
Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion : **2011 - 2012**

Date du Jury : **octobre 2012**

**Aspersion avec des eaux usées
traitées : Approche du risque lié à la
formation d'aérosols**

Yannick OLIVIER

Lieu du stage

Irstea, Aix-en-Provence

Référent professionnel

B.MOLLE

Référent pédagogique

B.ROIG

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Séverine TOMAS et Bruno MOLLE pour m'avoir accueilli et pour leur disponibilité même durant ces périodes de vacances estivales.

Je remercie également toutes les personnes de l'Irstea m'ayant aidé sur le terrain et pour les discussions sur les sports de glisse ou le rugby pendant les déplacements, Mathieu, Pascal, Arielle.

Ensuite, je remercie toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger professionnellement ou non dans les locaux de l'Irstea et avec qui j'ai pu partager le café et même un barbecue, Christophe, Julien, Jacques, Souha, Jafar, Carole...

Pour finir, j'aimerais également remercier mes camarades pour les conseils sur le rendu du mémoire et pour les weekends passés à travers la France.

Sommaire

Introduction	1
1 Cadre de travail sur la réutilisation des eaux usées traitées	3
1.1 Contexte et objectifs du mémoire	3
1.1.1 Contexte international et français	3
1.1.2 Intérêts et limites de la REUT	3
1.1.3 Etudes effectuées sur le sujet de la dispersion	4
1.1.4 Objectifs du mémoire	4
1.2 Enjeux de la réutilisation des eaux usées traitées	5
1.3 Principe de la réutilisation des eaux usées traitées	6
1.3.1 Usages et techniques employés	7
1.3.2 Les différents types d'irrigations	8
1.3.3 Réglementation relative à la REUT par aspersion	9
2 Etat des connaissances sur les risques liés à la REUT par aspersion	15
2.1 Evaluation de la dérive et du transport lors de l'irrigation par aspersion	15
2.2 Etat des connaissances sur l'évaluation des risques sanitaires liés à la REUT	16
2.2.1 Evaluation des risques sanitaires liés aux agents chimiques	16
2.2.2 Evaluation des risques sanitaires liés aux micro-organismes	17
2.2.3 Conclusion	18
2.3 Méthodes d'échantillonnage de l'air	19
2.3.1 Echantillonnage par sédimentation	19
2.3.2 Méthode d'échantillonnage par impaction	19
2.3.3 Echantillonnage par filtration	21
2.3.4 Comparaison des méthodes d'échantillonnages	22
3 Méthodologie d'approche pratique de l'estimation des volumes dérivés et transportés lors de l'aspersion	23
3.1 Présentation du modèle expérimental	23
3.1.1 Protocole de mesure de la BSF	23
3.1.2 Protocole au champ	23
3.1.3 Description de la station météorologique	26
3.1.4 Estimation des pertes lors des essais	27
3.2 Analyse de la dérive et du transport au champ au moyen d'eau colorée réalisé en 2011	31
3.2.1 Analyse du transport et de la dérive au champ	31
3.2.2 Bilan des essais 2011	33

3.3	Analyse de la dérive et du transport au champ au moyen d'eau colorée réalisé en 2012.....	34
3.3.1	Modélisation des volumes dérivés et transportés.....	34
3.3.2	Estimation des volumes mis en jeu.....	37
3.3.3	Bilan des essais.....	38
4	Discussion	39
4.1	Mise en perspective des résultats de l'étude.....	39
4.1.1	Limites du protocole.....	39
4.1.2	Exposition aux agents microbiologiques	41
4.1.3	Retombés des résultats expérimentaux	41
4.2	Recommandations concernant la REUT par aspersion.....	42
4.2.1	Evaluation de la possibilité d'effectuer une ERS	42
4.2.2	Recommandations.....	43
4.2.3	Présentation du principe de barrière	46
	Conclusion.....	49
	Bibliographie.....	51
	Liste des figures.....	55
	Liste des tableaux.....	57
	Liste des annexes.....	I

Liste des sigles utilisés

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AEP	Adduction en Eau Potable
AFD	Agence Française du Développement
AFSSA	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
AFSSET	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
AMPERES	Analyse de Micropolluants Prioritaires et Emergents dans les Rejets et les Eaux Superficielles
ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du Travail
BSF	Brillant de Sulfoflavine
CSHPF	Conseil Supérieur d'Hygiène Public en France
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DBO5	Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours
DCO	Demande Chimique en Oxygène
ET0	Evapotranspiration de référence
EUT	Eaux Usées Traitées
FAO	Food and Agriculture Organization
GT	Groupe de Travail
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
MES	Matière En Suspension
NOWMMA	New process for Optimizing Wastewater Reuse from Mauguio to the Mediterranean Area in support of the French Reuse Directive
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PTV	Particle Tracking Velocimetry
REUT	Réutilisation des Eaux Usées Traitées
RSDE	Recherche des Substances Dangereuses dans l'Eau
STEP	Station de Traitement des Eaux Polluées
UNESCO	United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization
US EPA	United State Environmental Protection Agency

Introduction

Dans un contexte de changements climatiques et de pressions croissantes entre les utilisations urbaine, industrielle, rurale et environnementale, les conflits liés à la ressource ne semblent que s'aggraver. Les ressources souterraines souvent de bonnes qualités et pour la plupart réservées aux usages domestiques subissent durant certaines périodes des pressions excessives. Ces dernières pouvant conduire à des interdictions d'utilisation de la ressource.

Un ensemble de règles est mis en place dans le but de préserver l'environnement des pollutions résiduelles. Une part de ces pollutions est liée aux rejets des stations d'épuration, dont le traitement et les performances dans le temps peuvent varier (vieillesse des structures, mauvaise séparation des eaux de pluie dans le cadre d'un réseau séparatif, augmentation des précipitations...). Ces pressions sont d'autant plus importantes lorsque la capacité de dilution des milieux est faible (période d'étiage). Mais ces rejets contiennent également une part importante de phosphore, d'azote, de potassium ainsi que d'autres éléments minéraux qui peuvent s'avérer utile à la vie végétale. Il apparaît donc intéressant de tenter de valoriser ces pollutions et les volumes d'eau les transportant, en l'apportant sur des plantes destinées à l'alimentation (humaine comme animale) ou non. Un effluent potentiellement dangereux dans le milieu s'avère utile pour les végétaux. (Lazarova et Brissaud, 2007)

Avec un bon encadrement des pratiques en matière de sécurité, les utilisations rurale et domestique qui peuvent être concurrentes pourraient devenir complémentaires. Les politiques de gestions des eaux usées basées sur le principe de précaution sont basées sur les différentes recommandations et guidelines (OMS, FAO) (Molle et al, 2012). Elles s'avèrent souvent très strictes du fait de l'impossibilité à l'heure actuelle avec les données existantes d'effectuer une analyse des risques exhaustive. Ainsi si le risque par ingestion est bien connu, il n'en est rien du risques par inhalation ou par voie cutanée, sauf dans le cas de la Legionelle et de quelques micropolluants, mais leurs concentrations ainsi que leurs probabilités d'apparition dans les eaux usées restent faibles.

1 Cadre de travail sur la réutilisation des eaux usées traitées

1.1 Contexte et objectifs du mémoire

1.1.1 Contexte international et français

La réutilisation des eaux usées traitées (REUT) a connu un fort développement ces dix dernières années avec une croissance entre 10 et 30% aux Etats-Unis, en Chine et en Europe. Ce taux peut même monter jusqu'à environ 40% dans un pays comme l'Australie, où le changement climatique rend les périodes de pénuries plus sévères. Mais malgré cette augmentation le volume exploité reste faible, en effet, selon une étude de 2005 (Global Water Intelligence) seulement 5% des eaux usées sont réutilisées, ce qui représente un volume de sept km³ (milliards de m³). La demande globale en eau est estimée à environ 4000km³ par an, ce qui correspond à environ 30% des ressources d'eaux renouvelables et facilement accessibles, qui sont estimées entre 10 000 et 14 000 km³ par an (UNESCO, 2003). Certains pays européens de part la faiblesse de leurs réserves en eau ont ainsi des objectifs assez ambitieux, c'est le cas de Chypre qui souhaite utiliser 100% des eaux traitées ou par exemple de l'Espagne qui aimerait satisfaire 10% des besoins en eaux de la ville de Madrid avec cette ressource. (Lazarova et Brissaud, 2007)

Avec ce développement, de nouvelles réglementations ont vu le jour. Dans le cas européen, le plan AGUA du gouvernement espagnol prévoit l'usage exclusif des eaux usées traitées pour l'irrigation des golfs. En Italie, le décret du 12 juin 2003 fixe les normes pour les REUT.

La France, n'ayant une réglementation que depuis 2010 utilise encore peu cette ressource en ce qui concerne l'irrigation des golfs et des espaces verts, bien que ce soient ces usages qui connaissent le plus fort développement dans le monde. Car d'une manière générale les besoins hydriques nationaux sont satisfaits sur l'ensemble des territoires. Néanmoins, de fortes disparités dans le temps et l'espace peuvent exister à l'échelle régionale (Climat, variation de la pluviométrie, densité de population...) comme le montre les arrêtés de restriction ou d'interdiction portant sur les prélèvements et les usages d'eaux qui sont promulgués presque chaque année.

1.1.2 Intérêts et limites de la REUT

Les projets de REUT sont soumis à des exigences vis-à-vis de la quantité mais aussi de la qualité des eaux utilisées. Sa production quasi régulière sur l'ensemble de l'année n'est pas en adéquation avec les cycles agricoles et les saisons, il faudra alors la stocker afin de correspondre aux besoins. Ensuite, sa qualité est à la fois un avantage (présence

d'azote, de phosphore, de nutriments...) mais aussi une source de risque (salinité, pathogènes...).

Les terrains de sports et les parcelles agricoles qui sont situés en proche périphérie ou au sein des zones urbaines, sont susceptibles de recevoir et de réutiliser ces eaux usées traitées, pourvu que les conditions de sécurités sanitaires soient suffisantes. Ceci crée un réel intérêt vis-à-vis de la préservation de la ressource en eau, notamment sur des territoires où les conditions météorologiques sont défavorables (cas d'une sécheresse prolongée), où la réserve est faible ou dans une zone où la pression des rejets est trop importante pour le milieu naturel. Le mode de distribution par aspersion crée également des conditions favorables à l'élimination d'une part importante des pathogènes résiduels en même temps que le risque de dispersion. Ce dernier thème est stratégique dans l'évaluation des risques potentiels de ces pratiques et n'est pas abordé par la littérature scientifique.

1.1.3 Etudes effectuées sur le sujet de la dispersion

Depuis la publication de l'arrêté du 2 août 2010 encadrant les pratiques de réutilisation des eaux usées en aspersion et à la suite d'une première expertise conduite par l'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) pour le compte de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), en collaboration avec le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), il apparaît que l'estimation du risque de création d'aérosols potentiellement contaminants reste largement perfectible.

1.1.4 Objectifs du mémoire

Les études disponibles dans la littérature scientifique sont particulièrement focalisées sur l'identification des dangers et proviennent de domaines très différents de celui de l'arrosage, il est donc intéressant de mieux documenter le sujet afin de mieux encadrer les différentes pratiques d'irrigation.

L'objectif principal de ce mémoire est de mieux cerner les risques sanitaires liés à l'irrigation d'espaces verts ou sportifs et des cultures agricoles à l'aide d'eaux usées traitées. La méthode d'aspersion sera plus particulièrement prise en compte, en effet elle peut donner lieu à la formation d'aérosols liquides potentiellement chargés en organismes pathogènes lors de l'utilisation d'eaux sortant de station d'épuration ou d'assainissement non collectif. Le but étant d'améliorer la gestion de l'aspersion d'un point de vue sanitaire que ce soit pour protéger les travailleurs ou la population en générale. Ce travail est conduit dans le cadre d'un projet d'appel d'offre EcoIndustrie, les recommandations issues de ce projet porteront sur le choix du matériel, les conditions de stockage et sur les conditions d'utilisation.

Pour ce faire la dérive et le transport des particules d'eau lors de l'aspersion ont été étudiés pour un type d'arroseur, afin de mieux appréhender les expositions. La dérive (ou volume de dérive) est le volume d'eau qui échappe, sous l'influence du vent, au périmètre mouillé en l'absence de vent, en quantité significative, c'est à dire avec une pluviométrie supérieure ou égale à 0.3 mm/h (ou 300 ml/(m².h)). Le transport (ou volume transporté) correspond au volume d'eau qui échappe au périmètre mouillé correspondant à une pluviométrie inférieure à 0.3 mm/h. Les résultats d'une étude antérieure (Molle *et al.* 2011) ont montré que la dérive était principalement le fait de gouttes de moins de 400 µm de diamètre et le transport de gouttes de moins de 150 µm de diamètre. Ensuite, l'impact de la présence de microorganismes sur l'aspersion et leur survie dans l'environnement en conditions réelles seront pris en compte à partir de la bibliographie ou dans la suite du projet.

Les problématiques sous jacentes à cet objectif sont :

- Mieux appréhender l'impact des particules et de la qualité des eaux usées sur la dispersion du jet.
- Approfondir le protocole des mesures *in-situ* pour donner les bases d'un couplage des modélisations fluides avec la caractéristique de survie d'un agent pathogène représentatif.
- Proposer des recommandations dans les projets de REUT sous la forme d'un guide technique.

1.2 Enjeux de la réutilisation des eaux usées traitées

En France, 33 km³ (milliards de m³) sont prélevés par an sur les ressources qui sont estimées à 175km³. Environ un tiers de ce volume est consommé directement (12 km³) et le reste est déversé dans l'environnement sous forme d'eaux usées. La consommation de cette ressource peut être séparée en quatre groupes les usages domestiques, l'agriculture l'industrie et les centrales énergétiques. Les usages domestiques et l'agriculture prélèvent respectivement 19% et 14% du volume total. Les prélèvements de l'industrie et des centrales électriques s'élèvent eux à 22km³ au total, mais contrairement au deux premiers la quasi-totalité du volume sera redistribué dans le milieu naturel. (Lazarova et Brissaud, 2007)

La ressource en eau en France est donc globalement bien supérieure à la demande, ce qui pourrait expliquer la faible demande de développement de la REU jusque là. Mais ce constat n'empêche pas quelques disparités de situation sur le territoire.

Bien qu'étant les plus évidentes, les difficultés d'approvisionnement en eau ne sont pas les seules motivations des projets ou perspectives de REUT. La nécessité de préserver un environnement sensible lors de périodes d'étiage contre de forts rejets peut aussi

peser. On trouve dans ce cas là les réserves naturelles, les zones de baignades, les zones conchylicoles et les cours d'eaux dégradés. Dans ce sens la REUT permettrait de préserver la qualité de ces espaces en limitant les rejets directs au milieu mais aussi en limitant les prélèvements dans les rivières ainsi que dans les nappes.

Les projets de REUT sont soumis à des exigences vis-à-vis de la quantité mais aussi de la qualité des eaux utilisées. Sa production quasi régulière sur l'ensemble de l'année n'est pas en adéquation avec les cycles agricoles et les saisons, il faudra alors la stocker afin de correspondre aux besoins. Ensuite, sa qualité est à la fois un avantage (présence d'azote, de phosphore, de nutriments...) mais aussi une source de risque (salinité, pathogènes...).

1.3 Principe de la réutilisation des eaux usées traitées

La réutilisation des eaux usées traitées est une étape s'intégrant à un processus plus large faisant appel successivement à (figure 1) :

- la collecte des eaux résiduaires ;
- leur traitement (ce dernier varie et est plus au moins avancé en fonction des stations d'épuration) ;
- leur stockage avant la réutilisation.

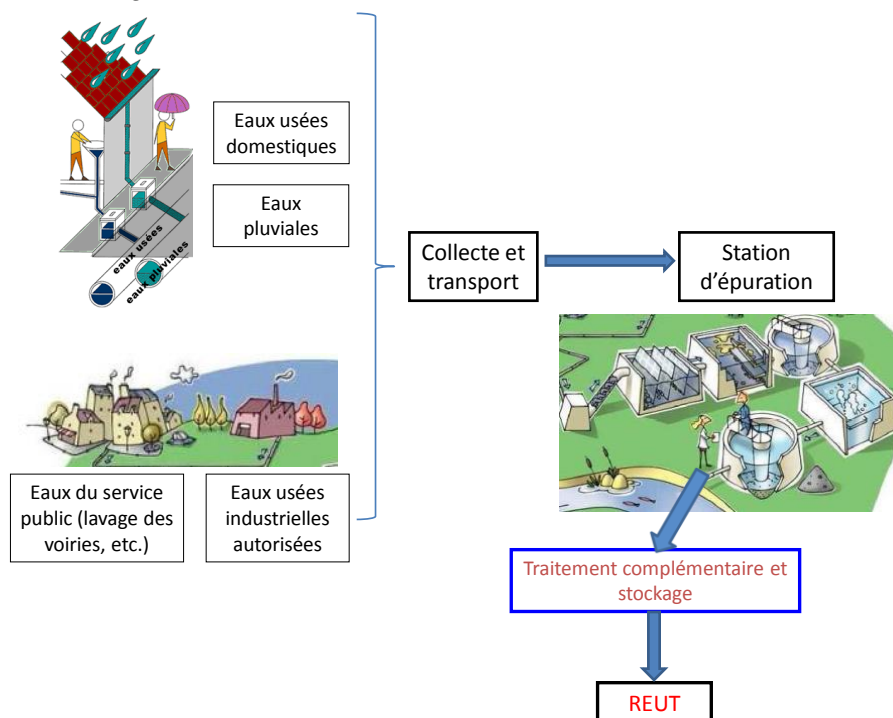


Figure 1 Schéma de l'intégration de la réutilisation des eaux usées (source ANSES)

Comme il est indiqué dans la suite les utilisations des eaux usées dépendent de leur qualité. Ainsi, des traitements assez communs dans les stations de traitement (comme les boues activées) peuvent être utilisés, mais il est aussi possible d'envisager des traitements complémentaires (coagulation physico-chimique, désinfection, filtration sur sable ou sur membrane, chloration, ultrafiltration...).

1.3.1 Usages et techniques employés

Quasiment tous les domaines relatifs aux usages de l'eau sont concernés par la REUT, seul ce qui touche aux eaux thermales et minérales constitue par contre une exception. En effet, lorsque le traitement adéquat est mis en place toute eau usée est potentiellement réutilisable. (AFD, 2011)

Dans le cas de cycle court, l'EUT passe directement du statut d'eau usée à celui de nouvelle ressource après avoir transité dans un mécanisme d'épuration, la REUT intervient dans la valorisation agricole et forestière, dans les usages urbains (irrigation d'espaces verts, lavage des voiries, alimentation de plan d'eau...), dans l'aquaculture (notamment en Inde et en Asie), dans la valorisation industrielle voire même dans certains cas à des fins d'alimentation en eaux potables (AEP) (exemple de la ville de Goulburn en Australie ou Windhoek en Namibie).

Pour ce qui est des cycles longs, sont dénommés ainsi les régimes hydrauliques où le cycle naturel de l'eau météoritique recoupe celui des eaux usées, les milieux récepteurs peuvent permettre une épuration supplémentaire en agissant comme un filtre (système géo-épuration). Ces modes de réutilisation sont parfois plus délicats car il faut être en mesure de pouvoir suivre le devenir de notre eau injectée, ce qui n'est pas forcément simple dans le cas de la recharge d'une nappe par exemple. Dans ce type de recharge plusieurs objectifs sont poursuivis:

- La restauration d'une ressource surexploitée et dont le rabattement est préjudiciable;
- la protection des aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée;
- l'amélioration du traitement grâce au pouvoir d'autoépuration des sols;
- la protection de l'environnement en évitant de rejeter des effluents dans des cours d'eau sensibles.

La sauvegarde et la valorisation du patrimoine environnemental peuvent aussi être obtenues grâce à l'utilisation d'EUT, c'est le cas lors du soutien d'étiage et de l'alimentation de zones humides.

Néanmoins, seulement deux usages majoritaires peuvent être distingués pour cette ressource, du fait des besoins quantitatifs et des intérêts réciproques entre producteurs d'eaux usées et utilisateurs d'eau, ce sont l'irrigation des parcelles agricoles et l'arrosage des espaces verts ainsi que le lavage des voiries, qui apparaissent comme les utilisations les plus simples.

Les sites concernés sont multiples, pour l'irrigation des cultures l'ensemble des sites, dans le périmètre proche des STEP, utilisant des techniques d'aspersion est concerné. Pour l'arrosage des espaces verts les sites sont encore plus nombreux il peut s'agir d'espace sportifs (notamment les golfs), de parcs, d'établissements sensibles recevant du public, de massifs ornementaux...

1.3.2 Les différents types d'irrigations

Selon l'article 2 de l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts, les différents types d'irrigation (figure 2) sont définis comme suit :

- Irrigation gravitaire : L'eau est fournie aux plantes par remplissage de petits bassins, par planches ou par calans, par des rigoles, canaux ou raies d'irrigation ;
- Irrigation localisée :
 - a) Souterraine : l'eau est fournie par l'intermédiaire de tuyaux perforés, de goutteurs de micro-irrigation ou de drains enterrés ;
 - b) De surface : l'eau est distribuée au moyen de goutteurs ou de rampes perforées au voisinage de la plante.
- Irrigation par aspersion : l'eau est fournie aux plantes sous forme de pluie artificielle grâce à l'utilisation d'organes d'arrosage ou d'asperseurs alimentés en eau sous pression.

L'irrigation gravitaire consiste donc à distribuer l'eau à partir d'un canal dans lequel l'écoulement se fait de manière gravitaire et à répartir cette eau à partir d'organes spécifiques. La ressource pourra s'infiltrer grâce à la réduction de sa vitesse d'écoulement due à la présence de bassins ou de rigoles. Ce type d'irrigation, le plus répandu dans le monde est sommaire, en général peu performant en termes d'uniformité de distribution.

L'irrigation localisée est un terme générique permettant d'englober toutes les techniques qui apporterait l'eau directement au pied des plantes avec un faible débit mais de manière continue (gouttes ou jets de très faible pression). Cette méthode est théoriquement la plus efficace, mais elle pose des problèmes assez complexes de maintenance pour assurer des performances de distribution élevée durablement.

L'irrigation par aspersion est une méthode d'irrigation permettant d'apporter l'eau sous forme de pluie plus ou moins intense. L'eau est donc amenée sous pression jusqu'à l'organe d'aspersion dans des canalisations de surface ou enterrées. Cette technique d'irrigation doit apporter une lame d'eau homogène sur l'ensemble de la surface arrosée à partir de points discrets. Elle est donc adaptée à tous les types de cultures et d'usages. Un asperseur projette de manière circulaire ou semi-circulaire l'eau sous forme de pluie. Il est défini par son débit, la taille de la buse, la pression, et le rayon du périmètre mouillé. La pression, la forme de la buse et la forme du corps de l'asperseur sont les paramètres déterminants de la granulométrie de distribution qui est responsable de la sensibilité de l'arrosage à l'action des paramètres météorologiques (vent, évaporation, humidité relative, rayonnement...). C'est principalement le vent qui va conditionner la dérive au-delà du périmètre mouillé et le transport de particule sur de plus grandes distances.



Canon d'irrigation



Turbine



Sprinkler à batteur



Micro sprinkler



Diffuseur



Micro jet ou micro spray

Figure 2 Présentation des principaux organes d'irrigation par aspersion (source Irstea)

Du fait de l'utilisation d'une eau sous pression et de la dispersion en gouttes il existe une possibilité de création d'aérosols pouvant se déplacer sur des distances importantes, seule la méthode d'irrigation par aspersion sera prise en compte dans le cadre de ce mémoire. Ce sont plus particulièrement les aérosols qui vont être étudiés dans ce dernier.

1.3.3 Réglementation relative à la REUT par aspersion

1.3.3.1 Réglementation française

C'est en 1990 que les premières recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) sont proposées comme préalable à la réglementation. Ces dernières concernent l'arrosage et l'irrigation et sont inspirées des recommandations de l'OMS de 1989, il s'agit à l'époque de développer cette réutilisation sans induire de risques pour la santé publique ainsi que pour l'environnement. De nombreuses exigences y sont évoquées : Distance de 100 m entre les arroseurs et les habitations, plantation d'un rideau d'arbre, utilisation d'asperseurs à courte portée, aspersion en dehors des heures d'ouverture au public...

Ensuite, deux circulaires sont publiées (22 juillet 1991 circulaire DGS/SD1.D/91 N°51, 3 août 1992 circulaire DGS/SD1.D/92 N°42) préconisant d'employer les recommandations du CSHPF de 1991 en matière de REUT pour l'irrigation des cultures et des espaces verts. Les deux points principaux étant :

- Supprimer ou réduire fortement les possibilités de contacts entre les populations et l'eau mais aussi les risques de contaminations alimentaires ;
- Limiter la dispersion des effluents.

En 2001 ces recommandations ont été révisées et un projet d'arrêté a vu le jour. Ce dernier fixant d'un point de vue sanitaire les aspects techniques et de surveillance de l'utilisation d'eaux usées traitées pour l'irrigation d'espaces verts ou de cultures.

En décembre 2008, L'agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa) a rendu son avis sur ce projet d'arrêté dans son rapport « Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation ». Du fait des champs de compétences respectifs de l'Afssa et de l'agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset), l'avis de l'Afssa porte sur les risques sanitaires pour l'Homme et les animaux, liés à une exposition par voie orale et n'inclut pas les risques sanitaires pour l'Homme liés à l'exposition par voie respiratoire ou cutanéomuqueuse. L'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage des espaces verts (pour lesquels il n'est pas identifié de risque sanitaire par ingestion), les dangers que peut présenter cette pratique pour les riverains ou les professionnels (notamment par l'aspersion), qui relèvent du champ de compétences de l'Afsset, sont exclus du rapport de l'Afssa. Ces aspects ont été traité dans le rapport « réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries » de 2012 de l'ANSES.

Aujourd'hui la REUT est régie par l'Arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. Ce dernier fixe les prescriptions sanitaires et techniques applicables à l'utilisation d'eaux usées traitées à des fins d'irrigation de cultures ou d'espaces verts (L'irrigation désigne ici l'apport artificiel en eau). Tout cela afin de garantir la protection de la santé publique, de la santé animale ainsi que la protection sanitaire des productions agricoles.

L'arrêté fixe différents critères :

- Sur la classification des qualités des eaux ;
- Sur l'origine des eaux usées, qui sont celles de stations d'épurations ou d'installations d'assainissement non collectif mentionnées respectivement au II et III de l'article L.2224-8 du code générale des collectivités territoriales. La charge brute de la pollution organique doit également être supérieure à 1.2 kg de DBO5 par jour, ce qui exclut de fait les installations d'assainissement individuelles;

- Sur les prescriptions techniques. L'irrigation de cultures ou d'espaces verts doit respecter en fonction de la qualité sanitaire des eaux des contraintes d'usages, de terrains et de distances. Les conditions de stockage des eaux usées traitées ne doivent pas favoriser le développement d'agents pathogènes ;
- La création et le suivi des REUT (dépôt de dossier, programme d'irrigation, programme de surveillance des eaux traitées et des sols au droit de l'irrigation).

Toute autorisation d'utilisation de cette ressource par aspersion peut être permise à titre expérimental par arrêté préfectoral et après avis favorable de l'ANSES. L'avis est rendu dans un délai ne devant pas dépasser six mois à compter de la date de réception du dossier de demande d'expérimentation. Ce dernier comporte notamment les résultats de suivi de la qualité des eaux usées traitées portés sur une aspersion à échelle réduite et sur un terrain n'exposant pas le public. L'équipement utilisé doit émettre la plus faible proportion possible d'aérosols et être placé le plus bas possible par rapport au sol et à la culture afin de limiter les expositions.

Les annexes I et II de l'arrêté du 2 août 2010 définissent quatre niveaux de qualité sanitaire des eaux usées traitées (A, B, C et D). A ces dernières sont associés des contraintes d'usage, de terrains et de distances.

- Niveaux de qualité sanitaire et fréquence de surveillance des eaux usées traitées (tableaux 1 et 2) ;
- Contraintes d'usages (Tableau 3) (On peut noter que l'irrigation avec des eaux usées traitées est interdite lors de la présence de public sur les sites comme les espaces verts, les forêts, les golfs...) ;
- Contraintes de distances (tableau 4) ;
- Contraintes de terrains. Pour ceux dont la pente est supérieure à 7% seule l'irrigation localisée est autorisée. L'irrigation par des eaux usées traitées de terrains saturés en haut est également interdite afin de limiter tous risques de ruissellement. En terrains karstiques, l'irrigation est possible avec des eaux de qualité A ou B, en outre la limite de pente passe de 7% à 3% pour ces derniers.

Tableau 1 Niveaux de qualité sanitaire des eaux usées traitées (source www.legifrance.gouv.fr)

Paramètre	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées			
	A	B	C	D
Matière en suspension (mg/l)	< 15	Conforme à la réglementation des rejets d'eaux usées traitées pour l'exutoire de la station hors période d'irrigation.		
Demande chimique en oxygène (mg/l)	< 60			
Entérocoques fécaux (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Phages ARN F-spécifiques (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
<i>E. Coli</i> (UFC/100mL)	≤ 250	≤ 10 000	≤ 100 000	-

Tableau 2 Fréquence de surveillance des eaux usées traitées (source www.legifrance.gouv.fr)

Usage requérant à minima une eau de qualité sanitaire	Fréquence d'analyse	Valeur limite à respecter en <i>E.coli</i> (UFC/100mL)
A	1 par semaine	≤ 250
B	1 tous les 15 jours	≤ 10 000
C et D	1 par mois	≤ 100 000

Tableau 3 Contraintes d'usages (source www.legifrance.gouv.fr)

Type d'usage	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées			
	A	B	C	D
Cultures maraîchères, fruitières et légumières non transformées	+	-	-	-
Cultures maraîchères, fruitières et légumières transformées	+	+	-	-
Pâturages	+	+ ⁽¹⁾	-	-
Espaces verts et forêts ouverts au public (notamment golfs)	+ ⁽²⁾	-	-	-
Fleurs vendues coupées	+	+	-	-
Autres cultures florales	+	+	+ ⁽³⁾	-
Pépinières et arbustes	+	+	+ ⁽³⁾	-
Fourrages frais	+	+	+ ⁽³⁾	-
Autres cultures céréalières et fourragères	+	+ ⁽¹⁾	-	-
Arboricultures fruitières	+	+	+ ⁽³⁾	-
Forêt d'exploitation avec accès contrôlé du public	+	+	+ ⁽³⁾	+ ⁽³⁾

+ : autorisée, - : interdite

- (1) Sous réserve du respect d'un délai après irrigation de 10 jours en l'absence d'abattoir relié à la STEP et de 30 jours dans le cas contraire.
 (2) Irrigation en dehors des heures d'ouverture au public.
 (3) Uniquement par irrigation localisée, telle que définie à l'article 2 du présent arrêté.¹

Tableau 4 Distances de sécurité (source source www.legifrance.gouv.fr)

Nature des activités à protéger	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées		
	A	B	C et D
Plan d'eau ⁽¹⁾	20m	50m	100m
Bassin aquacole (à l'exception des coquillages filtreurs) Pisciculture y compris pêche de loisir	20m	50m	100m
Conchyliculture Pêche à pied des coquillages filtreurs	50m	200m	300m
Baignades et activités nautiques	50m	100m	200m
Abreuvement du bétail	50m	100m	200m

(1) A l'exception du plan d'eau servant d'exutoire au rejet de la station d'épuration et des plans d'eau privés où l'accès est réglementé et où aucune activité telle que baignade, sport nautique et aquatique, pêche ou abreuvement du bétail n'est pratiquée.

Cette réglementation, évaluée dans le rapport de l'ANSES est en cours de révision. Une première version a circulé entre les différents experts du domaine et devrait être publiée fin 2012.

1.3.3.2 Réglementation existant à l'étranger.

Il existe afin de garantir la protection de la santé humaine ainsi que de l'environnement des recommandations sur les usages des eaux usées qui ont été émises par des organismes étrangers (principalement l'US EPA, et l'Australian EPA) et international (OMS, FAO).

Ces recommandations sont essentiellement basées sur des objectifs en terme de qualité des EUT (physico-chimiques et microbiologiques). Ces dernières portent sur les moyens de traitement et sur les mesures préventives *in-situ* (contraintes vis-à-vis du type d'irrigation, distances de sécurité, conditions météorologiques, matériels...).

Dans le cas de la qualité physico-chimique des EUT, du fait du manque de connaissances, aucune substance indicatrice spécifique n'est proposée. Ce dernier est donc pris en compte au travers des indicateurs classiques (DBO5, turbidité, MES...).

Dans le cas de la qualité microbiologique des EUT, celle-ci est assurée par l'évaluation d'indicateurs conventionnels de contamination fécale (coliforme fécaux, *E. coli*) avec des valeurs différentes en fonction des organismes.

Les recommandations de l'OMS, l'US EPA et l'australien EPA concernant les aspects physico-chimique, chimique et microbiologique pour les usages urbain et agricole sont présentées en annexe XX. Il est également possible de noter que seul l'US EPA traite des risques microbiologiques liés à l'aspersion. Cet organisme est le seul à préconiser une dose de chlore résiduel. Il indique également que même si les études indiquent un risque faible, les expositions doivent être limitées en attendant une étude des risques sanitaires complète. ainsi que les réglementations de deux de leurs états (Californie et South

Australia) et de six pays (Chypre, Espagne, Italie, Israël, Japon et Jordanie) concernant la réutilisation par aspersion pour des usages agricoles ou urbains sont précisés en Annexe1).

2 Etat des connaissances sur les risques liés à la REUT par aspersion

Le but de l'aspersion est de générer à partir d'une source ponctuelle un nuage de particules afin d'apporter une lame d'eau régulière sur une surface prédéfinie. Cette méthode est très souvent utilisée pour l'irrigation des cultures ainsi que pour l'arrosage de différents types d'espaces verts. De part son fonctionnement ce type d'arrosage crée des particules d'eau de tailles très différentes, ces dernières n'auront donc pas le même comportement sur le plan physique. En effet, selon leurs diamètres les particules restent longtemps en suspension dans l'air (taille < 100 µm) ou alors elles sédimenteront rapidement (Dowd et Maier, 2010). Toutes les particules pourront d'un point de vue sanitaire être susceptibles de se déposer sur la peau et les muqueuses alors que seules les plus petites pourraient atteindre les voies aériennes supérieures ou inférieures. Pour rappel, les microgouttelettes respirables pouvant atteindre les voies respiratoires basses sont celles ayant un diamètre inférieur à 10 µm, alors que celles dont la taille est comprise entre 10 µm et 100 µm n'atteindront que les voies respiratoires hautes.

Dans la mesure où notre ressource en eau est chargée en contaminants chimiques et biologiques il est donc important d'analyser les risques pour l'Homme liés à ces pratiques d'aspersion au travers d'une évaluation de la quantité d'eau pouvant être transportée loin du point d'émission.

2.1 Evaluation de la dérive et du transport lors de l'irrigation par aspersion

Un jet d'aspersion génère un arrosage sous forme de pluie par érosion progressive au cours de son trajet dans l'air. C'est la différence de vitesse entre le jet et l'air environnant qui gouverne la rapidité de la dispersion. Les gouttes produites sont de tailles variables comme indiqué sur la figure. Hendawi (2006) a mis en évidence que la taille des particules d'eau pouvant s'évaporer lors de l'aspersion pouvait aller jusqu'à 150 µm dans des conditions climatiques très favorables pour ce phénomène (température élevée, humidité faible, fort rayonnement...). Il a aussi démontré que les particules les plus sensibles à la dérive étaient celles d'un diamètre inférieur à 400 µm.

Partant de ces constats Molle et *al.* (2010) ont étudié 7 modèles d'arroseurs représentatifs des différentes catégories présentes sur le marché, d'un débit compris entre 50L/h à 50m³/h et d'une portée comprise entre 2 et 50m. A partir de ces informations un bilan des volumes concernés par les différents types de gouttes (0-150µm; 150-400µm; >400µm) et les estimations des dérives pour un vent de 4m/s ont été effectués. Le volume des

gouttes sensibles à l'évaporation donne une indication sur le risque de création d'aérosols alors que le volume des gouttes sensibles à la dérive lui donne une idée des volumes pouvant sortir de la zone cibles. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- La sédimentation est le phénomène intervenant pour la grande majorité du volume lors de l'irrigation, il représente au minimum sur les sept arroseurs utilisés 97.5% des volumes mis en jeu. Les asperseurs produisent donc très peu de particules susceptibles de s'aérosoliser ;
- La dérive (déplacement du périmètre mouillé) ne dépasse pas les 20% de la portée pour les arroseurs irrigant à plus de 20m et 40% pour les autres dans des conditions de vent extrêmes pour l'arrosage;
- Le volume susceptible d'être transporté est faible, quelques centaines de ml/h/m² selon les modèles. Leur production dépend du débit, de la pression et du type d'asperseur ainsi que de la forme de la buse.

2.2 Etat des connaissances sur l'évaluation des risques sanitaires liés à la REUT

Les différents résultats précédents sur l'aspersion ont été pris en compte comme hypothèses de travail du groupe de l'ANSES dans l'évaluation des risques sanitaires liés à l'irrigation avec des eaux usées traitées par contact direct. C'est-à-dire qu'une particule d'eau de taille inférieure à 150 µm a été retenue comme valeur seuil pour l'évaluation des risques sanitaires (ERS). Cette taille de particule est donc retenue pour caractériser une exposition possible par inhalation, pour la voie cutanée toutes les tailles de particules ont été considérées.

2.2.1 Evaluation des risques sanitaires liés aux agents chimiques

Dans un premier temps la composition des eaux usées traitées a été recherchée. Les eaux résiduaires véhiculent trois grands types de pollution : la pollution carbonée, la pollution azotée et la pollution phosphorée. Mais l'eau peut aussi contenir certains micropolluants, cela va directement dépendre de la nature des activités pesant sur le bassin versant.

La sélection des micropolluants a été faite après l'étude de l'action de recherche et de réduction des substances dangereuses pour le milieu aquatique (RSDE 1) et du programme de recherche sur l'analyse des micropolluants prioritaires et émergents dans les rejets et les eaux superficielles (AMPERES). Cette dernière est très difficile à mettre en œuvre du fait de la grande diversité de ces substances, de la diversité des traitements dans les systèmes d'assainissement et du manque de données. Dans le cadre du rapport

de l'ANSES les substances sélectionnées sont celles répondant aux critères suivants (Annexe 2) :

- Les substances quantifiées dans les études RSDE 1 et AMPERES sont retenues de manière prioritaire ;
- Les substances sont toxiques pour l'Homme et possèdent des valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour la voie respiratoire et cutanée;
- La substance n'est pas fortement volatile (Constante de Henry $< 1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ ou pression de vapeur $< 100 \text{ Pa}$ s'il n'existe pas de constante de Henry).

L'ERS a été faite dans le cadre d'un scénario du pire cas et sur trois types de populations différentes exposés à la REUT par aspersion : travailleurs, passants et résidents. Pour ces catégories seule la voie par inhalation a été prise en compte à cause d'un manque de donnée pour la voie cutanée. Mais l'objectif de l'aspersion étant d'apporter de l'eau à la plante et au sol et non de créer des gouttelettes susceptibles d'être inhalées du fait des faibles durées d'arrosage, la voie cutanée apparaît comme la voie d'exposition principale.

Pour les substances choisies et pour les populations exposées par voie respiratoire, les résultats montrent, sauf pollution accidentelle ou ponctuelle, que ces dernières ne devraient pas se retrouver dans les EUT traitées à des concentrations pouvant induire un effet néfaste pour la santé des populations.

2.2.2 Evaluation des risques sanitaires liés aux micro-organismes

Toutes les stations d'épuration ne sont pas conçues pour faire diminuer la pollution microbiologique des eaux usées. Les organismes présents dans les eaux résiduaires sont donc susceptibles de se retrouver en sortie de station et donc d'être présents lors de l'aspersion en cas de réutilisation.

Comme pour la pollution chimique, la saisine de l'ANSES ne concerne que l'exposition directe lors de l'aspersion. Afin d'obtenir un panel de micro-organismes présents dans les EUT et induisant un risque sur la santé humaine, des recherches bibliographiques ont été effectuées. En ce qui concerne la voie respiratoire des études faites sur la présence d'agent pathogènes dans les aérosols d'EUT (Altmeyer et *al.* , 1990 ; rapport de l'institut du Québec, 2008 ; Carducci et *al.* , 2000) puis sur les organismes présents dans les STEP ont été étudiées. De nombreux micro-organismes tels des bactéries, des virus, des vers, des protozoaires et des champignons sont présents mais aucunes études n'a montré la présence de protozoaires ou d'helminthes dans les aérosols d'EUT (Annexe 3).

De nos jours les effets sanitaires liés à la REUT par aspersion sont encore mal connus. Peu d'études épidémiologiques existent sur le sujet. Fattal *et al.* ont montré, à partir d'une étude de 11 kibbutz utilisant de l'eau partiellement traitée en alternance avec d'autres ressources pour l'irrigation, un excès de risque de maladies entériques chez les jeunes

enfants (0-4 ans). Shuval *et al.* ont également travaillé sur 20 kibbutz, mais ils n'ont pas démontré d'excès de risques de maladie entérique chez des travailleurs et leur famille exposés à des aérosols d'eaux usées partiellement traitées. Une seule étude française existe sur la REUT par aspersion (Devaux *et al.*, 2001), cette dernière cumule la surveillance sanitaire de la population (séparée en deux groupes : les exposés correspondant aux exploitants et employés agricoles et les non exposés afin d'effectuer des comparaisons) avec le contrôle de la qualité des eaux utilisées. Aucun événement épidémique particulier n'a été révélé et le suivi des exploitants et des salariés agricoles n'a pas montré de problème de santé particulier et ce sur quatre années.

Ce résultat est certes rassurant mais le manque d'information est donc à compléter, il est possible de s'appuyer sur l'épidémiologie mieux connue liée aux aérosols dans les STEP. Le groupe de l'ANSES évoque les symptômes observés chez les travailleurs des STEP :

- Fatigue ;
- Maux de tête ;
- Fièvre ;
- Nausées ;
- Symptômes gastro-intestinaux ;
- Symptômes respiratoires ;
- Problèmes oculaires et cutanés.

Néanmoins, les origines de ces symptômes sont assez difficiles à retracer en raison de la multiplication des expositions. Il est donc difficile d'associer un symptôme à une source en particulier.

Aujourd'hui, en raison d'un manque d'information sur les microorganismes aéroportés (sur la détection, l'estimation des valeurs doses réponses, la survie dans le milieu aérien) il est très difficile d'estimer les risques liés à la REUT par aspersion sur la base de données scientifiques fiables. Il a donc été identifié une série de dangers à partir de la littérature sans présumer des capacités du mode de distribution à abattre les contaminations par les micro-organismes (exposition aux UV, à l'oxygène, passage d'un milieu aqueux à sec).

2.2.3 Conclusion

Les principaux dangers liés à la REUT sont d'origines microbiologique et chimique. Le rapport de l'ANSES réalisé en 2011 ne montre pas de risque sanitaire dans ses scénarii. Mais seulement 10 substances ont été étudiées. En ce qui concerne les risques liés aux agents pathogènes microbiologiques, le groupe de travail (GT) n'a pas pu réaliser d'ERS. Il s'est par conséquent arrêté à l'identification des dangers.

Les conclusions du groupe relèvent un besoin de limiter l'exposition au travers de la qualité de l'eau (qualité initiale, stockage, transport, surveillance), des pratiques

(conception et gestion des réseaux, maîtrise de la dérive en aspersion, distances de sécurité), de l'information sur le risque d'exposition (restriction d'accès au public, mesures de préventions pour les professionnels).

Une nouvelle version de l'arrêté intégrant ces conclusions est en cours de préparation pour une parution probable à la fin de l'année 2012 avec en perspective une simplification de la procédure de demande d'autorisation.

Même si les expériences sur le long terme connues en France (étude épidémiologique à Clermont Ferrand, golf de Royan et dans le monde (Australie, Israël...)) n'ont pas donné lieu à des problèmes répertoriés, il reste à améliorer la surveillance autour des sites de REUT, caractériser plus finement le risque aérosol tant du point de vu qualitatif que quantitatif en fonction des pathogènes présent, et au-delà mieux comprendre la dégradation des polluants présents dans les effluents par les sols ou lors de leur distribution.

2.3 Méthodes d'échantillonnage de l'air

Il existe quatre techniques différentes d'échantillonnage statique de microorganismes en suspension dans l'air. Toutes font appel à des méthodes différentes, l'une d'elles est passive, la sédimentation, alors que les trois autres nécessitent une aspiration d'air à l'aide d'une pompe : l'impaction sur une surface solide, le barbotage dans un liquide et la filtration. L'association française de normalisation a défini une norme à ce sujet (AFNOR, EN 13098-2000), à laquelle il est possible de se référer même si elle a surtout été établie pour évaluer l'exposition sur les lieux de travail (Deloraine, 2002).

2.3.1 Echantillonnage par sédimentation

La sédimentation consiste à exposer un milieu nutritif (généralement dans une boîte de Pétri) à l'air ambiant pour une durée fixée arbitrairement. Cette méthode apparait peu représentative de manière qualitative étant donné que le dépôt des particules dépend de nombreux facteurs (poids des particules, flux d'air, interactions électrostatiques) et qu'il n'existe pas de spécificité vis-à-vis des germes collectés. Des limites existent aussi sur l'aspect quantitatif, en effet, il n'y a pas de lien entre le nombre d'organismes de l'air et ceux collectés sur la boîte de Pétri. Tous ces éléments font de la sédimentation une méthode contestée dans de nombreux cas, bien qu'elle soit facile à mettre en place et ne correspond pas à un gros investissement (Grandguillot, mémoire EHESP, 2004).

2.3.2 Méthode d'échantillonnage par impaction

L'impaction consiste à imposer à une particule une vitesse de dérive suffisante afin de l'éloigner de sa trajectoire et la recueillir dans ou sur un milieu liquide ou solide. Ces

systèmes peuvent donc permettre de séparer des particules de tailles différentes présentes dans un milieu gazeux.

- Impaction sur milieu solide

Comme dit précédemment la méthode consiste à interposer un support solide de collecte (milieu de culture) sur le trajet de l'air aspiré par la pompe. Les supports peuvent être directement cultivés et le nombre de colonies dénombré par la suite (Deloraine, 2002).

Dans ce cas l'échantillonneur est un biocollecteur avec une entrée de forme et de taille variables. Ensuite, il existe trois approches différentes : l'impaction directe, l'impaction à fente (Grenier, 1995) et l'impaction centrifuge (Ambroise, thèse université Nancy, 2003).

Dans le premier cas une boîte de Pétri contenant une substance nutritive est placée directement sur le chemin du flux d'air, sous une grille d'aspiration dont les caractéristiques détermineront l'efficacité de l'échantillonnage. La grille permet en effet de sélectionner les particules en fonction de leurs diamètres aérodynamique. En utilisant plusieurs étages il est donc possible de trier par ordre décroissant les particules (« appareils d'Andersen »). Ce qui peut représenter par exemple le dépôt sélectif aux différents niveaux de l'arbre bronchique.

Dans le deuxième cas, le support du milieu de culture tourne sous une ou plusieurs fentes d'aspiration afin d'avoir une répartition homogène des particules sur la gélose. La répartition est donc induite par la surface des fentes et la vitesse de rotation du milieu. Certains de ces appareils peuvent recueillir un très fort débit d'air (jusqu'à 700 L/min), ce qui permet de recueillir des volumes d'air importants pour un temps réduit (de l'ordre de quelques minutes).

Enfin, dans le dernier cas la force centrifuge permet l'homogénéisation des bactéries sur le support. Pour se faire, un rotor au centre projette les particules du flux d'air aspiré sur le support de collecte constitué de bandelettes souples de gélose.

Le principal inconvénient de l'impaction sur un milieu solide réside dans le choc et le dessèchement subi par la bactérie, ce qui peut la fragiliser ou créer un stress. Bien que ces appareils aient subi de nombreuses modifications au cours du temps et que leur utilisation reste simple elle reste limitée. En effet, dans le cas d'une forte concentration en particules, les milieux récepteurs sont vite saturés ce qui rend difficile le dénombrement (Eduard et al., 1990). La faible précision de cette méthode ainsi que la nécessité d'un temps d'échantillonnage court sont énoncés dans les limites mises en avant par la norme AFNOR. Mais d'un autre côté le niveau de détection est faible, ce qui permet d'utiliser cette méthode pour des atmosphères peu chargées en microorganismes.

- Impaction sur milieu liquide

Ce type d'impaction aussi appelé barbotage consiste à faire passer l'air aspiré dans un milieu liquide, qui peut être de l'eau ou tout autre liquide proche physiquement, comme du sérum physiologique, un tampon phosphaté ou directement une solution nutritive. L'air aspiré passe par un verre frité dont la porosité permet d'obtenir de petites bulles dans le liquide. Cette technique de prélèvement des aérosols a été améliorée par l'utilisation du principe d'inertie des particules, on parle dans ce cas de biocollecteur par impingement ou d'impingers (Xuejun et al, 2000). Cet outil est très répandu dans la mesure des bioaérosols (Droguet, 2000), en effet une plus grande quantité de microorganismes peut être échantillonnée par rapport à l'impaction sur milieu solide. Un autre avantage correspond à la possibilité d'effectuer un grand nombre d'analyses variées sur les échantillons (analyses chimiques, biologiques, immunologiques et moléculaires).

Le principe de fonctionnement de l'impaction sur milieu liquide peut être responsable d'une perte de liquide, que ce soit par évaporation ou entrainement de gouttelettes dans le flux d'air. Pour un des barboteurs le plus commun (AGI 30) il a été démontré une perte d'efficacité au bout d'une heure d'échantillonnage à cause de l'évaporation du milieu et de la réaérosolisation (Lin et al 1997). Afin de limiter ces pertes le principe de la centrifugation (c'est-à-dire que l'air chargé en particules aspiré par la pompe pénètre tangentiellement aux parois) a été mis en œuvre dans les modèles les plus récents afin de limiter la taille des bulles. Les avantages sont de prolonger la durée de prélèvement jusqu'à plusieurs heures, d'améliorer l'efficacité de ce dernier, de limiter l'évaporation, d'utiliser d'autres liquides plus visqueux comme le glycérol et de limiter le stress subi par les microorganismes. Tout ceci permettant d'augmenter le taux de microorganismes viables. Ce type d'appareil est nommé « Biosampler ».

L'efficacité de cette méthode est réduite pour les prélèvements de fines particules, mais d'un autre côté elle permet des prélèvements dans des atmosphères très contaminées car il est possible après le prélèvement de procéder à des dilutions.

2.3.3 Echantillonnage par filtration

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un filtre de type membranaire ou fibreux exposé à l'air. La porosité de ce dernier est choisie de manière à recueillir les particules viables. Les membranes peuvent être fabriquées dans différents matériaux : de la gélatine, de la cellulose ou du polycarbonate pour les lectures directes en microscopie. Dans le cas d'une analyse, les filtres peuvent être placés sur un milieu de culture ou lavés dans un milieu liquide afin de réaliser un examen des microorganismes dans la solution de lavage. Ceci constitue donc un avantage majeur pour cette méthode puisqu'elle permet

d'envisager plusieurs types d'analyses pour un même échantillon. D'un autre côté elle est peu adaptée dans le cas de faibles concentrations (Deloraine, 2002).

Les prélèvements peuvent se faire via des appareils spécifiques à l'échantillonnage des aérosols ou il est possible d'utiliser des pompes d'aspirations reliées à des cassettes servant de support aux filtres. L'utilisation de ces appareillages est assez simple et le coût reste faible. Cependant les filtres peuvent être fragiles (gélatine) ce qui entraîne des difficultés en atmosphère humide (>75%). Cette technique peut également stresser les microorganismes en les asséchant.

2.3.4 Comparaison des méthodes d'échantillonnages

Après avoir présenté les différentes méthodes d'échantillonnage, il est possible de ne retenir que deux d'entre elles, qui sont l'impaction et la filtration, les autres n'étant que très peu employées pour la métrologie des bioaérosols. Pour l'ensemble de ces techniques, la norme AFNOR ne précise pas le type d'appareil à utiliser mais elle préconise d'utiliser des méthodes d'échantillonnage connues et documentées. De la même manière pour les pompes, celles-ci doivent satisfaire aux normes sur les pompes d'échantillonnage individuel et à poste fixe (EN1232, EN12919).

Dans les études précédentes, le all-glass impinger (AGI-30) et le BioSampler ont obtenu un plus haut taux de recouvrement des *L.pneumophila* que les échantillonneurs du type filtration ou impaction (Deloge-Abarkan *et al.*, 2007 ; Li *et al.*, 2003). Les échantillonneurs marchant sur le principe de l'impaction sur milieu liquide sont très communément utilisés sur le terrain pour capturer les légionelles atmosphériques (Blatny *et al.*, 2008 ; Pascual *et al.*, 2001). D'autres paramètres peuvent également avoir une influence sur le taux de recouvrement, c'est le cas de la durée d'échantillonnage (Rule *et al.* 2007) et du choix du liquide de collection (Ishimatsu *et al.* 2001). En termes d'échantillonneur, le AGI-30 et le BioSampler ont une meilleure performance pour la collection de bioaérosols que le MAS-100 (dispositif de filtration) (Ching-Weng Chang *et Fang-Chen Chou*, 2011).

Finalement, après l'étude des échantillonnages de bioaérosols (notamment des légionelles), les méthodes par sédimentation et par impaction sur milieu liquide semblent les plus adaptées à notre problématique. En effet, la méthode par sédimentation du fait de sa facilité de mise en place permettrait en plaçant un grand nombre de boîte de Pétri et de fils PVC de caractériser les volumes transportés. L'utilisation d'un système d'impaction en milieu liquide serait judicieuse du fait de sa représentativité et du non recours à une mise en culture.

3 Méthodologie d'approche pratique de l'estimation des volumes dérivés et transportés lors de l'aspersion.

La mesure d'un spectre de goutte à partir d'une taille de 5µm (ce qui correspond à la taille des gouttes potentiellement dangereuses pouvant être inhalées par l'être humain) à l'aide de la PTV (dispositif permettant de caractériser la taille et la vitesse des gouttes en vol) s'étant révélée à la fois compliquée et risquée pour le matériel, une série de mesures de transport en conditions de plein champ en préparation aux mesures effectuées avec un ensemencement bactérien a été mise en œuvre. L'objectif est d'appréhender l'exposition potentielle des travailleurs et des populations riveraines aux aérosols. Le protocole s'inspire de méthodes classiquement utilisées pour les mesures de transport ou de dépôt en pulvérisation agricole de pesticides.

3.1 Présentation du modèle expérimental

3.1.1 Protocole de mesure de la BSF

Afin de pouvoir estimer les volumes collectés un traceur fluorescent, Brillant de Sulfoflavine (BSF), a été ajouté à l'eau lors des essais. Il s'agit d'un colorant alimentaire dont le seuil de détection varie entre 1 et 10 µg/L selon le colorimètre. Le traceur BSF est mis dans la cuve d'alimentation à une concentration de 0.5g/L, un retour à la cuve permet de maintenir la suspension homogène et de régler la pression de sortie pour la maintenir constante tout au long de l'essai. Le traceur tend à se dégrader avec le temps en fonction de la température et de la lumière, les échantillons sont donc prélevés immédiatement après la fin du test et stockés à l'abri de la lumière et de la chaleur. Les dilutions sont effectuées dans les 48h qui suivent la mesure.

Avant chaque analyse, il est indispensable d'établir une courbe étalon à partir de la solution mère de la cuve (ici à 0.5g/L). Sa création est importante dans le sens où elle va permettre de relier la concentration du traceur à l'intensité fluorescente captée sous une excitation lumineuse de 450nm. Même si la solution est bien agitée et que la quantité introduite en BSF est précise, il reste de nombreuses sources d'incertitude sur la concentration réelle dans la cuve. Afin d'y pallier une courbe étalon est également réalisée au laboratoire.

3.1.2 Protocole au champ

Les mesures ont été effectuées, à Salon de Provence, sur une parcelle d'environ 4ha exempte d'obstacle dans un rayon de 200m, ce qui permet d'obtenir des conditions de vent relativement stable.

Un seul type d'arroseur a été testé, il s'agit d'un modèle couramment utilisé dans les parcs et les jardins (turbine Rain Bird 5000+) dont la portée est de 12m environ, à 3bar avec une buse de 3 mm. L'utilisation d'un second muni d'un batteur avait été envisagée puis abandonnées afin de se concentrer sur la turbine. Il est alimenté par une pompe électrique, au cours d'essais qui durent 30 minutes. Sur une zone d'un rayon de 50m différents types de collecteurs ont été implantés (figure 3). Ici le but est de caractériser la distribution volumique des gouttes mises en suspension dans l'air et transportées par le vent.

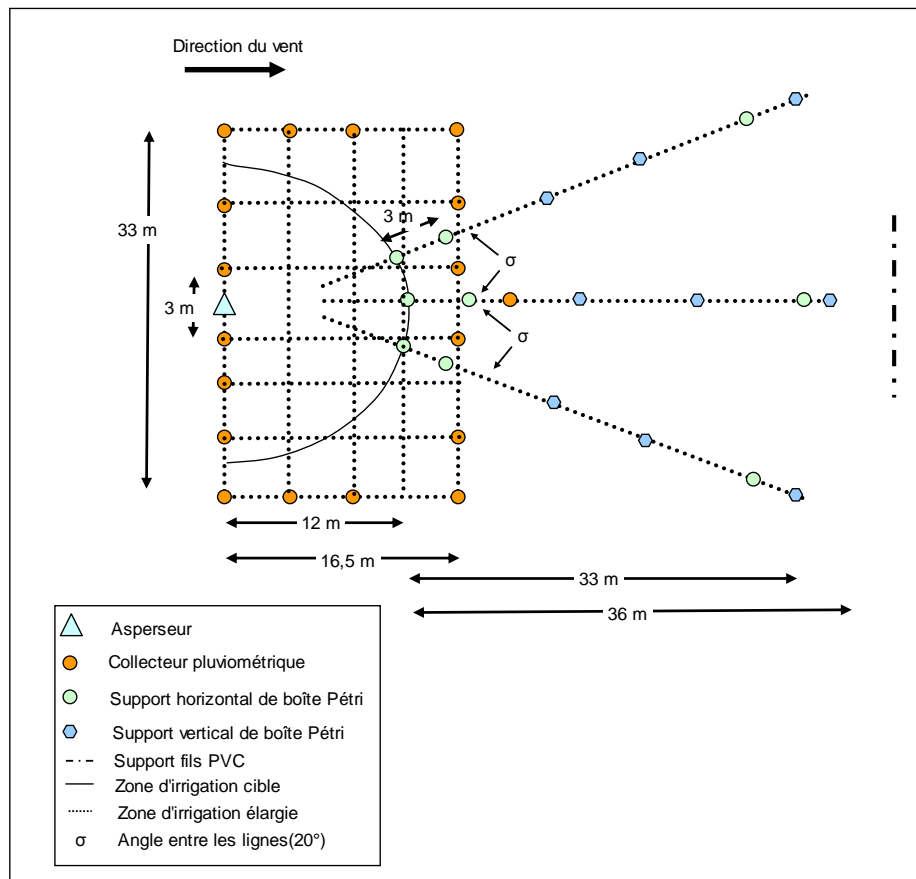


Figure 3 Schéma de l'implantation des collecteurs en 2011 (Irstea, 2011)

- Pluviométrie

Une zone de 40 m de coté a été dégagée pour venir y implanter un maillage de pluviomètres. Les pluviomètres permettent d'observer la distribution quantitative de l'eau et d'apprécier l'effet du vent sur la dérive. Au nombre de 144 (12*12), ils sont espacés de 3m, représentant chacun une surface de 9m² et ont une surface de collecte de 119cm². La mesure est effectuée par pesée du collecteur après séchage des parois externes et du retrait de la tare.

- Estimation du transport et de la dérive

Les collecteurs de transport sont placés sous le vent de l'arroseur suivant trois lignes partant de l'arroseur ; ces lignes sont séparées de 20° (Figure 3).

Les collecteurs sont:

- Des bandes de papier hydrosensible disposées principalement en position verticale, elles donnent une première appréciation qualitative de l'existence de transport et de dérive;
- Des boîtes de Pétri (figure 4):
 - o en position horizontale à 25 cm du sol, disposées suivant trois lignes centrées sur la direction du vent, Elles sont maintenues par des supports PVC. Ces dispositifs permettent par dilution et mesure par fluorimétrie de quantifier les volumes soumis à la sédimentation;
 - o en position verticale placées à 0.5 et 1.4m du sol, fixées sur des supports métalliques;

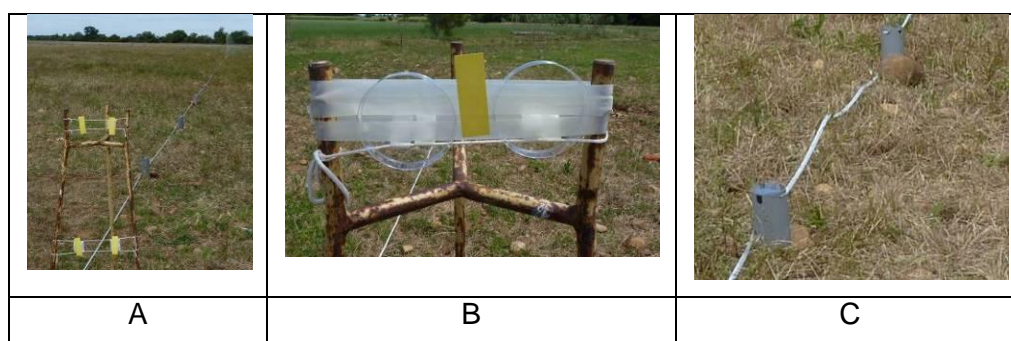


Figure 4 Collecteurs utilisés pour estimer le transport : papier hydrosensible (a), boîtes de Pétri disposées verticalement (b) et les lignes de boîtes de Pétri déposés sur des supports en PVC (c). (Irstea. 2011)

- Des fils PVC d'une longueur de 5m placés horizontalement à des hauteurs différentes;
- Des échantillonneurs cycloniques prêtés par le CSTB. Ils sont alimentés par une batterie et disposé à 75m et 100m sous le vent. Fonctionnant pendant toute la durée de l'essai, le volume échantillonné d'air correspond à un volume de $2m^3$. Seules trois mesures ont pu être faites par ce dernier moyen en 2011;
- Des barboteurs placés à des hauteurs de 1m20 (hauteur conventionnelle lors de l'estimation des légionelles atmosphérique) (Granguillot, 2004), en bordure du champ (environ 100m).

Ces collecteurs sont exposés pendant la durée de l'essai (30minutes), puis sont récoltés et isolés en vue d'être: scannés pour les papiers hydrosensibles, dosés par dilution pour les dépôts de colorant dans les boîtes de Pétri, les fils PVC et les collecteurs faisant appel à la méthode d'impaction.

A l'issue de l'essai, chaque boîte de Pétri recueillie sur le terrain est séchée, puis des volumes d'eau distillée précis (10mL) sont ajoutés pour diluer à nouveau le colorant et ainsi mesurer la fluorescence de la solution, qui est comparée à la courbe étalon. A partir de cette valeur et du volume de dilution on peut remonter à la quantité de colorant, donc à

la quantité de solution recueillie. Ce qui représente un échantillonnage du transport et/ou de la dérive. De même, le fil en PVC est rincé pour en extraire le colorant et le doser.

L'utilisation lors des essais de 2011, des papiers hydrosensibles et de boîtes de Pétri placés verticalement étaient mis en place. Ces dispositifs ont permis de mettre en évidence que mêmes pour de grandes distances des gouttes étaient prélevées. Mais le fait d'installer des boîtes de Pétri verticalement pose le problème des perturbations de l'écoulement de l'air, quoi qu'il en soit l'intensité recueillie sur les boîtes verticales était en moyenne 10 fois supérieure à celle des horizontales, son estimation était donc importante. A de grandes distances les boîtes de Pétri placées horizontalement ne permettent donc plus d'obtenir des résultats significatifs. La méthode des fils PVC a l'avantage d'avoir un impact mineur sur l'écoulement de l'air, mais sa surface d'échantillonnage reste faible (en effet seul une partie de la surface est prise en compte, environ 80%) (Gil et al, 2007). En revanche chaque fil permet d'échantillonner une hauteur de couche d'air différente, et il est possible d'aligner de nombreux fils de différentes longueurs à différentes hauteurs sur un même mat.

Pour chaque essai, la distribution pluviométrique ainsi que la disposition de la dérive et du transport ont été évaluées. Comme dans les études précédentes un quadrillage de 144 pluviomètres a été utilisé. Concernant la dérive, le dispositif se compose de 3 lignes de collecteurs (Boîte de Pétri horizontale à 25 cm du sol) séparées de 20° et dont la ligne centrale est placée sous le vent. Les collecteurs sont disposés tous les cinq mètres et ce de 15m à 50m. Enfin, pour le cas des aérosols des fils PVC d'une longueur de 5m sont placés à 1m et 2m du sol à des distances de 30m 40 m et 50 m, afin de caractériser la répartition verticale des volumes et donc le risque d'inhalation.

Des barboteurs (préférés aux échantillonneurs cycloniques pour la possibilité de recueillir des micro-organismes viables) devaient être initialement placés à des hauteurs de 1m20 (hauteur conventionnelle lors de l'estimation des légionelles atmosphériques) (Grandguillot, 2004), en bordure du champ. Mais leur utilisation a été abandonnée afin de se concentrer exclusivement sur les aérosols liquides au cours de ce mémoire. Mais ces expérimentations sont prévues pour 2013.

3.1.3 Description de la station météorologique

Conformément à la norme ISO 22866, la station météorologique (figure 5) est équipée de deux anémomètres sonique 3D à des hauteurs différentes (ici respectivement à 3.9m et 2.7 m du sol), d'un pyranomètre et d'une sonde de température et d'humidité. L'ensemble des données est rassemblé dans le datalogger Campbell (CR3000).

Les anémomètres soniques permettent d'avoir les composantes U, V et W du vent à un temps donné. Ces dernières sont définies comme suit :

- U orientée vers le nord ;

- V est la composante du vent perpendiculaire à U et dans le sens direct, c'est-à-dire que V est orientée vers l'est ;
- W est la composante verticale du vent, elle est orientée vers le haut.

La fréquence d'acquisition est de 20 Hz. Ce qui correspond à 36000 acquisitions pour une durée de fonctionnement de 30 minutes. Sur les deux anémomètres soniques, celui à 2.7m de hauteur est placé à l'envers ce qui se traduit par une inversion de la composante W.

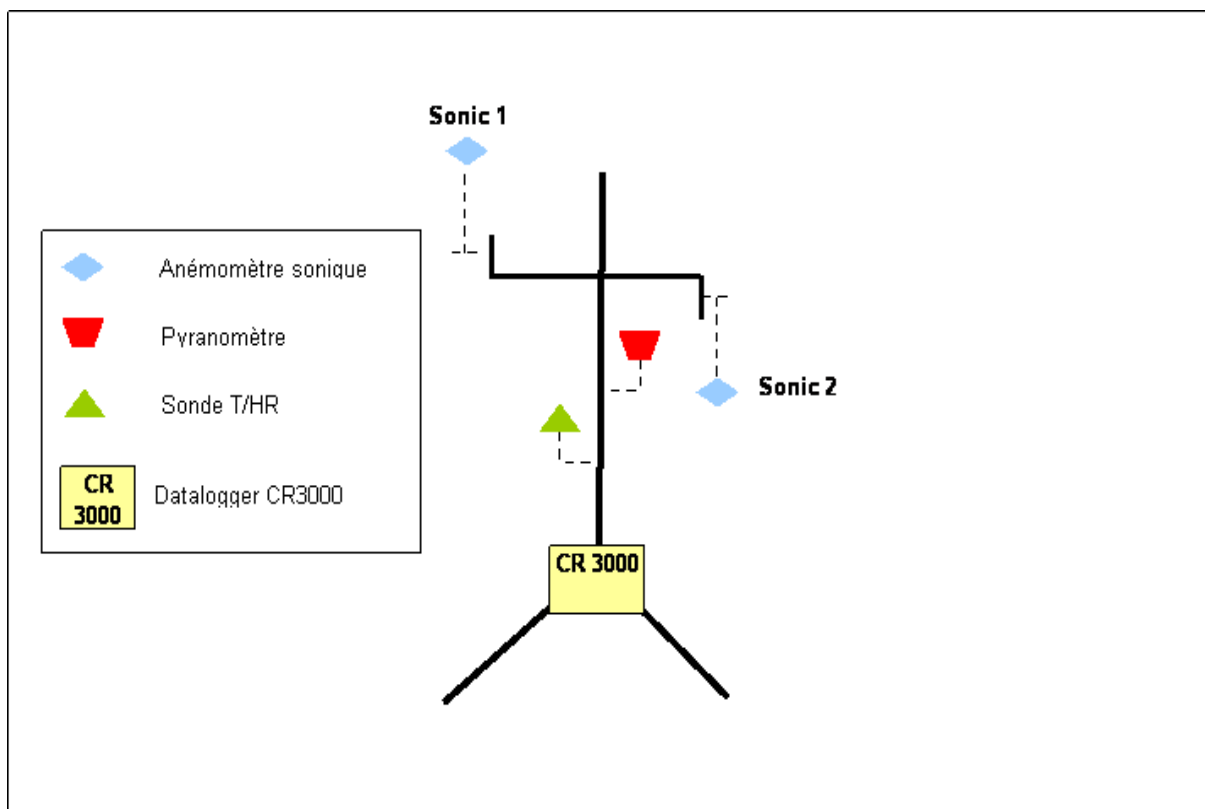


Figure 5 Dispositif météorologique (source Irstea)

Au cours du stage onze essais ont été menés durant les mois de juillet et août, pour des conditions climatiques cohérentes avec les conditions d'irrigation réelles ainsi qu'avec la norme relative aux mesures de la dispersion d'un nuage de gouttes au champ lors de la pulvérisation de pesticides (NF ISO 22866). Les vitesses de vent observées sont pour la plupart comprises entre 1m/s et 5 m/s, les températures inférieures à 35°C.

3.1.4 Estimation des pertes lors des essais

A partir des mesures de pluviométrie recueillies à l'issue de chaque essai, il est possible de calculer les volumes échantillonnés par les pluviomètres et les comparer avec le volume mesuré par le compteur en entrée de parcelle lors de chaque test.

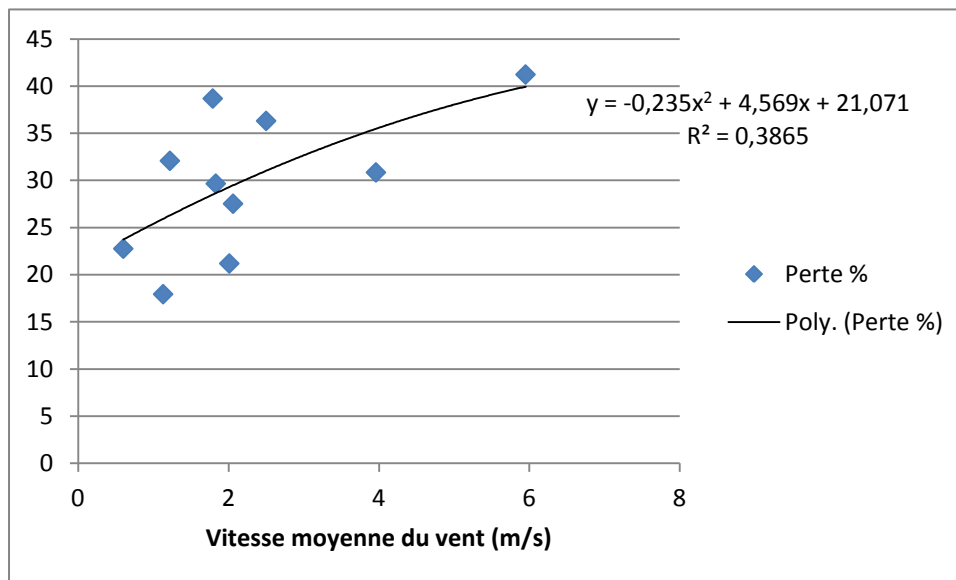


Figure 6 Estimations des pertes de volumes en fonction de la vitesse du vent

Sur l'ensemble des essais on ne reconstitué pas entre 17 et 40% du volume initial (figure 6), cette proportion tend à augmenter avec la vitesse moyenne du vent, ce qui est à relier au fait que le transport des particules d'eau de petites tailles augmente avec cette composante.

Cependant les volumes perdus ne peuvent pas être directement reliés aux volumes transportés, en effet on peut soupçonner qu'une part de l'eau est perdue autrement que par transport. Les essais ayant été réalisés à Salon de Provence et en plein été, le phénomène d'évaporation dans les pluviomètres peut jouer une part non négligeable dans les pertes. Molle et al (2011 evaporation and wind drift) ont mis en évidence le lien entre les pertes par évaporation dans les collecteurs en fonction du temps au cours de la mesure en tenant compte de la masse d'eau collectée :

Au cours des mesures conduites le temps d'attente n'a jamais dépassé une demi-heure.

L'erreur induite par ce phénomène peut représenter 50% des pertes.

Au-delà les mêmes auteurs ont proposé un modèle expliquant les pertes pour un arroseur de type sprinkler à batteur réputé moins sensible au vent que la turbine utilisée pour les essais. L'équation est de la forme :

$$\% \text{ pertes totales} = 5.97E - 02 + 2.024E - 02 * I - 4.626 * V + 2.996 * DS$$

I = radiation lumineuse (W/m²)

V = vitesse moyenne du vent (m/s)

DS = déficit hygrométrique (kPa)

En utilisant l'équation numéro un, dans des conditions climatiques proches de celles des essais (température entre 30 et 35°, V = 2.5 m/s; I = 780 W/m², DS = 2.5 kPa), l'évolution

sur deux jours des pertes dues à l'évaporation a pu être estimée (figure 7). La perte moyenne sur une journée est de 10.3%, 18.1% pour les périodes allant de 11h à 18h et 6.1% de 19h à 10h. A une échelle de temps plus réduite, et pour tenir compte de la variation des conditions climatiques au cours d'une journée, la valeur de ET_0 (Evapotranspiration de référence) varie entre 0 et 5mm/h

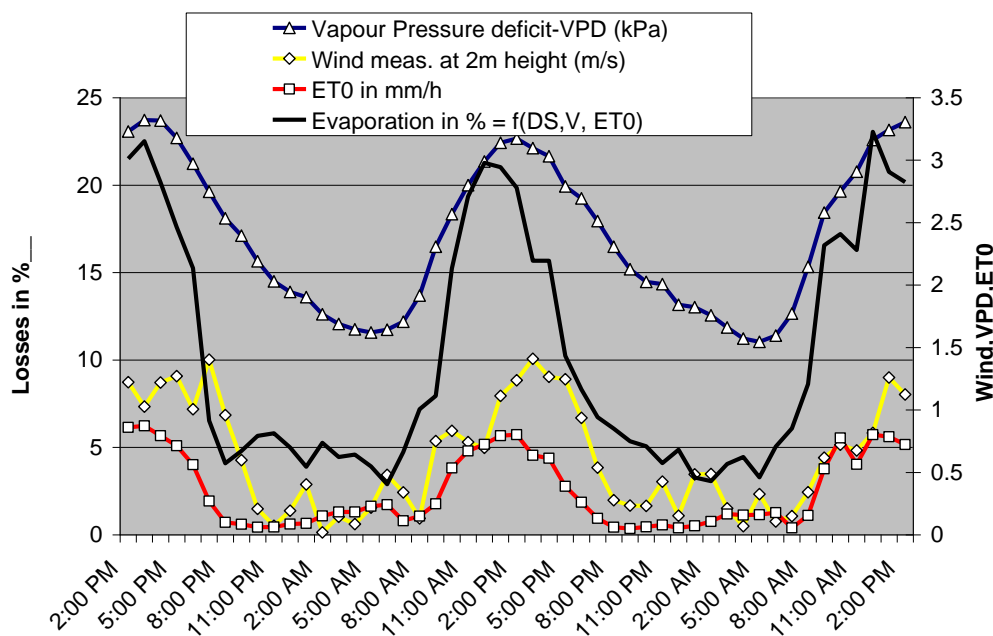


Figure 7 Evolution des pertes par évaporation au cours du temps (Molle et al, 2011)

Tout le volume non collecté par les pluviomètres n'est donc pas forcément soumis à la dérive. Les essais ayant souvent été fait en fin de matinée on peut penser que 2 à 3% du volume sont perdus à cause du phénomène d'évaporation.

Par ailleurs la surestimation de la dérive peut aussi être due au dispositif expérimental. En effet, dans les pluviomètres les plus éloignés peu de volume est récupéré, on a donc une grande sensibilité à l'évaporation. Or c'est justement à ces distances que la plus grande part du volume est apportée (figure 9), il s'en suit qu'une erreur même faible se répercute fortement sur le résultat global. Le type de maillage en quadrillage et la distance entre collecteurs ne sont peut être pas les mieux adapté pour l'estimation des pertes par dérive sur ce type d'arroseur dont la portée est faible. Des lignes de pluviomètres partant de l'asperseur et continuant en ligne droite pourraient mieux convenir, donnant une meilleure idée du profil de distribution (figures 8 et 9).

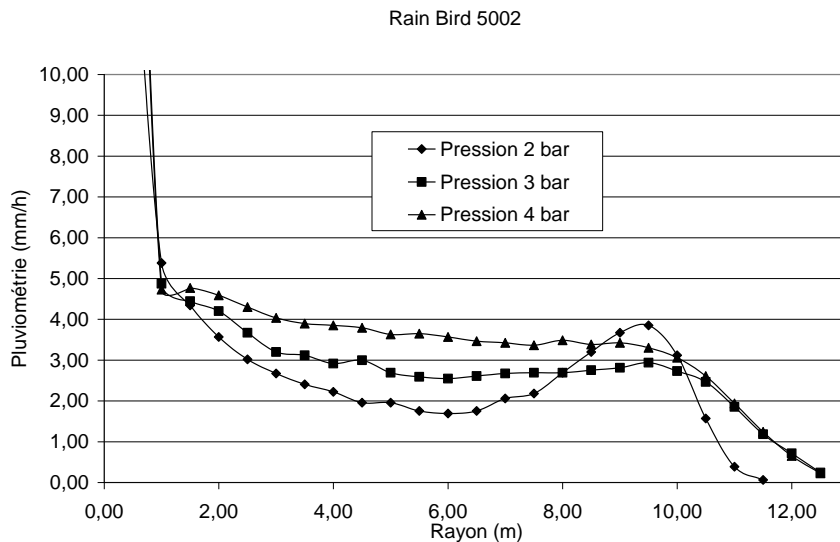


Figure 8 Répartition de la pluviométrie le long du jet de la turbine RB 5000+ (source ONEMA)

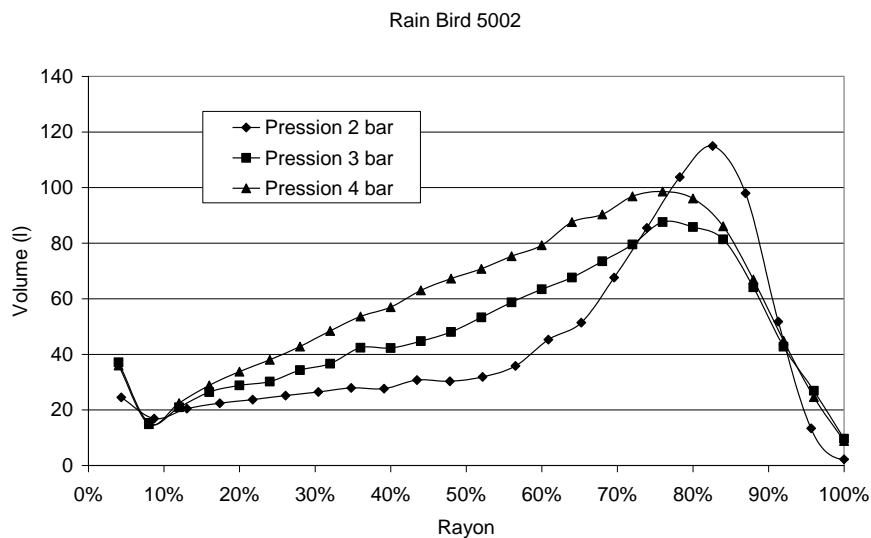


Figure 9 Représentation du volume le long du jet de la turbine RB 5000 plus (source ONEMA)

Pour conclure, dans nos conditions (tableau 5) et en se référant à la figure 7, environ 50 % des pertes sont dues à l'exposition des particules d'eau au phénomène d'évaporation. Les 50 % restant sont quand à eux dus à des incertitudes sur la mesure. En effet le quadrillage de pluviomètres reste un peu lâche si on considère la portée de l'asperseur, une valeur de 2m aurait été mieux adaptée, l'influence du vent sur les petites gouttes (0.4 mm de diamètre) et le transport en dehors du périmètre mouillé explique le reste. L'objectif principal des mesures n'étant d'estimer les pertes, le maillage de pluviomètres décrit précédemment a été conservé.

Tableau 5 Conditions météorologiques moyennes lors des essais

Heure des essais	T (°C)	HR(%)	I (W/m ²)	V (m/s)
11h	32,05	36,17	740,83	2,49

3.2 Analyse de la dérive et du transport au champ au moyen d'eau colorée réalisé en 2011

3.2.1 Analyse du transport et de la dérive au champ

Une dizaine d'essais de mesure du transport ont été conduits. Les conditions climatiques de mesures ont été choisies pour être cohérentes avec les conditions qui pourraient être rencontrées lors de l'utilisation d'eaux usées traitées en aspersion.

Pour chaque distance de mesure la courbe des doses transportées sous le vent de l'asperseur en fonction de la distance a été tracée (Figure 10). Lors des essais la vitesse moyenne du vent a varié de 1.5 à 4.8m/s. La composante verticale de la vitesse a quant à elle varié de -7 à +9cm/s, ce qui apparait être une vitesse faible lorsqu'on la compare avec celle de sédimentation d'un aérosol (25cm/s).

Même si les doses sont faibles, on note qu'un transport est observé avec des vitesses du vent inférieures à 2m/s, cependant avec une telle vitesse du vent le volume de transport collecté est inférieur à 0.1ml/(m².h) (mm/h) à la limite du périmètre mouillé (12m).

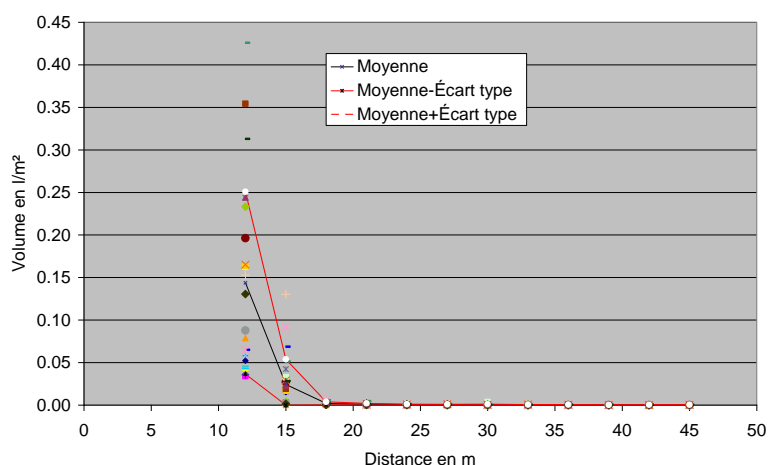


Figure 10: Transport des particules mesuré sur l'ensemble des essais, asperseur RB5000+ (Molle et al 2011)

Les courbes moyennes sont reportées aux Figures 10 et 11. Aux proches environs de l'arroseur (12 m) la dose recueillie est en moyenne de 280ml/(m².h), avec un écart type de 21ml/(m².h) sur l'ensemble des échantillons. Autrement dit, jusqu'à 12 m, il s'agit de volume soumis à la dérive et les boîtes de pétri sont dans la zone mouillée en conditions ventées, puisque cette dernière est définie comme étant la portion du sol qui reçoit plus de 0.3mm/h, ou 300ml/(m².h). La quantité d'eau recueillie diminue ensuite très rapidement. Au-delà de 18m la dose recueillie descend en dessous de 5ml/(m².h) pour atteindre 2ml/(m².h), au-delà de 25m, soit à une distance correspondant à deux fois la portée de l'asperseur (figure 11).

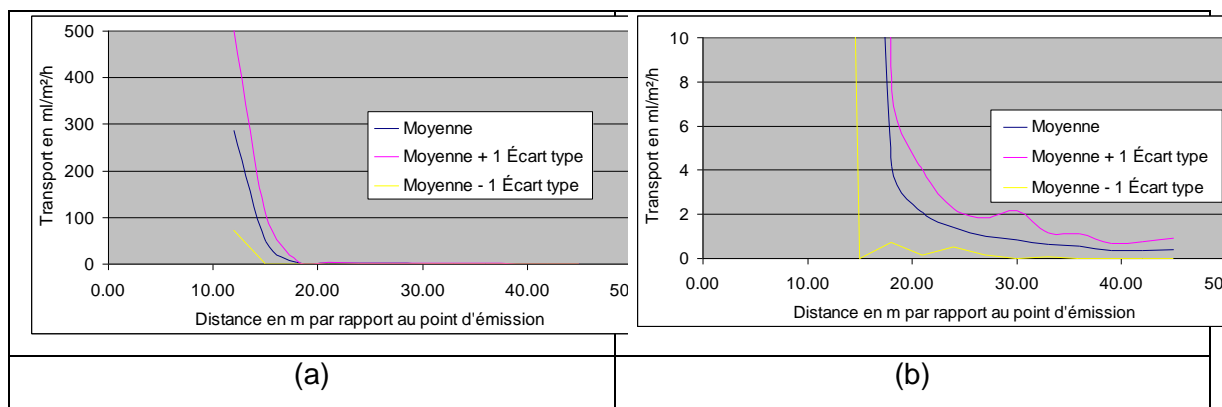


Figure 11: Dose moyenne transportée recueillie sur l'ensemble des essais en fonction de la distance : vue d'ensemble (a) et zoomée (b). (Molle et al 2011)

Pour ce qui est des boîtes de Pétri placées verticalement, sur deux lignes en aval de la zone arrosée, des quantités proches de celles collectées horizontalement ont pu être recueillies, comme indiqué dans le Tableau 6 et la Figure 12. Les doses calculées ici s'entendent par m^2 de section verticale et à l'échelle d'une heure. En bordure de la zone de mesure on peut trouver jusqu'à $5ml/(m^2.h)$ d'embruns en suspension dans la masse d'air et se déplaçant avec elle. Ces mesures donnent une première idée du nuage de gouttes passant à une hauteur moyenne de 1m du sol environ. Il reste à affiner la méthode afin d'avoir une idée de la répartition verticale des volumes transportés.

Tableau 6 Doses moyennes ($ml/(m^2.h)$) recueillies par les boîtes de pétri verticales (Molle et al 2011)

Distance (m)	Minimum bas	Maximum bas	Minimum haut	Maximum haut
21	0,298	26,598	0,379	27,722
30	0,069	10,722	0,066	10,385
39	0,029	4,075	0,031	4,052
48	0,008	2,662	0,002	4,102

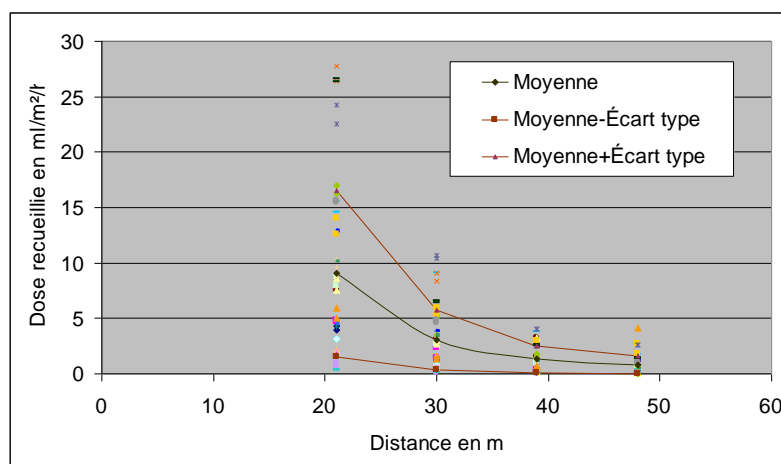


Figure 12: Doses échantillonnées par les boîtes de pétri verticales ($ml/(m^2.h)$) en fonction de la distance et sans distinction de vitesse du vent (Molle et al 2011)

Les échantillonneurs cycloniques utilisés à 75 et 100m de l'asperseur ont eux aussi recueilli une petite quantité de colorant, dans des proportions qui ne peuvent être appréciées que qualitativement, puisque ces appareils n'ont été disponibles qu'au cours de 3 mesures (15, 17 et 23 juin). Les doses collectées à 0.4m du sol sont reportées dans le Tableau 7, le volume d'air échantillonné est de 2m³ sur 20 minutes, soit un débit de 6m³/h, il est ramené à la surface du collecteur. L'influence de la vitesse du vent sur la quantité ayant dérivée est notable, cependant les doses collectées restent inférieures ou égales à 2ml/(m².h) (tableau 7). Ce type de mesure mériterait d'être approfondi.

Tableau 7 Doses collectées par les échantillonneurs cycloniques en l/h (Molle et al 2011)

Distance (m)	15-juin	17-juin	23-juin	23-juin
75	0,0001888	0,0006023	0,0020781	0,0108711
10	0,0001922	0,0001044	0,0126789	0,0014841
Vent moyen (m/s)	1,54	2,73	4,6	4,57

3.2.2 Bilan des essais 2011

En observant les volumes récupérés les 10 essais, on remarque qu'entre 10 et 30% du volume n'est pas récupéré par les échantillonneurs (Pluviomètre et boîte de Pétri horizontale). Cela amène à penser que les gouttes de plus petites tailles sont maintenues en suspension sur de longues distances, mais il ne faut pas oublier qu'une partie du volume est perdue à cause de l'évaporation qui peut par exemple se passer dans les pluviomètres. Mais ce constat est appuyé par la présence de gouttes sur les papiers hydrosensibles puis sur les boîtes de Pétri placées verticalement à 45m de l'asperseur.

Le travail a été conduit sur un seul modèle d'asperseur à relativement faible portée (Rain Bird 5000+), pour être plus complet la prise en compte d'autres asperseurs serait nécessaire, à la fois en modélisation et in situ.

Cette première approche a permis de développer un protocole et d'avoir une idée de l'évolution des volumes d'eau dérivée et transportée en fonction de la distance à l'asperseur mais l'influence du vent que ce soit par sa vitesse moyenne ou sa direction moyenne par rapport à l'alignement de nos collecteurs n'a pas été prise en compte. Au vu des résultats obtenus sur les volumes transportés, il n'a pas été possible de reconstituer les quantités d'eaux totales soumises au transport. Ces aspects devront donc être approfondis par la suite.

3.3 Analyse de la dérive et du transport au champ au moyen d'eau colorée réalisé en 2012

3.3.1 Modélisation des volumes dérivés et transportés

Comme précédemment les mesures lors des onze essais ont été effectuées dans des conditions climatiques cohérentes avec celles qui pourraient être rencontrées lors de la REUT par aspersion.

Pour chaque essai le volume recueilli a été caractérisé par la distance du récepteur avec l'asperseur, la vitesse moyenne du vent (calculée à partir des différentes composantes U, V et W), l'orientation des lignes de boîtes de pétri et la position des fils pvc. (Annexe 4)

Après une première observation des résultats, les volumes récupérés évoluent de manières inverses avec l'augmentation de l'angle et de la distance. C'est-à-dire que lorsqu'un de ces deux paramètres augmentent le volume diminue, et dans le même sens avec l'augmentation de la vitesse moyenne du vent. Des tests de corrélation ont été effectués sur les trois types de mesures (mesure par les boîtes de Pétri, mesure par les fils PVC à 1m et 2 m du sol). Les coefficients obtenus sont compris entre -1 et 1, lorsqu'ils sont proches de 1 ou de -1 ils indiquent une relation linéaire entre deux variables, en revanche lorsque le résultat est proche de 0 il n'existe pas de relation linéaire entre les variables. Cependant, cela ne permet de rejeter l'existence d'une relation non linéaire. Les données qui sont étudiées ici sont le volume surfacique (V_s en ml/m^2), la vitesse moyenne du vent (V en m/s) calculée à partir des composante U et V, la valeur absolue de l'angle formé par la direction du collecteur et la direction moyenne du vent (α en degré) et la distance par rapport à l'asperseur (d en m).

Tableau 8 Coefficients de corrélation pour les mesures par boîtes de Pétri

Corrélation	Vitesse moyenne	Angle/vent	Distance	Volume surfacique
Volume surfacique	0,393620517	-0,2958863	-0,283218579	1

Tableau 9 Coefficients de corrélation pour les mesures par fil PVC à 1m

Corrélation	Vitesse moyenne	Angle	Distance	Volume surfacique
Volume surfacique	0,553077257	-0,265315905	-0,152422747	1

Tableau 10 Coefficients de corrélation pour les mesures par fil PVC à 2m

corrélation	Vitesse moyenne	Angle	Distance	Volume surfacique
Volume surfacique	0,568440638	-0,282497162	-0,127475642	1

Aux vues des résultats (tableaux 8, 9 et 10), dans les trois cas les coefficients reliant le volume aux 3 autres paramètres étant éloignés de 1 ou de -1, on peut conclure sur l'existence d'une relation, mais celle-ci n'est pas linéaire. Néanmoins, les signes des différents coefficients confirment le lien positif entre la vitesse moyenne du vent et le volume surfacique et le lien négatif avec l'angle et la distance à l'asperseur.

Afin d'appuyer ces premières conclusions, la dépendance des différentes variables a été observée grâce à un test du khi deux. Cette étude n'a pu être faite que sur les mesures réalisés à l'aide des boîtes de Pétri, car le nombre d'événements pour les fils PVC n'était pas assez élevé pour l'effectuer, mais les tendances sont les mêmes pour les trois mesures. Les volumes surfaciques ont donc été étudiés de manières séparées avec les trois autres variables. Les deux autres variables ont été fixées afin que cela soit réalisable L'hypothèse de départ (H_0) est qu'il n'y a pas de liens entre les différentes données.

Tableau 11 Résultats du test du khi deux

Test Khi-2	Vs/d	Vs/ α	Vs/V
p-value	2,272.10-5	0,078	0,36

Pour une erreur de 10% ($p\text{-value} < 0.1$), l'hypothèse H_0 est rejetée dans deux cas, le volume surfacique n'est donc pas indépendant de la distance ni de l'angle. L'hypothèse est même rejetée dans le premier cas avec un intervalle de confiance de 5%, qui est celui communément utilisé. Mais en travaillant sur des valeurs expérimentales un intervalle de 10% paraît plus judicieux. En revanche il est impossible de rejeter l'hypothèse H_0 dans le cas de la vitesse du vent. Mais comme de nombreux essais ont été effectués pour des vents moyens proches, cela intervient peut être comme un biais qui empêche de conclure sur la dépendance (tableau 11). (Annexe 5)

Après la mise en évidence de l'action des 3 paramètres principaux sur la quantité d'eau récupérée, la modélisation les liens entre les différentes données a pu être réalisée, le tableau 12 exprime l'évolution des volumes surfaciques sur 30 minutes (V_s).

Tableau 12 Modélisation de l'évolution des volumes surfaciques (ml/m²)

Type de collecteur	Equations $V_s=f(V,\alpha,d)$	R	R ²
Boîte de Pétri	$V_s=0,462*V^{6,315}*\alpha^{-0,594}*d^{-2,983}$	0,854	0,73
Fil PVC1m	$V_s=0,452*V^{7,948}*\alpha^{-0,865}*d^{-2,989}$	0,936	0,876
Fil PVC 2m	$V_s=3,389*V^{5,895}*\alpha^{-0,838}*d^{-2,561}$	0,933	0,871

Au regard des coefficients de détermination (R^2) et considérant les conditions expérimentales, les équations obtenues semblent tout à fait acceptable. La valeur légèrement inférieure de la corrélation pour l'équation des volumes recueillis par les

boîtes de Pétri peut être due à la croissance du couvert végétal qui a pu perturber la réception de l'eau lors de l'aspersion. En effet, la hauteur de l'herbe lors des premières manipulations était faible et en fin proche des boîtes de Pétri. La modélisation donne les valeurs des fils PVC à une hauteur de 2m supérieur à ceux à 1m, la proximité des concentrations relevées lors des essais à de grandes distances pourrait expliquer ce fait. A partir de ces dernières il est donc possible d'avoir une idée de l'évolution des volumes soumis à la dérive et au transport lors de l'irrigation.

Néanmoins, en comparant les équations avec les résultats expérimentaux, les volumes calculés sont sous estimés pour des vents inférieures à 2m/s. Ceux calculés à partir de la formule correspondant aux boîtes de Pétri le sont le plus, pour un vent de 2m/s les volumes sont deux cent fois inférieures à ceux mesurées. La différence est moindre lorsque les vitesses de vents s'élèvent (facteur cinq). Pour les calculs avec les fils PVC on remarque la même variation, on sous estime le volume pour des faibles vitesses (inférieure à 2m/s) mais au dessus les résultats correspondent (Annexe 6).

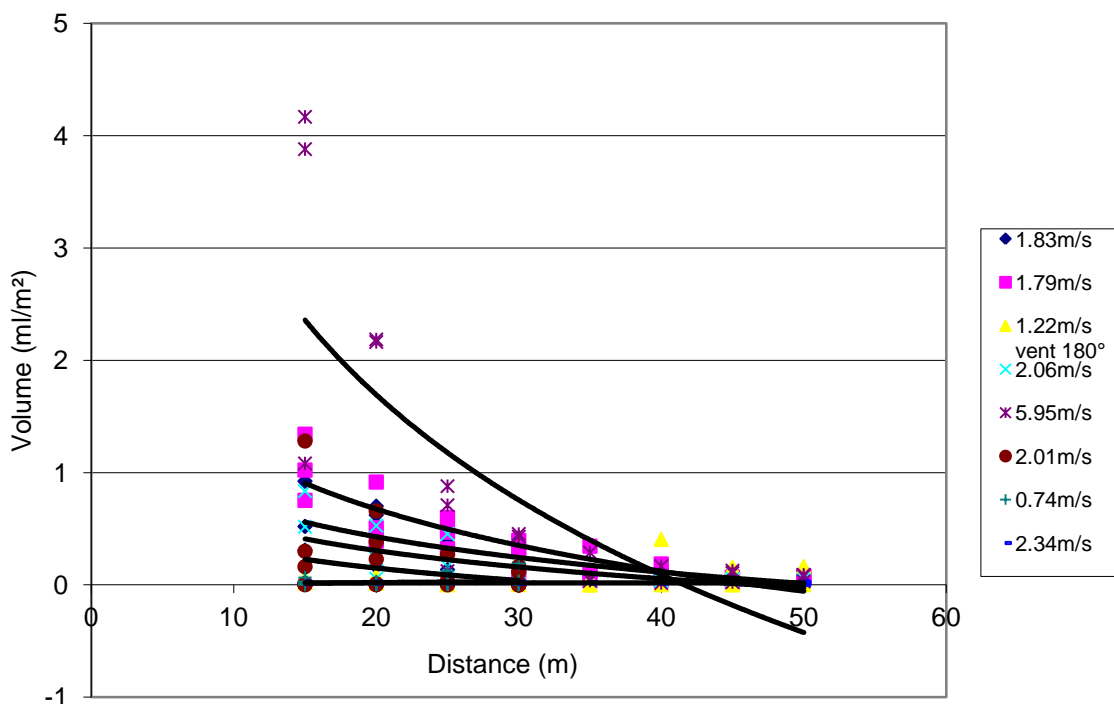


Figure 13 Résultats expérimentaux par analyse des boîtes de Pétri

Ceci peut s'expliquer par l'incorporation dans notre modèle d'essais correspondant à de faibles vitesses et avec des angles élevés. En effet, des mesures ont été conduites tôt le matin en l'absence de vent, ou plutôt avec un vent faible pour valider le fait que la distribution des aérosols se faisait dans la direction principale du vent. D'autres traitements sont prévus pour affiner cet aspect. En comparant avec l'année précédente les premières mesures étaient effectuées à 15m et non 12m afin d'éviter d'être dans le périmètre mouillé, le fait de s'écarter ne permet pas de récolter les volumes plus élevés situé en amont (figure 13). Ces derniers éléments sont donc tendance à tirer les résultats

vers le bas en raison des faibles volumes récoltés. Des erreurs de mesures peuvent également être responsables de ces différences. Un travail sur le choix des modèles d'ajustement reste à faire en travaillant sur des données homogènes.

3.3.2 Estimation des volumes mis en jeu

Sur l'ensemble des doses recueillies pour des vitesses moyennes du vent supérieure à 3m/s, les volumes correspondent tous au phénomène de transport (volume inférieure à 300ml/(m².h)), les courbes moyennes (c'est-à-dire pour des angles allant de 0° à 90°) représentées à la figure 12 montrent une diminution rapide du volume avec la distance, au-delà de 25m, soit deux fois la distance de l'asperseur environ, tout les volumes sont inférieure à 3ml/(m².h). Néanmoins, directement sous le vent les valeurs à 15m montent jusqu'à 4.3ml/(m².h), 23.4ml/(m².h) et 99.3ml/(m².h) pour des vitesses moyennes de vent respectives de 3m/s, 4m/s et 5m/s (figure 14).

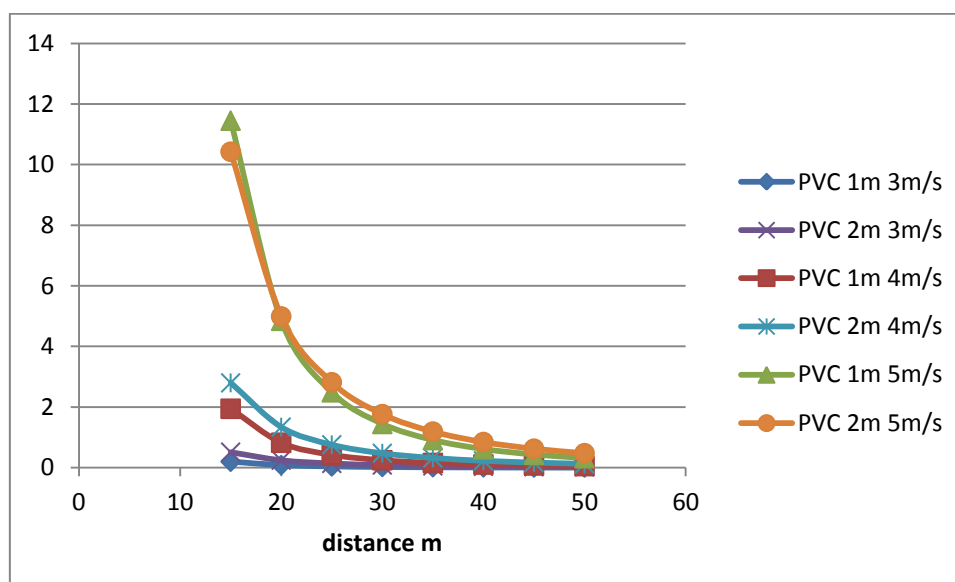


Figure 14 Modélisation des volumes moyens (ml/(m²/s)) recueillis par les fils PVC en fonction de la distance et du vent

En prenant en compte, la sensibilité de fluorimètre et les erreurs de mesures, il ressort qu'un volume mesuré inférieure à 0.1ml/(m².h) ne peut être différencié d'un volume nul. A partir de ce constat une représentation des surfaces soumises à la dérive est envisageable (tableau 13). Pour des vents supérieurs à 4m/s et pour les distances étudiées lors de nos expérimentations les volumes ne sont jamais négligeables bien que les quantités restent faibles, dans le pire des cas le volume s'élève à 4ml/(m².h) pour une distance de 50m.

Tableau 13 Distance maximale de dérive (m) en fonction de l'angle et du vent

Hauteur	vitesse du vent/angle (°)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1m	3m/s	35	15	15							
	4m/s	50	40	35	30	25	25	15	15	15	15
	5m/s	50	50	50	50	50	45	45	40	40	40
2m	3m/s	50	30	20	20	15	15	15	15	15	15
	4m/s	50	50	45	40	35	30	30	30	30	25
	5m/s	50	50	50	50	50	50	50	50	50	45

3.3.3 Bilan des essais

Aux vues des différences de résultat entre les méthodes de mesures, la récolte des aérosols avec des fils PVC semblent plus adaptée que celle avec les boîtes de Pétri. Plusieurs raisons l'expliquent, dans un premier temps lors des essais on observe facilement le déplacement horizontale du nuage d'aérosols (Annexe 7), les fils PVC permettent de mieux récolter de part leur position ce panache que les boîtes de Pétri qui sont placées horizontalement et près du sol. Dans un second temps, les boîtes de Pétri sont aussi plus sensibles à l'évolution du couvert végétal entre les différents essais, ce qui peut être ajouté un biais entre nos différents essais. Enfin, la possibilité de placer à des hauteurs variables nos fils PVC rend plus adaptée cette méthode de collecte pour les l'estimation des volumes pouvant être inhalés par un être humain.

De travaux en cours permettront d'étudier les mécanismes d'atomisation, dérive et transport dans leur ensemble. Un couplage des modélisations fluides avec la caractéristiques de survie des pathogènes, avec validation in situ, apparait être une voie nécessaire d'approfondissement.

4 Discussion

4.1 Mise en perspective des résultats de l'étude

Une forte disparité sur l'estimation des volumes en fonction des méthodes d'échantillonnage est visible. Cette dernière est due aux variabilités des paramètres lors de l'expérimentation, que ce soit pour le protocole choisi ou pour les paramètres physiques et de terrains.

4.1.1 Limites du protocole

4.1.1.1 Influence des paramètres environnementaux

Au cours des essais, seules les vitesses et les directions moyennes du vent sur 30 minutes ont été prises en compte lors de la modélisation de l'évolution des volumes. Mais ce dernier n'est pas fixe au cours des mesures et peut parfois (comme cela a été le cas une fois) totalement changer de direction au milieu de l'expérimentation. Les caractéristiques du vent ne sont pas les seules à évoluer, c'est également le cas, dans une moindre part, des autres paramètres météorologiques (température, rayonnement, humidité relative...). Les mesures sur le terrain étant réalisées au cours de la même période et donc dans des conditions climatiques similaires, les caractéristiques météorologiques n'ont pas toutes été prises en compte lors de l'exploitation des résultats bruts pour se concentrer essentiellement sur le vent. D'autres études pourraient donc être faites afin de mieux comprendre le processus d'aérosolisation en fonction du déficit de saturation et du rayonnement. Toutes les variations de ces paramètres induisent des conditions de mesures résultant à des incertitudes. L'estimation des variations des volumes recueillis en fonction de la distance, de l'angle par rapport à la direction moyenne du vent ainsi que sa vitesse est par conséquent entachés d'erreurs.

Mais, les facteurs environnementaux ne sont pas les seuls à influencer les résultats. La rotation de l'asperseur intervient également. Le modèle choisi pour les essais effectue une rotation complète sur une minute environ. Bien que ce genre de rotation soit sans doute la plus représentative des techniques utilisées lors de l'irrigation de culture ou d'espace vert, ce temps de rotation peut influencer sur les résultats. En effet, le temps d'effectuer une rotation complète le vent peut avoir changé plusieurs fois de direction et donc épandre les particules sur une plus grande surface. C'est en général pour cette raison que les essais se déroulent au minimum sur une voire deux heures, mais en conditions réelles une telle donnée n'est pas envisageable.

4.1.1.2 Ajustement du protocole

Le protocole fait appel à trois méthodes de collecte différentes (pluviomètres, boîtes de Pétri, fils PVC). La première permet d'estimer la dérive au champ et les deux autres les volumes soumis à la dérive et au transport.

du vent réel, de l'ordre le plus souvent de quelques m/s, à celle de la sédimentation, 0.25cm/s en moyenne pour des particules soumises à la dérive. Il est également possible d'ajouter que les fils PVC de part leurs hauteurs par rapport au sol sont moins sensibles aux variations de la végétation qui peuvent perturber les trajectoires de nos volumes sortant du périmètre mouillé. Un second avantage de cette méthode de collecte réside dans la possibilité de placer nos fils à de nombreuses hauteurs différentes sans perturber les écoulements d'air dans la zone. Cette multiplicité des points de collecte permettra de mieux caractériser les volumes pouvant être inhalés en se plaçant aux niveaux des voies respiratoires hautes d'individus de tailles différentes.

4.1.2 Exposition aux agents microbiologiques

Pour approfondir le protocole, après avoir quantifié les volumes mis en jeu dans les phénomènes de dérive et de transport, il est nécessaire de mieux quantifier les mesures d'expositions aux agents microbiens aéroportés lors de la REUT par aspersion. Un dispositif a été proposé dans ce sens afin de récolter et de quantifier les micro-organismes lors de l'irrigation. Il apparaît que les méthodes faisant appel au principe de l'impaction sur milieu liquide, en raison de leurs caractéristiques (meilleur taux de recouvrement des organismes, efficacité sur une longue durée, multiplicité des analyses possibles...), pourraient donc être mises en place afin de pouvoir réaliser cet objectif. Néanmoins, il apparaît difficile aux vues de la composition très variée des eaux usées en agents microbiens de trouver un indicateurs fiable pour l'ensemble des situations. En outre, les travaux faisant référence à la survie des agents pathogènes ainsi qu'à leurs influences sur l'aspersion en conditions réelles sont très rares. En raison d'un manque de travaux, ces deux aspects qui devaient être traités initialement dans le cadre de ce mémoire ne l'ont pas été. Cette approche est prévue pour l'année 2013 afin de pouvoir réaliser une évaluation des risques représentative d'une pratique d'aspersion.

4.1.3 Retombés des résultats expérimentaux

Un stage de licence 3 STEP de l'université Paris Diderot en partenariat avec la SAUR et dans le cadre du projet NOWMMA a été réalisé durant la même période. L'un de ses objectifs étant de modéliser et de représenter à l'aide du logiciel ADMS la variation des volumes de transport au cours de l'aspersion avec des eaux usées de manière bidimensionnelle (figure 16). Ces représentations ont été permises à l'aide des mesures effectuées par l'IRSTEA en 2011. Le modèle prend en compte des paramètres météorologiques (vitesse du vent, température, nébulosité, humidité relative, précipitations...), le lieu où se déroule l'aspersion (zone rurale ou urbaine, obstacle, géométrie) et les paramètres de l'asperseur (géométrie, débit, pression, diamètre de la buse, hauteur d'éjection) (figure 16). Afin, d'affiner cette méthode il serait intéressant d'intégrer les données expérimentales du présent afin de tenir compte de l'influence de la

variation du rayonnement solaire et la variation du vent qui ont été mesurées au cours des manipulations sur la dérive et le transport qui en découlent.

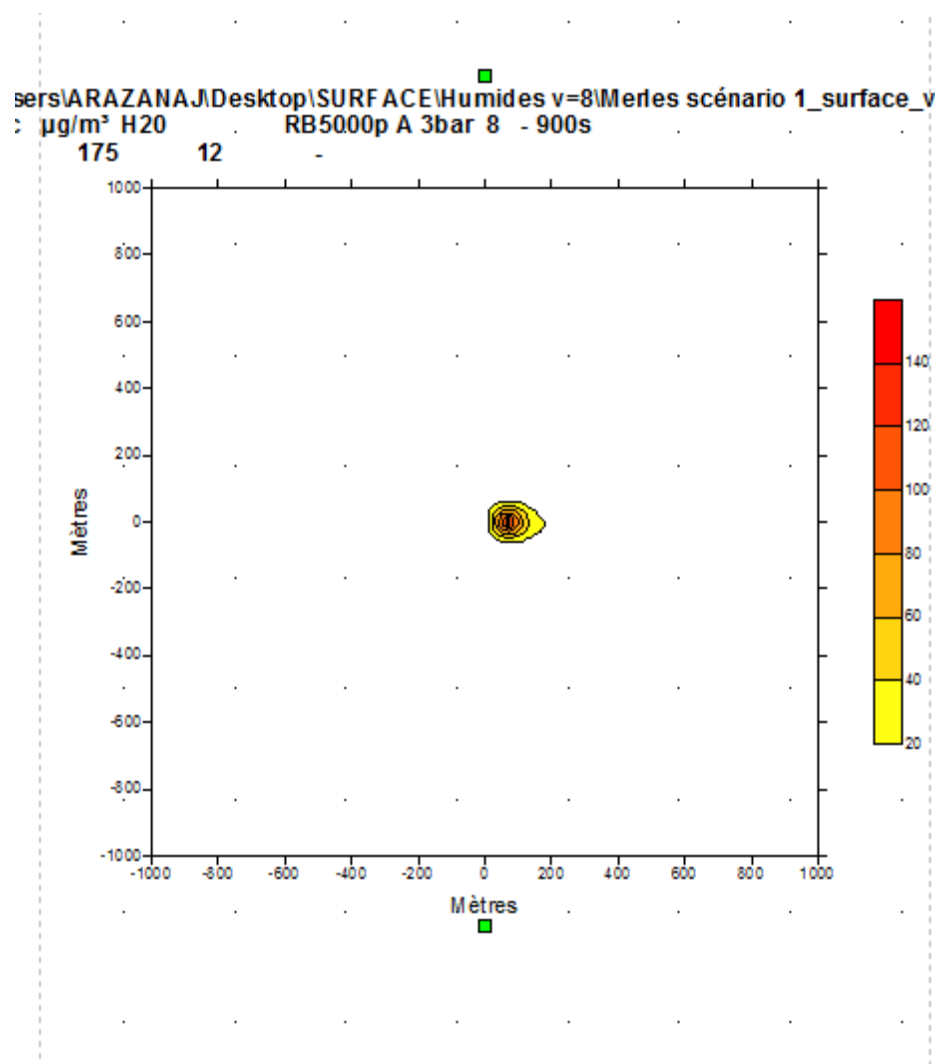


Figure 16 Exemple de résultats d'une modélisation via ADMS (rapport de stage RAZANAJATOVO A, 2012)

4.2 Recommandations concernant la REUT par aspersion

4.2.1 Evaluation de la possibilité d'effectuer une ERS

Comme indiqué auparavant, la composition des eaux usées traitées est très variable. Elle va dépendre de l'eau brute d'origine, des traitements que cette dernière aura subis et des conditions de stockage avant sa réutilisation. Néanmoins, le groupe impliqué dans le rapport de l'ANSES a pu sélectionner un groupe de micro-organismes pouvant avoir des effets néfastes sur les voies respiratoire et cutanée dans le but d'évaluer la possibilité d'effectuer une ERS.

L'évaluation quantitative des risques repose en grande partie sur l'existence de relation dose réponse établie. Bien que l'on retrouve ces informations dans les cas de l'ingestion, pour les deux voies respiratoire et cutanée ces valeurs sont encore parcelaires (excepté dans le cas de *Legionella pneumophila*, mais ces données sont encore controversées). A cela s'ajoute également le manque d'information sur les expositions aux pathogènes et

leur survie en milieu réel. En l'état actuel des connaissances, une ERS liée à la REUT par aspersion n'est pas réalisable. Il est donc impossible d'affirmer, pour les voies décrites, l'absence de risque lors de cette réutilisation, il est donc important de limiter les expositions en attendant la création de données sûres.

4.2.2 Recommandations

La qualité des eaux usées traitées dépend de nombreux facteurs, dont la plupart sont situés à l'amont du système de REUT. Ainsi, les recommandations apportées ne peuvent pas se limiter à l'épandage par aspersion de la ressource et à la limite de l'exposition des populations humaines. Elles devront donc se faire sur l'ensemble du système, qu'il est possible de séparer en trois axes:

- La qualité des eaux brutes;
- Sur les éléments de sécurité (traitements des eaux brutes, technologies d'irrigation employées);
- La limitation des expositions des populations humaines.

A partir de ces trois axes il est possible d'identifier pour chacun d'entre eux les points critiques sur lesquelles il faudra s'appuyer afin de limiter le risque (figure 17).

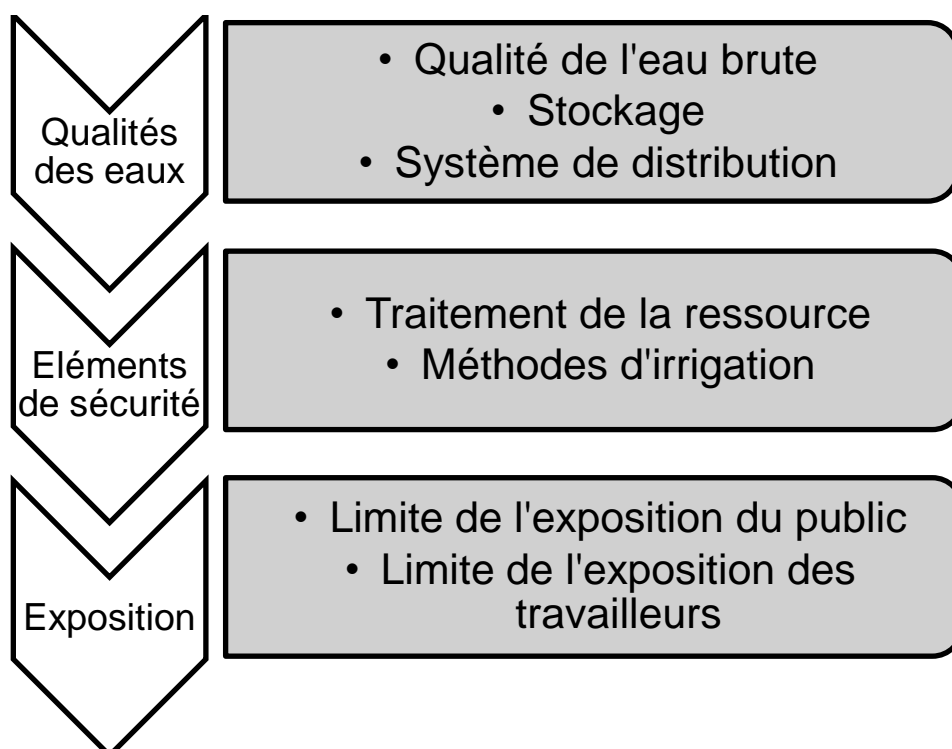


Figure 17 Différents classes de recommandation pour la REUT par aspersion

4.2.2.1 Recommandations portant sur la qualité de la ressource

Dans le cas de la qualité des eaux, le respect de l'arrêté semble être un bon point de départ. Les eaux usées devront donc provenir de stations d'épuration ou d'installations d'assainissement non collectif ayant une charge brute supérieure à 1.2 kg DBO5 par jour

(ce qui exclu les systèmes d'assainissement individuels). Pour ce qui est du stockage, ce dernier ne devra pas favoriser le développement d'agents pathogènes. Enfin, toutes les eaux ne sont pas adaptées à tous les usages, leur utilisation en fonction du niveau de qualité de la ressource devra également être prise en compte. Les réseaux de distribution, tout comme les éléments de stockage, devront permettre de maintenir la qualité de la ressource. Des vidanges devront donc être possibles et le risque de stagnation des eaux devra être écarté. Le réseau devra aussi être indépendant vis à vis de tous les réseaux d'AEP (un système de surverse reste possible pour palier les lacunes quantitatives ou pour rincer les cuves).

4.2.2.2 Recommandations sur les éléments de sécurités

Certains types d'irrigation du fait du mode de distribution requièrent une très bonne qualité de la ressource, des dispositifs de filtration ou de désinfection devront être mis en place. Afin que ces traitements soient efficaces un programme de surveillance des stations d'épuration liées à la REUT sera mis en place.

Le programme de surveillance est décrit en deux axes dans la modification de l'arrêté du 2 août 2010. Il comporte :

- Un suivi périodique de qualité cité dans l'annexe 1 (MES, DCO, *Escherichia coli*, Entérocoques fécaux, Phages ARN F-spécifique, spores de bactérie anaérobies sulfitoréductrices) réalisé tout les dix ans;
- Un suivi de routine avant chaque saison d'irrigation sur un éventail de paramètres limité (MES, DCO, *Escherichia coli*).

Toutes les analyses sont réalisées par un laboratoire accrédité par le comité français d'accréditation. Les indicateurs de contamination fécale sont utilisés lors du contrôle, mais ces derniers ne sont pas de bons indicateurs pour toutes les pollutions microbiologiques. La recherche d'autres indicateurs serait donc une bonne piste à explorer.

Concernant les matériels utilisés seuls les systèmes décrit dans le dit arrêté peuvent être utilisés (Irrigation par aspersion, irrigation gravitaire et irrigation localisée). Dans le cas précis de l'aspersion, les asperseurs de faible apogée et de basse pression devront être utilisés (3.5 bar pour les turbines et 5.5 bar pour les canons d'arrosage).

4.2.2.3 Recommandations sur la limitation de l'exposition

En plus du choix d'un asperseur adapté, la limitation des durées d'exposition doit être prise en compte. Cette dernière peut être obtenue en limitant les périodes d'arrosages au cours de la journée, en définissant des périmètres de sécurité et par prévention.

Dans un premier temps, une interdiction d'accès du public aux sites lors de l'irrigation est une solution simple, ce qui est déjà fait en Australie. Des arrosages nocturnes pourraient

réduire encore les expositions, ce qui agirait aussi sur la limitation de la dispersion car en général les vents sont plus faibles de nuit. Néanmoins selon le rapport de l'ANSES, la période diurne est plus favorable à l'abattement des micro-organismes. Dans le cas où l'irrigation en journée est possible (ce qui n'est sans doute pas le cas sur les golfs ou sur certains espaces verts) il serait donc plus intéressant de l'effectuer tout en maintenant l'interdiction au public.

L'interdiction ne concerne pas exclusivement les conditions d'accès, mais l'aspersion peut être interdite si la vitesse du vent est trop élevée. Selon les modifications de l'arrêté du 2 août 2010 ce seuil est de 20 km/h, soit environ 5.5 m/s, il pourrait être abaissé vers 4m/s à 2m.

Ensuite, selon la réglementation française une distance minimale de sécurité avec les habitations et les voies de communications voisines doit être respectée. Elle est évaluée à un minimum de deux fois la portée de l'asperseur. Selon les modélisations de ce mémoire ,dans le cas de l'utilisation d'un asperseur de parc et jardin, et dans le pire des cas (modélisation la plus élevée et directement sous le vent) des particules d'eau serait présentes à plus de 200m pour des vents allant jusqu'à 5.5km/h (tableau 14).

Tableau 14 Variation des volumes (mm/(m².h)) directement sous le vent

Vitesse du vent/distance	20m	30m	45m	50m	100m	150m	200m
3 m/s	2,050	0,726	0,257	0,000	0,000	0,000	0,000
4 m/s	11,178	3,957	1,401	1,070	0,200	0,000	0,000
5 m/s	41,654	14,746	5,220	3,986	0,674	0,240	0,000
5,5 m/s	73,047	25,860	9,155	6,990	1,185	0,419	0,201

Les volumes recueillis à de telles distances restent faibles. Il serait donc intéressant de pouvoir évaluer les concentrations en organismes pathogènes dans ces volumes et d'affiner la modélisation des distances afin de pouvoir fixer une réelle distance de sécurité. La qualité des eaux pourrait aussi avoir un impact sur ces limites, plus l'eau est de bonne qualité et moins les distances de sécurité seraient grandes. L'influence des obstacles sur la répartition des volumes serait également intéressante à chiffrer, afin de pouvoir faire varier les distances de sécurité en fonction de la végétation des alentours.

Enfin, il est également possible de limiter les expositions en informant le public et les professionnels. Ces recommandations se retrouvent également dans l'arrêté lié aux eaux usées traitées.

Des panneaux d'informations à l'entrée des espaces verts informeront le public de la REUT sur le site. Il explicitera les périodes de fermeture du site lors de l'arrosage et énoncera des règles d'hygiène permettant de limiter l'exposition aux contaminants.

Pour ce qui est des professionnels, des formations expliciteront les risques potentiellement liés à la REUT et les règles de travail ou d'hygiène permettant de limiter les risques (éviter les zones irriguées lors de l'aspersion, hygiène de base...). Les locaux devront aussi être adaptés (séparation des vêtements de travail et de ville, présence de douche et fourniture de moyens de nettoyage fixe et sans eaux pour le terrain...). Pour ce qui est des équipements individuelles le matériel adéquat sera fourni (vêtements de travail restant sur le site, équipements imperméables, protection des voies respiratoires et des yeux s'il existe un risque d'éclaboussure).

Mais toutes les recommandations ne se valent pas en terme d'efficacité, il serait donc intéressant de pouvoir classer ces dernières afin de rendre plus lisibles les contraintes liées aux qualités des eaux usées traitées.

4.2.3 Présentation du principe de barrière

Dans le but d'irriguer les cultures avec des eaux de qualités variables, un concept de barrière a été développé par Israël dans les directives relatives aux usages des eaux usées traitées pour l'irrigation (Norme ISO CD 16075-3). Le but est de limiter les contacts des agents pathogènes avec les populations via l'alimentation, en accumulant un nombre de barrière à la contamination. Ce nombre varie en fonction du type de culture ou d'activité et tient compte du mode de consommation ou de contact. Un exemple des différents types de barrière est présenté dans le tableau 15.

Tableau 15 Présentation du concept de barrière (source : Guidelines for treated wastewater use for irrigation project)

Type de barrière	Application	Distance	Poids
Irrigation des cultures destinées à l'alimentation			
Disinfection de l'eau usée			1
Microfiltration de l'eau usée			1
Ultrafiltration et nanofiltration de l'eau usée			2
Distance entre le dispositif et le fruit le plus bas	Micro-sprinkler Irrigation localisée	< 25 cm	0
		25 cm < <50 m	1
		>50 cm	2
Système de goutte à goutte souterrain	Légumes sous-terrains		2
Peau non comestible			1
Cuisson requise			1
Irrigation of public gardens			
Parc interdit au public lors de l'irrigation			1
Ultrafiltration ou nanofiltration de l'eau usée			1

Chaque nombre de barrières correspond à un poids en fonction de l'efficacité d'une opération dans la limitation du risque. Ensuite, en fonction de la qualité de l'eau usée traitée et de son utilisation un total de points sera à atteindre pour que cette réutilisation soit applicable dans ces conditions. Ces critères dans le cas de l'irrigation par aspersion des parcs et jardins sont définis dans le tableau 16.

Tableau 16 Utilisation des barrières en fonction de la qualité de la ressource (source : Guidelines for treated wastewater use for irrigation project)

Type d'eaux usées	Définition	Irrigation de parc et jardin
Eau brute	Eau non traitée	Interdite
Eau traitée de mauvaise qualité	Eau ayant subi un traitement physique et biologique à des degrés différents mais pas de filtration ni de désinfection	Interdite
Eau de qualité moyenne		Interdite
Eau de bonne qualité		Interdite
Eau de très bonne qualité	une filtration et une désinfection.	1
Eau de vraiment très bonne qualité	Eau ayant subi un traitement physique et biologique suivi d'une ultrafiltration ou une filtration par osmose inverse.	0

La méthode des barrières représente un moyen simple et aisément compréhensible de présenter les exigences liées à la qualité de l'eau et de connaître l'efficacité des types de recommandations qu'il est possible de fournir. Il serait donc intéressant d'incorporer ce principe dans les nouvelles réglementations.

Conclusion

L'objectif de ce travail était de mieux cerner les risques sanitaires liés à l'existence probable de micro-organismes dans les eaux usées traitées lors de son utilisation par aspersion pour une exposition par voie cutanée ou par inhalation à des aérosols créés lors de l'aspersion.

En raison d'un manque d'études sur le sujet (que ce soit lors de la quantification des volumes mis en jeu, l'existence de valeur dose réponse, ou la survie des agents pathogènes dans le milieu) et de la grande variabilité microbiologiques de ces eaux il est actuellement impossible d'effectuer une ERS sans toutefois affirmer l'absence de risques.

Les expérimentations de terrains réalisées pendant le stage ont permis d'obtenir une première idée des volumes mis en jeux ainsi que de leurs évolutions en fonction de la distance à l'asperseur et de la variabilité du vent. Pour des vents supérieures à 3m/s des particules d'eau à 50m sous le vent de l'origine sont retrouvées mais à des volumes faibles (proche de zéro à 3m/s et atteignant 4ml/(m²/h) lorsque le vent passe à 5m/s). Avec cette augmentation l'angle soumis à la dérive augmente également. Mais ces résultats sont encore à compléter notamment dans les conditions de vent les plus faibles.

Ces résultats ont cependant permis de faire évoluer la méthodologie de l'estimation des aérosols liquides produits par un système d'irrigation par aspersion. A partir de cela, l'étude de l'impact de l'ajout de micro-organismes dans l'eau ainsi que leur survie en condition réelle est prévue pour 2013. Afin d'affiner les connaissances sur les expositions, les résultats expérimentaux seront intégrés à un modèle informatique (ADMS) permettant de connaître la répartition des volumes en fonction des paramètres climatiques. Ils permettront notamment de mieux caractériser l'impact du rayonnement solaire et de la variabilité du vent.

Ne pouvant pas conclure sur l'absence de risques, des recommandations ont été décrites. Elles portent sur trois points principaux : i) la qualité de la ressource (stockage, système de distribution...), ii) les éléments de sécurité (traitement complémentaire, technique d'irrigation...) et iii) les limitations des expositions aussi bien chez les travailleurs que pour le public. Dans ce sens et afin de rendre l'estimation du risque plus compréhensible, il serait intéressant de s'inspirer du concept de barrière décrit dans la réglementation israélienne, relative à l'irrigation par des eaux usées traitées des cultures destinées à l'alimentation, puis dans les recommandations internationales. En effet, ce concept décrit l'efficacité d'une mesure en lui attribuant un nombre de points, le total de points à

atteindre pour une utilisation donnée dépend de la qualité de l'eau usée distribuée du mode de consommation de cette culture et des différents traitements complémentaires appliqués.

Bibliographie

ANSES, 2012, Rapport d'expertise collective, « Comité d'experts spécialisé évaluation des risques liés aux eaux » « Groupe de travail Réutilisation des eaux usées traitées », Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries , Saisine « n°2009-SA-0329 » , , Février 2012, 121p.

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 pour le doctorat de Biologie Santé Environnement : Université de Nancy, 2003, 201 p

AFD, 2011, Réutilisation des eaux usées traitées - Perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action, Février 2011

http://www.afd.fr/webdav/site/afd/shared/PORTAILS/SECTEURS/EAU_ET_ASSAINISSEMENT/pdf/REUT.pdf. 91p.

Afssa, 2008, Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation. Maisons-Alfort : Afssa, décembre 2008. 69p.

Altmeyer N., Abadia G., Schmitt S. et al., 1990, Risques microbiologiques et travail dans les stations d'épuration des eaux usées. *Fiche médico-technique n°34* ; DMT 44 TC 34.

Blatny, J.M. Blatny, B.A. Reif, G. Skogan, O. Andreassen, E.A. Hoiby, E. Ask, V. Waagen, D. Aanonsen, I.S. Aaberge, D.A. Caugant, 2008, Tracking airborne *Legionella* and *Legionella pneumophila* at a biological treatment plant *Environmental Science and Technology*, 42 (2008), pp. 7360–7367

Carducci A., Tozzi E., Rubulotta E. et al., 2000, Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment. *Water Research* ; 34(4) : 1173-1178.

Ching-Cheng Chang & Fang-Chen Chou, 2011, Assesment of bioaerosol sampling techniques for viable *Legionella pneumophila* by ethidium monoazide quantitative PCR, *Aerosol Science and Technologie*, 45:3,343-351

Deloge M. et al. 2004, Design of an experimental chamber to study aerosols of *Legionella*, 19th Annual Meeting of the EWGLI. May 2004.

M. Deloge-Abarkan, T.L. Ha, E. Robine, D. Zmirou-Navier, L. Mathie, 2007, Detection of airborne *Legionella* while showering using liquid impingement and fluorescent in situ hybridization (FISH) *Journal of Environmental Monitoring*, 9 (2007), pp. 91–97

Deloraine A, 2002, Etude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bioaérosols générés par le compostage des déchets - Synthèse des résultats, contrat ADEME/CAREPS n°0075038, février 2002

Devaux I., Gerbaud L., Planchon C. et al. 2001, Infectious risk associated with wastewater reuse: an epidemiological approach applied to the case of Clermont-Ferrand, France. *Water Science and Technology* ; 43(12) : 53 – 60.

Dowd S.E. et Maier R.M. 2000, Aeromicrobiology in environmental microbiology. Edited by R.M. Maier, I.L. Pepper, and C.P., Gerba. Academic Press, San Diego, Calif. 91–122 p.

Droguet J, 2000, Danger représenté par les légionelles dans les aérosols issus des centrales électriques : incertitudes et besoins de connaissances. Mémoire de l'EHESP, 2000

Eduard W et al, 1990, Evaluation of methods for enumerating microorganisms in filter samples from highly contaminated occupational environments. *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol 51, n°8

Fattal B., Wax Y., Davies M. et al. 1986, Health risks associated with wastewater irrigation : an epidemiological study. *Am. J. Public Health* ; 76 : 977-979.

Gil y., Sinfort C., Brunet Y., Polveche V., Bonicelli ., 2007, Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying, *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 14, Mai 2007, 2945-2957p.

Granguillot G, 2004, Exposition des populations aux légionelles potentiellement contenues dans les panaches d'aéroréfrigérants des centrales nucléaires, mémoire de l'EHESP 2004

Grenier D, 1995, Quantitative analysis of bacterial aerosols in two different dental clinic environments. Applied and Environmental Microbiology, 1995, vol 61, n° 8.

Hendawi M. (2006), Etudes des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'aspersion, these de doctorat, Université Aix-Marseille II.

Ishimatsu S, et al. 2001, Sampling and detection of legionella pneumophila aerosols generated from an industrial cooling tower. The Annals of Occupational Hygiene, 2001, vol 45

Lazarova, V., Brissaud, F., 2007, Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. L'eau, l'industrie, les nuisances, 299 (2007) 29-39.
<http://www.ecoumenegolf.org/XEauXLAZAROVA.pdf>

Li et al., 2003, Ultraviolet germicidal irradiation and titanium dioxide photocatalyst for controlling *Legionella pneumophila*. Aerosol Science and Technology, 37 (2003), pp. 961–966

Lin X, 1999, Long-term sampling of airborne bacteria and fungi into a non evaporating liquid. Atmospheric Environment, 1999, vol 33

Molle et al., 2011, Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'aspersion d'irrigation : Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées épurées.

Molle B, 2011, Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet distribution, Wiley online library, Irrigation and Drainage, 2011

Molle, B., Brelle, F., Bessy, J. and Gatel, D. 2012, Which water quality for which uses? Overcoming over-zealous use of the precautionary principle to reclaim wastewater for appropriate irrigation uses, 2012. Irrig. and Drain. 61 (Suppl. 1): 87–94 (2012), DOI: 10.1002/ird.1662

Onema, 2009, Molle, B., Huet, L., Tomas, S., Granier, J., Dimaiolo, P., Rosa, C. Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'aspersion

d'irrigation Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées

Pascual et al., 2001. L. Pascual, S. Perez-Luz, A. Amo, C. Moreno, D. Apraiz, V. Catalan. Detection of *Legionella pneumophila* in bioaerosols by polymerase chain reaction. Canadian Journal of Microbiology, 47 (2001), pp. 341–347

Rule AM, 2007, Application of flow cytometry for the assessment of preservation and recovery efficiency of bioaerosol sampler spiked with pantoea agglomerans. Environment Science and Technologie 2007.

Shuval H.I., Wax Y., Yekutieli P. et al. 1989, Transmission of enteric disease associated with wastewater irrigation : a prospective epidemiological study. *American journal of public health* ; 79 (7) : 850-852.

Xuejun Lin et al. 2000, Survival of Airborne Microorganisms During Swirling Aerosol Collection, Aerosol Science and Technology, volume 32, Issue 3,2000

Réglementation

DGS (1991). Circulaire DGS/SD1.D./91 N°51 du 22 juillet 1991 relative à l'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation des cultures et l'arrosage des espaces verts. N° DGS/ SD1.D/91 N°51.

DGS (1992). Circulaire DGS/SD1.1D/92 N°42 du 3 août 1992, Recommandations complémentaires concernant l'utilisation après épuration, des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation des cultures et des espaces verts. N° DGS/SD1.1D/92 N°42.

Arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'intégration de la REUT

Figure 2 : Présentation des principaux organes d'irrigation par aspersion

Figure 3 : Schéma de l'implantation des collecteurs en 2011

Figure 4 : Collecteurs utilisés pour estimer le transport

Figure 5 : Dispositif météorologique

Figure 6 : Estimations des pertes de volumes en fonction de la vitesse du vent

Figure 7 : Evolution des pertes par évaporation au cours du temps

Figure 8 : Répartition de la pluviométrie le long de jet de la turbine RB 5000+

Figure 9 : Représentation du volume le long de jet de la turbine RB 5000+

Figure 10 : Transport des particules mesuré sur l'ensemble des essais, asperseur RB 5000+

Figure 11 : Dose moyenne transportée recueillie sur l'ensemble des essais en fonction de la distance

Figure 12 : Doses échantillonnées par les boîtes de Pétri verticales en fonction de la distance et sans distinction du vent

Figure 13 : Résultats expérimentaux par analyse des boîtes de Pétri

Figure 14 : Modélisation des volumes moyens recueillis par les fils PVC en fonction de la distance et du vent.

Figure 15 : Modification du maillage de pluviomètre

Figure 16 : Exemple de résultats d'une modélisation via ADMS

Figure 17 : Différentes classes de recommandation pour la REUT par aspersion

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveau de qualité sanitaire des eaux suées traitées

Tableau 2 : Fréquence de surveillance des eaux usées traitées

Tableau 3 : Contraintes d'usages

Tableau 4 : Distance de sécurité

Tableau 5 : Conditions météorologiques moyennes lors des essais

Tableau 6 : Doses moyennes recueillies par les boîtes de Pétri verticales

Tableau 7 : Doses collectées par les échantillonneurs cycloniques

Tableau 8 : Coefficients de corrélation pour les mesures par boîtes de Pétri

Tableau 9 : Coefficients de corrélation pour les mesures par fil PVC à 1 m

Tableau 10 : Coefficients de corrélation pour les mesures par fil PVC à 2 m

Tableau 11 : Résultats du test du khi 2

Tableau 12 : Modélisation de l'évolution des volumes surfaciques

Tableau 13 : Distances maximales de dérive en fonction de l'angle du vent

Tableau 14 : Variation des volumes directement sous le vent

Tableau 15 : Présentation du concept de barrière

Tableau 16 : Utilisation des barrières en fonction de la qualité de la ressource

Liste des annexes

Annexe 1 : Réglementation étrangères et internationales -II-

Annexe 2 : Agents chimiques pathogènes rencontrés lors de la REUT -VI-

Annexe 3 : Agents biologiques pathogènes -XII-

Annexe 4 : Traitement des données de vent -XIV-

Annexe 5 : Résultats des tests du khi-2 -XVII-

Annexe 6 : Résultats des modélisations -XX-

Annexe 7 : Photos des expérimentations du 9 août 2011 -XXVI-

Annexe 1 : Réglementation étrangères et internationales

I Recommandations internationales

1 Aspect physico chimique

Usages agricoles (source ANSES)

		DBO ₅ (mg/L)	MES (mg/L)	Turbidité (NTU)	pH	Couleur	Odeur	Cl ₂ résiduel (mg/L)
US EPA (2004)	<i>Cultures alimentaires sans transformation industrielle</i>	≤ 10	(a)	≤ 2	Entre 6 et 9	(a)	(a)	≥ 1
	<i>Cultures alimentaires avec transformation industrielle</i>	≤ 30		(a)				
	<i>Cultures non alimentaires</i>	(a)		(a)				
OMS (2006)	<i>Irrigation illimitée</i>	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	<i>Irrigation limitée</i>	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
Australien EPA (2006)	<i>Cultures alimentaires sans transformation industrielle</i>	A déterminer au cas par cas	A déterminer au cas par cas	(a)	(a)	(a)	(a)	A prévoir
	<i>Cultures alimentaires avec transformation industrielle</i>	< 20	< 30					
	<i>Cultures non alimentaires</i>	< 20						

(a) : pas de recommandation particulière

Usages urbains (source ANSES)

		DBO ₅ (mg/L)	MES (mg/L)	Turbidité (NTU)	pH	Couleur	Odeur	Cl ₂ résiduel (mg/L)
US EPA (2004)	<i>Usages non restreints</i>	≤ 10	(a)	≤ 2	Entre 6 et 9	Absence	Absence	> 1
	<i>Usages restreints</i>	≤ 30	≤ 30	(a)		(a)	(a)	(a)
OMS (2006)	(b)							
Australian EPA (2006)	<i>Usages non restreints</i>	A déterminer au cas par cas	A déterminer au cas par cas	(a)	(a)	(a)	(a)	A déterminer au cas par cas
	<i>Usages restreints</i>	< 20	< 30					A prévoir

(a) : pas de recommandation particulière

(b) : aspect non traité pour cet usage

2 Aspect chimique

Les eaux usées urbaines contiennent de nombreux micropolluants dont un certain nombre, du fait de la non existence de techniques précises, est non quantifiable.

Ces derniers peuvent être classés en deux groupes (composés minéraux et organiques) parmi lesquelles figurent des substances dites « émergentes » (perturbateurs endocriniens, résidus de médicaments, drogues, sous produits de désinfection, etc.).

Les trois organismes (US EPA (2004), OMS (2006) et Australian EPA (2006)) proposent:

- concernant les composés minéraux et organiques, aucune valeur n'est proposée du fait de la faible exposition en comparaison avec les la consommation d'eau potable.
- concernant les substances dites « émergentes », il est nécessaire d'effectuer des études pour quantifier leur concentration et les taux d'abattement dans les stations d'épuration.

3 Aspect microbiologique

Usages agricoles (source ANSES)

		E.coli (UFC / 100 mL)	Coliformes fécaux (UFC/ 100 mL)	Œufs d'helminthes (œuf/L)	Virus entériques (Abattement)	Protozoaires entériques (Abattement)	Bactéries entériques (Abattement)
US EPA (2004)	<i>Cultures alimentaires sans transformation industrielle</i>		ND				
	<i>Cultures alimentaires avec transformation industrielle</i>	(a)	< 200	(a)	(a)	(a)	(a)
	<i>Cultures non alimentaires</i>		< 200				
OMS (2006)	<i>Irrigation illimitée</i>	(a)	(a)	≤ 0.1	6 – 7 log		
	<i>Irrigation limitée</i>			(a)			
Australien EPA (2006)	<i>Cultures alimentaires sans transformation industrielle</i>	< 1					
	<i>Cultures alimentaires avec transformation industrielle</i>	< 100	(a)	(a)	6 log	5 log	5 log
	<i>Cultures non alimentaires</i>	< 10000					

ND : non détectable

(a) : pas de recommandation particulière

Usages urbains (source ANSES)

		E.coli (UFC/ 100 mL)	Coliformes fécaux (UFC/ 100 mL)	Virus entériques (Abattement)	Protozoaires entériques (Abattement)	Bactéries entériques (Abattement)
US EPA (2004)	<i>Usages non restreints</i>	(a)	0	(a)	(a)	(a)
	<i>Usages restreints</i>		< 200			
OMS (2006)	(b)					
Australian EPA (2006)	<i>Usages non restreints</i>	< 1	(a)	5 log	3,5 log	4 log
	<i>Usages restreints</i>	< 100				

(a) : pas de recommandation particulière

(b) : aspect non traité pour cet usage

4 Autres mesures

Différentes recommandations dans le but de limiter l'exposition ont été proposées (US EPA, OMS en 2004 et Australian EPA en 2006)

- respecter des distances de sécurité ;
- créer des barrières au vent (barrières végétales ou murs autour des surfaces irriguées) ;
- préférer des systèmes d'irrigation basse pression et avec peu de formation de fines gouttelettes;
- Irriguer dans des conditions de vent faible et lors de la fermeture des sites au public;
- préférer des méthodes d'irrigation localisée.

L'US EPA précise que les distances de sécurité sont définies par les instances réglementaires d'une manière arbitraire (expérience et niveau de traitement).

II Réglementations internationales

1 Aspect physico-chimique

Usages agricoles (source ANSES)

		DB O ₅ (mg /L)	DC O (mg /L)	O ₂ diss ous (mg/ L)	ME S (mg /L)	Turbi dité (NTU)	Cl ₂ résid uel (mg/ L)	pH	S A R	Phosp hore (mg/L)	Nitr ate (mg /L)	Azo te tota l (mg /L)	Conduc tivité (μS/cm)	
Califo rnie		(a)	(a)	(a)	(a)	≤ 2	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	
Sout h Austr alia		< 20	(a)	(a)	(a)	≤ 2	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	
Israël		15	(a)	0.5	15	(a)	0.5	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	
Espa gne	<i>Cultures alimenta ires sans transfor mation industrie lle</i>	(a)	(a)	(a)	20	10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	
	<i>Cultures alimenta ires avec transfor mation industrie lle</i>				35	(a)								(a)
	<i>Cultures non alimenta ires</i>				35	(a)								(a)
Chyp re		10			10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	
Jorda nie	<i>Cultures alimenta ires cuites</i>	30	100	> 2	50	10	(a)	En tre 6 et 9	(a)	(a)	30	45	(a)	
	<i>Arbres fruitiers</i>	200	500	(a)	150	(a)	(a)				45	70		

	Cultures de champs, cultures industrielles et forêts	300	500	(a)	150	(a)	(a)				45	70	
Italie		20	100	(a)	10	(a)	(a)	Entre 6.5 et 9	10	2	15		3 000

(a) : pas de valeur limite

Usages urbains (source ANSES)

		DBO ₅ (mg/L)	DCO (mg/L)	O ₂ dissous (mg/L)	MES (mg/L)	Turbidité (NTU)	pH	SAR	Phosphore (mg/L)	Nitrate (mg/L)	Azote total (mg/L)	Conductivité (µS/cm)	Apparence Couleur Odeur
Californie	Restreints	(a)	(a)	(a)	(a)	2	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	Non restreints	(a)	(a)	(a)	(a)	2	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
South Australia	Restreints	< 20	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	Non restreints	< 20	< 30	(a)	≤ 2	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
Italie		20	100	(a)	10	(a)	6 et 9.5	10	2	15	(a)	3000	(a)
Jordanie	Restreints	30	100	> 2	50	10	6 et 9	(a)	(a)	30	45	(a)	(a)
	Non restreints	200	500	(a)	150	(a)	6 et 9	9	(a)	45	70	(a)	(a)
Japon		(a)	(a)	(a)		≤ 2 mg-kaolin équivalent/L	5.8 et 8.6	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	Plaisant
Espagne		(a)	(a)	(a)	20	10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)

(a) : pas de valeur limite

Aspect chimique :

	Italie	Jordanie
Aluminium	1,0	5,0
Arsenic	0,02	0,1
Barium	10	(a)
Beryllium	(a)	0,1
Bore	1,0	1,0
Cadmium	0,005	0,01
Calcium	(a)	230
Cobalt	0,05	0,05
Chrome (total)	0,1	0,1
Chrome hexavalent	0,005	(a)
Fer	2,0	5,0
Fluor	(a)	1,5
Lithium	(a)	2,5 (0,075 pour les citronniers)
Magnésium	(a)	100
Manganèse	0,2	0,2
Mercuré	0,001	0,002
Molybdène	(a)	0,01
Nickel	0,2	0,2
Plomb	0,1	5,0
Cuivre	1,0	0,2
Sélénium	0,01	0,05
Etain	3,0	(a)
Thallium	0,001	(a)
Vanadium	0,1	0,1
Zinc	0,5	5,0
Cyanures	0,05	(a)
Sulfure d'hydrogène	0,5	(a)
Sulfites	0,5	(a)
Sulfates	500	500,0
Phosphates	(a)	30,0
Chlorure	250	400,0
Bicarbonates	(a)	400,0
Fluorure	1,5	(a)
Phénols	0,1	< 0,002
Pentachlorophénols	0,003	(a)
Aldéhydes	0,5	(a)
Tetra/trichloro-éthylène	0,01	(a)
TTHM	0,03	(a)
Solvants chlorés	0,04	(a)
Solvants aromatiques	0,001	(a)
Benzène	0,01	(a)
Benzo(a)pyrene	0,00001	(a)
Pesticides organophosphorés	0,00001	(a)

Autres pesticides (total)	0,05	(a)
Biocides chlorés	0,0001	(a)
Surfactants (total)	0,5	(a)

(a) : pas de valeur limite

Aspect microbiologique :

Usages agricoles (source ANSES)

		<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Coliformes fécaux (NPP/100 mL)	Coliformes totaux (UFC/100 mL)	Nématodes intestinaux (oeuf/10L)	<i>Taenia saginata</i> (oeuf/L)	<i>Taenia solium</i> (oeuf/L)	Œufs d'helminthes (oeuf/L)	<i>Legionella</i> spp (UFC/L)	Salmoneilles
Californie	<i>Cultures alimentaires</i>	(a)	(a)	2.2	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	<i>Cultures non alimentaires</i>			23						
South Australia	<i>Toutes cultures</i>	< 10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	<i>Cultures restreintes</i>	< 100								
	<i>Prairies, fourrages</i>	< 1 000								
Israël		(a)	(a)	12 NPP/100 mL (80% du temps) 2.2 NPP/100 mL (50% du temps)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
Espagne	<i>Cultures alimentaires sans transformation industrielle</i>	100	(a)	(a)	1 (<i>Ancylostoma</i> , <i>Trichuris</i> et <i>Ascaris</i>)	(a)	(a)	(a)	100	(a)
	<i>Cultures alimentaires avec transformation industrielle</i>	1 000				1	1		(a)	
	<i>Cultures non alimentaires</i>	10 000				(a)	(a)		1 000	
Chypre			50	(a)	(a)	(a)	(a)	0	(a)	(a)
Jordanie	<i>cultures alimentaires cuites</i>	100	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	≤ 1	(a)	(a)
	<i>Arbres fruitiers</i>	1 000								
	<i>Cultures de champs, cultures</i>									

	<i>industrielles et forêts</i>									
Italie		10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	Absence

Usages urbains (source ANSES) :

		<i>E.coli</i> (UFC/ 100 mL)	Coliformes totaux (UFC/ 100 mL)	Nématodes intestinaux (œuf/10L)	Œufs d'helminthes (œuf/L)	<i>Legionella</i> <i>spp</i> (UFC/L)
Californie	<i>Restreints</i>	(a)	2.2	(a)	(a)	(a)
	<i>Non restreints</i>	(a)	23	(a)	(a)	(a)
South Australia	<i>Restreints</i>	< 10	(a)	(a)	(a)	(a)
	<i>Non restreints</i>	< 100	(a)	(a)	(a)	(a)
Italie		10	(a)	(a)	(a)	Absence
Jordanie	<i>Parcs, aires de jeux, bords de routes à l'intérieur des villes</i>	100	(a)	(a)	≤ 1	(a)
	<i>Bords des routes à l'extérieur des villes, jardins paysagés</i>	1 000	(a)	(a)		(a)
Japon		ND	(a)	(a)	(a)	(a)
Espagne		200	(a)	1 (<i>Ancylostoma</i> , <i>Trichuris</i> et <i>Ascaris</i>)	(a)	100

Annexe 2 : Agents chimiques pathogènes rencontrés lors de la REUT (source ANSES)

Familles	Substances	N° CAS	Concentrations moyennes retrouvées en sortie de STEP (en µg/L)		Classification		Constante de Henry (en Pa.m ³ /mol)	Pression de vapeur (en Pa)	Existence d'une VTR à seuil d'effet	Existence d'une VTR sans seuil d'effet (ERU)
			Ampères	RSDE1	CIRC	Règlement CLP				
Pesticides	Hexachorocyclohexane	58-89-9	0,06	0,033 (avec un écart type de 0,04)		Acute tox. 3(*) H301 Acute tox. 4(*) H332, H312 STOT RE 2(*) H373	0,35 (à 25°C)			Oui
	Dieldrine	60-57-4	0,01		3	Carc. 2- H351 Acute tox.1 H310 Acute tox. 3(*) H301		4,13*10 ⁻⁵	Oui	Oui
Phtalates	DEHP	117-81-7	2,2 (avec un écart type de 1.8)	32,9 (avec un écart type de 135,412)	2B	Repr.1B- H360 FD	4,43 (à 20°C)		Oui	
Chlorophénols	Pentachlorophénol	87-86-5	0,05	0,057 (avec un écart type de 0.069)	2B	Carc. 2- H351 Acute tox. 2(*) H330 Acute tox. 3(*) H311- H301 Eye irrit.2 H319 STOT SE 3 H335 Skin Irrit.2 H315	0,26 (calc)	41-51*10 ⁻⁴ (à 20°C)		Oui
Métaux	Chrome métallique	7440-47-3	2,7 (avec un écart type de 4,3)	157,6 (avec un écart type de 213,078)	3			10 ⁻⁶ (à 844°C)		Oui
	Chrome (III)	16065-83-1			3					
	Chrome (VI)	18540-29-9			1					
	Nickel	7440-02-0	5,2 (avec un écart type de 5,1)	14,327 (avec un écart type de 14,254)	2B	Carc. 2- H351 Skin Sens.1 H317		0 à 20°C	Oui	Oui
	Cobalt et composés du cobalt	7440-48-4	0,47 (avec un écart type de 0,11)		2B	Resp. Sens.1 H334 Skin Sens.1 H317			Oui	

Cobalt métallique associé au carbure de tungstène	7440-48-4 12070-12-1			2A	Resp. Sens.1 H334 Skin Sens.1 H317				
Cobalt métallique sans carbure de tungstène	7440-48-4			2B	Resp. Sens.1 H334 Skin Sens.1 H317				
Sulfate de cobalt et autres sels de cobalt	10026-24-1			2B					
Arsenic	7440-38-2	1,3 (avec un écart type de 0,72)	2,165 (avec un écart type de 1,842)	1	Acute tox. 3(*) H331- H301			Oui	Oui
Cadmium	7440-43-9	0,06 (avec un écart type de 0,05)	5,5 (avec un écart type de 6,364)	1	Carc.1B- H350 Muta.2- H341 Repr. 2- H361 fd Acute tox. 2(*) STOT RE1 H330		14,8	En cours Anses	
Plomb	7439-92-1	1,5 (avec un écart type de 1,8)	9,736 (avec un écart type de 13,285)	2B				En cours Anses	

Classification du CIRC

Classification de l'Union européenne (Règlement CLP)

Groupe 1 : l'agent est cancérogène pour l'Homme
 Groupe 2A : l'agent est probablement cancérogène pour l'Homme
 Groupe 2B : l'agent est peut être cancérogène pour l'Homme
 Groupe 3 : l'agent est inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'Homme

Acute tox. : toxicité aiguë
 Skin Sens. 1 : Sensibilisation cutanée
 H301 : Toxique en cas d'ingestion
 H310 : Mortel par contact cutané
 H312 : Nocif par contact cutané
 H315 : Provoque une irritation cutanée
 H317 : Peut provoquer une allergie cutanée
 H319 : Provoque une sévère irritation des yeux
 H330 : Mortel par inhalation
 H331 : Toxique par inhalation
 H332 : Nocif par inhalation
 H334 : peut provoquer des symptômes allergiques ou d'asthme ou des difficultés respiratoires par inhalation
 H335 : peut irriter les voies respiratoires
 Muta.2 - H341 : Susceptibles d'induire des anomalies génétiques
 Carc.1B - H350 : Peut provoquer le cancer
 Carc. 2 - H351 : Susceptible de provoquer le cancer
 Repr.1B - H360 : Peut nuire à la fertilité ou au fœtus
 Repr.2 - H361 : Susceptible de nuire à la fertilité ou au fœtus
 H373 : Risque présumé d'effets grave pour les organes à la suite d'exposition répétée ou prolongée

Annexe 3 : Agents biologiques pathogènes (source ANSES)

Bactéries pathogènes

Genres (*)	Espèces ou sérotypes (*)	Concentration (unité par litre)	
<i>Escherichia</i>	<i>E. coli</i>	$10^6 - 10^7$	Birks <i>et al.</i> , 2004 ²
<i>Salmonella</i>	S.typhi ³ S. typhimurium S. paratyphi A, B, C	$1 - 10^3$	OMS, 2006
<i>Shigella</i>	<i>S. dysenteriae</i> <i>S. boydii</i> <i>S. sonnei</i> <i>S. flexneri</i>	$1 - 10^4$	Petterson et Ahsbold, 2004 ⁴
<i>Yersinia</i>	<i>Y. enterocolitica</i>		
<i>Vibrio</i>	<i>V. cholerae</i> ⁹	$10^2 - 10^5$	OMS, 2006
<i>Plesiomonas</i>	<i>P. shigelloides</i>		
<i>Pseudomonas</i>	<i>P. aeruginosa</i>		
<i>Staphylococcus</i>	<i>S. aureus</i>		
<i>Campylobacter</i>	<i>C. coli</i> <i>C. jejuni</i>	$10 - 10^4$	OMS, 2006
<i>Clostridium</i>	<i>C. perfringens</i>	$10^4 - 10^5$	Harwood <i>et al.</i> , 2005
<i>Leptospira</i>	<i>L. interrogans</i>		
<i>Listeria</i>	<i>L. monocytogenes</i>		
<i>Mycobacterium</i>	<i>M. tuberculosis</i> , <i>M. kansasii</i> , <i>M. xenopi</i> , <i>M. avium</i> , <i>M. marium</i> , <i>M. ulcerans</i> ⁹ , <i>M. fortuitum</i> , <i>M. abscessus</i> , <i>M. cholerae</i>		
<i>Legionella</i>	<i>L. pneumophila</i>		
<i>Klebsiella</i>	<i>K. pneumoniae</i>		
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus anthracis</i>		

Virus

Famille (*)	Espèces (*)	Concentration (par litre)	
<i>Picornaviridae</i>	Virus poliomyélitiques ⁵ Virus Coxsackie A Virus Coxsackie B Echovirus Enterovirus 68 à 71 Virus de l'hépatite A	$10^2 - 10^5$	Petterson et Ahsbold, 2004
<i>Reoviridae</i>	Réovirus humains Rotavirus humains	$10^2 - 10^5$	OMS, 2006

² Il s'agit de la concentration en *E.coli* indicateur de contamination fécale et non en *E.coli* pathogène.

³ Non présent de façon régulière en France métropolitaine.

⁴ Toutes espèces confondues.

⁵ Non présent de façon régulière en France métropolitaine.

<i>Caliciviridae</i>	Norovirus	ND – 10 ⁴	Petterson et Ashbold, 2004 ⁶
<i>Hepeviridae</i>	Virus de l'hépatite E		
<i>Astroviridae</i>	Astrovirus humains		
<i>Coronaviridae</i>	Coronavirus humains		
<i>Adenoviridae</i>	Adenovirus humains	250 – 250 000	Boffil-Mas <i>et al.</i> , 2000

Protozoaire helminthes

Familles (*)	Espèces (*)	Concentration (par litre)	
Rhizopodes	<i>Entamoeba histolytica/dispar</i>	1 – 10 ²	OMS, 2006
Flagellés	<i>Giardia intestinalis</i>	10 ² – 10 ⁵	
Amibes libres	<i>Acanthamoeba</i> <i>Naegleria fowleri</i> <i>Hartmannella</i>		
Sporozoaires	<i>Toxoplasma gondii</i> <i>Isospora belli</i> <i>Isospora hominis</i> <i>Cryptosporidium parvum</i>	1 – 10 ⁴	
Nemathelminthes	<i>Enterobium vermicularis</i> <i>Trichuris trichura</i> <i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Necator americanus</i> , <i>Ankylostoma duodenale</i> <i>Strongyloides stercoralis</i> <i>Toxocara canis</i> , <i>Toxocara cati</i>	1 – 10 ² 1 – 10 ³ 1 – 10 ³	
Plathelminthes	<i>Taenia saginata</i> , <i>T. solium</i> , <i>T. hydatigena</i> <i>Hymenolepis nana</i> , <i>H. diminuta</i> <i>Echinococcus granulosus</i> , <i>multilocularis</i>		

⁶ Détection positive par PCR.

Champignons

Genres	Espèces	Concentration (par litre)	
<i>Candida</i>	<i>C. albicans</i>	8.5 10 ⁶ à 5 10 ⁷ UFC ⁷	Korzeniewska <i>et al.</i> , 2009
<i>Cryptococcus</i>	<i>C. neoformans</i>		
<i>Aspergillus</i>			
<i>Trichophyton</i>			
<i>Epidermophyton</i>			
<i>Chryseosporium</i>			
<i>Cladosporium</i>			
<i>Mucor</i>			
<i>Penicillium</i>	<i>P. marneffeii</i>		

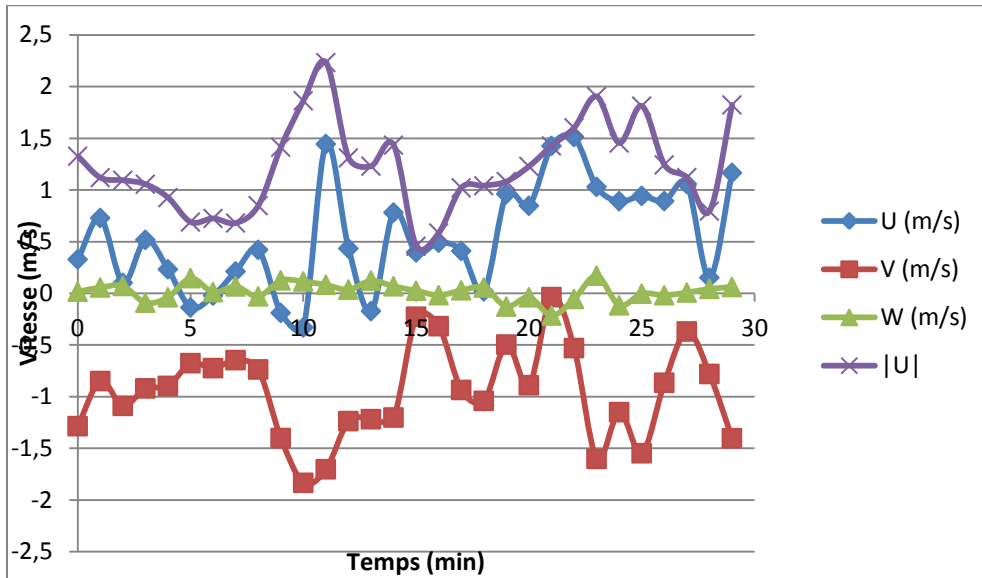
⁷ Il s'agit de la concentration en levures totales et champignons totaux dans les eaux usées (Korzeniewska *et al.*, 2009).

Annexe 4 : Traitement des données de vent

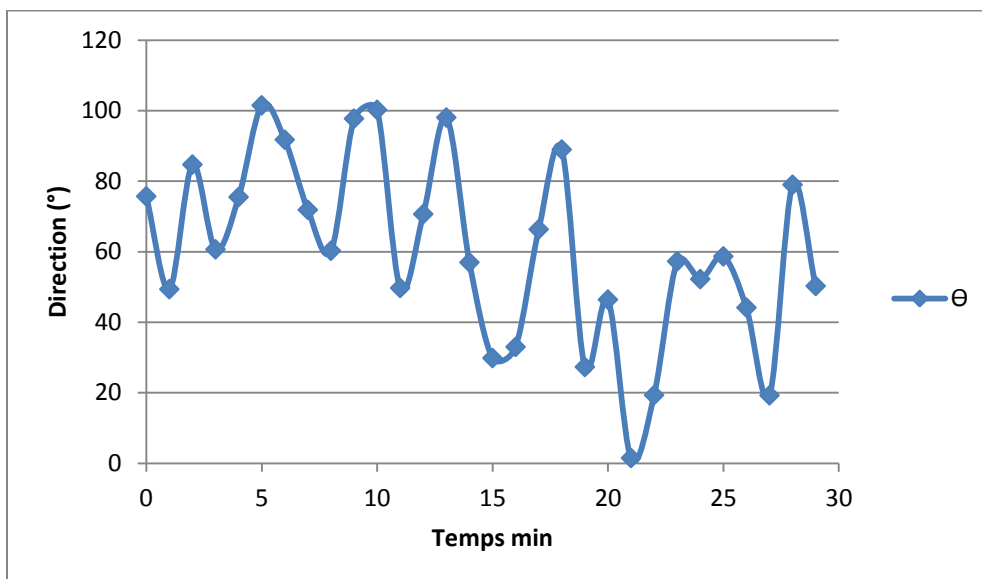
Essai du 20 juillet

- Traitement du vent par intervalle d'une minute

Représentation des vitesses :

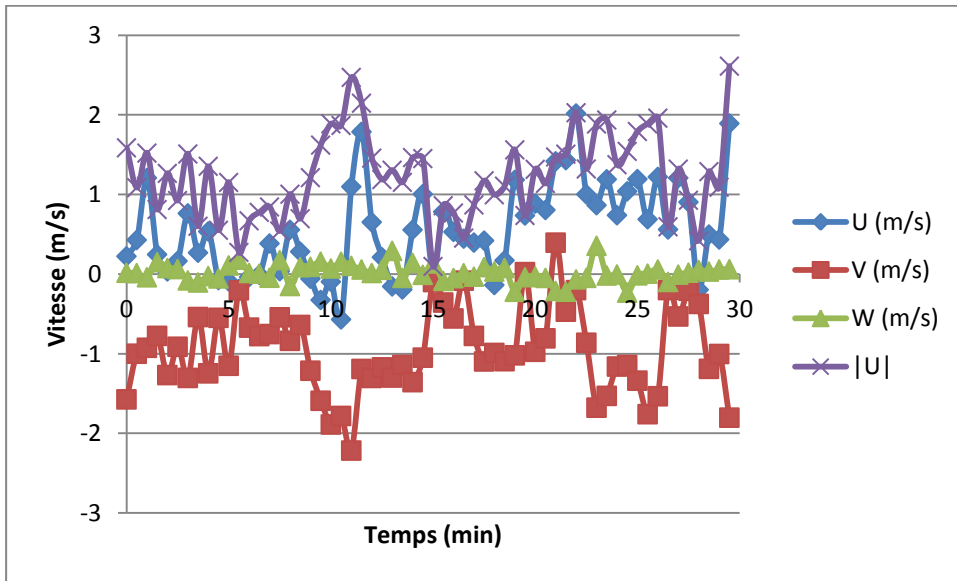


Représentation de la direction :

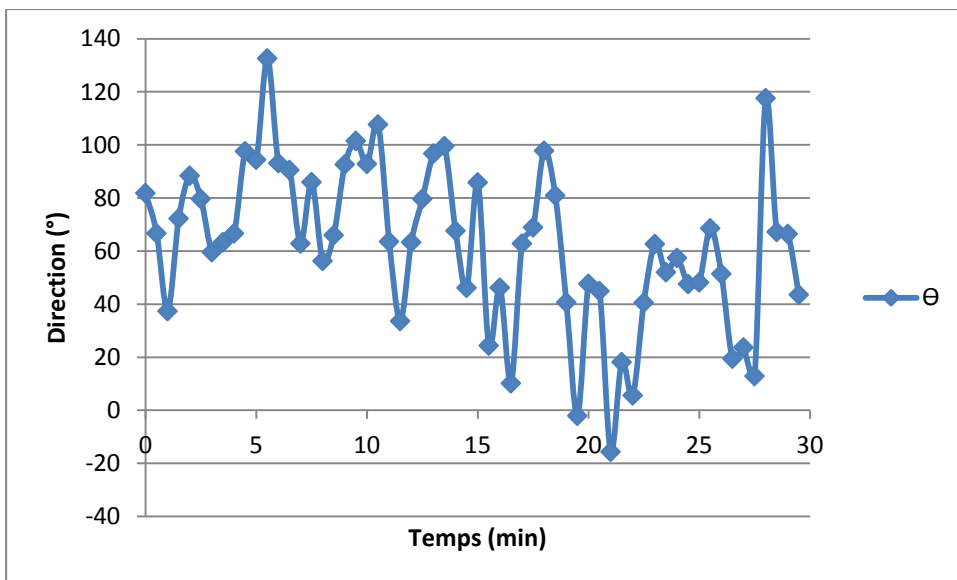


- Traitement du vent par intervalle de 30 secondes :

Représentation des vitesses



Représentation de la direction



Annexe 5 : Résultats des tests du khi-2

Volume / Distance

réelles	<0,3	0,3<X	total	Attendues	<0,3	0,3<X	total	
<=20	2,00	11,00	13,00	<=20	8,27	5,02	13,00	
<=35	10,00	6,00	16,00	<=35	10,18	6,18	16,00	
<=50	16,00	0,00	16,00	<=50	10,18	6,18	16,00	
total	28,00	17,00	45,00	total	28,00	17,00	44,00	
							P value	2,272E-05

Volume / Angle

réelle	<0,3	0,3<X	total	Attendue	<0,3	0,3<X	total	
<=20°	5,00	13,00	18,00	<=20°	3,41	14,59	18,00	
<=40°	4,00	8,00	12,00	<=40°	2,28	9,72	12,00	
>40°	2,00	26,00	28,00	>40°	5,31	22,69	28,00	
total	11,00	47,00	58,00	total	11,00	47,00	58,00	
							P value	0,08

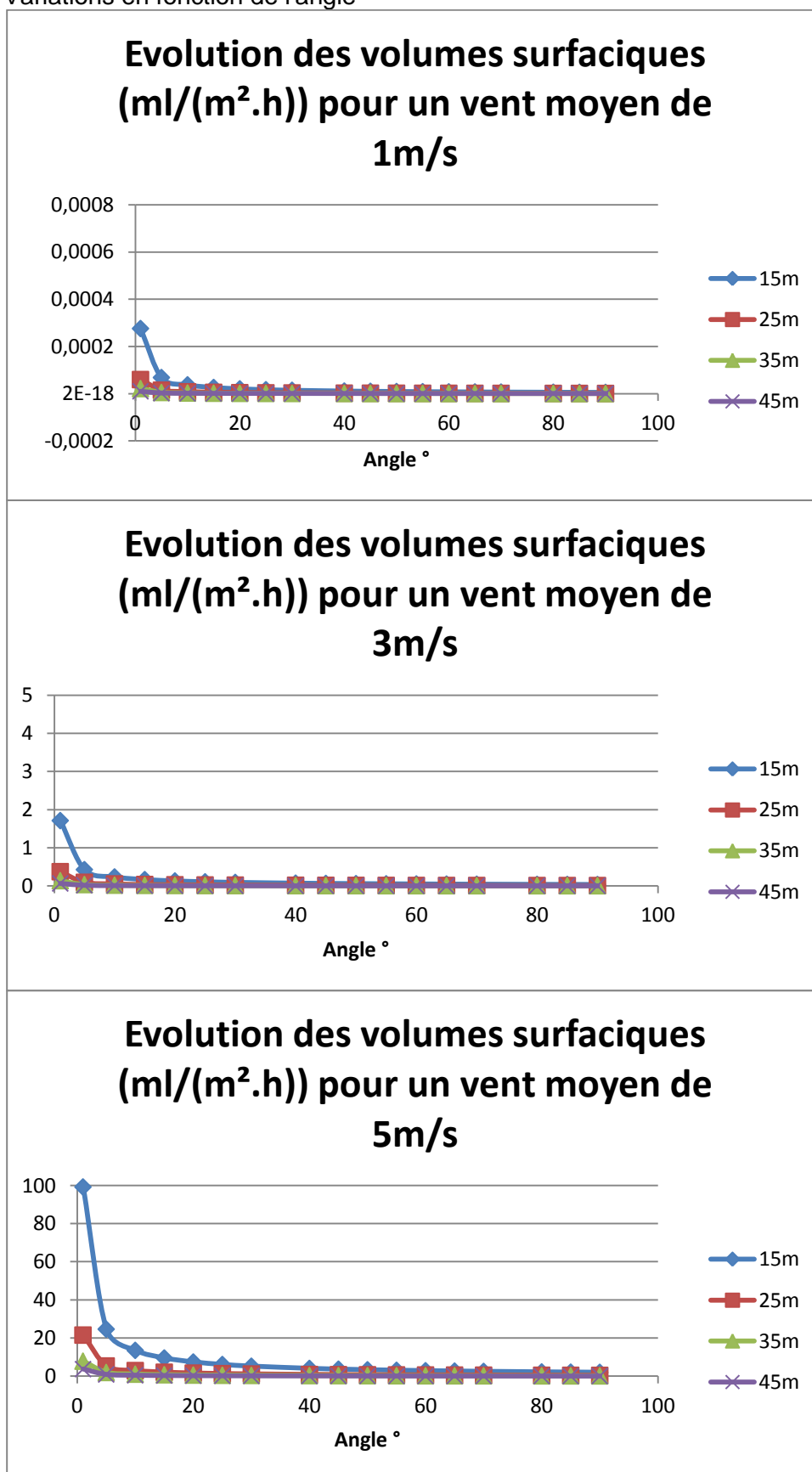
Volume / Vitesse

réelle	<0,3	0,3<X	total	réelle	<0,3	0,3<X	total	
<2	15,00	15,00	30,00	<2	13,22	16,78	30,00	
>2	11,00	18,00	29,00	>2	12,78	16,22	29,00	
total	26,00	33,00	59,00	total	26,00	33,00	59,00	
							P value	0,35

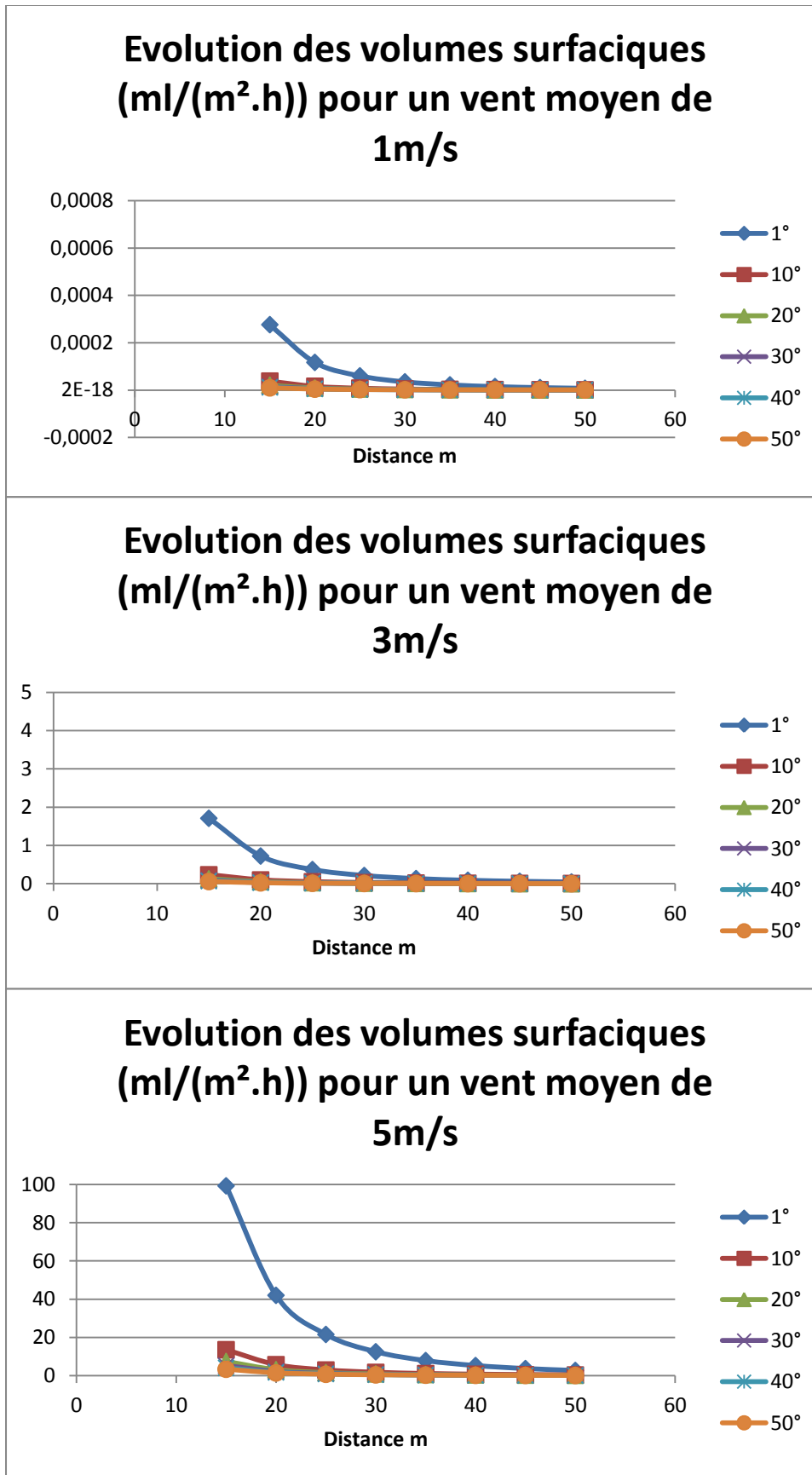
Annexe 6 : Résultats des modélisations

- Résultats pour les fils PVC placés à 1m

o Variations en fonction de l'angle

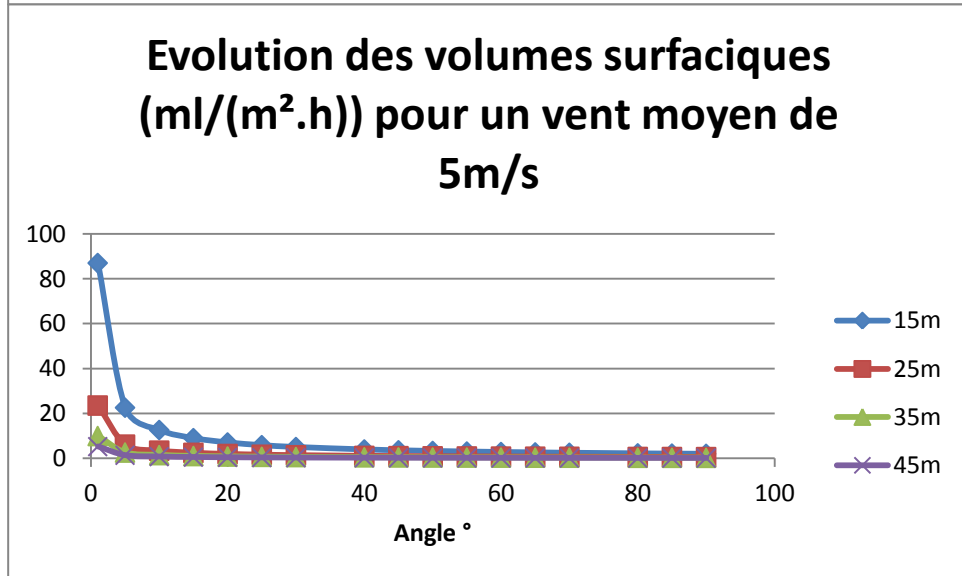
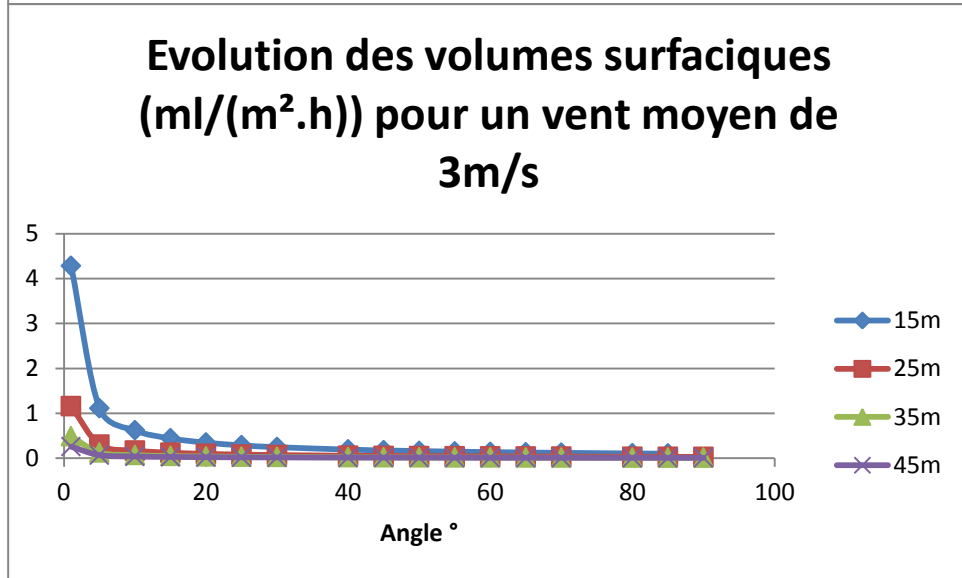
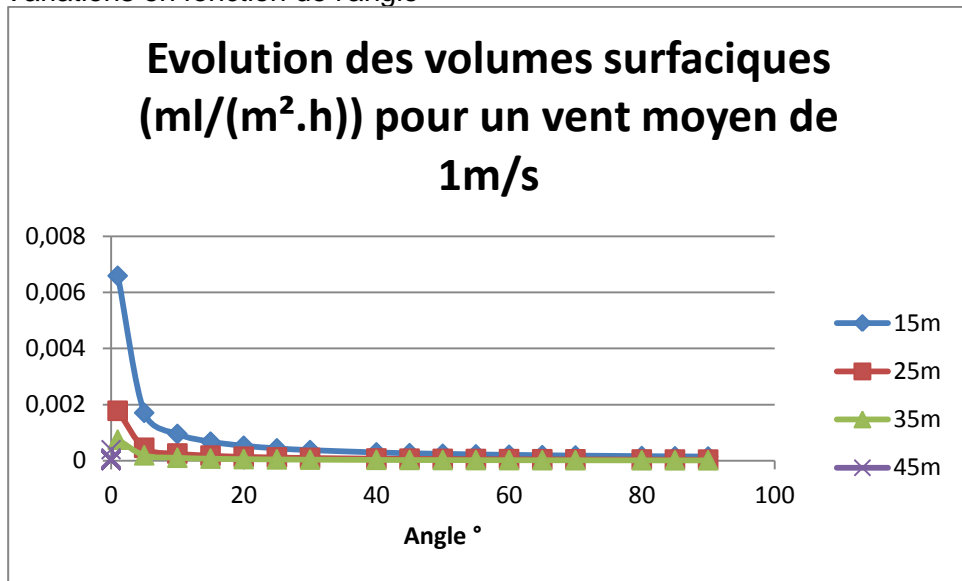


- Variations en fonction de la distance



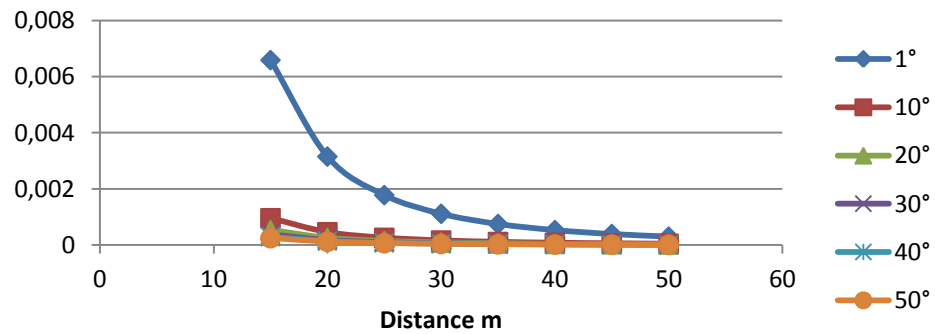
- Résultats pour les fils PVC placés à 2m

o Variations en fonction de l'angle

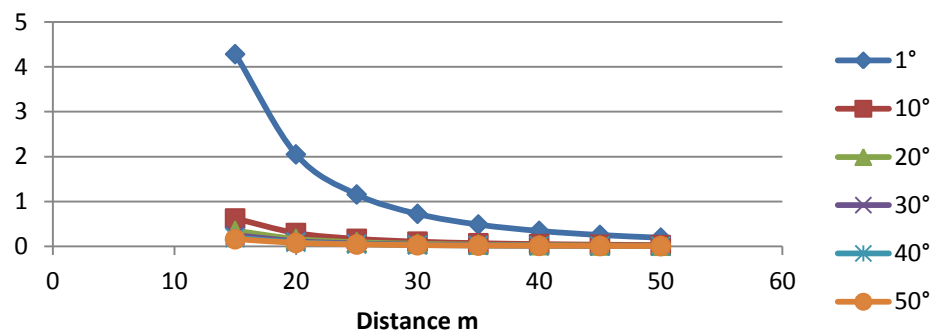


o Variations en fonction de la distance

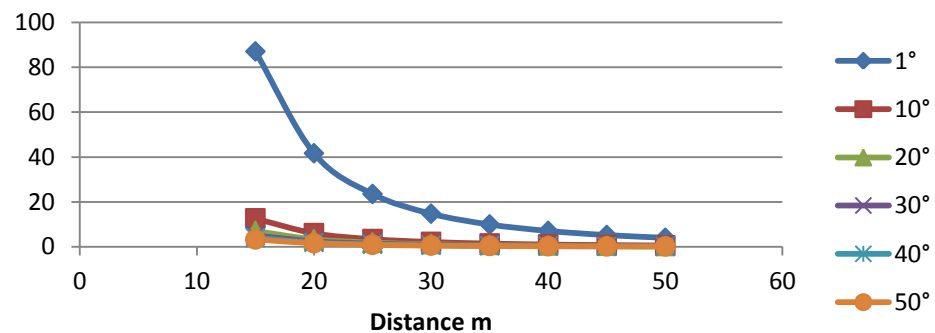
Evolution des volumes surfaciques (ml/(m².h)) pour un vent moyen de 1m/s



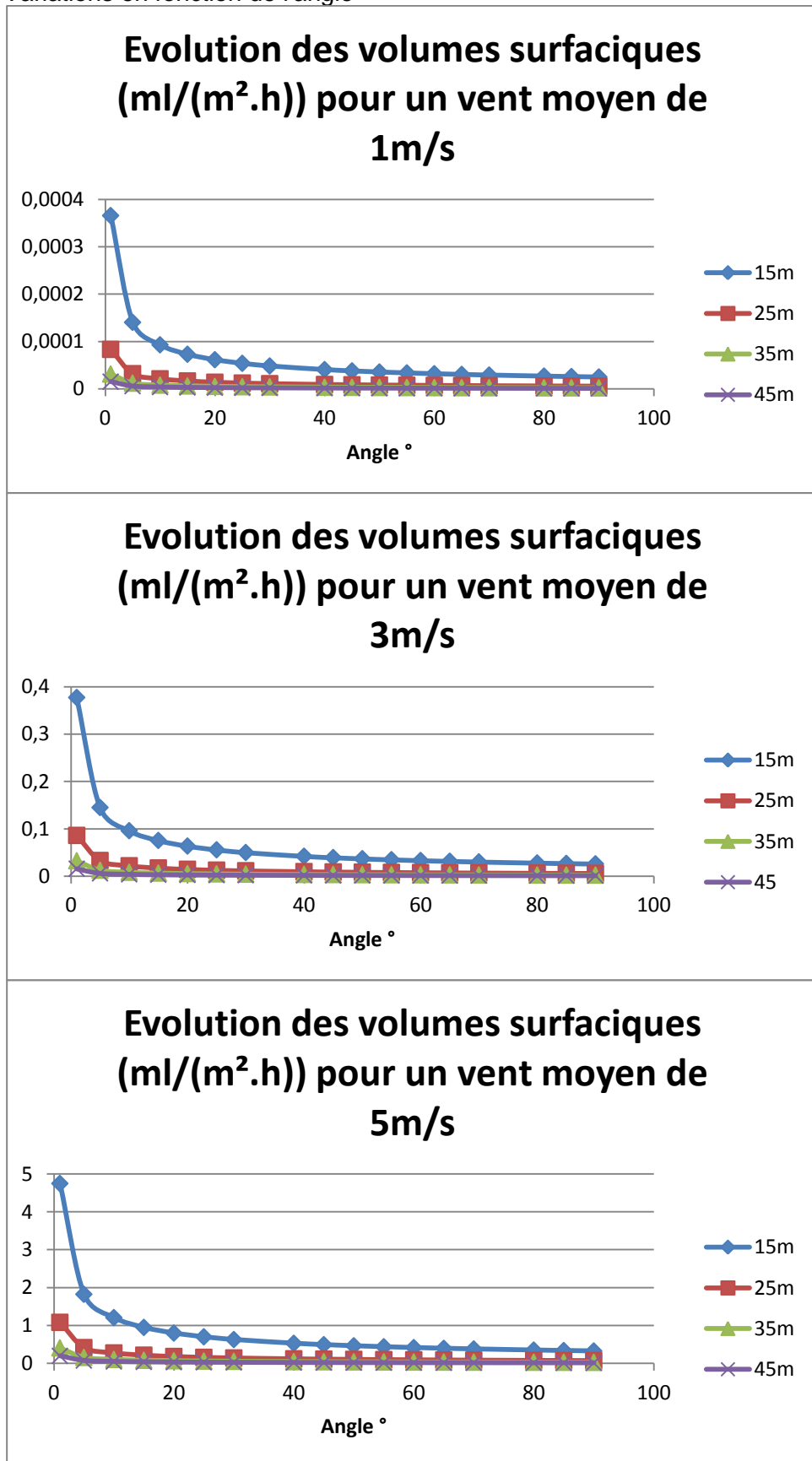
Evolution des volumes surfaciques (ml/(m².h)) pour un vent moyen de 3m/s



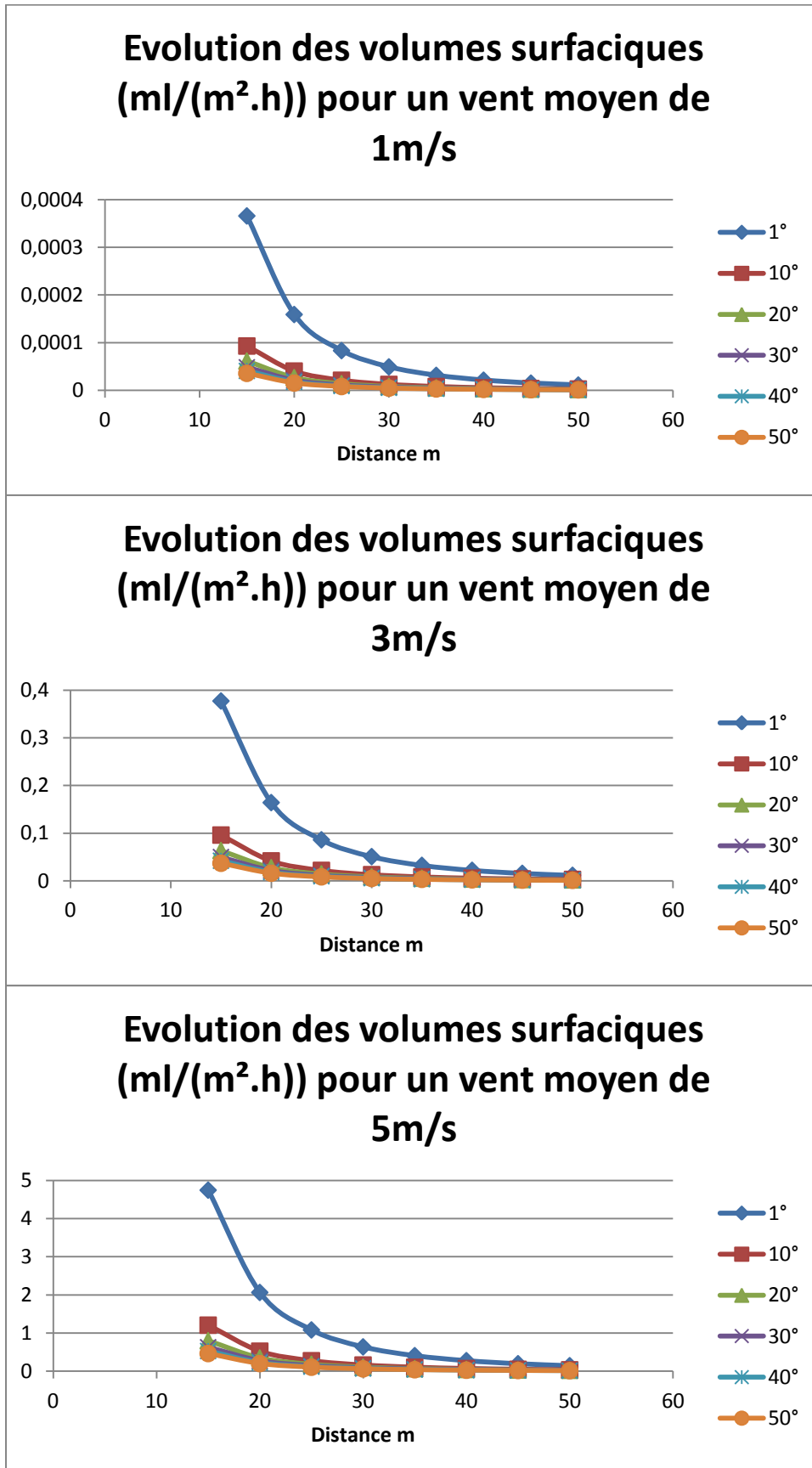
Evolution des volumes surfaciques (ml/(m².h)) pour un vent moyen de 5m/s



- Résultats pour les boîtes de Pétri
 - o Variations en fonction de l'angle



- Variations en fonction de la distance

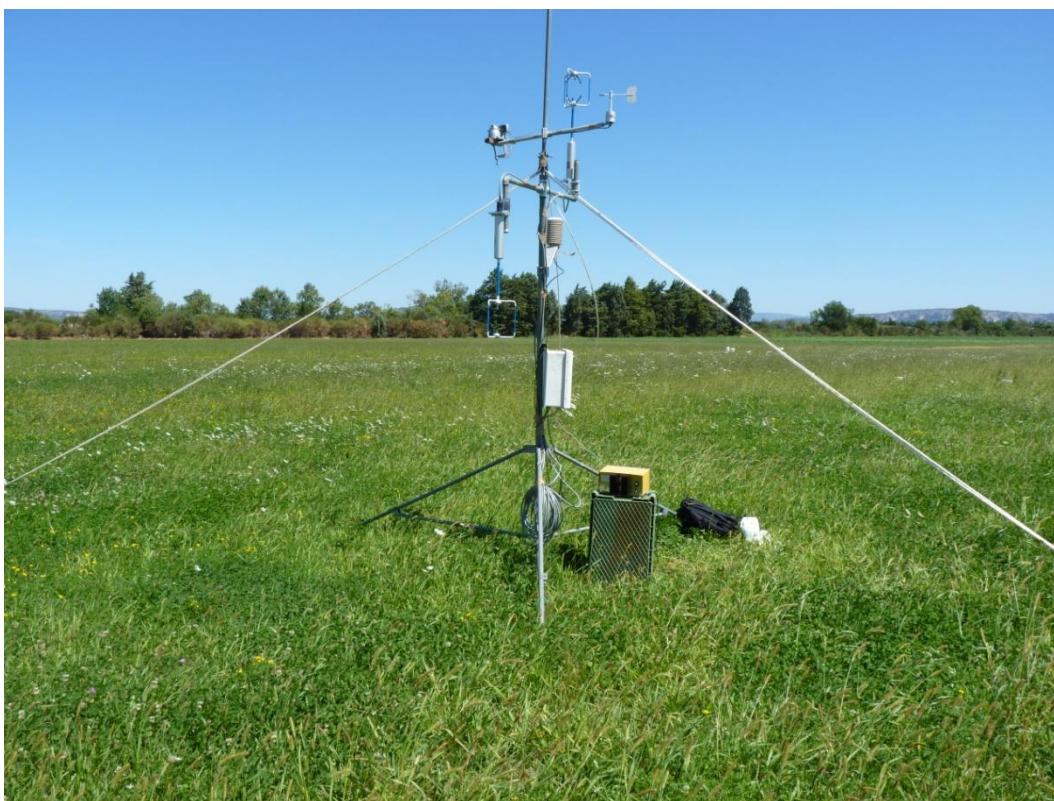


Annexe 7 : Photos des expérimentations du 9 août 2011

- Disposition des pluviomètres



- Station météorologique



- Disposition des boîtes de Pétri et des fils PVC



- Observation du panache de gouttelettes



OLIVIER

Yannick

October 9th 2012

Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion 2012

Spraying with treated wastewater: Studies of the risk linked with the aerosol creation.

Abstract :

In the context of global warming, the pressures are more and more important on the water resources. The Wastewater Reuse gives value to a potentially harmful pollution, allowing the conciliation of two water utilizations (domestic and rural). This use has to be supervised because of the presence of potentially deleterious elements. The actual policies are based on different guidelines and regulations often very strict due to the lack of data on this subject.

A field experimentation has been developed in order to estimate the volumes transported by the wind (derive and transport). The problematic are :

- Improve in situ measurement protocol in order to give the base of the establishment of a model with the characteristics of a representative pathogenic agent;
- Suggest recommendations in the wastewater Reuse project.

The results show the existence of aerosols at very long distance. Water particles can be found at more than 50m of the sprinkler and at a height of 2m. A first estimation of volume variations functions of the distance and the wind (average speed and direction) has been established.

This work contributes to quantify the volume on which people can be exposed by inhalation or skin contact. The data will be used for protocol improvement and measurement computer program adjustment for more representativeness and pathogenic organism concentration estimation.

Keywords :

Wastewater Reuse, spraying, transport, drift, health risk assessment, aerosol, pathogenic microorganism, exposition.

L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

OLIVIER

Yannick

9 octobre 2012

Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion 2012

Aspersion avec des eaux usées traitées : Approche du risque lié à la formation d'aérosols

Résumé :

Dans un contexte de changement climatique les pressions sont de plus en plus importantes sur la ressource en eaux. La réutilisation des eaux usées traitées (REUT), en valorisant une pollution potentiellement néfaste pour le milieu, permettrait de concilier deux utilisations de l'eau (utilisations domestiques et rurales). Ces utilisations doivent être encadrées en raison de la potentielle présence dans l'eau d'éléments dangereux pour l'Homme. Les politiques de gestion actuelle sont basées sur les différentes recommandations et guidelines. Mais elles s'avèrent souvent très strictes en raison du faible nombre de données existant sur le sujet.

Une expérimentation sur le terrain a donc été mise au point dans le but d'estimer les volumes s'échappant sous l'influence du vent (transport et dérive). Les problématiques sous jacente sont :

- Approfondir le protocole de mesure *in-situ* pour donner les bases des modélisations fluides avec les caractéristiques d'un agent pathogène représentatif;
- Proposer des recommandations dans les projets de REUT.

Les résultats montrent l'existence d'aérosols soumis à l'action du vent sur de grandes distances. Il est possible de retrouver des particules d'eau à plus de 50 m de l'asperseur et à une hauteur de 2m. Ils donnent également une première estimation de la variation des volumes en fonction de la distance et des variations du vent (vitesse et direction).

Ce travail permet donc de quantifier un peu mieux les volumes pouvant entrer en contact avec l'Homme par inhalation ou par voie cutanée. Il permettra également d'affiner le protocole et de caler un modèle informatique de mesure afin d'être le plus représentatif possible et de pouvoir estimer les concentrations en organismes pathogènes.

Mots clés :

Réutilisation des eaux usées traitées, Aspersion, Transport, Dérive, Aérosols
Evaluation des risques sanitaires, Micro-organismes pathogènes, Exposition.

L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.