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées ainsi que de l'eau minérale naturelle distribuée en buvette publique).

¹³⁹ Fréquence demandée dans l'arrêté du 20 juin 2007.

6/ Conditions d'utilisation

6.1 Bonnes pratiques d'hygiène et maintenance

Les règles de bonnes pratiques d'hygiène à respecter sont à présenter de manière détaillée.

Les protocoles de maintenance préventive des équipements doivent être précisés : nature des interventions, fréquence, compétences de l'intervenant. Les choix réalisés dans ce domaine doivent être justifiés, notamment en ce qui concerne la fréquence de renouvellement des consommables (type filtre à charbon actif) et de vérification des capteurs si présents.

6.2 Pilotage et surveillance de la production d'eau

Les dispositifs mis en place et procédures à respecter pour garantir la sécurité sanitaire des eaux produites doivent être décrits de manière détaillée et leur pertinence doit être argumentée :

- description des moyens retenus pour assurer que les points critiques pour la maîtrise de la qualité de l'eau sont maîtrisés en permanence (le cas échéant, sondes sur la prise d'air, capteurs d'analyse en continu, etc.).
- description des mesures de surveillance et d'alerte en cas d'incident, de dysfonctionnement ou de dérive mis en évidence par la surveillance, afin de les corriger dans les meilleurs délais : indicateurs suivis, seuils d'alerte, actions correctives ;
- description des mesures éventuelles mises en œuvre pour limiter la pollution de l'air au niveau du site (périmètre de protection, conventions avec les riverains, etc.).
- description des procédures de suivi de la qualité de l'air dans l'environnement immédiat de l'installation, via le dispositif officiel de surveillance de la qualité de l'air ou au moyen de capteurs spécifiques (en particulier, COV et particules) ;
- description des procédures à mettre en œuvre en cas de pics de concentration en polluants dans l'air (de type incendie) ;
- description du suivi analytique réalisé (qualité de l'air, des condensats bruts, de l'eau traitée) : plan d'échantillonnage, canevas analytiques utilisés, valeurs cibles, méthodes analytiques, garanties techniques apportées par le laboratoire, résultats disponibles. Les prélèvements et analyses réalisés dans ce cadre doivent être confiés à un laboratoire indépendant dont la compétence est reconnue par une accréditation portant sur les paramètres analysés et utilisant des méthodes d'analyse normalisées, ou validées et documentées conformément à la norme EN ISO/IEC 17025 (2017) ou à d'autres normes équivalentes reconnues à l'échelle internationale ;
- description du dispositif de protection contre les actes de malveillance. La méthode utilisée n'est pas imposée mais il est possible de se référer aux principes définis par exemple, dans le guide de l'ASTEE¹⁴⁰ sur la protection des installations d'eau potable vis-à-vis des actes de malveillance ;
- dans le cas des eaux conditionnées, description des mesures de retrait / rappel prévues en cas de contamination d'un lot de produits. Éventuellement, modalités de gestion d'une échantillothèque.

¹⁴⁰ ASTEE. 2017. « Protection des installations d'eau potable vis-à-vis des actes de malveillance ». <https://www.astee.org/publications/protection-des-installations-deau-potable-vis-a-vis-des-actes-de-malveillance/>.



anses

CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr — [@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)