

Risques sanitaires liés aux proliférations de *Legionella* dans l'eau

Évaluation des risques sanitaires liés aux proliférations de *Legionella* dans l'eau des tours aéroréfrigérantes des centres nucléaires de production électrique d'EDF

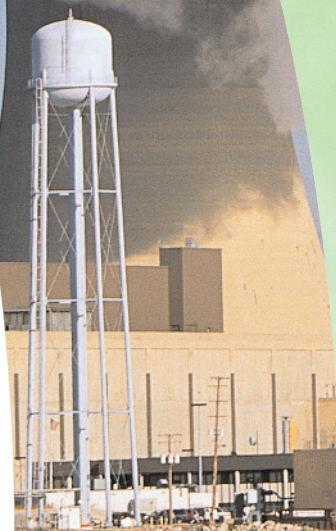
Première phase d'analyse : évaluation de la pertinence des seuils d'action actuellement recommandés

- **Avis de l'Afsset**
- **Avis du comité d'experts spécialisé**
- **Rapport du groupe d'experts**



agence française de **sécurité sanitaire**
de l'environnement et du travail

Février 2006



**Evaluation des risques sanitaires liés aux proliférations de *Legionella*
dans l'eau des tours aérorefrigérantes des centres nucléaires de
production électrique d'EDF**

Première phase d'analyse :

Evaluation de la pertinence des seuils d'action actuellement recommandés

Saisine n° 2004/015

RAPPORT

du groupe de travail Afsset «*Legionella* CNPE»

Février 2006

Membres du groupe de travail « Legionella – CNPE » de l'AFSSET :

Président

Bernard Tribollet. CNRS - Université Paris 6.

Membres

Mme Florence Ader. Jusqu'en novembre 2005-CHG de Tourcoing, depuis Laboratoire de Recherche en Pathologie Infectieuse - EA 2689 Lille.

M Jean-Philippe Croué. Université de Poitiers.

M Didier Hilaire. Centre d'études du Bouchet DGA.

M Philippe Hubert. INERIS.

M Jean Lesne. ENSP

M Frédéric Marcel. INERIS.

M Pierre Servais. Université Libre de Bruxelles.

M Jacques Vendel. IRSN.

Membres du Comité d'Experts Spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens »

Mme Laurence Mathieu, rapporteur auprès du CES. EPHE

M Dave Campagna. Cellule d'épidémiologie associée au Service de Santé au Travail. RATP

M Vincent-Henri Peuch. Météo-France

Membres de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET)

Coordination scientifique

Paulina Cervantès avec le concours de Quentin Dubrac

Secrétariat administratif

Séverine Boix

Contribution de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)

« Revue des pratiques, dans les pays de niveau de développement économique comparable à celui de la France, des réglementations ou recommandations de bonnes pratiques pour la gestion du risque Legionella dans les installations de refroidissement par dispersion d'air des CNPE » (Eric Tarnaud).

Contribution écrite du Centre d'études du Bouchet (DGA)

« Eléments techniques pour l'identification des micro-organismes aériens » (Yannick Morel).

Audition d'experts scientifiques extérieurs au GT :

Département Environnement et Santé Publique, Université de Nancy

Professeur Philippe Hartemann

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

M. Enric Robine,

Mlle Thi Lan Ha

Centre d'études du Bouchet. DGA

M. Yannick Morel

Audition des industriels

EDF

M. Cabanes (Service des études médicales).

Mme Bourbonnais (Centre d'Ingénierie, de Déconstruction et d'Environnement).

M. Delabriere (Ingénierie de conception d'EDF).

Mme Delapierre (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement).
M. Garcier (Directeur Délégué Radioprotection et Prévention des Risques).
M. Gilbert (Recherche & Développement d'EDF).
M. Guezou (Centre d'Ingénierie, de Déconstruction et d'Environnement).
Mme Harmand (Délégué de l'Etat-major Environnement à la Division Production Nucléaire)
M. Lebrun (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement).
Mme Pain (Directeur Délégué Environnement).
M. Pérard (Chef du Projet Impacts Sanitaires Microbiologiques).
Mme Viricel (Centre d'expertise et d'inspection dans les domaines de la réalisation et de l'exploitation).
Mme Wallet (Service des études médicales).

Société nationale d'électricité thermique (SNET)

M. Brunello (Service environnement)

Bertin Technologies

M. Bruno Vallayer (Département « Systèmes pour les biotechnologies »).

Balticare- Baltimore

M. Vermynen

Sollicités pour audition, sans suite :

HAMON

M. Yves Sorel (Direction Générale)

M. Bernard Chalumeau

Il convient de souligner que malgré deux invitations par le groupe de travail, la Société HAMON ne s'est pas présentée à l'audition après avoir pourtant donné leur accord préalable.

SOMMAIRE

Abréviations	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des figures.....	7
1. Nature et traitement de la saisine	9
1.1. Nature de la saisine	9
1.2. Traitement de la saisine	9
2. Gestion du risque <i>Legionella</i> dans les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air.....	12
2.1. Réglementation nationale	12
2.2. Réglementations, recommandations ou guides de bonnes pratiques dans les pays de niveau de développement économique comparable à celui de la France	13
2.2.1. Afrique du Sud, Japon et Chine.....	13
2.2.2. Allemagne	13
2.2.3. Australie.....	13
2.2.4. Belgique.....	15
2.2.5. Canada	15
2.2.6. Espagne	15
2.2.7. Etats Unis	16
2.2.8. Pays Bas	18
2.2.9. Royaume Uni	18
2.2.10. Suisse	19
2.2.11. Conclusions.....	20
3. Etat des connaissances.....	22
3.1. Ecologie des <i>Legionella</i>	22
3.2. Pathologie liée aux <i>Legionella</i>	23
3.3. La plasticité génomique comme support des phénotypes.....	24
3.4. Transition adaptative de l'environnement à l'hôte humain	24
3.5. Panorama épidémiologique des infections à <i>Legionella</i>	25
3.5.1. Epidémie dans une zone géographique étendue (Cas de Lens)	25
3.5.2. Epidémie dans une zone géographique étendue (Cas de la Norvège)	25
3.5.3. Cas sporadiques non expliqués	26
3.6. Détection et dénombrement des <i>Legionella</i> dans l'environnement.....	26
3.6.1 Détection et dénombrement de <i>Legionella</i> dans l'eau	26
3.6.2. Caractérisation des aérosols et détection des <i>Legionella</i> dans les aérosols.....	27
3.6.3. Echantillonneur des bio- aérosols	29
3.7. Modélisation de la dispersion des panaches	31
3.8. Points critiques dans les installations industrielles.....	31
3.8.1. Dévesiculeurs ou pare gouttelettes	31
3.8.2. Le circuit d'eau et le biofilm.....	32
3.9. Surveillance, entretien et maintenance des installations industrielles.....	33
3.10. Traitement physico-chimique et désinfection des eaux	33
4. Principales caractéristiques des TAR CNPE exploitées par EDF	36
5. Présentation et discussion de l'approche d'EDF	37
5.1. Démarche de démonstration d'EDF concernant les seuils d'action actuellement préconisés	37
5.1.1. Présentation et discussion de la modélisation	38
5.1.1.1. Présentation et discussion du choix du modèle	38
5.1.1.1.1. Argumentation présentée par EDF	38
5.1.1.1.2. Commentaires des experts.....	38
5.1.1.2. Présentation et discussion des valeurs paramétriques des modèles	39
5.1.1.2.1. Argumentation présentée par EDF	39

5.1.1.2.2. Commentaires des experts.....	39
5.1.1.3. Présentation et discussion de l'interprétation des résultats de modélisation	41
5.1.1.3.1. Argumentation présentée par EDF.	41
5.1.1.3.2. Commentaires des experts.....	41
5.1.1.4. Discussion et conclusion.	42
5.1.2. Présentation et discussion de l'approche d'estimation de l'exposition des individus aux panaches	43
5.1.2.1. L'approche d'EDF	43
5.1.2.2. Commentaires des experts.....	44
5.1.3. Conclusion sur les arguments de démonstration d'EDF.....	45
5.2. Présentation et discussion des plans de surveillance mis en place par EDF..	45
5.2.1. Points de prélèvements.....	46
5.2.1.1. Argumentation d'EDF.....	46
5.2.1.2. Commentaires des experts	46
5.2.2. Paramètres d'auto-surveillance	47
5.2.3. Seuils d'action en cas de dépassement suspecté ou avéré de seuils recommandés.....	47
5.2.4. Conclusion.....	49
5.3. Projets de recherche d'EDF en cours de réalisation	49
6. Conclusions	50
7. Mesures complémentaires et besoins de recherche	52
8. Références.....	53
Annexe 1 : Saisine	61
Annexe 2 : Fond documentaire	65

Abréviations

AFSSET : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail
ANC : Actives non- cultivable
AOX : Absorbable organic halide
ARNr : Acide ribonucléique ribosomal
BCYE : Buffered charcoal yeast extract
CEB : Centre d'études du Bouchet
CES-milieux aériens : Comité d'experts spécialisés « évaluation des risques liés aux milieux aériens ».
CNPE : Centre nucléaire de production électrique
CNRL : Centre national de référence des *Legionella*
CNRS : Centre national de la recherche scientifique
COD : carbone organique dissous
CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment
DAPI : Di-aminido-phenyl indol
DGA : Délégation générale de l'armement
DGSNR : Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection
EDF : Electricité de France
ENSP : Ecole nationale de la santé publique
EPA : Environmental Protection Agency (Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis)
EPHE : Ecole pratique des hautes études
FISH: Fluorescence *in situ* hybridization
GT : Groupe de travail
HACCP: Hazard analysis critical control point
HR : Humidité relative
ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement
INB : Installations nucléaires de base
INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques
InVS : Institut de veille sanitaire
IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
MES : matières en suspension
MO : matière organique
NRC : Nuclear regulatory Commission
NTU : Nephelometric turbidity unit
PCR : Polymerase chain reaction
SNET : Société nationale d'électricité thermique
spp : species (toutes espèces de *Legionella* confondues)
TA : titre alcalimétrique
TAC : titre alcalimétrique complet
TAR CNPE : Tours aérorefrigérantes de centre nucléaire de production électrique
TAR ICPE : Tours aérorefrigérantes d'installation classée pour la protection de l'environnement
TAR : Tours aérorefrigérantes
THCa : titre hydrotimétrique calcique ou dureté calcique
UFC : Unité Formant Colonie
VNC : viables non cultivables

Liste des tableaux

	Page
▪ <u>Tableau 1</u> : Actions et procédures de surveillance en fonction de l'abondance de <i>Legionella spp</i> d'après la norme australienne AS/NZS 3666, troisième partie.....	14
▪ <u>Tableau 2</u> : Actions et procédures de surveillance en fonction de la concentration de bactéries hétérotrophes cultivables d'après la norme australienne AS/NZS 3666, troisième partie.....	14
▪ <u>Tableau 3</u> : Niveau recommandé pour les paramètres indicatifs de la qualité de l'eau dans les tours aéroréfrigérantes d'après le décret royal espagnol 865/2003 du 4 juillet 2003	15
▪ <u>Tableau 4</u> : Fréquence de mesure des paramètres biologiques d'après le décret royal espagnol 865/2003 du 4 juillet 2003	15
▪ <u>Tableau 5</u> : Actions proposées en fonction de l'abondance de <i>Legionella spp</i> dans l'eau d'après le décret royal espagnol 865/2003 du 4 juillet 2003	16
▪ <u>Tableau 6</u> : Actions préconisées par l'Occupational Safety & Health Administration en fonction de l'abondance en <i>L. pneumophila</i> (1999).....	17
▪ <u>Tableau 7</u> : Valeurs guides recommandées par le Cooling Technologies Institut pour les paramètres indicateurs de salissure biologique	17
▪ <u>Tableau 8</u> : Fréquence d'analyse des paramètres indicateurs de la qualité de l'eau des TAR recommandée par le Health safety executive au Royaume-Uni (HSE, 2004).....	19
▪ <u>Tableau 9</u> : Actions recommandées par le Health safety executive au Royaume-Uni en fonction de l'abondance de bactéries hétérotrophes cultivables et de <i>L. pneumophila</i> (HSE, 2004).....	19
▪ <u>Tableau 10</u> : Actions recommandées par l'Office fédéral de la santé publique de Suisse en fonction de l'abondance de bactéries hétérotrophes cultivables et de <i>Legionella spp</i> (2005).....	20
▪ <u>Tableau 11</u> : Comparaison des caractéristiques des <i>Legionella</i> lors de deux phases de croissance (Adapté d'après Steinert, et al., 2002)	24
▪ <u>Tableau 12</u> : Seuils établis par EDF pour gérer le risque <i>Legionella</i> dans ses installations CNPE	48

Liste des figures

	Page
▪ <i>Figure 1</i> : Cinétique de survie de <i>L. pneumophila</i> mesurée par culture bactérienne en fonction du taux d'humidité (d'après Ha, 2005 a)	28
▪ <i>Figure 2</i> : Cinétique de survie de <i>L. pneumophila</i> sérotype 6 mesurée par un test d'intégrité membranaire en fonction du taux d'humidité relative (d'après Ha, 2005 a)	28
▪ <i>Figure 3</i> : Cinétique de survie de <i>L. pneumophila</i> sérogroupe 6 et <i>L. pneumophila</i> sérogroupe 1 de Lens mesurée par intégrité membranaire (d'après Ha, 2005 a)	29

Liste des figures (suite)

Page

- **Figure 4 : Cinétique de survie de *L. pneumophila* sérogroupe 6 et *L.pneumophila* sérogroupe 1 de Lens mesurée par culture bactérienne (d'après Ha, 2005 a)29**
- **Figure 5 : Principe d'impaction en milieu liquide des biocollecteurs (Source Robine. CSTB)30**
- **Figure 6 : Exemples de biocollecteurs d'air utilisés dans le cadre de mesures environnementales (Source : M. Morel, CEB)30**
- **Figure 7 : Modélisations de la concentration de *Legionella* au sol, tracées à partir des données d'EDF pour une concentration de 10^5 UFC/l.....43**
- **Figure 8 : Comparaison des modélisations d'EDF à la concentration de *Legionella* correspondant au seuil d'arrêt pour les TAR ICPE (10^5 UFC/l) et au seuil d'intervention pour les TAR CNPE (5.10^6 UFC/l pour Cattenom et 5.10^5 UFC/l pour Chinon)43**

1. Nature et traitement de la saisine

1.1. Nature de la saisine

La direction générale de la santé, la direction de la prévention des pollutions et des risques et la direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, en date du 15 novembre 2004, ont saisi l'AFSSET afin de réaliser une expertise collective sur l'évaluation des risques sanitaires liés à la prolifération de *Legionella* dans l'eau des tours aéroréfrigérantes des centres nucléaires de production électrique (TAR CNPE) d'EDF (annexe 1). Cette demande se décline en deux parties bien distinctes :

- Evaluer, pour le cas particulier de ces installations et sur la base de leur situation actuelle, des niveaux d'interventions à partir desquels des mesures préventives (traitements de désinfection) devraient être appliquées, en particulier tenant compte de l'influence qu'exercent des facteurs tels que :
 - les concentrations de *Legionella* dans les circuits de refroidissement
 - la hauteur des tours
 - les technologies de refroidissement
 - les modalités de surveillance
 - les caractéristiques des implantations vis-à-vis des populations exposées, notamment prenant en compte la densité de la population autour des TAR CNPE et les caractéristiques climatologiques ;
- expertiser les éléments relatifs à l'analyse des risques sanitaires et environnementaux fournis ou à fournir par l'exploitant, ainsi que les résultats des études pertinentes, dont certaines restent encore à produire ou à finaliser.

1.2. Traitement de la saisine

Afin d'instruire cette saisine dans le cadre de l'expertise collective, un groupe de travail *ad-hoc* intitulé « *Legionella* – CNPE », a été créé par décision de la directrice générale de l'agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail et installé en date du 4 février 2005, sous la présidence de Monsieur Bernard Tribollet (CNRS - Université Paris 6).

Le groupe de travail a été rattaché au Comité d'Experts Spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES – milieux aériens) lors de son installation le 10 juin 2005.

Les membres du groupe et leurs domaines d'expertise sont les suivants :

- Florence Ader. Médecin spécialiste en pathologies infectieuses. Modélisation expérimentale de l'infection à *Legionella*.
- Dave Campagna, membre du CES - milieux aériens. Epidémiologiste expert du domaine environnement et santé au travail.
- Jean-Philippe Croué. Chimie de l'eau, traitements oxydatifs et sous produits de désinfection.
- Didier Hilaire. Dispersion aérienne de micro-organismes et décontamination.
- Philippe Hubert. Dispersion atmosphérique et analyse probabiliste.
- Jean Lesne. Bactéries pathogènes dans l'environnement. Quantification des légionelles dans l'eau
- Frédéric Marcel. Sécurité industrielle et analyse des risques.
- Laurence Mathieu, rapporteur auprès du CES - milieux aériens. Caractérisation des expositions aux bactéries de l'eau, des biofilms et de l'air.
- Vincent Peuch, membre du CES - milieux aériens. Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants.
- Pierre Servais. Ecologie des milieux aquatiques.
- Bernard Tribollet, président du groupe de travail. Biofilms, entartrage, corrosion des matériaux en milieux naturels.
- Jacques Vendel. Physique et métrologie des aérosols.

La saisine était accompagnée d'une série de documents fournis par EDF portant principalement sur :

- les procédures de mesure du taux de primage de dévésiculeurs ;
- la modélisation de la diffusion et retombée au sol des panaches de tours des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et de tours CNPE à l'aide du modèle Multipol-Screen3 ;
- des études d'exposition professionnelle à *Legionella pneumophila* (*L. pneumophila*) dans les sites nucléaires d'EDF ;
- une « évaluation quantitative du risque sanitaire et d'impact sanitaire ».

Après analyse de la saisine et de ces documents, les experts ont :

1. émis deux remarques préalables :

- l'impossibilité d'effectuer une évaluation quantitative du risque sanitaire en l'absence de dose infectante de *L. pneumophila* connue pour l'homme ;
- la nécessité de considérer la présence et l'abondances de *Legionella spp* dans les circuits de circulation d'eau des TAR sans se limiter aux phénomènes de multiplication (prolifération) de cette bactérie dans les TAR ;

2. considéré que la demande se déclinait selon trois interrogations principales :

- la recevabilité du dossier de démonstration de l'exploitant visant à justifier des seuils d'intervention en *Legionella spp* spécifiques pour leurs TAR CNPE. Cette démonstration s'appuyait sur la comparaison des concentrations en *Legionella spp* au sol générées par la dispersion atmosphérique du panache des TAR CNPE et des TAR ICPE, estimées à l'aide d'outils de modélisation. EDF consolidait sa démonstration avec des études d'exposition professionnelle ;
- la pertinence de la démarche de surveillance des installations d'EDF relative à la maîtrise des niveaux de *Legionella spp* dans l'air autour de ses installations ;
- la pertinence des traitements de désinfection concernant *Legionella spp*, considérant par ailleurs, l'impact environnemental de ces traitements.

A la lumière d'une première audition d'EDF, le groupe a sollicité des compléments d'information. Ces nouveaux éléments ont été reçus jusqu'en juin 2005 et portent notamment sur la modélisation de la retombée des panaches effectuée à l'aide du modèle ADMS3, la stratégie de surveillance et le traitement de ses installations.

Les différentes questions identifiées par les experts ont été soumises à l'ensemble du groupe et discutées en séances plénières du groupe de travail. Cette méthode a permis d'assurer la pluralité des points de vue et d'identifier les points nécessitant un examen plus approfondi. Chaque membre a été sollicité sur son domaine de compétence et a participé à la rédaction des parties s'y rapportant. Toutes les contributions, internes ou externes au groupe, ont été présentées en séance plénière puis validées par les membres du groupe de travail. Au cours de la phase de rédaction, il a été demandé à tous les experts de lire l'intégralité des versions successives du rapport.

Au total, les experts ont examiné une trentaine de documents confidentiels fournis par EDF de février à juin 2005, représentant plus de 1000 pages et ont auditionné des représentants de l'exploitant à trois occasions. Les experts ont apprécié la visite d'un site CNPE qui leur a permis de mieux interpréter les données et les conclusions d'EDF.

Le groupe d'expertise collective s'est réuni en séance plénière 12 fois entre février 2005 et janvier 2006 et a participé à plusieurs conférences téléphoniques. Il a procédé à l'analyse critique de l'ensemble des documents transmis par l'exploitant et il a utilisé les données scientifiques et techniques récentes, sur la problématique *Legionella*, la réglementation en vigueur tant en France que dans les pays de niveau de développement économique comparable à celui de la France et les informations recueillies lors des auditions de plusieurs experts scientifiques institutionnels et industriels.

Parmi ces derniers, quelques exploitants d'installations similaires ou fournisseurs de technologies pour les TAR de grandes dimensions, ont été consultés. Il est à souligner ici que, bien que sollicité à plusieurs reprises, le fabricant de dévésiculeurs de TAR ICPE et des TAR CNPE d'EDF ne s'est pas présenté à l'audition.

Les travaux du groupe d'expertise ont été rapportés oralement devant le CES « milieux aériens de l'Agence par Bernard Tribollet, président du groupe de travail et par Laurence Mathieu, rapporteur et y ont été débattus lors de ses séances d'octobre et de décembre 2005.

Le présent rapport porte sur la recevabilité du dossier de démonstration d'EDF visant à justifier des seuils d'intervention en *Legionella spp* spécifiques pour des TAR CNPE et la pertinence de sa démarche de surveillance visant à la maîtrise des niveaux de *Legionella spp* dans l'air autour de ces installations.

Les informations relatives aux procédés de traitement, à leur efficacité et leur impact sur l'environnement feront l'objet d'une exploitation complémentaire et d'un avis ultérieur.

2. Gestion du risque *Legionella* dans les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air

2.1. Réglementation nationale

Installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air des centrales nucléaires de production électrique (TAR CNPE)

Les installations nucléaires de base (INB) incluant les tours des installations de refroidissement du circuit tertiaire par dispersion d'eau dans un flux d'air (TAR CNPE) sont régies par le décret n° 63-1228 du 11 décembre 1963 modifié. Ce décret établit la distinction entre les « équipements qui font partie d'une installation nucléaire de base » et les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), en spécifiant que les premiers sont ceux qui constituent « un élément de cette installation nécessaire à son exploitation ».

Le seul texte qui encadre la gestion du risque lié aux légionelles dans les TAR CNPE, est une demande émanant de la DGSNR (courrier en date du 2 février 2005 de la DGSNR à EDF). D'après ces recommandations, EDF doit mettre en place des mesures de prévention adaptées afin de maintenir la concentration en *Legionella spp* en dessous de 5.10^6 UFC/l dans l'eau des circuits de refroidissement de toutes les TAR CNPE à l'exception de celles de Chinon, pour lesquelles la concentration en *Legionella spp* demandée est de 5.10^5 UFC/l.

Ces recommandations se déclinent aussi en terme de fréquence d'analyse. La périodicité des mesures pour les INB est :

- mensuelle si la concentration en *Legionella spp* est inférieure à 10^4 UFC/l ;
- toutes les deux semaines si la concentration en *Legionella spp* est comprise entre 10^4 et 10^5 UFC/l (inférieure à 10^4 UFC/l pour Chinon) ;
- hebdomadaire si la concentration en *Legionella spp* est supérieure à 10^5 UFC/l (supérieure à 10^4 UFC/l pour Chinon).

Les rejets d'effluents liquides et gazeux ainsi que les prélèvements d'eau de ce circuit sont soumis à une autorisation délivrée au niveau ministériel tel qu'indiqué par le décret n° 95-540 du 4 mai 1995 relatif aux INB. Ces règles s'appliquent aux TAR CNPE.

Installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air soumises à autorisation (TAR ICPE)

Les TAR sont des installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air relevant de la législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (TAR ICPE). Le contrôle de l'application de cette réglementation est assuré par l'inspection des installations classées sous l'autorité du préfet. Les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air font l'objet de la rubrique 2921 de la nomenclature des installations classées créée par décret du 1^{er} décembre 2004. Les prescriptions générales applicables aux installations soumises à déclaration ou autorisation sous cette rubrique sont précisées dans les arrêtés ministériels du 13 décembre 2004, (*Journal officiel* décembre 2004).

Pour les installations soumises à autorisation, ces dispositions prévoient que :

- la concentration en *Legionella spp* dans l'eau des TAR doit être maintenue à un niveau inférieur à 10^3 UFC/l pour assurer une gestion du risque. La fréquence de prélèvements est mensuelle, sauf si les résultats de 12 mois consécutifs montrent que la concentration en *Legionella spp* reste inférieure à 10^3 UFC/l, dans ce cas la fréquence devient trimestrielle ;
- si la concentration en *Legionella spp* est supérieure ou égale à 10^3 UFC/l et inférieure à 10^5 UFC/l, l'exploitant prend des dispositions pour nettoyer et désinfecter l'installation de façon à s'assurer d'une concentration en *Legionella spp* inférieure à 10^3 UFC/l d'eau selon les indications décrites ci-après :

- la vérification de l'efficacité du nettoyage et de la désinfection est réalisée par un prélèvement selon la norme NF T90-431 dans les deux semaines consécutives à l'action corrective ;
 - le traitement et la vérification de l'efficacité du traitement sont renouvelés tant que la concentration mesurée en *Legionella spp* est supérieure ou égale à 10^3 UFC/l et inférieure à 10^5 UFC/l d'eau ;
 - à partir de trois mesures consécutives indiquant des concentrations supérieures à 10^3 UFC/l d'eau, l'exploitant devra procéder à l'actualisation de l'analyse méthodique des risques de développement des *Legionella spp* dans l'installation, en prenant notamment en compte la conception de l'installation, sa conduite, son entretien et son suivi ;
 - l'analyse des risques (au sens de points critiques de l'installation) doit permettre de définir les actions correctives visant à réduire le risque de développement des *Legionella spp* et de planifier la mise en oeuvre des moyens susceptibles de réduire ces risques. Le plan d'actions correctives, ainsi que la méthodologie mise en oeuvre pour analyser cet incident sont joints au carnet de suivi ;
 - si le résultat de l'analyse selon la norme NF T90-431 rend impossible la quantification de *Legionella spp* en raison de la présence d'une flore interférente, l'exploitant prend des dispositions pour nettoyer et désinfecter l'installation de façon à s'assurer d'une concentration en *Legionella spp* inférieure à 10^3 UFC/l ;
- si la concentration en *Legionella spp* est supérieure ou égale à 10^5 UFC/l, l'exploitant doit immédiatement arrêter l'installation et informer l'inspection des installations classées. Il met en oeuvre des actions correctives, notamment la vidange, le nettoyage et la désinfection de l'installation. Il réalise un prélèvement 48 heures après la remise en service de l'installation, puis tous les quinze jours pendant trois mois. L'installation peut être de nouveau arrêtée si le résultat d'une de ces mesures met en évidence un résultat supérieur à 10^4 UFC/l en *Legionella spp*.

2.2. Réglementations, recommandations ou guides de bonnes pratiques dans les pays de niveau de développement économique comparable à celui de la France

Ce chapitre présente les informations collectées par l'INERIS concernant les réglementations, recommandations et/ou les procédures de bonnes pratiques dans les pays de niveau de développement économique comparable à celui de la France.

2.2.1. Afrique du Sud, Japon et Chine

Dans ces pays, les CNPE sont toutes situées en bord de mer et n'utilisent pas d'installation de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air.

2.2.2. Allemagne

Selon la direction de la sûreté nucléaire de l'Agence Fédérale de l'Environnement (Federal Environmental Agency) il n'y a pas de réglementation particulière pour les tours aéroréfrigérantes des CNPE. La seule contrainte connue est que l'eau d'appoint des TAR doit être décarbonatée (source : échanges Ineris-Sté Hamon). Pour ce qui est de la gestion des TAR ICPE, il n'existe pas de réglementation ou de guide spécifique pour les TAR et la gestion du risque *Legionella*. Néanmoins, le guide 6022-3 de 2002 concernant les exigences en termes d'hygiène pour les systèmes d'air conditionné (section 4.3.10) précise que la qualité microbiologique de l'eau doit être maintenue en dessous de 10^4 UFC/ml pour la flore totale et inférieure à 10 UFC/l pour les *Legionella*.

2.2.3. Australie

L'Australian Nuclear Science and Technology organisation indique qu'en Australie il n'existe pas de réglementation relative à la gestion de la problématique *Legionella* dans les circuits d'eau de TAR CNPE. Par contre, la gestion du risque *Legionella* des installations industrielles est régie selon une norme prescriptive. Cette norme a été intégrée dans la réglementation relative aux bâtiments et dans la plupart des textes réglementaires sanitaires. Il s'agit de la norme "Air-handling and water systems of buildings, microbial control, AS/NZS 3666 Australian/New Zealand standards, Sydney".

La première partie de cette norme concerne la conception, l'installation et la mise en route du système de refroidissement. La deuxième partie couvre la conduite et la maintenance des systèmes. Enfin, en 2000, une troisième partie concernant des critères de performance de traitements et de valeurs opératoires de surveillance, a été introduite.

Cette norme préconise le maintien de la concentration de *Legionella spp* dans l'eau des installations de refroidissement à la limite de détection de la méthode d'analyse australienne AS 3896. Pour atteindre cet objectif, les installations de refroidissement doivent être équipées de systèmes de régulation automatique de traitements des eaux. Ces traitements sont destinés à la maîtrise de la corrosion, du tartre, de l'encrassement biologique et de la multiplication microbienne. La performance du programme d'entretien et de traitement de l'eau est jugée d'après des valeurs spécifiques de paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau.

Des procédures de surveillance et d'actions spécifiques à suivre sont déclinées en fonction des valeurs seuils en *Legionella spp*. En outre, des valeurs seuils en bactéries hétérotrophes cultivables sont préconisées pour les installations alimentées avec une eau de surface ou une eau grise. Ces procédures sont présentées dans les tableau 1 (concentration en *Legionella spp*) et 2 (concentration en bactéries hétérotrophes cultivables).

Tableau 1 : Actions et procédures de surveillance en fonction de l'abondance de *Legionella spp* d'après la norme australienne AS/NZS 3666, troisième partie.

Abondance de <i>Legionella spp</i> (UFC/l)	Procédures à suivre
< LD*	n°1 : surveillance mensuelle et maintien du programme de traitement de l'eau
≥ LD* et < 10 ⁶	n°2 : identifier l'origine du problème, révision du programme de traitement de l'eau, action correctrice, désinfection immédiate et programme de contrôle selon la procédure n° 3 n°3 : nouvelle analyse de l'eau dans un délai de 3 à 7 jours a) si détection < limite de détection, continuer à analyser l'eau tous les 3 à 7 jours jusqu'à ce que 2 échantillons consécutifs aient une concentration en <i>Legionella spp</i> inférieure à la limite de détection ; appliquer la procédure n°1. b) si détection < 10 ⁵ UFC/l, répéter la procédure n°2 c) si détection ≥ 10 ⁵ UFC/l, décontamination immédiate et répéter la stratégie de contrôle n°3 d) si détection ≥ 10 ⁶ UFC/l, désinfection immédiate, recommencer les procédures n°2 et n°3

*LD : limite de détection de la méthode AS 3896 est estimée à > 10 UFC/ml

Tableau 2 : Actions et procédures de surveillance en fonction de la concentration de bactéries hétérotrophes cultivables d'après la norme australienne AS/NZS 3666, troisième partie.

Abondance de bactéries hétérotrophes (UFC/l)	Procédures à suivre
< 10 ⁸	n°1 : surveillance mensuelle et maintien du programme de traitement de l'eau
≥ 10 ⁸ et < 5.10 ⁹	n°2 : identifier l'origine du problème, révision du programme de traitement de l'eau, action correctrice, désinfection immédiate et programme de contrôle selon la procédure n° 3 n°3 : nouvelle analyse de l'eau dans un délai de 3 à 7 jours a) si détection < 10 ⁵ UFC/ml, répéter la procédure n°1. b) si détection ≥ 10 ⁵ UFC/l et < 5.10 ⁶ , retour à la procédure n°2 c) si détection ≥ 5.10 ⁶ UFC/l, décontamination immédiate et répéter la stratégie de contrôle n°3

2.2.4. Belgique

L'agence fédérale de contrôle nucléaire indique qu'il n'existe pas de réglementation particulière pour les tours aéroréfrigérantes des CNPE. Cependant, pour les TAR ICPE, la communauté flamande possède une réglementation concernant la prévention du risque *Legionella*; ces textes, en cours de ré-évaluation, sont :

- the control of *Legionella* bacteria in water system, approved code of practice and guidance, Health and Safety Enquiries (HSE);
- Omvang en preventie van vermeerdering van *Legionella* in koeltorens en luchtbehandelings apparatuur.

Les autres parties de la Belgique (Wallonie et Bruxelles) n'ont pas de réglementation concernant la gestion du risque *Legionella* dans les TAR.

2.2.5. Canada

Il n'existe pas de réglementation spécifique concernant la problématique *Legionella* dans les TAR CNPE et les TAR industrielles.

2.2.6. Espagne

Il n'existe pas de réglementation spécifique pour les tours aéroréfrigérantes des CNPE (Consejo de Seguridad Nuclear). Par contre, il existe une réglementation pour les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air. En effet, le décret royal 865/2003 du 4 juillet établit les critères de santé et d'hygiène pour la prévention et le contrôle de la légionellose. L'annexe 4 de ce document concerne la surveillance et les actions à mettre en œuvre.

Des valeurs limites pour plusieurs paramètres indicatifs de la qualité de l'eau sont préconisées. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Niveau recommandé pour les paramètres indicatifs de la qualité de l'eau dans les tours aéroréfrigérantes d'après le décret royal espagnol 865/2003 du 4 juillet 2003

Paramètres physico-chimiques	Niveau recommandé
Turbidité	< 15 UNF (unité néphélométrique de formaline)
Conductivité	dans les limites permettant une qualité de l'eau n'entraînant pas la formation de tartre et/ou de corrosion
pH	6,5-9,0
Fer total	< 2 mg/L
Niveau en biocide	en fonction des spécifications du fabricant

La qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau doit être examinée selon la fréquence de mesure suivante : mensuellement, pour la température, pH, conductivité, turbidité, fer total et la flore totale dans l'eau d'appoint et, quotidiennement pour le niveau de chlore ou de biocide utilisé. La qualité microbiologique de l'eau doit être examinée selon la fréquence de mesure et les paramètres indiqués dans le tableau 4.

Tableau 4 : Fréquence de mesure des paramètres biologiques d'après le décret royal espagnol 865/2003 du 4 juillet 2003

Paramètres	Fréquence minimale
<i>Legionella spp</i> (ISO 11731 partie 1, 1998)	Trimestriel
Bactéries hétérotrophes cultivables (ISO 6222, 1999)	Mensuel

Lorsque des changements sont détectés dans la qualité physico-chimique de l'eau, le programme de traitement de l'eau doit être réexaminé et les mesures nécessaires adoptées.

Lorsque des changements sont détectés dans la flore totale et dans le niveau de biocide, une recherche de *Legionella spp* doit être réalisée, et si nécessaire, des mesures correctives appliquées (tableau 5).

Tableau 5 : Actions proposées en fonction de l'abondance de *Legionella spp* dans l'eau d'après le décret royal espagnol 865/2003 du 4 juillet 2003

Abondance de <i>Legionella spp</i> (UFC/l) selon la norme ISO 11731 (1998)	Action proposée
$>100 < 10^3$	Examen du programme d'entretien et corrections appropriées, ré-échantillonnage 15 jours après
$>10^3 < 10^4$	Révision du programme de maintenance pour établir les actions correctives afin de réduire la concentration en <i>Legionella spp</i> . Nettoyage et désinfection. Confirmation des résultats de l'analyse à 15 jours ; si le nouveau résultat est inférieur à 100 UFC/l, réalisation d'une nouvelle analyse après 1 mois et application du programme de maintenance envisagé. Si l'une des 2 analyses donne un résultat supérieur à 100 UFC/l, réviser le programme de maintenance et mettre en œuvre les améliorations nécessaires. Si le résultat excède 10^3 UFC/l, mettre en œuvre les procédures de nettoyage et désinfection et effectuer de nouvelles analyses après 15 jours.
$> 10^4$	Arrêt de l'installation, purge du système quand c'est possible. Avant redémarrage, nettoyage, traitement et réalisation de nouvelles analyses après 15 jours.

Le décret royal prévoit en plus l'inspection de l'installation. En effet, le décret indique que toutes les parties doivent être vérifiées en terme de fonctionnement, d'état de conservation et de propreté (présence de nutriments, incrustation de tartre, produits de corrosion, boue...).

2.2.7. Etats Unis

Il existe des recommandations spécifiques pour les TAR des CNPE éditées par l'US Nuclear Regulatory Commission (NRC). Cependant, le NRC considère qu'il n'y a pas assez de données sur la dose infectante de *L. pneumophila* pour l'homme et de seuil d'alerte pour *Naegleria fowleri* permettant de définir des seuils de gestion. La gestion générale des TAR CNPE (gestion du risque *Legionella*, maintenance, suivi...), est réalisée donc, d'après les réglementations et recommandations applicables aux autres tours de refroidissement. Les recommandations pour ces dernières sont présentées dans un guide édité par l'Occupational Safety & Health Administration (OSHA. 1999).

Le manuel technique de l'OSHA (1999) est un document destiné aux ingénieurs hygiénistes afin de les aider à évaluer le potentiel de légionelloses de leur site industriel. Ce manuel présente des informations sur la maladie, la bactérie, les procédures d'identification de sources probables lors de cas avérés de légionellose et de stratégies de contrôle de *L. pneumophila* dans les installations industrielles.

L'OSHA déconseille d'effectuer l'estimation d'une exposition aux *L. pneumophila* par un dénombrement de cette bactérie dans l'air par la technique d'impaction sur milieu gélosé en raison du nombre de « faux positifs » liés à la méthode d'analyse. En revanche, il est souligné que la recherche de *L. pneumophila* dans l'eau est un moyen valable pour l'identification d'une source potentielle à l'origine de cas de légionelloses.

Toutefois, le chapitre « conseils pour l'échantillonnage de l'eau » (water sampling guidelines) de ce document préconise des valeurs guides d'abondance en *L. pneumophila* destinées à l'évaluation de l'efficacité des actions de maintenance des installations. Il est souligné que ses valeurs sont des seuils de gestion et non des seuils sanitaires capables d'assurer la santé des individus présentant une immunodépression. Les valeurs guides pour les TAR sont présentées dans le tableau 6.

Quant aux traitements de l'eau, il est indiqué que l'utilisation de biocides de manière périodique (2 fois par an) est nécessaire pour maîtriser l'abondance de *L. pneumophila* dans les installations et souligne que l'efficacité des agents oxydants traditionnels (chlore et brome) appliqués à faible dose et en continu a été démontrée.

Le Center for Disease Control and Prevention (CDC) recommande l'estimation de l'abondance de *L. pneumophila* dans l'eau des installations dans certaines circonstances : évaluation du potentiel d'amplification et de diffusion de *Legionella* d'une installation, vérification de l'efficacité des procédures de décontamination et en cas d'épidémie afin d'identifier la source.

Tableau 6 : Actions préconisées par l'Occupational Safety & Health Administration en fonction de l'abondance en *L. pneumophila* (1999).

Abondance de <i>L. pneumophila</i> dans l'eau (UFC/l)	Actions
10 ⁵	Nettoyage immédiat et/ou traitement par biocide
10 ⁶	Nettoyage urgent et/ou traitement par biocide, mesures pour prévenir l'exposition des employés

L'institut de technologies de refroidissement (Cooling Technologies Institut. CTI) a également développé un guide destiné à la gestion du risque *Legionella* dans les TAR (CTI 2000). La surveillance des *Legionella* dans les TAR comprend :

- l'évaluation visuelle et par des méthodes microscopiques de la salissure biologique déposée sur les surfaces en différents points du système ;
- le dénombrement de bactéries hétérotrophes par culture ;
- l'évaluation de l'efficacité des actions destinées à contrôler la contamination microbiologique ;
- la vérification visuelle du niveau d'encrassement du réservoir de la TAR et d'autres éléments des TAR (dévésiculateur, packings etc).

Les valeurs guides recommandées par le CTI pour les paramètres indicateurs de salissures biologiques sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Valeurs guides recommandées par le Cooling Technologies Institut pour les paramètres indicateurs de salissure biologique.

Compartiment	Bactéries hétérotrophes cultivables	Examen microscopique
Eau	< 10 ⁷ UFC/l	absence d'amibes et/ou d'autres protozoaires ciliés
Surface	10 ⁵ UFC/cm ²	absence d'amibes et/ou d'autres protozoaires ciliés
Dépôt	Non Applicable	absence d'amibes et/ou d'autres protozoaires ciliés

2.2.8. Pays Bas

Au Pays Bas il existe une seule centrale nucléaire. Elle n'est pas soumise à une réglementation particulière en ce qui concerne la gestion du risque lié à *Legionella*. Par contre, pour les tours type ICPE, le ministère des affaires sociales et de l'emploi a publié un décret (11/09/2003) modifiant la réglementation sur les conditions de travail (acte 1998, section 5 ; décret section 4.87) en lien avec la prévention et la limitation de l'exposition aux *L. pneumophila*.

La sous-section 2 précise que le plan de gestion du risque *Legionella* doit inclure le suivi de paramètres physiques, chimiques et biologiques (incluant le dénombrement des *Legionella spp*). Les valeurs paramétriques de gestion dépendent spécifiquement du site, de leurs équipements et conditions de fonctionnement des procédés.

Compte tenu de l'absence de connaissances de la relation existante entre l'abondance de *L. pneumophila* dans l'eau et l'abondance de *L. pneumophila* dans l'air sous forme d'aérosols et du fait qu'une tour peut devenir instable sur une courte période de temps du fait de facteurs externes et donc source de *Legionella spp*, il est recommandé de maintenir une concentration en *Legionella spp* aussi faible que possible.

2.2.9. Royaume Uni

D'après l'autorité pour l'énergie atomique (Atomic Energy Authority- UK), il n'existe pas au Royaume Uni de réglementation particulière pour les TAR CNPE. La majorité des centrales anglaises étant situées en bord de mer et n'utilisent pas d'installation de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air..

En ce qui concerne la réglementation générale des TAR (à tirage naturelle type CNPE ou forcé type ICPE), les principaux textes encadrant la prévention du risque *Legionella* sont les suivants :

- Health and Safety at work act (1974) ;
- Control of substance hazardous to Health Regulations (COSHH, 1999) ;
- un document guide de référence publié par le Health Safety Executive (HSE) intitulé : « Approved code of practice and guidance Legionnaires disease, the control of *legionella bacteria* in water system » (2004).

Le sous-chapitre du document guide du HSE est consacré à la surveillance générale. Les points suivants sont à noter :

- la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau d'appoint et de l'eau de refroidissement doit être surveillée en routine afin d'assurer l'efficacité du programme de traitement. La fréquence et l'ampleur de la surveillance dépendront des caractéristiques opératoires du système, la fréquence minimale recommandée étant d'une fois par semaine (tableau 8) ;
- l'identification de changements dans la chimie de l'eau comme le pH, les matières en suspension, la dureté, le chlore et l'alcalinité entraîne la mise en œuvre d'une action corrective. Les quantités de produits chimiques de traitement comme les inhibiteurs de corrosion et de tartre et les biocides oxydants doivent être mesurées. D'autres aspects du programme de traitement comme la vitesse de corrosion et l'activité microbiologique doivent être également surveillés ;
- le programme de surveillance doit inclure l'échantillonnage et le dénombrement de bactéries hétérotrophes cultivables et de *L. pneumophila* ;
- les eaux de refroidissement doivent être analysées de façon hebdomadaire.

Tableau 8 : Fréquence d'analyse des paramètres indicateurs de la qualité de l'eau des TAR recommandée par le Health Safety Executive au Royaume-Uni (HSE, 2004)

Paramètre	Fréquence	
	Eau d'appoint	Eau de refroidissement
Dureté calcique mg/l CaCO ₃	Mensuel	Mensuel
Dureté magnésique mg/l CaCO ₃	Mensuel	Mensuel
Dureté totale mg/l CaCO ₃	Mensuel	Mensuel
Alcalinité totale mg/l CaCO ₃	Trimestriel	Trimestriel
Chlorure mg/l Cl	Mensuel	Mensuel
Sulfates mg/l SO ₄	Trimestriel	Trimestriel
Conductivité µS/cm	Mensuel	Hebdomadaire
Matières en suspension mg/l	Trimestriel	Trimestriel
Niveau d'inhibiteur mg/l	-	Mensuel
Biocides oxydant mg/l	-	Hebdomadaire
Température °C	-	Trimestriel
pH	Trimestriel	Hebdomadaire
Fer soluble mg/l Fe	Trimestriel	Trimestriel
Fer total mg/l Fe	Trimestriel	Trimestriel
Facteur de concentration	-	Mensuel
Activité microbiologique	Trimestriel	Hebdomadaire
<i>Legionella pneumophila</i>	-	Trimestriel

Les actions qui doivent être entreprises en réponse aux résultats de numération bactérienne sont indiquées ci-dessous (tableau 9).

Tableau 9 : Actions recommandées par le Health safety executive au Royaume-Uni en fonction de l'abondance de bactéries hétérotrophes cultivables et de *L. pneumophila* (HSE, 2004)

Bactéries hétérotrophes cultivables (UFC/l)	<i>L.pneumophila</i> dans l'eau du circuit (UFC/l)	Actions requises
$\leq 10^7$	$\leq 10^2$	Système sous contrôle
$> 10^7$ et 10^8	$> 10^2$ et $\leq 10^3$	Révision des mesures de contrôle et évaluation des risques pour actions correctives
$> 10^8$	$> 10^3$	Mise en œuvre d'actions correctives. Traitement biocide. Evaluation des risques pour la mise en place d'actions correctives.

2.2.10. Suisse

En Suisse, il n'y a pas de réglementation spécifique pour les TAR CNPE. En ce qui concerne les TAR ICPE, un document intitulé « Legionella et légionellose » vient d'être publié (2005) par l'Office fédéral de la santé publique (rubrique maladies transmissibles) dans lequel un chapitre est réservé à la gestion de la présence de *Legionella* dans les tours de refroidissement.

Dans ce chapitre intitulé « cas particuliers des installations de traitement d'air », des actions spécifiques à mettre en œuvre sont recommandées en fonction des valeurs d'abondance de bactéries hétérotrophes cultivables et de *Legionella spp.* Ces valeurs sont présentées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Actions recommandées par l'Office Fédéral de la santé publique de Suisse en fonction de l'abondance de bactéries hétérotrophes cultivables et de *Legionella spp* (2005).

Bactéries hétérotrophes (UFC/l)	<i>Legionella spp.</i> * (UFC/l)	Mesures à prendre
$\leq 10^7$	$\leq 10^3$	Le système est sous contrôle, continuer la maintenance
$> 10^7$ et $\leq 10^8$	$> 10^3$ et $\leq 10^4$	Les résultats obtenus doivent être confirmés par une nouvelle analyse immédiate. Si le nombre de bactéries est similaire, procéder : - à une nouvelle évaluation du risque. - à des mesures de surveillance. - à la mise en œuvre des mesures correctives. - à la vérification de l'efficacité des mesures par de nouveaux contrôles microbiologiques.
$> 10^8$	$> 10^4$	Nouvelle collecte immédiate d'échantillons et analyses. Arrêt de l'installation le plus rapidement possible. Vidange, nettoyage et désinfection, Traitement spécifique et remise en fonction après analyses négatives pour <i>Legionella spp.</i> Identifier les mesures correctives nécessaires afin de maintenir le nombre de bactéries à un niveau acceptable à long terme. Vérifier l'efficacité des mesures par de nouveaux contrôles microbiologiques.
* méthode ISO 11731		

Les analyses microbiologiques de routine (bactéries aérobies, aéro-anaérobies et *Legionella spp*) sont recommandées une à quatre fois par an.

En ce qui concerne les dispositions de surveillance, il est recommandé d'effectuer une inspection visuelle des caissons, des batteries, des siphons et des canaux d'évacuation afin de déceler la présence de tartre, biofilm, boue et de mesurer la turbidité et la couleur de l'eau. Il est conseillé d'utiliser un carnet de suivi des actions et observations tel que proposé en France.

2.2.11. Conclusions

Des différentes réglementations ou recommandations, il ressort que la plupart des pays ont opté pour appliquer aux TAR CNPE les mêmes règles de gestion que celles appliquées aux TAR ICPE. Néanmoins, ces règles de gestion du risque de *L. pneumophila* dans les installations de refroidissement sont très diversifiées selon les pays.

Des textes réglementaires sont appliqués en Australie, Espagne, Etats Unis et Royaume Uni. En Belgique seule la communauté flamande a une réglementation. Dans ces pays un traitement de désinfection en continu est recommandé, excepté aux Etats-Unis où les traitements de désinfection ne sont pas en continu mais à mettre en œuvre à intervalles réguliers.

Le nettoyage et le renforcement du traitement de désinfection sont recommandés lorsque l'abondance de *Legionella* est $> 10^2$ UFC/l en Espagne, $> 10^3$ UFC/l en Australie et Royaume Uni et $> 10^5$ UFC/l aux Etats-Unis. En Australie, Espagne et au Royaume Uni, ces seuils de gestion s'accompagnent des valeurs seuils en bactéries hétérotrophes.

En Allemagne, Pays Bas et Suisse des valeurs guides de gestion existent sous forme d'un guide officiel. Dans ces guides, le seuil de *Legionella* préconisé est < 10 UFC/l en Allemagne, $\leq 10^3$ UFC/l en Suisse, un seuil aussi bas que possible au Pays Bas.

3. Etat des connaissances

La légionellose est un problème croissant de santé publique tant par l'augmentation de la pression épidémique communautaire et nosocomiale qu'elle exerce sur nos collectivités, que par son polymorphisme clinique et sa gravité, la classant parmi les infections pulmonaires à risque vital. De grandes questions sont posées par le pathogène bactérien responsable de la légionellose, principalement *Legionella pneumophila* :

- en amont de toute infection humaine, le problème de sa distribution environnementale au sein des réseaux de distribution et de traitement des eaux pose le problème de la maîtrise préventive de sa diffusion dans l'environnement ;
- les outils de détection et de quantification bactérienne dans l'eau et dans l'air, bien qu'existants sous-estiment l'abondance de *Legionella* ;
- la transmission à l'homme de formes infectantes traduit une transition adaptative posant la question de l'acquisition et/ou de l'expression de facteurs de virulence comme supports de la gravité ;
- les progrès médicaux et l'étirement de la pyramide des âges accroissent l'éventail des populations à risque puisque les individus dont les défenses immunitaires sont diminuées et les âges extrêmes sont plus susceptibles à ce risque infectieux.

La synthèse des études épidémiologiques montre que le contrôle de ce risque infectieux passe par la prise en compte de toutes les étapes du cycle infectieux et de l'écologie de ce pathogène au sein des biotopes aquatiques (Fliermans *et al.*, 1996).

Ci-après est présenté l'état des connaissances des principaux éléments à prendre en compte dans l'examen de la saisine.

3.1. Ecologie des *Legionella*

Les *Legionella* appartiennent à la famille des *Legionellaceae*. Il en existe 49 espèces à l'heure actuelle, dont la plus fréquemment isolée est *Legionella pneumophila*. Ces espèces peuvent être divisées en sérogroupes (par exemple, *Legionella pneumophila* peut appartenir au séro groupe 1, 2 ... 14), pouvant eux-mêmes être divisés en sous-types (Lp1 peut être de sous-type Pontiac, Philadelphie...).

Les *Legionella* sont des bacilles Gram négatif aérobies, qui mesurent de 0,2 à 0,9 µm de large sur 2 à 20 µm de long. Elles ne sont ni capsulées, ni sporulées, et peuvent être mobiles grâce à 1 ou 2 flagelles polaires.

Dans l'environnement et le milieu hydrique en particulier, leur survie et croissance sont influencées par de nombreux paramètres :

- température (multiplication : 20-45°C ; survie : 6-66°C) (Tison *et al.*, 1980 ; Fliermans *et al.*, 1981 ; Habicht et Muller, 1988) ;
- pH, ions fer et zinc, conditions hydrauliques (zone de stagnation) (Ciesielski *et al.*, 1984 ; Dennis *et al.*, 1984 ; Bollin *et al.*, 1985 ; States *et al.*, 1985 ; Stout *et al.* ; 1985, Bhopal *et al.*, 1991 ; Rogers *et al.*, 1994 ; Zacheus et Martikainen, 1994 ; Pongratz *et al.*, 1994 ; Keller *et al.*, 1996 ; Leoni *et al.*, 2001 ; Hoebe et Kool, 2000 ; Avril *et al.*, 2000 ; Hodgson et Casey, 2002 ; Den Boer *et al.*, 2002 ; Barbotte *et al.*, 2002 ; Borella *et al.*, 2004 ; Wadowsky *et al.*, 1985) ;
- présence de biofilm¹ ou de cyanobactéries qui relarguent des nutriments (Fields, 2002 ; Tyson *et al.*, 1980) ;
- présence d'autres microorganismes. Les premières publications montrent que les *Legionella spp* se développent beaucoup mieux et plus rapidement lorsqu'elles sont co-cultivées avec des amibes non pathogènes dans de conditions défavorables. Cette protection augmente encore dans l'amibe enkystée qui permet la résistance aux températures élevées, voire à la chloration. (Rowbotham, 1980 ; Nahapetian *et al.*, 1991 ; Breiman *et al.*, 1990 ; Cirillo *et al.*, 1999 ; Holden *et al.*, 1984 ; Fields, 2002 ; Steinert *et al.*, 2002 ; Thomas *et al.*, 2004).

¹ Un biofilm est un système métastable, résultant (1) de la multiplication des bactéries fixées sur le composant et du dépôt de bactéries provenant de la phase eau, (2) de l'érosion continue, conduisant à un relargage constant de microorganismes dans la phase eau (Rittman 1989, Ascon-Cabrera *et al.*, 1995). En d'autres termes, la contamination bactérienne de l'eau d'un réseau est directement liée au biofilm et particulièrement à la croissance et à l'arrachage des bactéries fixées. Et inversement, la dynamique du biofilm est également influencée par la qualité de l'eau à son contact.

Cette capacité à exercer le « parasitisme » d'autres cellules et ainsi d'exercer une « stratégie de camouflage » vis-à-vis de sources d'agression externes, est une marque distinctive de ces bactéries. Dans l'environnement naturel et les installations humaines (réseau d'eau, TAR, ...) les amibes non pathogènes et pathogènes (protozoaires) constituent ainsi la principale « niche » (Greub, 2004 ; Smith-Somerville, 1991 ; Rowbotham, 1980).

3.2. Pathologie liée aux *Legionella*

Chez l'homme, la contamination s'effectue par inhalation d'un aérosol de fines gouttelettes d'eau contaminée. L'infectiosité d'un aérosol est liée à différents paramètres : les caractéristiques physiques de cet aérosol, dont la taille des gouttelettes, sa concentration en *Legionella*, leur survie dans l'aérosol. Ainsi, il a été déterminé de manière empirique qu'un aérosol ne peut être infectieux que si les gouttelettes d'eau qui le composent sont assez petites pour atteindre les alvéoles pulmonaires (diamètre inférieur ou égal à 5 µm) (Bollin *et al.*, 1985 ; Girod *et al.*, 1982) et assez grandes pour contenir une ou plusieurs bactéries (diamètre supérieur à 2 µm) (Baron et Willeke, 1986). A l'heure actuelle, aucune relation fiable n'a pu être mise en évidence entre la concentration en *Legionella* dans l'eau ou dans l'air et le développement de la maladie chez l'homme.

Chez l'homme, *L. pneumophila* établit un foyer infectieux au sein de l'alvéole pulmonaire où la bactérie interagit avec les macrophages et les cellules épithéliales pour lesquelles elle possède un tropisme particulier. Ces deux entités cellulaires constituent la « porte d'entrée » de l'infection et de la dissémination de la maladie chez l'homme.

La solution de continuité entre l'environnement et l'alvéole passe donc par le macrophage alvéolaire dont l'action est non seulement significativement neutralisée mais constitue aussi une niche répliquative. Ceci occasionne un accroissement significatif de l'inoculum bactérien jusqu'à la 48^{ème} – 72^{ème} heure dans le cul-de-sac alvéolaire tel que décrit dans les modèles expérimentaux animaux (Brieland *et al.*, 1994). Une deuxième entité cellulaire importante s'est révélée permissive à *L. pneumophila* : la cellule épithéliale alvéolaire. C'est en 1993 que l'infectivité de *L. pneumophila* vis-à-vis des cellules épithéliales alvéolaires a été démontrée et que l'on a prouvé *in vitro* qu'elles constituent, outre les macrophages, une autre niche de multiplication (Mody *et al.*, 1993). De plus, quand la démultiplication de l'inoculum est effective *L. pneumophila* entraîne la lyse cellulaire causant d'importantes lésions à la barrière alvéolo-capillaire source de translocation bactérienne. Depuis, ces données ont été largement confirmées *in vivo* et expliquent la dissémination de *L. pneumophila* à d'autres territoires pulmonaires et la décompartmentalisation extra-pulmonaire par voie hématogène (Brieland *et al.*, 1994).

Pour l'instant, la dose infectante chez l'homme est méconnue. Seules les doses infectantes sur des modèles expérimentaux animaux reproductibles et validés sont connues : cobayes⁺⁺, souris consanguines A/J⁺⁺ et primates (Berendt *et al.*, 1980 a ; Breiman *et al.*, 1987 ; Brieland *et al.*, 1994).

Les méthodes d'infection se font par le biais d'un aérosol infecté ou par instillation intra-trachéale directe. Les seuils déterminés correspondent à la biomasse bactérienne nécessaire pour induire une infection *in situ* au contact de l'interface épithéliale alvéolaire de l'animal exposé :

- 10⁶ UFC est l'inoculum infectant pour la maladie du légionnaire type fièvre de Pontiac correspondant à une survie des animaux exposés de 100% ;
- 10⁷ UFC est l'inoculum infectant pour la légionellose avec une mortalité proche de celle de l'homme soit 10 à 25% ;
- 10⁸ UFC et au-delà est l'inoculum léthal.

Toutefois, ces seuils ne tiennent pas compte de certains paramètres tels que :

- le taux de transfert bactérien air-alvéoles, pour lequel il n'existe aucune modélisation ;
- les modifications anatomo-fonctionnelles des pathologies broncho-pulmonaires chroniques dont le tabagisme est le principal promoteur, qui facilitent l'implantation bactérienne.

Les scientifiques s'accordent sur les points suivants :

- le développement et la gravité de la maladie sont conditionnés par le niveau d'exposition. Plus l'aérosol véhiculerait de *Legionella*, plus l'inoculum atteignant les voies aériennes inférieures serait important et plus cela aurait un impact sur la morbi-mortalité.


Au-delà d'un seuil critique d'exposition représentant la quantité minimale de bactéries atteignant l'alvéole nécessaire à l'induction d'une maladie, il existerait une relation dose-réponse proportionnelle entre exposition et développement de la maladie traduisant un « effet inoculum ». Ainsi, on peut présumer que plus la quantité de *Legionella* rejetées dans les panaches sera importante, plus l'on se rapprochera de ce seuil critique d'exposition ;

- l'Homme est un hôte accidentel dont l'infection par *L. pneumophila* est médiée au sein de l'alvéolaire pulmonaire par deux types cellulaires permissifs : le macrophage et la cellule épithéliale. Le même phénomène de parasitisme que pour les amibes est mis en place. Ces cellules sont lysées après multiplication bactérienne libérant un inoculum prêt à infecter d'autres cellules contiguës et à disséminer dans l'organisme au travers des lésions engendrées sur la barrière alvéolo-capillaire.

3.3. La plasticité génomique comme support des phénotypes

Ces dix dernières années, d'énormes progrès ont été effectués dans la compréhension du cycle infectieux de *L. pneumophila* où l'on distingue désormais deux états bactériens distincts : phase intracellulaire et phase extracellulaire. La phase intracellulaire est hautement répliquative au sein d'une vacuole cloisonnée (dite phagolysosomiale) qui permet à la bactérie d'échapper aux mécanismes bactéricides de défense de l'hôte et d'utiliser le métabolisme cellulaire à son profit. La phase extracellulaire correspond à un état stationnaire de croissance, hautement transmissif. Les récents travaux *in vitro* ont permis de démontrer la réversibilité d'un état à un autre appelé « variation de phase » (Molofsky *et al.* ; 2004, Cazalet *et al.*, 2004). Ce dimorphisme temporel est couplé à un dimorphisme structurel et fonctionnel dont leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 11. Même si ces notions de variation de phase sont encore théoriques, la plasticité génomique de ce pathogène lui permet d'alterner un état phénotypique adapté aux conditions environnementales aquatiques, en particulier aux conditions de stress, avec un état intracellulaire pathogène.

Tableau 11 : Comparaison des caractéristiques des *Legionella* lors de deux phases de croissance (Adapté d'après Steinert *et al.*, 2002).

Phase «Répliquative» intracellulaire		Phase «Invasive» extracellulaire
Phase exponentielle de croissance	Faible T° Epuisement en acides aminés 	Phase stationnaire de croissance
Formes longues		Formes oblongues
Non flagellées		Flagellées, très mobiles
Osmo-résistantes (Na ⁺)		Osmo-sensibles (Na ⁺)
Faible cytotoxicité		Cytotoxicité
Faible résistance au stress		Résistance au stress biocides

3.4. Transition adaptative de l'environnement à l'hôte humain

Les études sur l'écologie de *Legionella spp* prouvent que cette bactérie est originellement autochtone des milieux aquatiques naturels. Ce sont les développements à grande échelle des réseaux d'eau de distribution publique et des systèmes de climatisations humides qui ont permis à *Legionella* de se multiplier et de survivre en dehors de son habitat écologique naturel, puis d'entrer en contact avec certaines cellules humaines (Steinert *et al.*, 2002). Rappelons que les conditions optimales de multiplication et de croissance sont obtenues quand la bactérie est internalisée par des cellules différenciées «cibles».

La bactérie a alors acquis un comportement de pathogène opportuniste émergent où l'homme, s'il n'est qu'un hôte accidentel, est quand même une cible pour laquelle elle est de plus en plus affine. L'évolution adaptative qu'opère actuellement *Legionella spp* vers les cellules humaines pourrait aboutir à terme à un accroissement de sa virulence.

Dans ce contexte de transition adaptative de l'environnement à l'hôte humain, la communauté scientifique se pose actuellement la question de savoir si, outre le parasitisme des protozoaires environnementaux, l'exposition constante ou répétée aux agressions chimiques (biocides) ne favoriseraient pas une augmentation de leur virulence.

3.5. Panorama épidémiologique des infections à *Legionella*

La légionellose représente environ 5% des pneumonies aiguës communautaires et jusqu'à 15% des pneumonies communautaires nécessitant une hospitalisation. Une admission en réanimation est nécessaire dans 40% des cas. Son incidence globale en France en 2003 était estimée à 1,8/100 000 habitants. Elle atteint 5,6/100 000 habitants chez les sujets de plus de 70 ans (Campese *et al.*, 2004). La létalité globale en 2003 en France a été de 14%. Le sérotype 1 de *L. pneumophila* est responsable de plus de 85% des cas.

Depuis la première épidémie de légionellose identifiée en France survenue en 1998, les alertes de légionellose de type « cas groupés » sont devenues de plus en plus diversifiées. En effet, des cas de légionellose classique, à savoir, des cas groupés dans un temps relativement court (quelques jours) et dans l'espace (< 5 km), ont évolué vers des situations où quelques cas sont mis en évidence dans une zone géographique étendue et/ou dans un intervalle de temps assez long (quelques semaines) par rapport aux premières épidémies identifiées (Miquel *et al.*, 2004 ; Rouil *et al.*, 2004). Deux études ont montré que la zone de contamination d'une installation industrielle équipée de système de refroidissement à base de TAR d'une hauteur de l'ordre de la dizaine de mètres peut dépasser les 10 km.

Il est important de préciser que la littérature scientifique ne montre pas d'étude faisant état d'une relation entre des cas groupés et/ou sporadiques de légionellose et l'émission de *Legionella pneumophila* ou *Legionella spp* par une TAR CNPE ou d'une TAR de taille équivalente.

3.5.1. Epidémie dans une zone géographique étendue (Cas de Lens)

En novembre 2003 une épidémie de type « cas groupés » a été détectée à Lens. Plusieurs experts ont contribué à l'identification de la source de contamination. Deux approches ont été menées parallèlement : l'une par la recherche des *Legionella spp* dans divers prélèvements provenant des différentes sources potentielles, l'autre par modélisation de la dispersion des panaches à partir des sources les plus probables. Rappelons ici que l'investigation par la modélisation de la propagation par voie aérienne des *Legionella spp* a été faite en prenant comme traceur des gouttelettes d'eau d'un diamètre moyen de 5 µm comme traceur. Aussi, les concentrations de gouttelettes d'eau, exprimées en µg/m³ d'air, à distance des sources prises en compte, qui ont été présentées dans les différents cas simulés, ne présagent pas de la concentration en *Legionella spp*, dans ces gouttelettes, ni de leurs facultés d'infection mais seulement de la présence possible de ces bactéries.

En revanche, on peut supposer que la concentration en *Legionella spp* des aérosols est très liée à la concentration de ces bactéries (sous toutes formes possibles) dans le milieu aquatique émetteur, et donc que d'un scénario à l'autre, une quantité égale de gouttelettes, exprimée en µg/m³, ne correspond pas à une concentration identique en *Legionella spp*.

Ces réserves émises, les simulations réalisées ont montré que le transport aérien de bactéries peut dépasser la dizaine de kilomètres pour une TAR (Rouil *et al.*, 2004). Ceci est plausible avec des sources puissantes comme les TAR industrielles, dans les caractéristiques topographiques et dans les conditions météorologiques rencontrées durant la période considérée. Ainsi, les distances d'impact sont plus grandes qu'il n'était dit ou reconnu jusqu'alors (Tran Minh *et al.*, 2006).

Un autre enseignement a pu être tiré : une source primaire, telle qu'un bassin de lagunage, peut contaminer un site secondaire comme une TAR, qui à son tour peut devenir la source d'une épidémie et/ou de cas groupés.

En effet, dans le cas de Lens, cette hypothèse a été retenue pour expliquer la contamination des TAR. En effet à proximité de celles-ci existe un bassin de lagunage équipé d'aérateurs de surface générateurs d'aérosols qui ont été retrouvés à plus de 200 mètres de distance grâce aux mesures d'aérosols mises en œuvre (Mathieu *et al.*, 2006). Cette hypothèse peut aussi expliquer la contamination de la station de lavage de voiture située à 300 mètres des TAR.

3.5.2. Epidémie dans une zone géographique étendue (Cas de la Norvège)

En mai-juin 2005 une épidémie de type « cas groupés » a été détectée à Sarpsborg en Norvège où 55 personnes ont été contaminées dont 10 sont décédées.

L'étude d'expertise réalisée par les autorités sanitaires a établi que les cas avérés se trouvaient à des distances allant jusqu'à 17 kilomètres du point source identifié (« Scrubber » industriel d'environ 20 m d'hauteur). La modélisation de la dispersion du panache a permis de confirmer que les aérosols contaminés pouvaient parcourir des distances importantes (> 17 km) correspondant à la dispersion géographique des cas décelés (Fugleseng *et al.*, 2005).

3.5.3. Cas sporadiques non expliqués

En dépit des dépassements de seuils constatés, notamment à Chinon et Cattenom, aucun cas groupé n'a été décrit. Une étude suggère néanmoins que les panaches issus des TAR des installations industrielles pourraient intervenir dans la survenue des cas sporadiques (Che *et al.*, 2003). Les cas sporadiques sans source identifiée de contamination représentent 50 % de cas de légionellose déclarés annuellement (Desenclos, 2004) depuis 1987, date de la mise en place de la déclaration obligatoire.

L'absence d'information précise s'explique par le fait qu'à l'heure actuelle aucun outil d'évaluation n'a été mis en place spécifiquement pour étudier le lien potentiel entre des TAR de grandes dimensions et les cas sporadiques.

3.6. Détection et dénombrement des *Legionella* dans l'environnement

3.6.1 Détection et dénombrement de *Legionella* dans l'eau

Il n'y a pas d'indicateur bactérien pour suggérer la présence de *Legionella*, ce qui nécessite la détection directe de la bactérie elle-même. La méthodologie utilisée est la méthode normalisée de détection des *Legionella* d'un échantillon d'eau par culture sur un milieu gélosé spécifique, appelé BCYE (Buffered Charcoal Yeast Extract) (NF T90-431 en France et ISO 11731 ailleurs). Ce milieu gélosé contient du charbon ainsi que plusieurs composés chimiques indispensables à la croissance bactérienne (pyrophosphate de fer, α -cétoglutarate, L-cystéine (Feely *et al.*, 1979).

Il est à noter que si cultivabilité (formation d'une colonie sur milieu gélosé) et viabilité (aptitude à se multiplier dans des conditions favorables) sont devenues des synonymes généralement admis dans la littérature, la réciproque est fautive : la non-cultivabilité ne reflète pas une non-viabilité des bactéries.

Depuis plusieurs décennies, la méthode culturale est remise en cause pour sa sous-estimation du nombre réel de microorganismes vivants dans les échantillons environnementaux, y compris un aérosol (Heidelberg *et al.*, 1997). Car, au sein d'une population bactérienne, se trouvent en proportions variables des bactéries cultivables et des bactéries mortes et, entre ces deux extrêmes physiologiques, des bactéries plus ou moins actives, des bactéries dormantes, blessées ou stressées ou blessées. Les microorganismes ne sont pas toujours cultivables mais peuvent pourtant être viables (aptés à se multiplier) ou métaboliquement actifs, ce qui introduit les concepts de bactéries «viables non cultivables» (VNC) ou «actives non cultivables» (ANC) pour décrire ces bactéries intactes et actives (Colwell et Grimms, 2001 ; Joux et Lebaron, 2000 ; Kell *et al.*, 1998 ; Steinert *et al.*, 1997).

Dans le domaine des eaux potables (milieu oligotrophe comparé aux eaux de surface utilisées dans les circuits de refroidissement des TAR type CNPE), le ratio bactéries cultivables/bactéries totales (après marquage de l'ADN bactérien par le fluorochrome DAPI) est généralement très inférieur à 1 % ; le nombre de bactéries vivantes (estimé par des mesures d'activités métaboliques) est globalement supérieur d'un facteur 10 à 10³ par rapport aux bactéries cultivables.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour détecter ces bactéries *in situ* sans l'intermédiaire de la culture, telles que :

- l'hybridation *in situ* ciblant spécifiquement les ARNr 16S (Williams *et al.*, 1998) et détectant la quasi intégralité des isolats y compris ceux internalisés par les cellules hôtes (Grimm *et al.*, 1998),
- sans oublier la palette de méthodes moléculaires (Palmer *et al.*, 1995, Ballard *et al.*, 2000).

D'autres méthodes permettent d'estimer leur viabilité et de caractériser leurs états biologiques, telles que :

- la méthode DVC (Direct Viable Count) (Yokomaku *et al.*, 2000),
- la mesure de l'intégrité membranaire par marquage à l'iodure de propidium (Boulos *et al.*, 1999),

Même si le concept « viable non cultivable » n'est pas admis par l'ensemble de la communauté scientifique (Bogosian et Bourneuf, 2001), la question reste d'actualité en raison de l'importance en terme de santé publique.

En ce qui concerne *Legionella spp*, l'absence ou le faible nombre de bactéries cultivables dans un échantillon d'eau ne signifient pas l'absence ou le faible nombre de cellules vivantes. Plusieurs travaux expérimentaux ce sont attachés à démontrer que de façon similaire à bon nombre de bacilles à Gram négatif, *Legionella spp* peuvent exprimer un état viable mais non cultivable (Hussong *et al.*, 1987), avec la possibilité de conserver sa capacité infectieuse et sa pathogénicité. Nystrom (2001) a rapporté l'incapacité de détecter des *Legionella spp* dans plusieurs échantillons d'eau par méthodes de culture du fait de l'importance de la compétition d'autres bactéries et levures, alors que, la présence de *Legionella spp* viables pouvait être confirmée après inoculation de ces échantillons à des cobayes. Hussong *et al.* (1987) ou Steinert *et al.* (1997) ont montré que des espèces pathogènes ayant perdu leur capacité à cultiver peuvent conserver leur virulence et infectiosité. La réversibilité de cet état de non cultivabilité peut être obtenue dans certaines conditions par la remise en culture avec une amibe (Steinert *et al.*, 1997). Ces expériences suggèrent l'idée que lorsqu'une cellule de *Legionella spp* à l'état libre rencontre une cellule hôte eucaryote adéquate, il lui est plus facile de se multiplier à l'intérieur de cet hôte que de se multiplier sur gélose spécifique BCYE.

3.6.2. Caractérisation des aérosols et détection des *Legionella* dans les aérosols

Pour la plupart des microorganismes, l'air est un milieu extrême et la létalité occasionnée par l'aérosolisation est généralement importante (Stetzenbach, 1992). Il faut sans doute rappeler ici que l'évaporation d'une goutte d'eau d'un diamètre initial de 10 µm se produit en moins de 0,1 s (30% HR, 20°C) (Willeke *et al.*, 1998). Dans une ambiance telle que celle rencontrée dans les TAR CNPE, la cinétique d'évaporation de l'aérosol formé est probablement de l'ordre de quelques secondes, ce qui suggère que les microorganismes collectés sont sans doute des particules biologiques déshydratées.

A ce jour, la littérature ne fournit aucune fonction simple permettant de décrire le comportement des germes aérosolisés, même si au travers de diverses études, déjà anciennes et n'utilisant que la cultivabilité pour mesurer les *Legionella spp*, l'humidité relative de l'air et la souche aérosolisée ont été identifiées comme des paramètres influençant la réponse des bactéries au stress de la dessiccation lors de l'aérosolisation :

- trois études indépendantes montrent qu'un milieu humide (HR > 80%) serait plus favorable à la survie d'une souche de *L. pneumophila*. A l'inverse, les *Legionella spp* ne semblent pas bien survivre en atmosphère sèche (Berendt *et al.*, 1980 b ; Hambleton *et al.*, 1983 ; Dennis et Lee, 1988). Leurs expériences révèlent aussi qu'environ 1/3 de la population de *Legionella* reste cultivable à 20°C et 60% d'humidité et ce 30 minutes après aérosolisation ;
- une étude réalisée en laboratoire sur des *Legionella* en suspension dans un aérosol à 65% d'humidité relative a montré qu'elles peuvent survivre au moins 2 heures (Hambleton *et al.*, 1983) ;
- *L. pneumophila* séro-groupe 1 -sous-type Pontiac- survit mieux que les autres sous-types de *L. pneumophila* (Dennis et Lee, 1988) ;
- une autre étude a montré qu'une plus grande pathogénicité des souches de *Legionella* semble être associée à une survie plus longue dans les aérosols. La capacité à survivre et à rester cultivable après passage dans un aérosol devrait donc être vue comme un facteur de potentialisation de la pathogénicité des souches (Dennis et Lee, 1988).

D'autres facteurs ont aussi été identifiés comme favorables à la survie des *Legionella* dans les aérosols. Ainsi :

- comme pour d'autres bactéries, le stade métabolique de *L. pneumophila* affecte sa survie dans l'air, les cellules avec une activité métabolique faible montrent le plus de résistance (Hambleton *et al.*, 1983) ;
- la présence de sels minéraux ou de cyanobactéries augmentent la stabilité de *L. pneumophila* dans l'aérosol (Berendt, 1981 ; 1980 b).

Les très récents travaux réalisés au CSTB dans le cadre d'une sur la survie de différentes souches de *Legionella* aérosolisées confirment et apportent un éclairage nouveau sur l'influence de ces facteurs environnementaux (Ha, 2005 a ; Audition CSTB). Notamment, ces travaux indiquent :

- les cinétiques de survie d'une *L. pneumophila* sérogroupe 6 (sg6) dans un aérosol (HR 95%, 20°C) montrent que 99% de la cultivabilité est perdue en 1 heure (figure 1), mais que l'estimation de leur survie au travers de l'intégrité membranaire des bactéries se maintient sur plus de 5 heures (90 % de survie – figure 2). L'intégrité membranaire des *Legionella* aérosolisées est touchée après 20 heures (30% et 10% de survie respectivement après 20 et 70 heures avec une humidité relative de 95%) ;
- la survie de *L. pneumophila* sg6, mesurée par l'intégrité membranaire est favorisée pour des hygrométries allant de 30 et 60% (maintient à un niveau de survie > 70%, figure 2) ;
- la survie mesurée par l'intégrité membranaire des *L. pneumophila* est accrue pour la souche épidémique de Lens par rapport à la souche de laboratoire (figure 3), alors que leur cultivabilité est comparable (figure 4).

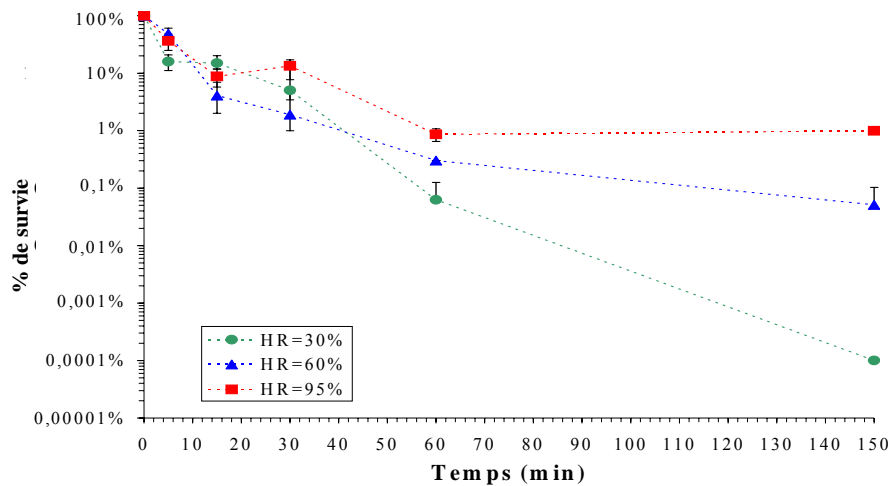


Figure 1 : Cinétique de survie de *L. pneumophila* mesurée par culture bactérienne en fonction du taux d'humidité (d'après Ha, 2005 a).

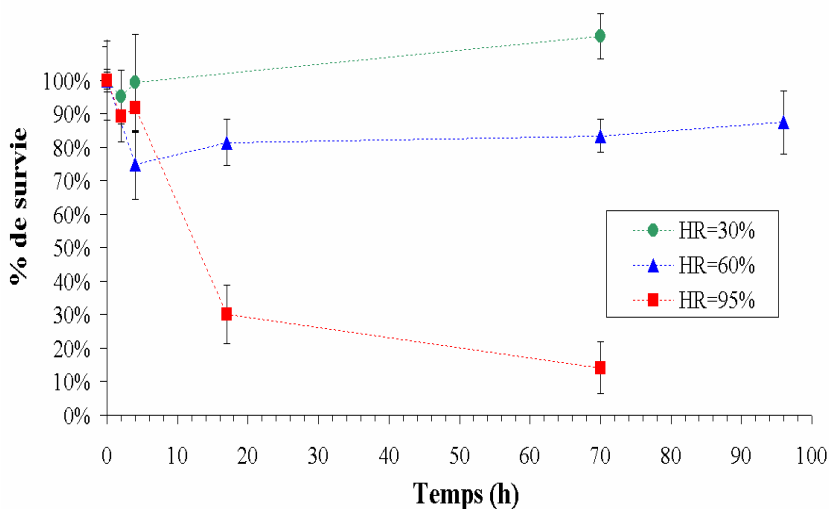


Figure 2 : Cinétique de survie de *L. pneumophila* sg6 mesurée par intégrité membranaire en fonction du taux d'humidité relative (d'après Ha, 2005 a).

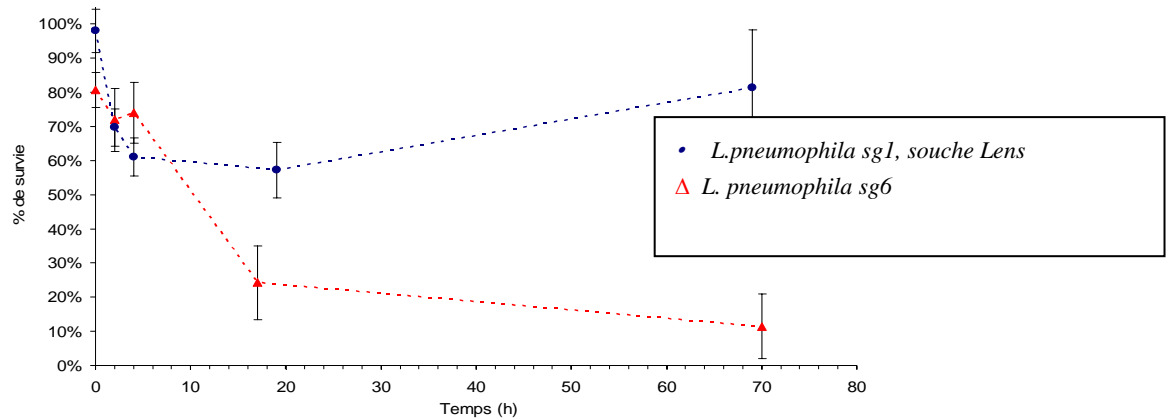


Figure 3 : Cinétique de survie de *L. pneumophila* sérotype 6 et *L. pneumophila* sérotype 1 de Lens mesurée par intégrité membranaire (d'après Ha, 2005 a).

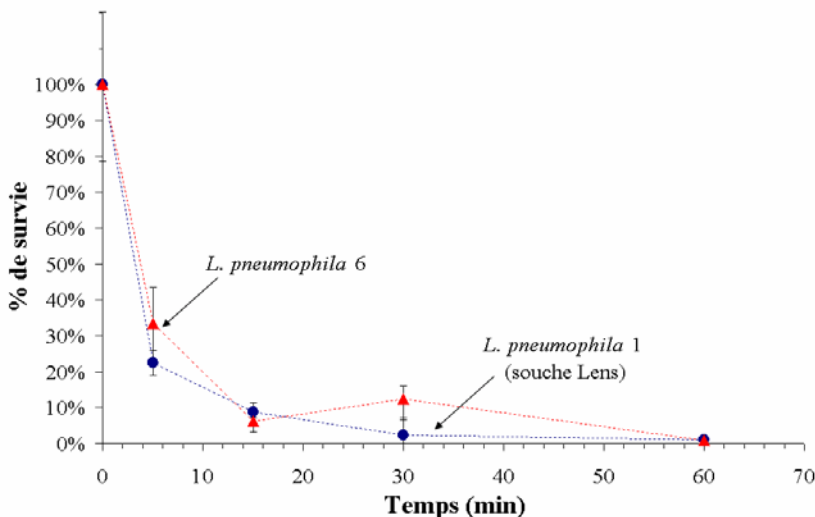


Figure 4 : Cinétique de survie de *L. pneumophila* sérotype 6 et *L. pneumophila* sérotype 1 de Lens mesurée par culture bactérienne (d'après Ha, 2005 a).

Le principe de collecte de l'échantillonneur utilisé peut engendrer une perte supplémentaire de viabilité des bactéries aérosolisées. De récents travaux d'intercomparaison de biocollecteurs pour la détection des *Legionella* aérosolisées (Deloge *et al.*, 2004 ; 2005 ; Ha *et al.*, 2005 b) qui ont été réalisés à la fois en banc d'aérosolisation et sur site environnemental montrent que parmi les 3 principaux systèmes de collecte d'aérosols bactériens (impaction sur milieu solide, impaction en milieu liquide et filtration), le meilleur rendement de collecte des *Legionella* apparaît avec l'impaction en milieu liquide, comparativement à la filtration ou l'impaction sur milieu solide. Ces résultats corroborent d'autres travaux plus anciens et non dédiés à *Legionella* (Ishimatsu *et al.*, 2001 ; Duchaine *et al.*, 2001).

3.6.3. Echantillonneur des bio- aérosols

Il existe donc des outils expérimentaux pour la collecte et l'analyse des aérosols de *Legionella spp* qui sont, il est vrai, essentiellement utilisés à des fins de recherche. Cependant, certains de ces outils (collecteur par impaction en milieu liquide et détection des *Legionella spp* aérosolisées par la méthode FISH) ont été utilisés dans le cadre de l'épisode épidémique de Lens (Mathieu *et al.*, 2006), où ils sont apparus recevables par l'ensemble des experts en charge de ce dossier.

Dans la pratique, ces premières mesures de *Legionella spp* dans l'air extérieur apparaissent valides et la recherche de solutions analytiques complémentaires à la méthode culturale doit être poursuivie et consolidée, avec notamment des mesures comparatives entre techniques par culture, FISH et PCR.

Par ailleurs, dans le cadre des activités de biodéfense, l'aérobio-contamination est un thème sur lequel le Centre d'Etude du Bouchet (CEB), travaille depuis plusieurs années. Leur audition et contribution écrite a permis de confirmer que des outils de collecte et de détection performants et accessibles étaient utilisés pour la détection des germes de l'air extérieur, dans un cadre militaire et de défense civile (réseau Biowatch aux USA). Tous les outils de collecte présentés fonctionnent sur le principe de l'impaction en milieu liquide (Figures 5 et 6).

Dans le cas particulier des *Legionella*, la taille des particules à collecter correspond à la fraction de gouttelettes assez petites pour atteindre les alvéoles pulmonaires (diamètre inférieur à 10 μm) (Bollin *et al.*, 1985 ; Girod *et al.*, 1982) et assez grandes pour contenir une ou plusieurs bactéries (diamètre supérieur à 2 μm) (Baron et Willeke, 1986). Quant aux moyens de mesure des *Legionella spp*, outre la méthode de culture, les techniques de biologie moléculaire (PCR) ou de détection par réaction anticorps-antigènes sont spécifiques et peuvent être appliquées.

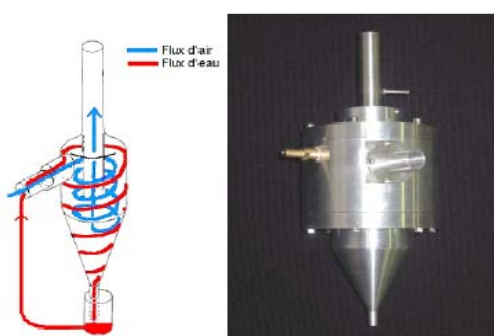


Figure 5 : Principe d'impaction en milieu liquide des biocollecteurs (Source Robine. CSTB)



Figure 6 : Exemples de biocollecteurs d'air utilisés dans le cadre de mesures environnementales (Source : M. Morel, CEB).

3.7. Modélisation de la dispersion des panaches

Parallèlement au développement d'outils permettant de collecter les bio-aérosols provenant des TAR, la diffusion de *Legionella spp* par les panaches de TAR a été évaluée à l'aide de modèles théoriques. La plupart des outils disponibles utilisent des modèles de dispersion des polluants dans l'air. Ces modèles permettent d'estimer le transport, le point d'impact et la concentration au point d'impact d'un polluant à partir d'un point d'émission. Bien qu'entachés d'incertitudes ces outils sont bien adaptés au calcul de chroniques (séries temporelles) permettant de suivre l'évolution des panaches dispersés en fonction des conditions météorologiques.

Le choix d'un modèle et son application dépendent de nombreux facteurs tels que l'échelle géographique à laquelle il va être appliqué (nationale, régionale,...), l'échelle temporelle (journalière, hebdomadaire, annuelle,...), le type de polluant (gazeux, gouttelettes, poussières), le terrain (plat ou accidenté), les caractéristiques de la source d'émission, les conditions météorologiques, la qualité des données utilisées, ... De nombreux modèles gaussiens existent : la gamme s'étend des modèles simples (Screen3) permettant une première analyse à des modèles plus complexes (ADMS3).

3.8. Points critiques dans les installations industrielles

3.8.1. Dévesiculeurs ou pare gouttelettes

Le dévesiculeur est un dispositif de limitation des entraînements vésiculaires, couramment appelé pare-gouttelettes. Le risque de dispersion des *Legionella spp* par les tours aérorefrigérantes est essentiellement lié à deux paramètres : la quantité de gouttelettes émises à la sortie de la tour et le transport dans l'environnement gouverné par les mouvements atmosphériques. La quantité de gouttelettes émises est quantifiée de manière indirecte en multipliant le volume d'eau en circulation dans l'installation par le taux de primage des dévesiculeurs. Le second paramètre dépend principalement des conditions de propagation atmosphérique.

Par définition, le taux de primage ou l'entraînement vésiculaire est la quantité d'eau du circuit de refroidissement entraînée sous forme de gouttelettes par la vapeur au-dessus des séparateurs des réfrigérants. Il est donné par le rapport (exprimé en %) entre la quantité de gouttelettes ayant traversé le panneau éliminateur et la quantité en amont du dispositif. Les systèmes d'élimination des gouttes sont essentiellement des dévésiculeurs constitués d'obstacles (sous formes de lamelles, grilles, empilement...) qui imposent un trajet tortueux pour le gaz support et les gouttes en suspension dans ce gaz. Le principal mécanisme de collecte des gouttes est un mécanisme d'impaction. Par définition, l'impaction est régie par un nombre caractéristique qui est le nombre de Stokes. Ce nombre caractéristique est fonction d'une part, du temps de relaxation des gouttes proportionnel au carré de leur diamètre et à la vitesse du gaz à l'approche de l'obstacle, d'autre part, inversement proportionnel à une longueur caractéristique qui peut être l'espacement entre les lamelles. Le rendement d'un tel dispositif doit donc croître avec la taille des gouttelettes, la vitesse du gaz à traiter et en diminuant l'espace inter-lame.

Le taux de primage des panneaux éliminateurs de gouttes est donc piloté par cet ensemble de paramètres. Ainsi, la taille des gouttes dépend des conditions de pulvérisation (stabilité de la pression d'alimentation des buses, ...), la vitesse d'impact dépend du débit de gaz induit par le tirage naturel de la tour et la distance inter-lame est liée à l'intégrité du système dans le temps (détérioration après manipulation, encrassement, état de surface,...)

Cette analyse montre que le taux de primage des panneaux éliminateurs de gouttes est sensible aux différents paramètres énoncés ci-dessus et qu'a priori, si l'on peut évaluer leur performance au laboratoire sur des matériels neufs en contrôlant les vitesses de gaz et les débits d'aspersion, la transposition de ces résultats dans les conditions réelles d'exploitation nécessite l'application d'un facteur de sécurité qui pourrait prendre en compte les différents aléas de fonctionnement (variation de la granulométrie des gouttes liée à des fluctuations de pression d'alimentation des buses, variation du débit de gaz à traiter par tirage naturel et encrassement au cours du temps).

3.8.2. Le circuit d'eau et le biofilm

Les *Legionella spp* sont des bactéries à tropisme hydrique, bien que très peu d'études se soient attachées à examiner leur présence dans les milieux naturels en situation non-épidémique. Le « Criteria Health Document » édité par l'EPA (1999) démontre clairement la large distribution des *Legionella* dans les réservoirs d'eau douce naturelle (rivières, lacs, ...), mais surtout dans les réservoirs artificiels (systèmes de climatisation, réseaux d'eau chaude, ...) où elles sont capables de survivre parfois dans des conditions extrêmes (Fliermans *et al.*, 1981). Quelques études prouvent aussi leur présence et leur survie dans des environnements marins (Ortiz-Roque et Hazen, 1987 ; Palmer *et al.*, 1993 ; Heller *et al.*, 1998).

Les milieux hydriques artificiels (*i.e.* les réseaux d'eau, circuits d'eau des aérorefrigérants) sont reconnus comme zones amplificatrices et jouent le rôle de disséminateur de *Legionella spp*. Nombre d'études montrent clairement que l'eau potable véhiculée dans le réseau de distribution peut être une source significative de *Legionella spp* (Rusin *et al.*, 1997 ; States *et al.*, 1989). Cette contamination est moins importante dans les réseaux d'eau d'habitats collectifs ou individuels (respectivement, 25% et 6,2% d'échantillons d'eau positifs) qu'au niveau du réseau d'eau chaude et des douches en particulier (Zacheus et Martikainen, 1994 ; Luck *et al.*, 1993) ou encore au niveau des circuits de tours aérorefrigérantes (Heng *et al.*, 1997 ; Koide *et al.*, 1993).

Les facteurs clés favorisant leur développement dans ces environnements sont ceux déjà évoqués au paragraphe 3.1 "Ecologie des *Legionella*" : température, pH, zone de stagnation d'eau, présence de nutriments, dépôts, corrosion, tartre, protozoaires et autres microorganismes.

Comprendre le comportement des *Legionella spp* dans ces installations oblige à la prise en compte des interactions eau-matériaux. Depuis quelques décennies, il est prouvé que la problématique des bactéries, dans des réseaux d'eau est intimement liée à la présence d'un biofilm à la surface des installations, qui sert de réservoir nutritif, de niche protectrice vis-à-vis des désinfectants, de zone d'échanges génétiques et d'accumulation des pathogènes (Jefferson, 2004 ; Lejeune, 2003 ; Henke et Bassler, 2004 ; Branda *et al.*, 2005 ; Donlan, 2002 ; Stoodley *et al.*, 2002 ; Stanley et Lazazzera, 2004 ; Miller et Bassler, 2001 ; Van der Wende *et al.*, 1989 ; Servais *et al.*, 1992 a et b ; Flemming, 2002 ; Martiny *et al.*, 2003 ; Batté *et al.*, 2003).

Dans le cas des légionelles, il n'y a aucune raison pour qu'elles se comportent différemment des autres bactéries hydriques. Aussi, elles sont capables de coloniser les réseaux d'eau (Barbeau *et al.*, 1998). Elles y trouvent des zones propices à leur développement, véritables niches écologiques qui fonctionnent comme des amplificateurs des populations bactériennes.

La littérature relativement abondante à ce sujet décrit le genre *Legionella* comme une bactérie bien représentée dans les biofilms développés sur matériaux organiques à 40°C où elles peuvent contribuer à plus de 50% à la flore totale du biofilm. De même, les matériaux métalliques contenant du fer, zinc et aluminium et les produits de corrosion associés sont de facteurs stimulant la survie des *Legionella spp* car ils constituent des apports nutritionnels nécessaires à leur croissance (States *et al.*, 1985).

Au contraire, les études de la survie des *Legionella spp* dans les réseaux d'eau potable en présence de cuivre ou d'argent montrent une inhibition de la biomasse totale et des *Legionella spp*, en particulier (Rogers *et al.*, 1994, 1995 ; Landeen *et al.*, 1989 ; Liu *et al.*, 1998).

Par ailleurs, le biofilm joue le rôle de réservoir dans lequel elles se trouvent protégées des traitements de désinfection couramment appliqués en réseau d'eau (Kuchta *et al.*, 1993). *Legionella* peut survivre avec de faibles niveaux de chlore libre résiduel sur de longues périodes. L'exposition continue des légionelles à de fortes doses de chlore peut dans certains cas être efficace sur certaines eaux à faible concentration en matière organique ; mais ces traitements sur des eaux usées ou des effluents se sont avérés non efficaces (Palmer *et al.*, 1995). Lors d'un épisode épidémique dans un hôpital, les procédures d'hyperchloration du réseau d'eau chaude n'ont pas permis d'éradiquer les *L. pneumophila* responsables (Levin *et al.*, 1995).

De même, les décontaminations de réseau d'eau par choc thermique et purge n'ont qu'une efficacité temporaire et les *Legionella* retrouvent généralement leur niveau d'avant contamination en quelques semaines après traitement (Zacheus et Martikainen, 1996).

Les interactions avec d'autres microorganismes dans le biofilm semblent aussi essentielles à leur survie et prolifération dans les milieux aquatiques (Kramer et Ford 1994 ; Yu, 1997 ; Lin *et al.* 1998). L'association entre les légionelles et les protozoaires et leur présence reconnue dans les biofilms compliquent fortement leur désinfection. Kilvington et Price (1990) montrent que des kystes d'*Acanthamoeba* hébergeant des *Legionella spp*, les protègent du chlore même pour des concentrations de 50 mg/L en chlore libre. Srikanth et Berk (1994) montrent même que des amibes présentes dans l'eau des circuits de TAR sont capables de s'adapter aux traitements biocides appliqués.

3.9. Surveillance, entretien et maintenance des installations industrielles

Afin d'aider les exploitants à l'application de la réglementation, l'administration a mis à leur disposition un guide basé sur la méthode d'analyse de risque dans les installations industrielles dite d'analyse des dangers des points critiques pour leur maîtrise (ADPCM) connue sous le nom de HACCP pour « hazard analysis critical control point ».

Dans le cas de la réduction des risques liés aux *Legionella spp*, cette approche se décline en 3 familles d'action : préventives, de correction et de retour aux actions préventives. Ces trois groupes d'actions doivent, entre autres, prendre en compte le contrôle du biofilm et l'efficacité des moyens mis en œuvre, l'interprétation des résultats et l'enregistrement de tout événement en relation directe ou indirecte avec les phénomènes de prolifération des *Legionella spp*.

Afin d'identifier les actions spécifiques répondant à ces objectifs, il est nécessaire au préalable de mener une réflexion sur :

- les caractéristiques de qualité de l'eau aux points représentatifs de chaque partie de l'installation ;
- les performances de traitements éventuellement effectués ;
- les caractéristiques de l'installation ;
- les critères et les moyens techniques et humains à mobiliser pendant le suivi, la détection et le traitement des anomalies.

3.10. Traitement physico-chimique et désinfection des eaux

Les eaux de surface se caractérisent par la présence de matières en suspension (particules de tailles supérieures au micromètre) et de matières en solution à caractères minéral et organique. Les matières en suspension issues principalement du lessivage des sols (érosion) favorisent entre autre le transport des contaminants organiques et minéraux mais aussi microbiens. Les matières en solution englobent une composante minérale (minéralisation) souvent majoritaire qui est à mettre en relation avec l'origine de l'eau (géologique) et une composante organique issue à la fois du milieu terrestre (lessivage des sols, matières organiques allochtone) et du milieu aquatique (production microbienne, matières organiques autochtone). Pour les rivières et les fleuves, les matières organiques dissoutes sont principalement issues des sols et identifiées sous le terme de matières humiques ou substances humiques. Elles sont d'ailleurs à l'origine de la coloration brunâtre des eaux. Si la composition minérale demeure relativement constante, en revanche les teneurs en matières en suspension et en matières organiques en solution varient considérablement avec les saisons.

De part leurs caractéristiques physicochimiques l'utilisation d'eau de surface dite brute (directement pompée dans la rivière via un canal d'amenée) pour alimenter les unités de refroidissement de certaines centrales électriques (SNET) et des centrales nucléaires pose des problèmes d'entartrage (précipitation des espèces carbonatées) au niveau des échangeurs thermiques et de l'installation (déseviceur) mais aussi et surtout des phénomènes de prolifération microbienne (formation d'un biofilm). En effet, ces installations de part leurs températures élevées et leur alimentation avec des eaux chargées en matières organiques en solution à caractère dit biodégradable constituent un écosystème favorable aux phénomènes de prolifération microbienne dans la phase aqueuse et à la formation d'un biofilm dans les différentes parties constitutives de ce type d'installation.

La prolifération bactérienne au niveau des eaux de refroidissement et du biofilm constituant un problème majeur sur le plan sanitaire, le choix d'un ou des traitement(s) basé(s) sur le principe « la meilleure technologie disponible » afin d'assurer une désinfection permettant de réduire, autant que faire se peut, le risque sanitaire est donc à rechercher.

Compte tenu du grand nombre de données disponibles dans le domaine du traitement des eaux chargées en matière organique destinées à la potabilisation, il semble pertinent et légitime de s'appuyer sur ces connaissances acquises pour aborder les questions relatives au choix d'un traitement et identifier la meilleure technologie disponible à utiliser pour les TAR CNPE.

Dans le domaine du traitement des eaux à potabiliser cet aspect désinfection est également très présent, en particulier au niveau des installations qui sont alimentées par des eaux de surface. L'élimination des matières en suspension (< 0,5 NTU en sortie d'usine) en tant que vecteur potentiel de microorganismes pathogènes est devenue aujourd'hui un objectif prioritaire. L'efficacité des techniques de clarification (coagulation, floculation, décantation/flottation, filtration sur sable) est aujourd'hui bien maîtrisée. De plus, la mise en place de traitement chimique visant à assurer la qualité microbiologique des eaux produites jusqu'au robinet du consommateur demeure au moins en France une opération quasi systématique. Dans ce contexte, l'efficacité des réactifs de désinfection vis-à-vis de l'élimination des microorganismes pathogènes ainsi que l'influence de la qualité des eaux sur la formation de produits indésirables liés à l'utilisation de tels réactifs sont des points qui ont été et qui sont toujours très largement abordés par la communauté scientifique spécialisée. On relèvera notamment le volume très important de travaux relatifs à la réactivité des matières organiques dissoutes (i.e. substances humiques) vis-à-vis des réactifs oxydants utilisés pour la désinfection, en particulier les réactifs halogénés comme le chlore (Johnson *et al.*, 1982 ; Kringstad *et al.*, 1983 ; Coleman *et al.*, 1984 ; Norwood *et al.*, 1985) ; le dioxyde de chlore (Noack et Doerr., 1978 ; Stevens, 1982 ; Colclough *et al.*, 1983), les chloramines (Jensen *et al.*, 1985 ; Cowman et Singer, 1996), mais aussi l'ozone (Killops, 1986 ; Haag et Hoigne, 1983 ; Cooper *et al.*, 1986 ; Croué *et al.*, 1989) et le peroxyde d'hydrogène (Von Gunten et Hoigne, 1994).

Le constat général de tous ces travaux porte sur la très forte réactivité des matières organiques dissoutes des eaux de surface vis-à-vis des réactifs oxydants utilisables (consommation du réactif), forte réactivité qu'il est important de prendre en compte pour assurer le potentiel de désinfection souhaité lors de l'utilisation de tel réactif - notion de C.t, persistance d'une teneur fixée en oxydant pour une période de temps donné. Cette forte réactivité qui impose l'emploi de quantité accrue de réactif oxydant induit la formation excessive de composés indésirables (composés à caractère toxique). Ces molécules proviennent :

- soit de la réaction du réactif injecté avec les matières organiques dissoutes « naturelles » comme le chlore et ses dérivés (dioxyde de chlore ; chloramines) qui vont produire des composés dits organohalogénés (AOX pour Adsorbable Organic Halide), les plus connus étant les trihalométhanes, les acides haloacétiques et les halonitriles ;
- soit de la réaction du réactif injecté avec la phase minérale, c'est le cas de l'ozone qui conduit à la formation de bromates par oxydation des ions bromure (passage par la formation de brome - HOBr/BrO⁻) pouvant également conduire à la formation de dérivés organobromés de manière similaire au chlore ;
- soit de la réduction du réactif oxydant utilisé, c'est le cas des ions chlorite et chlorate pour le dioxyde de chlore ou des nitrates pour les chloramines.

Devant ce constat, à l'appui des nombreux travaux de recherche menés dans ce domaine et à cause des normes de plus en plus sévères fixées pour la qualité des eaux distribuées, les producteurs d'eau potable essayent de déplacer les étapes de désinfection le plus loin possible dans la filière, en aval des opérations visant à éliminer les particules en suspension et les matières en suspension colloïdales et en solution.

La problématique du traitement reste la recherche du compromis entre une bonne désinfection et la formation limitée de sous-produits à caractère toxique. De ce fait, la phase de préoxydation mettant en œuvre du chlore et certains dérivés du chlore en tête d'usine de potabilisation des eaux est aujourd'hui proscrite pour des eaux riches en matières organiques (eaux colorées) afin de garantir une teneur en sous-produits de chloration (trihalométhanes) en accord avec la législation.

Soulignons ici, qu'en France, des industries équipées des aéroréfrigérants utilisant de grands volumes d'eau de rivière (10000 à 30000 m³/jour), environ 10 fois moins que le volume d'une TAR CNPE qui est d'environ 170 000 m³/jour, appliquent des traitements tels que la clarification de l'eau brute à l'aide de flocculants et d'une décarbonatation. Ces traitements leur permettent une bonne maîtrise de la prolifération de *Legionella* dans les eaux des circuits de refroidissement < 10³ UFC/l et de respecter ainsi la réglementation appliquée aux TAR ICPE (audition SNET). Par ailleurs, en Allemagne, ces mêmes traitements sont appliqués dans certaines TAR CNPE alimentées en eau de rivière (communication INERIS).

4. Principales caractéristiques des TAR CNPE exploitées par EDF

Le parc des centrales nucléaires d'EDF comporte 19 centres nucléaires de production d'électricité (CNPE). Parmi eux 11 CNPE sont équipés de TAR soumises à la réglementation des INB. Ces 11 sites comportent au total 32 TAR, dont 28 TAR CNPE alimentées avec de l'eau de rivière et soumises aux recommandations de la DGSNR relatives au risque *Legionella* des INB (cf chapitre 2 - Réglementation nationale).

Les TAR CNPE des installations nucléaires de base se trouvent dans le circuit tertiaire et sont destinées à permettre la condensation de la vapeur du circuit secondaire par échange de chaleur.

Le circuit tertiaire comporte trois principales parties : le condenseur constitué de faisceaux tubulaires avec, selon les sites, une surface d'échange de 60000 à 130000 m² et des canalisations de 50 à 200 m de long reliant le condenseur et l'aéroréfrigérant.

Globalement, le fonctionnement de la TAR est le suivant : l'eau chauffée suite à l'échange thermique avec le circuit secondaire, en arrivant dans le bassin chaud, est projetée sous la forme de gouttelettes. Au contact du dévésiculateur, structure permettant d'augmenter la surface de contact entre les gouttelettes d'eau chaude et l'air ascendant destiné à refroidir l'eau (tirage naturel), la majeure partie de l'eau ainsi refroidie tombe dans un bassin appelé « bassin d'eau froid », l'autre partie est entraînée sous forme de micro-gouttelettes et constitue le panache que l'on observe à la sortie des aéroréfrigérants.

Le volume d'eau des circuits de refroidissement est variable d'un site à l'autre. Il est compris entre 20000 et 48000 m³ selon le type d'installation. Le temps de séjour de l'eau de re-circulation varie de 2,5 à 13 heures et le volume du panache est d'environ 0,8 m³/sec.

Les installations d'EDF sont équipées de dévésiculateurs dont le taux primage de 0,003% est garanti par le constructeur.

Comme décrit dans le chapitre « dévésiculateurs ou pare-gouttelettes, (point 3.8.1), l'émission d'aérosols est directement liée à l'efficacité de rétention d'eau de ces dévésiculateurs. En effet, le volume d'eau du panache ne pouvant pas être mesuré directement, est estimé d'après le débit d'eau de l'installation et du taux de primage du dévésiculateur.

Le groupe d'experts a bien noté que la présence et la prolifération des *Legionella spp* dans les TAR CNPE d'EDF sont principalement liées aux choix technologiques :

- d'utiliser un système de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air ;
- d'alimenter le système avec une eau de surface ;
- de faire re-circuler l'eau afin de réduire le volume d'eau prélevé dans la rivière.

5. Présentation et discussion de l'approche d'EDF

EDF a mis en place un comité en charge de la définition des actions spécifiques en vue de la gestion des risques liés aux *Legionella* dans les panaches diffusés par les TAR CNPE de ses sites industriels. Ce comité est composé de personnels techniques et de scientifiques, ainsi que de plusieurs Directions d'EDF. Ce comité a identifié et décliné plusieurs actions mises en place de manière parallèle dans le temps. Ces actions peuvent être classées en 3 types :

- démarche de démonstration d'EDF concernant les seuils de *Legionella* dans le bassin froid à partir desquels un traitement de désinfection est à mettre en œuvre. Il s'agit des travaux sur la modélisation de la dispersion atmosphérique des panaches et de l'exposition du personnel des CNPE à ces panaches ;
- surveillance des installations. Il s'agit du contrôle des niveaux de *Legionella spp* selon la norme de référence (NF T90-431) dans le bassin froid en accord avec les recommandations de la DGSNR. Selon les années, ces niveaux ont été exprimés soit en *Legionella spp* par litre (2002 et 2004) soit en *Legionella pneumophila* par litre (2001 et 2003). Des actions complémentaires ont été mises en place afin de collecter des données sur la qualité microbiologique et physico-chimique de l'eau en amont et en aval de ces installations ;
- projets de recherche en cours.

Ces trois points sont présentés et discutés dans les chapitres 5.1 à 5.3. L'examen des données concernant les plans d'entretien-maintenance et la mise en œuvre des traitements de désinfection feront l'objet d'une deuxième phase de travail du groupe d'experts dont les conclusions seront rendues dans un deuxième rapport.

5.1. Démarche de démonstration d'EDF concernant les seuils d'action actuellement préconisés

L'objectif d'EDF consiste à justifier le seuil de $5 \cdot 10^6$ UFC/l de *Legionella spp* comme seuil de gestion de ses TAR CNPE, et de $5 \cdot 10^5$ UFC/l de *Legionella spp* pour les TAR CNPE de Chinon. Pour atteindre cet objectif, EDF s'appuie sur la comparaison des concentrations en *Legionella* au sol générées par la dispersion atmosphérique du panache des TAR CNPE et des TAR ICPE. Ces concentrations sont estimées à l'aide d'outils de modélisation.

La stratégie d'EDF vise donc à prouver que le niveau de risque engendré par les TAR CNPE est inférieur à celui d'une TAR ICPE. Pour ce faire EDF s'appuie :

- dans une première série de documents, sur deux approches théoriques : la modélisation de la dispersion atmosphérique de panaches à l'aide du modèle Multipol-Screen 3 et sur un calcul de risque sanitaire pour les populations autour des TAR CNPE basé sur des données théoriques issues d'un travail de thèse dont les résultats n'ont pas fait l'objet de publication. EDF complète son argumentaire avec des données d'exposition professionnelle collectées au sein de ses sites INB ;
- dans une deuxième série de documents, et suite aux remarques du groupe d'experts formulées lors de sa première audition, EDF base son argumentaire uniquement sur la modélisation de la retombée des panaches effectuée à l'aide du modèle ADMS3, plus moderne que le précédent.

Ces arguments sont discutés ci-après.

5.1.1. Présentation et discussion de la modélisation

5.1.1.1. Présentation et discussion du choix du modèle

5.1.1.1.1. Argumentation présentée par EDF

(Document EDF : Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement de centres nucléaires de production d'électricité. Référence D4550.06-05/1832. Page 10).

« La modélisation a pour but d'évaluer la concentration ambiante en légionelles au sol, à partir de la concentration en légionelles dans l'eau des bassins froids des tours aéroréfrigérantes. Il est d'autant plus indispensable de recourir à une modélisation, qu'aucune technique de détection et de dénombrement des Legionella dans l'air n'est, à notre connaissance, actuellement validée. Quand bien même une telle mesure serait possible, elle ne pourrait être que ponctuelle dans le temps comme dans l'espace, alors que le modèle permet un criblage temporel et spatial. »

Modèle Multipol Screen 3

« Le modèle SCREEN3, qui est un code de screening (dépistage) accessible à tous (sur le site <http://www.epa.gov>), utilisé pour évaluer en première approximation l'impact maximal potentiel d'une installation,...s'appuie sur un jeu de données météorologiques « virtuelles » constituées à partir de l'ensemble de toutes les situations raisonnablement imaginables (vitesses de vent et classes de stabilité). Il calcule toutes les valeurs de concentration et ne retient que la valeur maximale horaire en chaque point de calcul ». (Document EDF : Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement de centres nucléaires de production d'électricité. Référence D4550.06-05/1832. Page11)

Modèle ADMS3

« Ont été modélisées sous ADMS3, et avec différents paramètres (prise en compte ou non de la topographie, taille de gouttelettes de primage) : la dispersion des légionelles émises par les 4 TAR du CNPE X qui constitue le site de référence, la dispersion des légionelles émises par 4 TAR ICPE de différents types qui seraient implantées sur le site X : soit des tours de climatisation d'environ 1 MW désignées dans la suite de l'étude comme petites tours, soit des tours de ICPE industrielles de faible hauteur désignées dans la suite par tours de faible hauteur (6,3 m) ».

« Les données météorologiques utilisées sont spécifiques au site. La concentration en légionelles dans l'eau de circulation a été supposée dans tous les cas de 10^5 UFC/l (seuil d'arrêt pour les installations ICPE). Dans le cas d'une gouttelette, le modèle intègre les dépôts sec et humide (lessivage du panache par la pluie). Les paramètres du dépôt sont supposés inconnus et donc renseignés par les paramètres par défaut d'ADMS ». (Document EDF référence : ELI ER/05 00414 A BPE. Page 4 à 6)

5.1.1.1.2. Commentaires des experts

Modèle Multipol-Screen 3

Globalement, les experts considèrent que le modèle Multipol-Screen3 n'est pas adapté à la problématique de la dispersion des gouttelettes d'eau car il s'agit d'un modèle de caractérisation de la climatologie renseignant sur les moyennes et non sur les conditions météorologiques extrêmes qui peuvent conduire à des pics de contamination. En conclusion, la qualité des résultats obtenus avec Multipol-Screen3 ne permet que d'en tirer des tendances générales et directement dépendantes des limitations d'un modèle de panache gaussien comme Multipol.

Modèle ADMS3

Ce modèle permet d'améliorer sensiblement la simulation précédente mais ne prend pas en compte toutes les lois de la physique lors de la dispersion atmosphérique d'un panache :

- pour le traceur de gouttelettes d'eau, le modèle ne prend pas en compte l'évaporation et les phénomènes de coagulation et adopte une vitesse de déposition par défaut. La récente expérience de l'INERIS avec ce code montre que la prise en compte des dépôts est majorée ce qui tend à « purger » prématurément le panache et donc à minimiser la concentration aérienne.

Ainsi, par prudence, le modélisateur aurait dû « imposer » une vitesse de dépôt au code plutôt que de s'en remettre au choix par défaut effectué dans le code ;

- les TAR CNPE ont des hauteurs bien plus importantes que celles des cheminées de sites industriels plus classiques généralement traitées par des logiciels tels que ADMS3. La prise en compte correcte de la dispersion du panache dans ces conditions devrait être vérifiée (par exemple avec le traitement des couches d'inversion).

En conclusion, les experts estiment qu'EDF dispose de moyens appropriés à la modélisation de la dispersion des panaches dans des conditions réalistes, notamment, le modèle MERCURE (modèle plus sophistiqué) développé par leur centre de recherche qui permet de mieux prendre en compte des phénomènes physiques complexes.

5.1.1.2. Présentation et discussion des valeurs paramétriques des modèles

5.1.1.2.1. Argumentation présentée par EDF

« Pour toutes les modélisations, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- *Le débit de légionelles à la sortie d'un aэрорéfrigérant est directement proportionnel au taux de primage.*
- *Toutes les gouttelettes d'eau de primage sont chargées en légionelles avec un diamètre inférieur à 10 µm et sont donc toutes considérées comme infectantes,*
- *Toutes les légionelles survivent au cours de leur transfert atmosphérique du bassin de la tour aэрорéfrigérante jusqu'au sol.*

Ces deux dernières hypothèses conservatives conduisent donc à des calculs majorants ».

(Document EDF : Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement de centres nucléaires de production d'électricité. Avril 2005. Page 10).

« Pour être infectantes, les légionelles présentes dans l'air doivent être viables. Or, pour la plupart des bactéries, l'air est un milieu extrême et la létalité occasionnée par l'aérosolisation est généralement importante... »

« ...L'étude de la survie des bactéries dans les aérosols est difficile car il faut bien définir ce qu'est un aérosol microbien, connaître les facteurs de l'environnement, maîtriser des techniques de prélèvement et d'identification représentatives de la réalité... Les études réalisées sur la survie des Legionella (Berendt, 1980 ; Hambleton, 1983 ; Dennis et Lee, 1988) font mention d'un abattement d'un facteur 10 à 100 du nombre de légionelles cultivables en 15 à 30 minutes. Ces facteurs d'abattement sont confirmés par de récentes études menées par EDF en collaboration avec le CSTB et Climespace en chambre d'aérosolisation ».

« La prise en compte, dans notre évaluation comparative des risques, d'une survie des Legionella égale à 100 % maximise donc fortement les résultats pour les aэрорéfrigérants de grande taille avec des zones de retombées situées à plusieurs kilomètres, ce qui correspond pour les Legionella, à un long parcours d'une durée estimée à une quinzaine de minutes avant leur arrivée au sol ».

(Document EDF : Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement de centres nucléaires de production d'électricité. Avril 2005. Page 12).

5.1.1.2.2. Commentaires des experts.

Choix de gouttelettes

Le choix des gouttelettes d'eau comme traceur s'avère pertinent en l'absence de meilleure connaissance en la matière. Pour la taille des gouttelettes, EDF retient 5 µm en précisant qu'il s'agit d'une hypothèse conservatrice. Si on peut admettre qu'une taille plus importante entraînerait un dépôt plus important, par gravité, il ne peut être exclu qu'une taille plus faible des gouttelettes favorisant l'évaporation, le comportement des aérosols se rapprocherait alors de celui d'un gaz, et dans ce cas la distance d'impact est au contraire plus importante. Cette hypothèse n'est donc pas particulièrement pénalisante.

Choix du taux de primage d'une TAR CNPE

EDF sélectionne une valeur de taux de primage pour les TAR CNPE à partir des données suivantes :

- mesures *in situ* sur des aérofrigoriférants de la centrale de Bugey (1980). Le taux moyen de primage obtenu est de 0,0038% ;
- mesures effectuées sur une unité pilote située à Civaux (qui n'est pas une tour de grande hauteur) donnant des taux de primage de 0,0018% ;
- mesures effectuées sur le banc d'essais MISTRAL. Le taux de primage est compris entre 0,0015% et 0,0045% et sur des bancs d'essais chez les fabricants, le taux de primage reste inférieur à 0,002%.

Compte tenu de ces différentes valeurs, EDF retient un taux de primage moyen de l'ordre de 0,003%, valeur garantie par leur fournisseur. Les experts soulignent cependant que ces valeurs sont obtenues avec du matériel neuf sans tenir compte de l'évolution de ses performances en fonction de son vieillissement et de son encrassement.

Par ailleurs, les constructeurs, d'après leur retour d'expérience, assignent généralement une marge de sécurité de 5 (Audition Baltimore). Dans ce cas, la valeur raisonnablement conservatrice à retenir pour réaliser les modélisations serait de l'ordre de 0,015 %. Cette valeur est donc très proche de celle des TAR ICPE (0,01 %). Toutefois, les experts n'ont pas pu confirmer avec le fournisseur garantissant les dévésiculeurs d'EDF si cette marge de sécurité était ou non inclus dans la valeur de 0,003%. HAMON ne s'est pas présenté à l'audition malgré son accord préalable. Néanmoins, les experts ont considéré que dans le contexte de comparaison entre la dispersion du panache d'une TAR CNPE et une TAR ICPE, cette valeur paramétrique est recevable.

Choix du taux de Primage TAR ICPE

Dans la première série de calculs, EDF avait retenu un taux de primage de 0,1% pour les TAR ICPE, soit un ordre de grandeur supérieur à celui qui est reconnu comme normal, 0,01%, pour ce type d'installation. Le guide de bonne pratique de gestion de TAR ICPE retient en effet ce pourcentage comme le taux de primage correct, intégrant une marge de sécurité de 5.

Ainsi, suite aux remarques des experts, dans la seconde série de calculs, EDF retient le taux de primage de 0,01% pour les TAR ICPE tout en maintenant pour ses propres installations le taux de 0,003%. Ces dernières valeurs sont considérées par les experts comme recevables.

Survie des *Legionella* aérosolisées

L'hypothèse retenue par EDF d'une perte de cultivabilité en 15 à 30 minutes, est présentée comme une hypothèse maximaliste. Or, comme discuté en chapitre 3 (figures 1 à 4), des méthodes de détection non basées sur la mise en culture montrent que les *L. pneumophila* dans les aérosols peuvent conserver leur viabilité (bactéries viables non cultivables) au delà de quelques heures (> à 70 heures – audition CSTB). Aussi, compte tenu de ce temps de survie de *Legionella* dans un aérosol, l'hypothèse retenue par EDF ne peut pas être considérée maximaliste.

Le temps de survie est un résultat clé à intégrer dans l'interprétation des résultats de modélisation. Il permet de répondre à la question concernant la distance que les *Legionella spp* et *L. pneumophila* aérosolisées des TAR CNPE peuvent parcourir en quelques heures.

Il est à noter que sur le volet de la caractérisation des aérosols générés par les TAR-CNPE, EDF a initié depuis 2004 des travaux en collaboration avec le CSTB. Cependant, les documents fournis par EDF ne présentent aucune donnée quantitative de *Legionella spp* ou *L. pneumophila* dans les panaches. Pourtant, ces données permettraient de compléter les résultats issus des modèles de dispersion, avec la concentration en *Legionella spp* ou *L. pneumophila* dans l'air au point d'émission et le taux de transfert entre l'eau du bassin froid et l'aérosol.

Par ailleurs, en l'absence de données précises et selon le principe de précaution, la coaérosolisation correspondant au transport atmosphérique d'amibes infectées avec des légionelles aurait dû être considérée dans l'analyse de risque *Legionella* qu'EDF a présentée.

5.1.1.3. Présentation et discussion de l'interprétation des résultats de modélisation

5.1.1.3.1. Argumentation présentée par EDF.

Comparaison TAR ICPE et TAR CNPE avec Multipol-Screen3

« Les éléments de démonstration issus de l'analyse présentée ci-dessus - à savoir, un niveau de risque inférieur d'un facteur 100 (10 pour le cas particulier de Chinon) pour nos grandes tours par rapport aux petites tours - nous conduisent à considérer que l'application d'un seuil d'arrêt en deçà de 10^7 UFC/l (respectivement 10^6 UFC/l pour Chinon), ne paraît pas justifié sur le plan sanitaire pour les grandes tours aéroréfrigérantes équipant les CNPE ». (Document EDF : Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement de centres nucléaires de production d'électricité. Avril 2005. Pages 15).

Comparaison TAR ICPE / TAR CNPE avec ADMS3

« Les ratios ne comparent pas les concentrations en un point précis mais plutôt les maxima obtenus »... (Page 11).

« Il ressort de cette comparaison qu'une tour de faible hauteur (6,3 m) assurant une moins bonne dispersion occasionne des concentrations dans l'environnement plus élevées mais sur un domaine plus restreint. Le pic de concentration est situé au plus près des tours de faible hauteur et chute rapidement dans un rayon d'environ 2 km. Par contre, pour les grandes tours, le pic de concentration relativement peu marqué est situé à environ 3 km (Page 14) ».

« L'impact constaté dans l'environnement est, à concentration égale en légionelles de l'eau de circulation, de 200 à 2000 fois moindre dans le cas de tours aéroréfrigérantes de CNPE (page 15) ».

(Document EDF référence : ELIER/05 00414 A BPE. Page 11 -15).

5.1.1.3.2. Commentaires des experts

Comparaison TAR ICPE et TAR CNPE avec Multipol-Screen3

EDF base l'interprétation des données de modélisation uniquement sur la comparaison de la concentration maximale de *Legionella* calculée à 100 m d'une source (trop proche de la source) et avec un taux de primage 10 fois trop fort (0,1%) pour les TAR ICPE. Il convient de souligner que :

- compte tenu des variations spatiales très importantes de courbes ICPE et CNPE, il est arbitraire de comparer à une distance donnée ;
- ces différences seraient réduites de manière importante (un log) si le taux de primage pour les TAR ICPE de 0,01 % avait été retenu ;
- C'est l'intégrale sous une distance correspondante à la portée maximale des panaches qui permettrait de comparer l'impact global d'une TAR ICPE à une TAR CNPE. Par exemple, à 10 km, on constate qu'une TAR de Chinon dépasse d'un log (2 log si l'on corrige le taux de primage) la concentration théorique en *Legionella* d'une TAR ICPE.

Comparaison TAR ICPE et TAR CNPE avec ADMS3

EDF retient comme indicateur synthétique de la comparaison TAR ICPE/TAR CNPE le ratio entre les concentrations maximales horaires correspondant aux percentiles 99,4 de *Legionella* au sol. Pour une concentration initiale dans l'eau de la TAR de 10^5 UFC/l, le choix du percentile 99,4 peut être admis parce qu'il est significatif d'une concentration maximale de *Legionella* engendrée dans l'environnement (valeur dépassée 52 heures par an) et que cette concentration maximale est représentative d'un niveau d'exposition aiguë auquel peut correspondre un risque *Legionella*.

Par contre, retenir le ratio de ces deux indicateurs comme facteur multiplicatif du seuil de gestion des TAR ICPE pour obtenir un seuil de gestion des TAR CNPE apparaît discutable.

Les courbes présentées par EDF montrent que :

- la concentration maximale en *Legionella* issue d'une TAR ICPE est rencontrée à proximité immédiate de la source. La courbe décroît rapidement dans le champ proche de la source à une distance comprise entre 20 et 200 mètres, soit dans la plupart des cas dans les limites du site ;

- la concentration maximale en *Legionella* issue d'une TAR CNPE est rencontrée dans une zone située à environ 600 m pour une TAR de Chinon et à 2-3 km de la source pour une TAR CNPE autre que Chinon. Une valeur proche du maximum est simulée jusqu'à une distance de 10 km ;
- dans le cas d'une TAR ICPE, la concentration en *Legionella* décroît très rapidement, au-delà de 200 m (limites de l'installation) elle atteint le même ordre de grandeur que celui de la TAR CNPE pour devenir très rapidement inférieure à la concentration en *Legionella* d'une CNPE, avec près de 2 log d'écart à 10 km.

Aussi, comme c'est la concentration dans l'environnement (hors installation) qui est déterminante d'une exposition de la population, il semble évident que rapporter le niveau ICPE constaté dans le champ très proche de la source, au maximum du niveau CNPE constaté dans l'environnement biaise le raisonnement qui s'ensuit sur le niveau de risque engendré pour la population environnante. Il est important de rappeler par ailleurs que dans le cas d'une TAR ICPE, le seuil de 10^5 UFC/l déclenche l'arrêt de la TAR, alors que dans l'exposé des représentants d'EDF il n'apparaît pas clairement qu'il en serait de même pour le seuil obtenu par leur approche comparative.

5.1.1.4. Discussion et conclusion.

Les résultats obtenus par EDF présentent d'importantes incertitudes et limites liées aux outils de modélisation et à l'état de l'art en la matière. Par exemple, les résultats obtenus avec l'outil ADMS3 pour les TAR ICPE ne permettent pas d'expliquer les cas groupés survenus à Lens. Dans ce contexte, il aurait été particulièrement intéressant de comparer quantitativement les résultats obtenus par Screen3 et ADMS3.

Ainsi, une comparaison a été réalisée par les experts avec quelques données issues de simulations d'EDF. Les données retenues sont :

- pour les simulations Multipol-Screen3, les valeurs relatives aux TAR de Chinon et à une TAR ICPE au sol ;
- pour les simulations ADMS3, les valeurs relatives à une TAR ICPE et à une TAR CNPE de Cattenom.

La figure 7 prend en compte la concentration en *Legionella* de 10^5 UFC/l pour les ICPE et pour les CNPE. Le taux de primage pour les TAR ICPE a été corrigé à 0,01% en remplacement du taux assigné par EDF (0,1%). Rappelons ici que l'arrêté du 13 décembre demande un taux de primage de 0,01% pour les TAR ICPE.

Ces courbes permettent de constater que :

- quel que soit le modèle utilisé, la concentration en *Legionella* dans les panaches de TAR CNPE est au dessus de celle du panache TAR ICPE à partir 3000 m;
- les résultats obtenus dans la zone comprise entre 200 et 2000 m sont difficilement interprétables puisque les deux modèles donnent des comportements du panache très différents.

La figure 8 prend en compte une concentration en *Legionella* de 5.10^6 UFC/l pour la TAR CNPE de Cattenom, 5.10^5 UFC/l pour la TAR de Chinon (seuil d'intervention actuel) et de 10^5 UFC/l pour une TAR ICPE (seuil d'arrêt de l'installation). Les courbes ainsi obtenues permettent de conclure qu'à l'exception du champ très proche (moins de 200 mètres de la TAR), les concentrations en *Legionella* au sol issues des panaches des TAR CNPE sont, au moins d'un ordre de grandeur supérieures aux concentrations calculées pour des TAR ICPE. En outre, il faut bien noter que si on appliquait au calcul le seuil d'intervention des TAR ICPE ($> 10^3$) la différence serait encore plus marquée, soit 2 log en dessous pour les TAR ICPE.

En conclusion, ces résultats permettent de démontrer qu'il n'existe pas une différence d'un facteur de 80 à 200 (voire plus) en faveur des TAR CNPE. Bien au contraire, la considération des valeurs plus réalistes pour les taux de primage et les concentrations en *Legionella* dans les TAR montre l'effet inverse : au delà d'environ 3000 m les concentrations en *Legionella* des TAR CNPE sont au moins d'un ordre de grandeur supérieures à celles issues des TAR ICPE. Cet effet inverse est observé indépendamment du système de modélisation considéré.

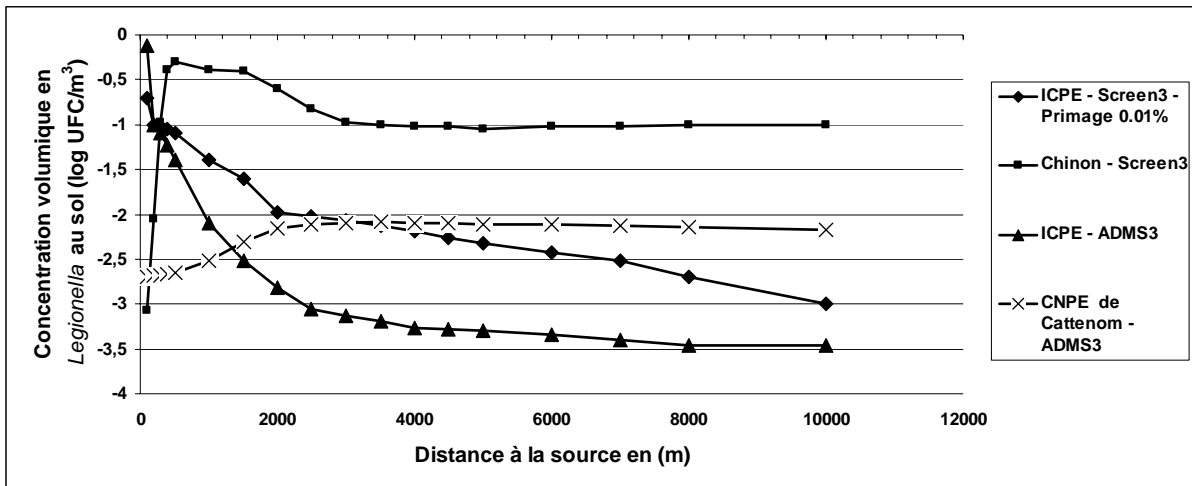


Figure 7 : Modélisations de la concentration de Legionella au sol, tracées à partir des données d'EDF pour une concentration de 10^5 UFC/l.

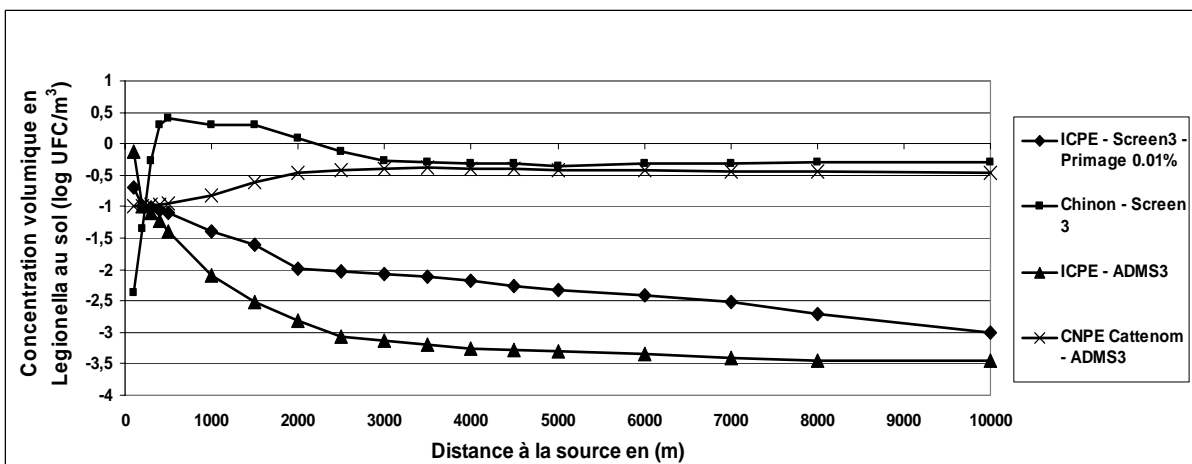


Figure 8 : Comparaison des modélisations d'EDF à la concentration de Legionella correspondant au seuil d'arrêt pour les TAR ICPE (10^5 UFC/l) et au seuil d'intervention pour les TAR CNPE (5.10^6 UFC/l pour Cattenom et 5.10^5 UFC/l pour Chinon)

5.1.2. Présentation et discussion de l'approche d'estimation de l'exposition des individus aux panaches

5.1.2.1. L'approche d'EDF

Evaluation quantitative des risques.

« Cette partie du travail consiste, à partir de données de concentrations maximales horaires, à calculer un nombre de malades potentiels par jour en prenant en compte le facteur densité de population »

« Cette méthode détaille, à partir d'une concentration dans l'air, le nombre de Legionella inhalées en fonction de l'activité respiratoire. Puis on établit une relation dose-réponse en fonction des données animales connues, transposées à l'homme à partir de données épidémiologiques » « Ce travail a été réalisé à partir de la Thèse de D. Ambroise (2003) ». (Document EDF : Evaluation du risque lié à la présence de légionelles dans les aéroréfrigérants des centrales. Rédacteur : Wallet F- 9 juin 2004. Page 6)

Exposition du personnel aux panaches

« L'incidence faible de la maladie des légionnaires ne permet pas de réaliser des études prospectives. Parmi les études conduites par le groupe EDF, deux approches ont été privilégiées :

D'une part la connaissance d'éventuels cas de légionellose au sein du personnel EDF. Pour cela une étude rétrospective sur deux années, 1996 et 1997, a été conduite à partir des données de la médecine de contrôle. Tous les arrêts pour « pneumonie, pneumopathie » ou « autre maladie bactérienne », les deux seules rubriques diagnostiques sous lesquelles pourrait figurer une légionellose, ont été recensées. Après un retour au dossier médical de ces personnes, aucun cas de légionellose n'a pu être identifié. Depuis cette date, trois cas ont été observés, tous reliés à des installations d'eau chaude sanitaire.

D'autre part, une enquête de séroprévalence. Cette enquête repose sur l'utilisation d'un marqueur d'exposition : le « taux d'anticorps anti-Legionella ». Une approche comparative a été adoptée, d'une part entre différents niveaux d'exposition, et d'autre part, par rapport à la séroprévalence de la population générale. L'idée est de comparer les taux d'anticorps anti-legionella entre les personnes travaillant sur des sites de production d'électricité ne différant que par la présence ou l'absence d'aéroréfrigérants de grande taille ».

« Les concentrations de Legionella dans l'air issues de ces modèles, obtenues au niveau du sol et à l'échelle de l'heure, de la journée et de l'année, alimentent, une fois croisées avec les données des roses des populations et des roses des vents, l'étude de probabilité de maladie (relation dose-réponse) ».

(Document EDF : Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement de CNPE. Avril 2005. Page 11 à 13).

5.1.2.2. Commentaires des expertsEvaluation quantitative des risques

De manière synthétique, ces arguments ne sont pas recevables en raison des faits suivants :

- les connaissances scientifiques montrent que les doses infectantes chez l'animal ne sont pas transposables à l'homme ;
- le travail de thèse cité en référence discute, en effet, des hypothèses d'exposition à l'eau chaude contaminée de douches et des TAR de faible hauteur. Néanmoins, le faible nombre de données disponibles fait que de fortes incertitudes y sont associées. Les résultats de cette thèse ne permettent pas de conclure à une dose infectante. Notons par ailleurs que ces travaux n'ont pas fait encore l'objet de publication.

Exposition professionnelle

Les apports de ces travaux, réalisés par le Service de santé au travail d'EDF/GDF, sont considérables vis-à-vis des risques liés à l'exposition professionnelle aux Legionella dans les CNPE. Un lien semble trouvé entre l'exposition ressentie aux panaches et le taux d'anticorps anti-légionelles, ce qui n'est pourtant pas mis en valeur dans ces travaux.

Etude rétrospective

Cette étude rétrospective sur 2 ans devrait s'avérer réconfortante pour les personnels craignant pour leur santé vis-à-vis du risque d'exposition professionnelle aux Legionella dans les CNPE. Toutefois les critères de validation des cas ne sont pas présentés clairement, le dénominateur n'est pas précisé et les calculs de cas attendus (compte tenu du nombre d'agents potentiellement exposés et prenant en compte leurs facteurs de risque spécifiques) ne sont pas présentés.

Ces travaux pourraient toutefois être avantageusement complétés par des calculs de cas attendus compte tenu du nombre d'agents potentiellement exposés et prenant en compte leurs facteurs de risques spécifiques. La discussion des résultats devrait aussi prendre en compte le phénomène épidémiologique appelé « Healthy worker effect » faisant en sorte que l'état de santé des actifs est, en moyenne, généralement meilleur que celui de la population générale. Il faut donc noter que les résultats observés au sein de populations de travailleurs (actifs) sont difficilement transposables à la population générale qui diffère également par d'autres facteurs (âge, sexe ratio, facteurs de risque, exposition professionnelle, ...).

Etude de séro-prévalence

Bien qu'intéressante, cette approche présente plusieurs limites. Certains patients authentiquement atteints de légionellose peuvent ne jamais présenter d'élévation des anticorps spécifiques (séroconversion, cette élévation apparaît en général 3 à 4 semaines après le contact mais peut aussi apparaître après 10 semaines). En outre, pour un titre élevé unique la sensibilité est faible (10%).

Les séro-prévalences devraient être recalculées pour les populations dites « exposées » puisque celles présentées dans le rapport prennent en compte l'ensemble des participants « exposés et non exposés ». La méthodologie et les résultats de cette enquête sont généralement bien détaillés. Toutefois, un peu plus de détails et de résultats découlant des facteurs pathologiques « épisodes de fièvres », « épisodes de bronchites » et « épisodes de pneumopathies » ne seraient pas superflus.

L'enquête de séro-prévalence montre toutefois des liens significatifs entre le fait de se dire exposé d'une manière générale aux panaches et une sérologie spécifique aux anticorps dirigés contre *L. pneumophila*.

Finalement, des mesures de séro-prévalence seraient intéressantes à réaliser auprès de populations riveraines (tirées au sort) bien que cette mesure ne demeure qu'un marqueur d'infection avérée et non d'exposition dont l'interprétation reste difficile. Par contre, une telle étude réalisée en population générale, ne devrait pas inclure de sujets professionnellement susceptibles d'être exposés aux *Legionella*.

En conclusion, les deux enquêtes présentées ne permettent pas d'apprécier l'impact de panaches d'aéroréfrigérants de CNPE sur la population habitant autour de CNPE.

5.1.3. Conclusion sur les arguments de démonstration d'EDF

Il est à souligner que si la comparaison des modélisations portait effectivement sur la dispersion du panache d'une TAR CNPE par rapport à une TAR ICPE, il n'est pas de même pour les seuils de mise en place des traitements de désinfection. En effet, EDF a déduit un seuil d'intervention (désinfection) pour les TAR CNPE, à partir de l'application d'un facteur de dispersion théorique calculé d'après leurs modélisations au seuil d'arrêt des TAR ICPE (10^5 UFC/l en *Legionella spp*) au lieu d'utiliser le seuil d'intervention appliqué aux TAR ICPE ($> 10^3$ UFC/l en *Legionella spp*).

A l'issue de l'expertise collective des documents transmis par EDF, il ressort que les éléments de démonstration d'EDF sont irrecevables, notamment en raison :

- de leur interprétation partielle et orientée des résultats de modélisations utilisées pour décrire la dispersion des panaches ;
- des résultats de calculs ne permettant pas de démontrer sans ambiguïté que les concentrations au sol en *Legionella* provenant d'un panache de TAR CNPE soient inférieures à celles provenant d'une TAR ICPE ;
- des données d'exposition professionnelle non transposables à la population générale, et non informatives du risque d'exposition potentiel des populations riveraines des TAR CNPE .

5.2. Présentation et discussion des plans de surveillance mis en place par EDF

Les plans de surveillance mis en place par EDF dans les TAR CNPE s'appuient sur des données issues :

- du contrôle recommandé pour les TAR INB par la DGSNR. Le contrôle des niveaux de *Legionella* est réalisé sur des échantillons provenant d'un point de prélèvement unique dans le bassin froid, à l'aide de la méthode normalisée de dénombrement de *Legionella* par culture sur milieu gélosé (NF T90-431) et à la fréquence recommandée par la DGSNR. Dans les documents mis à la disposition des experts, les concentrations en *Legionella* ont été exprimées, selon les années, soit en *Legionella spp* par litre (2002 et 2004) soit en *Legionella pneumophila* par litre (année 2001 – 2003) ;
- de l'autocontrôle mis en place par EDF. Il s'agit notamment de données collectées sur plusieurs paramètres physico-chimiques qui jouent un rôle dans la formation de tartre et des données de *Legionella* aux points amont et aval de l'installation. Cette démarche a débuté en juin 2004 ;

- des travaux de recherche. Des données ont été collectées sur certaines installations dans le bassin d'eau chaude et sur des installations pilotes.

Les commentaires issus de l'examen de l'ensemble de ces documents traitent principalement de la cohérence des plans d'auto-surveillance d'EDF par rapport aux données acquises.

5.2.1. Points de prélèvements

5.2.1.1. Argumentation d'EDF

«... le débit de circulation de l'eau au niveau du bassin froid assure un état de turbulence permanente, une bonne homogénéisation de la masse d'eau en tout point du bassin ... »

« Depuis 2004, EDF a de nouveau renforcé sa campagne de suivi des légionelles afin d'avoir une meilleure visibilité et compréhension d'évolution des colonisations de légionelles dans les circuits de refroidissement. Ce renforcement s'est traduit par :

- *une extension de la période de suivi sur toute l'année (uniquement en été auparavant).*
- *une augmentation des points de prélèvements, avec notamment des mesures réalisées dans les fleuves en amont et en aval des sites.*
- *l'adjonction de mesures de paramètres physico-chimiques dans l'optique d'étudier à terme des liens éventuels entre les concentrations en Legionella et la qualité de l'eau brute ».*

Les bilans montrent que :

- *les légionelles sont présentes en quantité non négligeable en amont des centrales (fleuve),*
- *les valeurs les plus basses (<10³ UFC/l) sont observées principalement sur les sites équipés de condenseur en acier inoxydable et utilisant, de ce fait, des traitements biocides contre le risque amibes,*
- *il existe des variations saisonnières dans les concentrations relevées dans les circuits ; les concentrations les plus élevées apparaissant en juillet et en août sur certains sites, et sur d'autres au printemps et en début d'automne,*
- *les concentrations observées sont majoritairement comprises entre 10³ et 10⁵ UFC/l (60 à 80 % des analyses en fonction des sites),*
- *les valeurs les plus élevées, entre 10³ et 10⁶ UFC/l, sont observées sur les sites « sensibles ».*

Toutes les valeurs de légionelles mentionnées dans ce document sont exprimées en UFC/l légionelles totales (Legionella spp.). Néanmoins, il est important de noter que dans la majorité des cas (plus de 90%) cette valeur correspondait à l'espèce L. pneumophila. »

(Document EDF : Stratégie d'échantillonnage. Résultats et Interprétation, mai 2005).

5.2.1.2. Commentaires des experts

Si effectivement des moyens certains ont été déployés pour essayer de caractériser le risque de prolifération des *Legionella* dans le circuit tertiaire de leurs installations CNPE, il demeure d'importantes incertitudes, en particulier liées aux phénomènes de contamination aiguë.

Représentativité spatiale du point d'échantillonnage

L'affirmation d'EDF quant à la représentativité de l'unique point d'échantillonnage pour l'ensemble du bassin froid est basée sur des arguments tendant à montrer que le bassin froid présente une hydraulique de type turbulent ; cependant cette affirmation n'est supportée par aucune donnée chiffrée. Ceci est d'autant plus délicat qu'en tenant compte de la géométrie de l'ouvrage et du volume du bassin, il est plus vraisemblable d'avoir une hydraulique variable, avec probablement des zones de stagnation, des zones de dépôts et remise en suspension et une distribution de la contamination de *Legionella* différente selon ces zones.

Représentativité temporelle de l'échantillonnage

Les documents d'EDF montrent :

- quelques résultats de dénombrement de *Legionella* (environ 10 prélèvements) dans le bassin froid à des concentrations très proches de celles mesurées dans le bassin chaud ;

- quelques données collectées sur une même journée (matin et après midi) ne montrant pas de différence de concentration en légionelles.

L'absence de monitoring en continu ou à des intervalles de temps plus ou moins rapprochés sur un seul point d'échantillonnage ne permet pas d'exclure l'existence de phénomènes de contamination aiguë. Des phénomènes tels que l'augmentation des apports de MO, des précipitations, une augmentation des températures, des proliférations algales, ... peuvent en être la cause.

De plus, il est connu que des événements ponctuels tel que l'arrachage de biofilm dans l'installation peuvent conduire à des niveaux transitoires de contamination plus élevés.

Or, la caractérisation des phénomènes de contamination aiguë constitue un point essentiel en raison de la possibilité d'exposition des populations : (1) par le panache pour les riverains des CNPE et (2) par les eaux en aval de CNPE destinées à l'usage récréatif ou d'irrigation, en considérant que plus de 90 % des *Legionella* isolées dans les CNPE appartiennent à l'espèce *pneumophila*.

Evolution de la contamination en amont, dans le circuit et en aval de l'installation

Bien que les données collectées par EDF lors des études sur pilote montrent que des *Legionella spp* et des amibes *Naegleria* sont présentes dans tous les dépôts des compartiments et ce quel que soit le matériau testé, la faiblesse du plan de monitoring des installations d'EDF ne permet pas d'exclure avec certitude que le seul lieu de prolifération de *Legionella spp* le long du circuit soit le condenseur. Compte tenu du fait qu'il est accepté que le condenseur des installations constitue un site favorable à la prolifération des *Legionella spp*, un suivi sur un point amont et aval du condenseur est un élément clé pour mener une bonne gestion du risque, et les problèmes d'accessibilité ne constituent pas un argument recevable.

5.2.2. Paramètres d'auto-surveillance

Dans le cadre de l'auto-surveillance, EDF a mis en place un suivi de plusieurs paramètres, autres que *Legionella spp*, et notamment des paramètres physico-chimiques en amont de l'installation tels que la mesure du degré d'entartrage. Sur une seule CNPE ces mesures sont effectuées en continu (TAC, TA, THCa). Pour les autres installations et pour tous les autres paramètres la fréquence varie entre 1 fois par jour à une mesure mensuelle et ceci selon l'état d'entartrage de l'installation (pH, chlorures, sodium, MES, conductivité, potassium, température). Le paramètre MES est suivi entre 3 fois par semaine et 1 fois par mois. Ce paramètre n'est absolument pas un indicateur de la charge organique de l'eau.

Force est de constater que le nombre et la fréquence des paramètres de suivi de la qualité de l'eau dans un contexte de sécurité sanitaire liée aux *Legionella spp* sont insuffisants. Aucune raison valable ne peut justifier l'absence de suivi en continu, au minimum, de la température, du pH, de la conductivité.

De plus, d'autres paramètres, plus pertinents d'un point de vue de la colonisation bactérienne, auraient pu être inclus dans ces suivis tel que la flore totale de l'eau en amont et au bassin froid ainsi que du réservoir naturel de *Legionella spp*, à savoir, les amibes pathogènes ou non et la matière organique. En effet des résultats présentés par EDF montrent qu'il n'y a pas de correspondance entre les sites classés « à fort potentiel d'entartrage » et les valeurs moyennes annuelles de concentrations en *Legionella spp*.

Notons par ailleurs que la température du fleuve (ou le Δ température) est un paramètre qui devrait être suivi avec attention dans la mesure où pendant la canicule en 2003, EDF a observé dans l'ensemble de ses CNPE une augmentation notable de la concentration des *Legionella* dans l'eau en amont, dans le bassin froid et dans l'eau du rejet. Sur certaines CNPE, ces concentrations ont atteint 10^4 UFC/l en amont et 10^5 UFC/l en aval. En outre, ceci montre que dans certaines circonstances, il existe un impact non négligeable sur la qualité microbiologique des eaux qui sont ensuite utilisées pour la baignade ou l'irrigation.

5.2.3. Seuils d'action en cas de dépassement suspecté ou avéré de seuils recommandés

EDF a sélectionné des critères lui permettant de gérer les situations où un éventuel dépassement est suspecté.

Il s'agit d'un plan d'action en trois temps :

- 1- seuil déclenchant la préparation de la mise en place d'un suivi journalier et d'un éventuel traitement de désinfection ;
- 2- seuil déclenchant un suivi journalier ;
- 3- seuil déclenchant une demande d'autorisation ou de désinfection.

Ces seuils sont présentés dans le tableau 12 ci-après.

Tableau 12 : Seuils établis par EDF pour gérer le risque *Legionella* dans ses installations CNPE.

TAR CNPE	Seuils d'action (UFC <i>Legionella</i> /litre selon méthode NF T90 - 431)			
	Se préparer à un suivi journalier et à la mise en place d'un traitement	Effectuer un suivi journalier	Proposer ou non une désinfection	mise en place de la désinfection et/ou de la demande d'autorisation
Chinon	$>10^4 - <10^5$	$5.10^5 - >5.10^5$	$>5.10^5$	si 3 mesures consécutives $> 5.10^5$ si une mesure à 5.10^5
Autres	$10^6 - 3.10^6$	$3.10^6 - <5.10^6$	$\geq 5.10^6$	si confirmation du résultat ($\geq 5.10^6$)

Seuils d'intervention recommandés par la DGSNR : 5.10^5 UFC/l en *Legionella spp* pour Chinon et 5.10^6 UFC/l en *Legionella spp* pour les autres CNPE.

Dans le cas de Chinon, il est à noter qu'il existe une incohérence dans les critères déclenchant la mise en place de la désinfection et/ou la demande d'autorisation.

Globalement, les seuils d'action retenus par EDF, trop proches des valeurs seuils à ne pas dépasser, ne lui permettent pas de maîtriser la contamination avant qu'elle atteigne le seuil recommandé, trois raisons peuvent être évoquées :

- une différence de concentration en *Legionella spp* inférieure à un log entre deux échantillons (entre 10^5 et 5.10^5 UFC/l en *Legionella* ; entre 3.10^6 et 5.10^6 et $< 5.10^6$ UFC/l en *Legionella*) n'est pas significative. En effet l'incertitude de la méthode de dénombrement de *Legionella spp* par culture sur milieu gélosé est de l'ordre d'un log ;
- l'augmentation de la fréquence du contrôle journalier est trop tardive. En effet EDF déclenche un suivi journalier uniquement lorsque la concentration en *Legionella* n'est qu'à 0,5 log du seuil à ne pas dépasser et ne tient pas compte des 10 jours qui s'écoulent entre le prélèvement et le résultat (ou mieux 5 jours tel qu'étudié actuellement par l'AFNOR) ;
- la mise en place des traitements de désinfection est extrêmement tardive puisque celle-ci n'est déployée que 10 jours après avoir dépassé le seuil recommandé, voir plus s'il est besoin d'une autorisation de rejets. En d'autres termes, pendant 10 jours l'eau du bassin présente une contamination en légionelles, dans le meilleur des cas, inférieure aux seuils d'action et, dans le pire, égale voire supérieure à 5.10^5 pour Chinon et à 5.10^6 UFC/l pour les autres CNPE.

Contamination des TAR CNPE

S'il est vrai que de l'ensemble des résultats issus de la surveillance du bassin froid des installations, il ressort que 60 à 80% des sites présentent des concentrations comprises entre 10^3 et 10^5 UFC/l, il existe néanmoins 20 à 40% des sites qui dépassent ces concentrations.

Les valeurs maximales observées pour au moins trois d'entre elles (hors Chinon) atteignent des concentrations en légionelles $>10^6$ UFC/l, très proches du seuil d'action recommandé pour les TAR CNPE. Pour Chinon, les données collectées lors des dépassements montrent que la concentration en *Legionella spp* peut atteindre $1,4.10^6$ UFC/l.

Ces observations associées au fait que 90 % des *Legionella* détectées appartiennent au genre *pneumophila* sont des arguments forts en faveur de la nécessité et de l'urgence avec laquelle EDF devrait réexaminer ses plans d'évaluation du risque *Legionella* afin de mettre en place des actions plus pertinentes de réduction de la contamination permettant de garantir la maîtrise et la réduction progressive des phénomènes de contamination aiguë des *Legionella* dans ses installations.

5.2.4. Conclusion

En conclusion, EDF n'a pas présenté une démarche d'autocontrôle des points critiques de ses installations. En effet, EDF base ses actions de désinfection uniquement sur le contrôle recommandé pour ses installations INB, à savoir une détection de *Legionella spp* par la méthode de culture, soit 10 jours après avoir dépassé le seuil. Une démarche d'autocontrôle basée sur des résultats quantitatifs obtenus par des méthodes rapides permettrait de palier à la gestion *a posteriori* du dépassement des seuils de *Legionella* recommandés. Des méthodes d'analyse arborescente des risques, telles que les approches HACCP et HAZOP permettant de caractériser le risque, d'identifier les points critiques et d'anticiper les actions à mettre en place dans les meilleurs délais et ceci avant d'atteindre le dépassement des seuils réglementaires, auraient pu être utilisées. En conclusion, les experts considèrent que la mise en place d'une démarche d'analyse et réduction de risque de prolifération et dissémination des *Legionella* pour les CNPE d'EDF plus cohérente est impérative.

5.3. Projets de recherche d'EDF en cours de réalisation

EDF a mis en œuvre des projets d'étude et de recherche pouvant apporter des éléments complémentaires à la réduction du risque de prolifération et de dispersion de *Legionella*. Il s'agit des projets suivants :

- développement d'une technique de détection spécifique et rapide des *L. pneumophila* par cytométrie en phase solide. Cette méthode sera ensuite adaptée à la détection en eau brute grâce à un procédé de pré-concentration par capture magnétique, et à des marqueurs de viabilité pour dénombrer la flore viable ;
- veille technologique sur les méthodes de biologie moléculaire permettant la détection de *Legionella* viable en eau brute ;
- mise au point d'une chambre expérimentale d'aérosolisation spécifiquement destinée aux *Legionella* et l'étude de la survie des *Legionella* aérosolisées de différentes souches de *Legionella* en fonction de l'humidité relative de l'air et des rayonnements solaires. Ce projet est réalisé en partenariat avec la société Climespace et le CSTB ;
- une campagne de mesures de *Legionella* dans l'air autour du CNPE de Chinon. Ceci permettra d'étudier la dispersion potentielle des aérosols de *Legionella* autour des installations en fonction de paramètres tels que le vent, la température, l'humidité et l'ensoleillement, tout en prenant compte la variabilité au sein et entre les TAR. Ce projet est réalisé en partenariat avec le CSTB ;
- création d'une cartographie des populations de *Legionella* présentes au sein des CNPE à partir du suivi du génotype. Ce projet est réalisé en partenariat avec le centre national de référence des légionelles ;
- la recherche de traitements innovants (peinture anti-biofouling) et la réalisation de tests de traitements classiques sur pilotes ;
- des études sur le comportement des *Legionella* dans les circuits de refroidissement.

Le groupe d'experts considère que globalement ces études pourraient contribuer à la levée de plusieurs incertitudes. Toutefois, en l'absence de documents présentant les protocoles d'étude, ils ne peuvent se prononcer sur la pertinence de ceux-ci.

6. Conclusions

De nos jours la dose infectante de *Legionella* capable de provoquer la légionellose chez l'homme est inconnue. Par conséquent, l'évaluation quantitative du risque lié à la présence de *Legionella* dans les TAR CNPE n'est pas possible. Ainsi, EDF a mise en place une démarche de démonstration basée sur la comparaison du risque relatif engendré par une TAR ICPE et une TAR CNPE et consolide sa démonstration à l'aide des études d'exposition professionnelle et des données issues des plans de surveillance.

De l'expertise collective des résultats de modélisation présentés par EDF, il ressort qu'il existe en effet, une différence entre la dispersion du panache d'une tour de faible hauteur (3,2 m et 6,3 m) et une tour de grande hauteur (environ 165 m). Cependant, ces résultats ne permettent pas de démontrer que le niveau de risque lié aux légionelles engendré par les TAR CNPE soit inférieur à celui d'une TAR ICPE, comme le concluait EDF. Il faut en effet prendre en compte les incertitudes liées d'une part aux modèles utilisés pour décrire la dispersion et la retombée au sol de *Legionella* provenant d'un panache, et d'autre part aux valeurs paramétriques utilisées et surtout le fait qu'au-delà de 3 km du point source, l'abondance de *Legionella* d'une TAR CNPE devient supérieure à celle d'une TAR ICPE. A cette même distance, la différence atteint deux puissances de 10 lorsque la comparaison est réalisée en considérant les seuils d'intervention de 5.10^6 pour les TAR CNPE et 10^3 pour les TAR ICPE. Or les récentes épidémies de Lens et de Sarpsborg en Norvège montrent que des épidémies de type cas groupés peuvent avoir lieu à partir d'une source de contamination située à plus de 10 km.

En dépit des dépassements de seuils constatés sur certains sites CNPE, aucun cas groupé n'a été décrit dans la littérature. Les cas sporadiques sans source identifiée de contamination représentent 50 % de cas de légionellose déclarés annuellement. L'absence d'information précise s'explique par le fait qu'à l'heure actuelle aucun outil d'évaluation n'a été mis en place spécifiquement pour étudier le lien potentiel entre des TAR de grandes dimensions et les cas sporadiques

Par ailleurs, les données collectées au sein de la population professionnelle d'EDF ne permettent pas d'évaluer le risque potentiel lié aux panaches des TAR CNPE sur les riverains, ces études n'étant pas transposables à la population générale.

Par conséquent, les résultats présentés par EDF ne permettent pas de justifier des seuils d'intervention pour les TAR CNPE 500 à 5000 fois plus élevés au seuil d'intervention des TAR ICPE.

Dans le cadre de la surveillance de ses installations, EDF a mis en place un plan de gestion basé sur des valeurs seuils en terme d'abondance de *Legionella*. La différence entre les seuils correspondant à différents types d'actions est inférieure à une puissance de 10. Or, une différence aussi faible d'abondance en *Legionella* (exemple : entre 10^5 et 5.10^5 UFC/l en *Legionella* ; entre 3.10^6 et 5.10^6 en *Legionella*) entre deux échantillons est non-significative, puisque l'incertitude de la méthode de dénombrement des *Legionella* par culture est de l'ordre d'une puissance de 10. Ainsi, les seuils choisis par EDF pour déclencher les différentes actions ne semblent pas pertinents.

En effet, EDF ne déclenche un suivi journalier que lorsque la concentration en *Legionella* atteint 0,5 log en dessous du seuil auquel un traitement doit être mis en place et ne tient pas compte du temps qui s'écoule entre le prélèvement et le résultat (10 jours). Ainsi, la mise en place des traitements de désinfection est extrêmement tardive puisque celle-ci n'est déployée que 10 jours après avoir dépassé le seuil recommandé, voire plus, en cas de besoin d'une autorisation de rejets. Or, c'est justement pendant ces périodes de dépassement que des contaminations aiguës peuvent avoir lieu.

En conclusion, EDF n'a pas présenté une démarche globale cohérente vis-à-vis du risque de prolifération et de diffusion des *Legionella*. EDF ne base ses actions de désinfection que sur le paramètre de contrôle recommandé pour les installations INB et ceci à des seuils d'intervention bien trop élevés.

Les experts concluent à :

- L'irrecevabilité de la démarche présentée par EDF pour la maîtrise du risque lié aux légionelles qui ne correspond pas, dans l'esprit, à une démonstration de sûreté pour une installation industrielle relevant des INB ;
- l'irrecevabilité des arguments actuels d'EDF pour justifier à terme des seuils d'intervention en *Legionella spp* pour les TAR CNPE plus élevés que les seuils d'intervention utilisés comme référence en France pour la gestion des TAR ICPE ;
- l'absence de pertinence des plans de surveillance des niveaux de *Legionella spp* mis en place par EDF dans les TAR de ses CNPE.

7. Mesures complémentaires et besoins de recherche

Les experts considèrent que les mesures complémentaires les plus urgentes à mettre en place à court terme sont :

- la caractérisation complète et approfondie du danger (flux entrants, distribution, résistance, concentrations, fluctuations d'abondances ...) dans l'eau des circuits de refroidissement des installations CNPE ;
- l'intégration des amibes libres aux plans de surveillance de *Legionella spp* ;
- l'identification des situations de contamination aiguë (périodicité, amplitude) ;
- la collecte de données d'abondance de *Legionella spp* dans l'air autour des TAR CNPE ;
- la mise en oeuvre d'un système intégré de processus, d'outils et d'équipement permettant de déceler rapidement la dégradation de la qualité microbiologique de l'eau et de tout autre phénomène favorisant la présence de *Legionella spp* dans l'eau de TAR CNPE ;
- l'identification des paramètres de détection précoce, indicateurs d'un changement de la qualité de l'eau, afin de mettre en place un système de surveillance permettant de garantir le non-dépassement de seuils de gestion et un retour au dessous de ces seuils dans les plus brefs délais en cas de dépassement .
- d'envisager des études épidémiologiques pour évaluer l'occurrence d'infection par *L. pneumophila* chez des populations riveraines potentiellement exposées aux retombées de panaches ou aux rejets d'eau de TAR CNPE

Des avancées significatives dans la réflexion et le débat autour de la question du risque *Legionella* seront probablement obtenues avec les résultats des travaux suivants :

- comparaison des isolats environnementaux de *Legionella* prélevés sur des TAR CNPE d'EDF aux principales souches cliniques (EDF-CNRL).
- la survie de la bactérie dans les aérosols et au cours de la dispersion des aérosols dans la phase air (EDF-CSTB)
- l'étude des cas sporadiques « Legiospo » et dont la publication des résultats est imminente (EDF-InVS).
- l'étude de la dose infectante chez l'homme;
- l'amélioration des modèles de transfert de la bactérie du milieu aqueux vers le milieu aérien.
- l'amélioration et la validation de la modélisation de la dispersion des panaches.
- l'étude de l'adaptation de la bactérie à l'écosystème particulier des CNPE et aux traitements biocides.

Enfin un deuxième rapport fera état des mesures complémentaires et de besoin de recherche concernant les traitements préventifs et curatifs.

8. Références

Textes Officiels

Arrêté du 13 décembre 2004 relatif aux installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air soumises à autorisation au titre de la rubrique n° 2921.

Décret n°63-1228 du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires.

Décret n°95-540 du 4 mai 1995 relatif aux rejets d'effluents liquides et gazeux et aux prélèvements d'eau des installations nucléaires de base.

Guide de formation à la gestion du risque de prolifération des légionelles dans les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air. (2005). Ministère de l'écologie et du développement durable. Disponible sur Internet : <http://www.ecologie.gouv.fr>.

Publications

Ambroise D. (2003). Influence de la variabilité de la mesure des bactéries de l'air sur l'évaluation du risque infectieux : exemple de la légionellose. Thèse de l'Ecole Doctoral Biologie, Santé, Environnement de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

Ascon-Cabrera MA., Thomas D., Lebeault JM. (1995). Activity of synchronised cells of a steady-state biofilm recirculated reactor during xenobiotic biodegradation. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 920–925.

Avril J., Dabernat H., Denis F. (2000). *Legionella*. In: Bactériologie clinique. 3^{ème} ed. Paris: Ellipses. 350-363.

Ballard AL., Fry NK., Chan L., Surman SB., Lee JV., Harrison TG., Tournier J. (2000). Detection of *Legionella pneumophila* using a real-Time PCR hybridization Assay. *J. Clin. Microbiol.* 38, 4215-4218.

Barbeau J., Gauthier C., Payment P. (1998). Biofilms, infectious agents, and dental unit waterlines: a review. *Can. J. Microbiol.* 44, 1019-1028.

Barbotte E., Chemardin J., Blech MF., Paquin JL., Lance P., Hartemann P. (2002). Deux ans et demi de surveillance environnementale de *Legionella* en Lorraine : premiers constats, premières résolutions, *Bull. Epidémiol. Hebd.* 37, 179-180.

Baron PA. et Willeke K. (1986). Respirable droplets from whirlpools: measurements of size distribution and estimation of disease potential. *Environ. Res.* 39 (1), 8-18.

Batté M., Mathieu L., Laurent P., Prévost M. (2003). Influence of phosphate and disinfection on the composition of biofilms produced from drinking water, as measured by fluorescence *in-situ* hybridization. *Can.J. Microbiol.* 49 (12), 741-753

Berendt RF., Young HW., Allen RG., Knutsen GL. (1980 a). Dose response of guinea pigs experimentally infected with aerosols of *Legionella pneumophila*. *J. Infect. Disease.* 141, 186.

Berendt RF. (1980 b). Survival of *Legionella pneumophila* in aerosols : effect of relative humidity, *J. Infect. Disease.* 141 (5), 689.

Berendt RF. (1981). Influence of blue-green algae (cyanobacteria) on survival of *Legionella pneumophila* in aerosols. *Infect. Immun.* 32 (2), 690-2.

- Bhopal RS., Fallon RJ., Buist EC., Black RJ., Urquhart JD., (1991). Proximity of home to a cooling tower and risk of non-outbreak legionnaires' diseases. *British Med. J.*, 302, 378-383.
- Bogosian et Bourneuf. (2001). A matter of bacterial life and death, *EMBO reports*, 21, 770-774.
- Bollin GE., Plouffe JF., Para MF. and Hackman B., (1985). Aerosol containing *Legionella pneumophila* generated by shower heads and hot-water faucets. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50, 1128-1131.
- Borella P., Montagna TM., Romano-Spica V., Stampi S., Stancanelli G., Triassi M., Neglia R., Marchesi I., Fantuzzi G., Tato D., Napoli C., Quaranta G., Laurenti P., Leoni E., de Luca G., Ossi C., Moro M., Ribera d'Alcala G. (2004). *Legionella* Infection Risk from Domestic Hot Water. *Emerg. Infect. Dis*, 10 (3), 457-464.
- Boulos L., Prévost M., Barbeau B., Coallier J., Desjardins R., (1999). LIVE/DEAD® BacLight™: application of a new rapid staining method for direct enumeration of viable and total bacteria in drinking water. *J. Microbiol. Meth.* 37, 77–86.
- Branda SS., Wilk S., Friedman L. (2005). Biofilms : the matrix revisited. *Trends Microbiol.* 13, 20-26.
- Breiman RF. et Horwitz MA. (1987). Guinea pigs sublethally infected with aerosolized *Legionella pneumophila* develop humoral and cell-mediated immune response and are protected against lethal aerosol challenge. *J. Exp. Med.* 164, 799-811.
- Breiman RF., Fields BS., Sanden GN. (1990). Association of shower use with Legionnaires' disease : possible role of amoebae. *J. Am. Med. Ass.* 263 (21), 2924-2926
- Brieland JK., McClain M., Le Gendre M., Engleberg C. (1997). Intrapulmonary *Hartmanella vermiformis* : a potential niche for *Legionella pneumophila* replication in a murine model of Legionellosis. *Inf. Immun.* 65 (11), 4892-4896.
- Campese C., Jarraud S., Decludt B., Jacquier G., Che D. (2004). Les légionelloses déclarées en France en 2003. *Bull. Epidemiol. Hebd.* 174-176.
- Cazalet C., Rusniok C., Brüggemann H., Zidane N., Magnier A., Ma L., Tichit M., Jarraud S., Bouchier C., Vandenesch F., Kunst F., Etienne J., Glaser P., Buchrieser C. (2004). Evidence in the *Legionella pneumophila* genome for exploitation of host cell functions and high genome plasticity. *Nat. Genetics.* 36, 1165-1173.
- Ciesielski CA., Blaser MJ., Wang WL. (1984). Role of stagnation and obstruction of water flow in isolation of *Legionella pneumophila* from hospital plumbing. *Appl. Environ. Microbiol.* 48, 984-7
- Che D., Campese C., Decludt B., Desenclos JC., (2003). Sporadic case of community acquired legionnaires' disease: an ecological study to identify new sources of contamination, *J. Epidemiology Community Health*, 57, 466-469.
- Cirillo JD., Cirillo ST., Yan L., Bermudez LE., Falkow S. (1999). Intracellular growth in *Acanthamoeba castellanii* affects the monocyte entry mechanism and enhances virulence of *Legionella pneumophila*. *Infect. Immun.* 67 (9), 4427-4434.
- Colclough CA., Johnson JD., Christman RF. and Millington DS. (1983). Organic reaction products of chlorine dioxide and natural aquatic fulvic acids. In "Water Chlorination: Environmental Impact and health Effect". R.L. Jolley, Ed. (Ann Arbor Science Publishers) vol 4, 219-229.
- Coleman WE., Munch JN., Kaylor WH., Streicher RP., Meier J.R. (1984). Gas chromatography/Mass spectrometry analysis of mutagen extracts of aqueous chlorinated humic acid. A comparison of the by-products to drinking water contaminants. *Environ. Sci. technol.* 18, 674-681

- Colwell RR. et Grimms DJ. (2001). Nonculturable microorganisms in the environment. Am. Soc. Microbiol. Washington DC.
- Cooper JW., Amy GL., Moore CA., Zika RG. (1986). Bromoform formation in ozonated groundwater containing bromide and humic substances. Ozone Sci. Eng. 8, 63-76.
- Croué JP., Koudjonou BK., Legube B. (1989). Parameters affecting the formation of bromate ion during ozonation. Ozone Sci. Eng. 18, 1-18.
- Cowman GA. et Singer PC. (1996). Effect of bromide ion on haloacetic acid speciation resulting from chlorination and chloramination of aquatic humic substances. Environ. Sci. Technol.30, 16-24.
- Deloge M., Ha TL., Robine E., Zmirou-Navier D., Hartemann P., Mathieu L. (2004). Aerosols containing *Legionella* measured by fluorescent in situ hybridisation : new approaches to metrology. 19th Annual Meeting of the European Working Group for *Legionella* Infections. Chamonix Mont Blanc. France. 15-18 May.
- Deloge M., Robine E., Zmirou-Navier D., Hartemann P., Mathieu L. (2005). Exposure of elderly people to *Legionella* isoalted in shower hot-water aerosols in nursing homes : first results from the French LEGION'AIR multicentric study. 20th Annual Meeting of the European Working Group for *Legionella* Infections. Roma, Italy. 15-17 May.
- Den Boer JW., Yzerman PF., Schellekens J., Lettinga KD., Boshuizen HC., Van Steengergen JE., Bosman A., Van den Hof S., Van Vliet HA., Peeters MF., Van Ketel RJ., Speelman P., Kool JL., Conyn Van Spaendonk MA. (2002). A large outbreak of Legionnaires' disease at a flower show in Netherland 1999. Emerg. Infect. Disease.8, 37-43.
- Dennis PJ., Wright AE., Rutter DA., Death JE. (1984). *Legionella pneumophila* in aerosol from shower baths. The J. Hyg. 93, 349-353.
- Dennis PJ. et Lee JV., (1988). Differences in aerosol survival between pathogenic and non-pathogenic strains of *Legionella pneumophila* serogroup 1. J. Appl. Bacteriol. 65 (2), 135-41.
- Desenclos JC. (2004). La légionellose : de Philadelphie au Pas de Calais ! Bull.Epidemiol.Hebdo. 36-37, 173
- Donlan, (2002). Emerg. Infect. Disease. 8, 881-890.
- Duchaine C., Thorne PS., Meriaux A., Grimard Y., Whitten P., Cormier Y. (2001). Comparison of endotoxin exposure assessment by bioaerosol impinger and filter-sampling methods. Appl. Environ. Microbiol. 67, 2775-80.
- Feely JC., Gibson RJ., Gorman GW., Langford NC., Rasheed K, Mackel DC., Baine WB. (1979). Charcoal yeast extract agar : primary isolation medium for *Legionella pneumoniae*. J. Clin Microbiol. 10 (4), 437-441.
- Fields B. (2002). The social life of *Legionellae*. In *Legionella*. Eds. R. Marre, Y. Abu Kwaik, C. Bartlett, NP. Cianciotto, BS. Fields, M. Frosch, J. Hacker, PC. Lück. Washington Press : 135-42.
- Flemming HC. (2002). Biofouling in water systems-cases, causes and countermeasures. Appl. Microbiol. Biotechnol. 59, 629-640.
- Fliermans CB, Cherry WB, Orrison LH, Smith SJ, Tison DL, Pope DH. (1981). Ecological distribution of *Legionella pneumophila*. Appl. Environ. Microbiol. 41, 9-16.
- Fliermans CB. (1996). Ecology of *Legionella*: from data to knowledge with a little wisdom. Microb. Ecol. 32, 203-228.

- Fugleseng JA., Smith KI., Tonsberg JH., Iversen J. (2005). Role of National Health Authorities during an Outbreak of Legionnaires' Disease in Norway. 6th International Conference on *Legionella*. Chicago. USA.
- Girod JC., Reichman RC., Winn WC. Jr, Klaucke DN, Vogt RL., Dolin R. (1982). Pneumonic and non-pneumonic forms of legionellosis. The result of a common-source exposure to *Legionella pneumophila*. Arch. Intern. Med. 142 (3),545-7.
- Greub G. (2004). Microorganisms resistant to free-living amoebae. Clin. Microbiol. 17 (2), 413-433.
- Grimm D., Mercket H., Ludwig W., Schleifer KH., Hacker J., Brand BC. (1998). Specific detection of *Legionella pneumophila* : construction of a new 16S rRNA-targeted oligonucleotide probe. Appl. Environ. Microbiol. 64, 2686-2690.
- Ha TL. (2005 a). Etude de l'aérosol de *Legionella pneumophila*. Thèse de Docteur es Sciences. Université Paris 12.
- Ha TL., Deloge M., Mathieu L., Robine E. (2005 b). Aerosols of *Legionella*. 19th Annual Meeting of the European Working Group for *Legionella* Infections. Chicago, USA.
- Haag WR. and Hoigne J. (1983). Ozonation of bromide-containing waters : Kinetics of formation of hypobromous acid and bromate, Environ. Sci. Technol.17, 261-267.
- Habicht W. and Müller HE. (1988). Occurrence and parameters of frequency of *Legionella* in warm water systems of hospitals and hotels in Lower Saxony. Zbl. Bakt. Hyg. Bull. 186, 79-88.
- Hambleton P., Proster MG., Dennis PJ. (1983). Survival of virulent *Legionella pneumophila* in aerosols. J. Hyg. Lond, 90 (3), 451-60.
- Heidelberg JF. (1997). Effect of aerosolization on culturability and viability of gram-negative bacteria. Appl. Environ. Microbiol, 63 (9), 3585-8
- Heller R., Holler C., Sussmuth R., Gundermann KO. (1998). Effect of salt concentration and temperature on survival of *Legionella pneumophila*. Lett. Appl. Microbiol. 26 (1), 64-8.
- Heng BH., Goh KT., Neg DL., and Ling, AE. (1997). Surveillance of legionellosis and *Legionella* bacteria in the built environment in Singapore. Ann. Acad Med. Singapore. 26, 557-565.
- Henke JM. et Bassler BL.(2004). Bacterial social engagements. Review. Trends Cell. Biol. 14 (11), 648-656.
- Hodgson JM., et Casey BJ. (2002). Prevalence of *Legionella* bacteria in building water systems. 7 pages;
- Hoebe CJ., et Kool JL. (2000). Control of *Legionella* in drinking-water systems. The Lancet. 355, 2093-2094.
- Holden EP. (1984). Intracellular growth of *Legionella pneumophila* within *Acanthamoeba castellanii* Neff. Infect. Immunol. 45 (1), 18-24.
- Hussong D., Colwell RR., O'Brien M., Weiss E., Pearson AD, Weiner RM., Burge WD. (1987). Viable *Legionella pneumophila* not culturable by culture on agar medium. Bio-Technol. 5, 947-950.
- Jefferson KK. (2004). What drives bacteria to produce a biofilm?. FEMS Microbiol. 236, 163-173.
- Jensen JN., Aubin JJ., Christman RF., Johnson JD. (1985). Characterization of the reaction between monochloramine and isolated aquatic fulvic acid. In "Water Chlorination : Environmental Impact and Health Effect". Lewis Publishers. 951-973

- Johnson JD., Christman RF., Norwood DL., Millington DS. (1982). Reaction products of aquatic humic substances with chlorine. *Environ. Health Persp.* 46, 63-71
- Joux F. et Lebaron P. (2000). Use of fluorescent probes to assess physiological functions of bacteria at single-cell level. *Review. Microbes Infect.* 2 (12), 1523-35.
- Kell, D.B. (1998). Viability and activity in readily culturable bacteria : a review and discussion of the practical issues. Ed. A. Van Leeuwenhoek. 73 (2) : 169-87.
- Keller DW., Hajjeh R., DeMaria A., Fields BS., Pruckler JM., Benson RS., Kludt PE., Lett SM., Mermel LA., Giorgio C., Breiman R.F. (1996). Community outbreak of Legionnaires's disease : an investigation confirming the potential for cooling towers to transmit *Legionella* species. *Clin. Inf. Disease.* 22, 257-261.
- Killops SO. (1986). Volatile ozonization products of aqueous humic material. *Wat. Res.* 20, 153-165.
- Kilvington S. and Price J. (1990). Survival of *Legionella pneumophila* within cysts of *Acanthamoeba polyphaga* following chlorine exposure. *J. Appl. Bacteriol.* 68 (5), 519-525.
- Koide M., Saito A., Kusano N. and Higa F. (1993). Detection of *Legionella spp* in cooling tower water by the polymerase chain reaction method. *Appl. Environ. Microbiol.* 59 : 1943-1946.
- Kramer MH. et Ford TE. (1994). Legionellosis : ecological factors of an environmentally 'new' disease. *Zentralbl Hyg Umweltmed.* 195 (5-6), 470-482.
- Kringstad KP., Ljungquist PO., De Sousa F., Srtomberg LM. (1983). On the formation of mutagens in the chlorination of humic acid. *Environ. Sci. Technol.* 17, 553-555.
- Kuchta, JM., Navratil JS., Shepherd ME., Wadowsky RM., Dowling JN., States SJ. (1993). Impact of chlorine and heat on the survival of *Hartmannella vermiformis* and subsequent growth of *Legionella pneumophila*. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 4096-4100.
- Landeen LK, Yahya MT, Gerba CP. (1989). Efficacy of copper and silver ions and reduced levels of free chlorine in inactivation of *Legionella pneumophila*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55 (12), 3045-50.
- Lejeune P. (2003). *Trends in Microbiol.* 11, 179-184.
- Leoni E., Legnani PP., Sabattini MA. and Righi F. (2001). Prevalence of *Legionella spp* in swimming pool environment. *Wat. Res.* 35, 3749-3753.
- Lin YE, Stout JE, Yu YL, Vidic RD. (1998). Disinfection of water distribution systems for *Legionella*. *Seminars in Respiratory Infections.* 13 (2):147-159.
- Liu Z, Stout JE, Boldin M, Rugh J, Diven WF, Yu VL. (1998) Intermittent use of copper-silver ionization for *Legionella* control in water distribution systems: a potential option in buildings housing individuals at low risk of infection. *Clin. Infect. Disease.* 26 (1), 138-40.
- Luck, PC., Leupold I., Hlawitschka M., Helbig, JH., Carmienke I., Jatzwauk L. (1993). Prevalence of *Legionella* species, serogroups, and monoclonal subgroups in hot water systems in south-eastern Germany. *Zentralblatt Hyg Umweltmedizin.* 193, 450-460.
- Hoebe C.J.P.A. & Kool J.L. (2000) Control of *Legionella* in drinking-water systems, *The Lancet*, 355, 2093-2094.
- Martiny AC., Jorgensen TM., Albrechtsen HJ., Arvin E., Molin S. (2003). Long-term succession of structure and diversity of a biofilm formed in a model drinking water distribution system. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 6899-6907.

- Mathieu L, Robine E, Deloge-Abarkan M, Ritoux S, Pauly D, Hartemenn P, Zmirou D. (2006). *Legionella* in aerosols : sampling and analytical approaches used during the Pas-de-Calais Legionnaires' disease outbreak. J. Infect. Disease. (acceptée, à apparaître en 2006)
- Mazieri NA, de Godoy CV, Alves SF, de Andrade DR, Levin AS, Hablitzel AC. (1994). Legionnaires' disease in the renal transplant unit of "Hospital das Clinicas, FMUSP" during a five year period (1988-1993). Review. Inst. Med. Trop. Sao Paulo. 36 (3), 231-236.
- Miller MB. et Bassler BL. (2001). Quorum sensing in bacteria. Annual Rev. Microbiol., 55, 165-199.
- Miquel PH., Haeghebaert S., Che D., Campese C., Guitard C., Brigaud T.,Thérouanne M., Panié G., Jarraud S., Ilef D. (2004). Epidémie communautaire de Légionellose, Pas de Calais, France, novembre 2003-janvier 2004. Bull. Epidemiol. Hebd. 36-37, 179-181
- Mody CH., Paine R., Shahrabadi MS., Simon RH., Pearlman E., Eiser BI., Toews GB. (1993) *Legionella pneumophila* replicates within rat alveolar epithelium. J. Inf. Disease. 167 (5) : 1138-1145.
- Molofsky AB., Swanson MS. (2004). Differentiate to thrive: lessons from the *Legionella pneumophila* life cycle. Microreview. Mol. Microbiol. 53 (1), 29-40.
- Nahapetian K., Challemel O., Beurtin D., (1991). The intracellular multiplication of *Legionella pneumophila* in protozoa from hospital plumbing systems. Res. Microbiol. 142 (6), 677-85.
- Noack MG. et Doerr RL. (1978). Reaction of chlorine, chlorine dioxide and mixtures thereof with humic acid : An interim report. In "Water Chlorination : Environmental Impact and health Effect. RL. Jolley, Ed, (Ann Arbor Science Publishers) 2, 49-58.
- Norwood DL., Thompson GP., St Aubin JJ., Millington DS., Christman RF., Johnson JD. (1985). By-products of chlorination : Specific compounds and their relationship to total organic halogen. Michigan, Lewis Publication. INC/Drinking water Res. Found., (Ref. AFEE. 66/47895, n° 352, 109-121.
- Nystrom, T. (2001). Not quite dead enough: on bacterial life, culturability, senescence, and death. Arch. Microbiol, 176 (3) : 159-164.
- Ortiz-Roque CM. et Hazen TC. (1987). Abundance and distribution of *Legionellaceae* in Puerto Rican waters. Appl. Environ. Microbiol. 53 (9), 2231-2236.
- Palmer CJ., Tsai YL., Paszko-Kolva C., Mayer C., Sangermano LR.. (1993). Detection of *Legionella* species in sewage and ocean water by polymerase chain reaction, direct fluorescent-antibody, and plate culture methods. App. Environ. Microbiol. 59 (11), 3618-3624.
- Palmer (1995). Detection of *Legionella* species in reclaimed water and air with the EnviroAmp *Legionella* PCR Kit and Direct Fluorescent Antibody Staining. Appl. Environ. Microbiol. 61, 407-412.
- Pongratz A., Schwarzkopf A., Hahn H. (1994). The effect of the pipe material of the drinking water system on the frequency of *Legionella* in a hospital. Zentralbl. Hyg. Umweltmed. 195, 483-488.
- Rittman BE. (1989). Detachment from biofilms. In: Structure and Function of Biofilms. Characklis WG & Wilderer PA. (Eds) John Wiley and Sons, New York. 49-58.
- Rogers J., Dowsett AB., Dennis PJ. (1994). Influence of temperature and plumbing material selection on biofilm formation and growth of *Legionella pneumophila* in a model potable water system containing complex microbial flora. Appl. Environ. Microbiol. 60, 1585-1592.
- Rogers J., Dowsett AB., and Keevil CW. (1995). A paint incorporating silver to control mixed biofilms containing *Legionella pneumophila*. J. Ind. Microbiol. 15, 377-383.

- Rouil L., Gardenas G., Marcel F. (2004). Evaluation de la dispersion atmosphérique d'aérosols potentiellement contaminés lors de l'épidémie de légionellose de la région de Lens. Bull. Epidemiol. Hebd. 36-37, 182-184.
- Rowbotham TJ. (1986). Current views on the relationship between amoebae, legionellae and man. Isr. J. Med. Sci. 22, 678-689.
- Rowbotham TJ. (1980). Preliminary report on the pathogenicity of *Legionella pneumophila* for fresh water and soil amoebae. J. Clin. Pathol. 33, 1179-1183.
- Rusin PA., Rose JB., Haas CN., Gerba, CP. (1997). Risk assessment of opportunistic bacterial pathogens in drinking water. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 152, 57±83.
- Servais P., Billen G., Laurent P., Levi Y., Randon G. (1992a), Studies of BDOC and bacterial dynamics in drinking water distribution system of the Northern Parisian suburb. Sci. Eau. 5, 69–89.
- Servais P., Laurent P., Billen G., Levi Y. (1992b). Etude de la colonisation bactérienne des réseaux de distribution. Techn. Sci. Meth. Eau. 6, 321–326.
- Smith-Somerville HE., Huryn VB., Walker C., Winters Al. (1991). Survival of *Legionella pneumophila* in the cold-water ciliate *Tetrahymena vorax*. Appl. Environ. Microbiol. 57.(9), 2742-2749.
- Srikanth S., Berk SG. (1994). Stimulatory effect of cooling tower biocides on amoebae. Appl. Environ. Microbiol. 59 (10), 3245-3249.
- Stanley NR. et Lazazzera BA. (2004). Environmental signals and regulatory pathways that influence biofilms formation. Mol. Microbiol. 52, 917-924.
- States SJ., Conley LF., Ceraso M. Stephenson, T.E., Wolford, R.S., Wadowsky, R.M. (1985). Effects of metals on *Legionella pneumophila* growth in drinking water plumbing systems. Appl. Environ. Microbiol. 50, 1149-1154.
- States, SJ., Conley CF., Kuchta JM., Wolford RS., Wadowsky RM., Yee RB. (1989). Chlorine, pH, and control of *Legionella* in hospital plumbing systems. J. Am. Med. Assoc. 261, 1882-1883.
- Steinert M., Emödy L., Amman R., Hacker J. (1997). Resuscitation of viable but not culturable *Legionella pneumophila*, philadelphia JR32 by *Acanthamoeba castellanii*. Appl. Environ. Microbiol. 63, 2047-2053.
- Steinert M., Hentschel U., Hacker J. (2002) *Legionella pneumophila* : an aquatic microbe goes astray. FEMS Microbiol. 26, 149-162.
- Stetzenbach LD. (1992). Airborne microorganisms. Encyclopedia of microbiology, vol.1, Academic Press, 53-65.
- Stevens AA. (1982). Reaction products of chlorine dioxide. Environ. Health. Persp. 46, 101-110
- Stoodley P., Sauer K., Davies DG., Costerton JW. (2002). Bio as complex differentiated communities. Annu. Rev. Microbiol. 56, 187-209.
- Stout JE., Yu VL., Best MG. (1985). Ecology of *Legionella pneumophila* within water distribution systems. Appl. Environ. Microbiol. 49 (1), 221-8.
- Swanson MS., Hammer BK. (2000). *Legionella pneumophila* pathogenesis : a fateful journey from amoebae to macrophages. Annu. Rev. Microbiol. 54 : 567-613.

- Tran Minh N., Ilef D., Jarraud S., Rouil L., Campese C., Che D., Haeghebaert S., Ganiayre F., Marcel F., Etienne J., Desenclos J. C. (2006). A community-wide outbreak of legionnaires disease linked to industrial cooling towers-how far can contaminated aerosols spread? *J. Infect. Dis.* 193 : 102-111.
- Van der Wende E., Characklis WG., Smith DB. (1989). Biofilms and bacterial drinking water quality. *Wat. Res.* 23, 1313–132;
- Von Gunten U. and Hoigne J. (1994). Bromate formation during ozonation of bromide containing waters : interaction of ozone and hydroxyl radical reactions. *Environ. Sci. Technol.* 28, 1234-1242.
- Wadowsky RM., Wolford R., McNamara AM. (1985). Effect of temperature, pH, and oxygen level on the multiplication of naturally occurring *Legionella pneumophila* in potable water. *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 1197-1205.
- Willeke K., Lin X., Grinshpun SA., Reponen T., Foarde KK., Ensor DS. (1998). Laboratory and field evaluation of a new bioaerosol sampling concept. *J. Aerosol Sci.* 499-500.
- Williams, SC., Hong Y., Danavall DCA., Howard-Jones MH., Gibson D., Frscher ME., Verity PG (1998). Distinguishing between living and non-living bacteria : Evaluation of the vital stain propidium iodide and its combined use with molecular probes in aquatic samples. *J. Microbiol. Meth.* 32 : 225-236.
- Yokomaku, D., Yamaguchi N., and Nasu M. (2000). Improved direct viable count procedure for quantitative estimation of bacterial viability in freshwater environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 66 (12), 5544-5548.
- Zacheus OM. et Martikainen P. (1994). Occurence of *legionellae* in hot water distribution systems of Finnish apartment buildings, *Can. J. Microbiol.* 40, 993-999.

Annexe 1 : Saisine

COURRIER REÇU LE

25 NOV. 2004

8227



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DE LA
PROTECTION SOCIALEMINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES
FINANCES ET DE L'INDUSTRIEMINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU
DÉVELOPPEMENT DURABLE

DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ

DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SÛRETÉ
NUCLÉAIRE ET DE LA
RADIOPROTECTIONDIRECTION DE LA PRÉVENTION DES
POLLUTIONS ET DES RISQUES

Paris, le 15 NOV. 2004

Le Directeur Général de la Santé
 Le Directeur de la Prévention des Pollutions et
 des Risques
 Le Directeur Général de la Sûreté Nucléaire et
 de la Radioprotection

à

Madame la Directrice Générale de l'Agence
 Française de Sécurité Sanitaire
 Environnementale
 27-31 avenue du Général Leclerc
 94703 Maisons-Alfort cedex

Objet : Evaluation des risques sanitaires liés aux proliférations de *Legionella* dans l'eau des tours aérorefrigérantes des centres nucléaires de production électrique d'EDF.

PJ : 1- Dossier documentaire transmis par EDF à la DGS le 10 juin 2004
 2- Projet d'arrêté ministériel relatif aux installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air soumises à autorisation au titre de la rubrique 2921
 3- Projet de Décision de l'Autorité de sûreté nucléaire
 4- Arrêté préfectoral du 6 août 2004 prescrivant au centre nucléaire de production d'électricité de Chinon de procéder à des traitements de lutte contre la prolifération des légionelles

Les épidémies de cas de légionelloses liés à des tours aérorefrigérantes humides qui ont eu lieu récemment, ont conduit les ministres chargés de la santé et de l'écologie à conjuguer leurs efforts pour mieux prévenir le risque sanitaire lié à ces installations, dans le cadre du plan de prévention des légionelloses 2004-2008 (juin 2004). La prévention du risque lié aux *Legionella* dans l'eau des tours aérorefrigérantes des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) d'EDF ne fait à ce jour l'objet d'aucune prescription réglementaire particulière.

A titre provisoire, EDF a mis en œuvre une stratégie de prévention, de surveillance, et d'action depuis l'été 2004, se basant sur des valeurs à ne pas dépasser pour la concentration en légionelles dans les circuits, sur la demande de la DGSNR.

Nous souhaitons dans un premier temps établir pour le cas particulier de ces installations, sur la base d'une évaluation de leur situation actuelle des niveaux d'interventions à partir desquels des mesures préventives devraient être appliquées. Dans un deuxième temps, les éléments relatifs à l'analyse des risques sanitaires et environnementaux fournis ou à fournir par l'exploitant, ainsi que les résultats des études pertinentes, dont certaines restent encore à produire ou à finaliser, feront l'objet d'une expertise par votre soin. Les conclusions de ces travaux pourront conduire notamment à la révision des niveaux d'intervention pour le cas des CNPE.

Aussi, et sans attendre les résultats finaux de l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux, nous vous serions obligés de nous fournir un premier rapport en réponse aux questions suivantes pour la fin du mois de février 2005 :

- Quelle est votre évaluation des mesures de prévention et de surveillance du développement des légionelles dans les circuits des TAR des CNPE, présentées par l'exploitant, afin de limiter le risque sanitaire lié à la présence de légionelles dans les effluents liquides et gazeux des TAR ?
- Quelles mesures alternatives ou complémentaires de celles mises en œuvre par l'exploitant sont de nature à limiter le risque sanitaire lié à la présence de légionelles dans les effluents liquides et gazeux des TAR (conception des circuits, nettoyage, désinfection, surveillance du fonctionnement des TAR...)?
- Quelles études devraient être réalisées en priorité pour améliorer la connaissance des risques et les moyens de les maîtriser, dans le cadre ou en complément des études déjà prévues dans le cadre du Plan de prévention des légionelloses 2004-2008, adopté en juin 2004 ?
- Enfin vous passerez en revue les pratiques en la matière dans les pays de niveau de développement économique comparable à celui de la France, et notamment l'existence de niveaux d'intervention ou d'arrêt des installations.

Pour cela vous examinerez notamment l'influence qu'exercent des facteurs tels que :

- les concentrations de légionelles dans les circuits de refroidissement,
- la hauteur des tours,
- les technologies de refroidissement (géométrie des circuits, nature des matériaux en contact avec l'eau, gestion des circuits...) et les conditions de maintenance et d'exploitation des circuits de refroidissement (arrêt des tours, modalités de nettoyage et de désinfection, fréquence, nature des produits utilisés...),
- les modalités - et notamment les points - de prélèvement et de mesures de concentration en *Legionella* dans les circuits de refroidissement,
- les caractéristiques des implantations vis-à-vis des populations exposées (notamment prenant en compte la densité de la population autour des CNPE et les caractéristiques climatologiques).

Il vous appartiendra également de prendre en compte dans vos conclusions les effets d'éventuels rejets de produits de traitement dans l'environnement dans l'hypothèse où des mesures plus restrictives en terme de concentration dans les circuits devraient être envisagées.

A cette fin, vous analyserez en particulier l'ensemble des données bibliographiques disponibles et les études fournies par EDF (cf. pièces jointes) ainsi que les informations complémentaires que vous jugerez nécessaires de lui demander. Par ailleurs, vous vous appuyerez sur les experts spécialisés dans les différents domaines de compétence concernés par cette évaluation, notamment pour ce qui concerne la modélisation de la dispersion des vésicules dans l'air, le nettoyage et la désinfection des circuits, la quantification des légionelles dans l'eau. Il

vous sera possible pour cela de travailler en collaboration avec les différents partenaires intervenant dans le cadre du Plan de prévention des légionelloses 2004-2008, adopté en juin 2004. Vous pourrez en particulier faire appel à l'IRSN et à l'INERIS et à certains des experts de la mission nationale d'appui nommée dans le cadre de l'épidémie de Lens.

Nous vous prions de croire, Madame la Directrice générale, à l'expression de notre considération distinguée.

William DAB



Thierry TROUVÉ



André-Claude LACOSTE



ANNEXE :

LISTE DES DOCUMENTS FOURNIS PAR EDF A LA DGSNR LE 10 JUIN 2004

- Annexe 1 : Evaluation du risque.
 - Evaluation du risque lié à la présence de légionelles dans les aëroréfrigérants des centrales (09/06/04)
 - Enquête de séroprévalence des anticorps dirigé contre *Legionella Pneumophila* chez le personnel exposé/non exposé aux panaches des aëroréfrigérants de centrales nucléaires (09/06/04)
 - Analyse comparée des expositions aux légionelles émises par les petites et les grandes tours de réfrigération atmosphérique (20/11/2001)
 - Synthèse des connaissances sur les panneaux éliminateurs des aëroréfrigérants du Parc Nucléaire et justification du taux de primage (19/05/04)
 - Les différents types de modèles existants. Présentation du modèle Multipol et du modèle Screen3 (09/06/04)
 - Vérification du modèle utilisé à partir de données issues de l'épidémie de Lens (09/06/04)
 - Survie des *legionella pneumophila* dans les aérosols (09/06/04)
 - Evaluation de risque Légionelles. Méthode de calcul (10/06/04)
 - Données de population et roses des vents (03/06/04)
- Annexe 2 : Impacts sanitaires et environnementaux / autorisations de rejets.
- Annexe 3 : Impact Production.

Annexe 2 : Fond documentaire

Première série de documents accompagnant la saisine :

- Projet de courrier DEP-SD2 N° 0047/2005 du 28/01/2005 de la DGSNR sur la prévention de la légionellose.4 Pages.
- Arrêté préfectoral du 06/08/2004 prescrivant au CNPE de Chinon un traitement de lutte contre la prolifération des légionelles.3 Pages.
- Evaluation du risque lié à la présence de Légionelles dans les aéroréfrigérants des centrales (09/06/04) .9 Pages.
- Enquête de séroprévalence des anticorps dirigé contre *Legionella pneumophila* chez le personnel exposé / non exposé aux panaches des aéroréfrigérants de centrales nucléaires (09/06/04).46 Pages.
- Analyse comparée des expositions aux Légionelles émises par les petites et les grandes tours de réfrigération atmosphérique (20/11/2001). 14 Pages.
- Synthèse des connaissances sur les panneaux éliminateurs des aéroréfrigérants du Parc nucléaire et justification du taux de primage (19/05/04) .11 Pages.
- Les différents types de modèles existants. Présentation du modèle Multipol et du modèle Screen3 (09/06/04). 2 Pages.
- Vérification du modèle utilisé à partir de données issues de l'épidémie de Lens (09/06/04). 3 Pages.
- Survie des *Legionella pneumophila* dans les aérosols (09/06/04) .7 Pages.
- Evaluation de risque légionelles. Méthode de calcul (10/06/04).3 Pages.
- Données de population et roses des vents (03/06/04) .22 Pages.
- Impacts sanitaires et environnementaux / autorisations de rejets. 2 Pages.
- Impact Production.2 Pages.

Premier envoi de documents d'EDF à l'AFSSET

La série comportait les documents accompagnant la saisine et ceux listé ci- après :

- Note technique: Organisation mise en place pour maîtriser le risque légionelles dans les CNPE d'EDF. 11 Pages.
- Inventaire des tours aéroréfrigérantes. Annexe 1.1 Pages.
- Note technique: Fiches de synthèse des aéroréfrigérants des Centres Nucléaires de Production d'Électricité d'EDF. 18 Pages.
- Rapport CNPE Civaux: Réfrigérant du circuit SEC - Procédure de mesure du taux de primage ou entraînement vésiculaire. 8 Pages.
- Note technique: Surveillance et limitation du risque lié à la présence de légionelles dans les installations industrielles et tertiaires des CNPE. Réf. 4 - PJ3.26 Pages.

- Prescription DT 200 indice 1: Maîtrise de l'entartrage des réfrigérants atmosphériques. Réf. 4 - PJ5.18 Pages.
- Prescription DT 191 : Prévention de la légionellose - Modalités de maîtrise et de réduction du risque lié à la présence de légionelles dans les installations. Réf. 4 - PJ6.16 Pages.
- Notes techniques: Programmes de Base de Maintenance Préventive des condenseurs bord de rivière. Réf.4 - PJ7.17 Pages.
- Notes techniques: Programmes de Base de Maintenance Préventive des aéroréfrigérants des paliers 900/1300/1400 MW. Réf.4 - PJ4. (14 Pages.20 Pages. 20 Pages.18 Pages.16 Pages.14 Pages.36 Pages.38 Pages.41 Pages. 32 Pages. 33 Pages.38 Pages.)

Deuxième envoi de documents d'EDF à l'AFSSET

Tous les documents précédents triés dans un classeur ainsi que les documents listés ci- après :

- Stratégie d'EDF pour la prévention du risque lié à la présence de légionelles dans les circuits de refroidissement des CNPE - D4550.06-05/1832. 24 Pages.
- Description des traitements mis en oeuvre à titre préventif et curatif - Note ELIER 0500326A.29 Pages.
- Description de la stratégie d'échantillonnage des légionelles dans les circuits d'eau des tours. 26 Pages.
- Notes techniques: Légionelles - Campagnes de suivi 2001 à 2004.(2004 : 147 Pages. 2003 : 44. Pages.2002 : 7 Pages. 2001 :10 Pages).
- Survie des légionelles aérosolisées : Synthèse des résultats sur l'étude de l'influence de l'humidité relative et du rayonnement.

Troisième envoi de documents d'EDF à l'AFSSET

- ETDOIG/050124A: aéroréfrigérants du Parc - Performance des panneaux éliminateurs de gouttes vis-à-vis de l'entartrage. 8 Pages.
- Note ELIER/0500712: Synthèse des études relatives à l'évaluation du risque légionelles associé aux aéroréfrigérants des CNPE. 9 Pages.
- Note ELIER/0500539: Méthodologie générale de l'évaluation du risque légionelles associé aux aéroréfrigérants des CNPE. 15 Pages.
- Note ELIER70500414; Dispersion atmosphérique des légionelles par les aéroréfrigérants Onglet 5 Gestion du risque. 31 Pages.
- Note D4550.06-05/2947: Logigrammes d'actions présentant les parades mises en oeuvre en fonction du suivi des paramètres pour les installations de refroidissement des circuits secondaires. 8 Pages.
- Note D4550.06-05/2929: Effet biocide du thiosulfate contenu dans les flacons d'analyse des Légionelles. 7 Pages.
- Note D4550.05-05/2991 : Réponse d'EDF aux questions posées lors de l'audition du 22 juin 2005 concernant les essais d'injection de CO₂ à Chinon. 7 Pages.

- Note EDEAPC050337A: Traitements par chloration massive anti-légionelles réalisés sur les circuits de refroidissements du CNPE de Chinon - Retour d'expérience 2004.7 Pages.

- Note HP-77/05/016/A: Etude de faisabilité des traitements de désinfection des circuits de refroidissement des CNPE alternatifs à la monochloramine.50 Pages.

- Note CR-P77/2005/015/B: Questionnement AFSSE sur les densités de légionelles dans les circuits de refroidissement tertiaire des CNPE.7 Pages.

- Note ELIER/0500629: Impact environnemental de la mise en place d'un traitement anti-légionelles sur les CNPE du bassin de la Loire. 19 Pages.

