



Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion : 2007/2008

Date du Jury : **24 septembre 2008**

**Contribution à l'évaluation de la contamination de l'air
des logements par les THM en vue d'une estimation de
l'exposition par inhalation des occupants**

Présenté par : Ianis DELPLA

Lieu du stage : LERES

Référent professionnel :
Mr. Michel Clément, LERES

Référent pédagogique :
Mr. Olivier Thomas, LERES

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon référent pédagogique, Olivier Thomas, directeur du Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Environnement et Santé (LERES) pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je tiens à remercier l'équipe participant à la conduite et à la mise en œuvre du projet THM-Pollprox au sein du LERES :

- Michel Clément, responsable du projet et enseignant à l'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, pour m'avoir intégré dans son équipe et pour ses conseils pendant ce stage.
- Hélène Hamel-Paulus, ingénieure recherche, pour son suivi et ses conseils, et pour m'avoir permis de l'accompagner sur le terrain pendant la campagne test.
- Vincent Bessoneau, étudiant en master recherche sur la contamination de l'air par les THM dans une douche expérimentale, dont les conseils m'ont été utiles pour la rédaction du rapport.
- Emilie Surget, dont l'aide a été précieuse pour la compréhension des aspects techniques et analytiques de l'enquête.

Ce mémoire a aussi vu son aboutissement grâce aux conseils de personnes extérieures au laboratoire, je tiens donc à remercier l'ensemble des professionnels qui ont contribué à son amélioration en prenant le temps de répondre à mes questions et en me fournissant de précieuses informations : Mickaël Derbez, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Jacques Ribéron, du CSTB-OQAI et Alain Person, du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP).

Sommaire

Introduction	1
I. ELEMENTS DE CONTEXTE RELATIFS AUX THM ET A L’AIR INTERIEUR	3
1. ORIGINE DE LA CONTAMINATION	3
1.1 Traitement de l’eau potable	3
1.2 Evolution des concentrations dans le réseau d’alimentation en eau potable.	3
2. IMPACTS SANITAIRES	5
2.1 Sources d’exposition	5
2.2 Voies d’exposition.....	5
2.3 Effets sur la santé.....	5
2.4 Populations exposées, populations sensibles	7
3. REGLEMENTATION APPLICABLE AUX THM ET A LA QUALITE DE L’AIR INTERIEUR	7
3.1 Trihalométhanes.....	7
3.2 Le renouvellement d’air	9
II. DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION DE L’AIR INTERIEUR PAR LES THM	11
1. IDENTIFICATION DES DETERMINANTS DE LA CONCENTRATION DANS LA DOUCHE	11
1.1 Concentration dans l’eau.....	11
1.2 Débit d’eau	11
1.3 Coefficient de transfert de masse.....	11
1.4 Température de l’eau	12
1.5 Type de jet.....	13
1.6 Renouvellement de l’air	13
2. SITUATIONS D’EXPOSITION DANS LE LOGEMENT	18
2.1 Pièces sources	18
2.2 Pièces de vie	19
III. QUANTIFICATION DE LA CONTAMINATION DE L’AIR INTERIEUR EN VUE D’UNE EVALUATION DE L’EXPOSITION	21
1. METHODES D’APPROCHES	21
1.1 Approches directe et indirecte.....	21
1.2 Organisation de la campagne logements	21
2. OUTILS DE RECUEIL DES DONNEES	23
2.1 Questionnaire	23

2.2	Métrologie	26
2.3	Modélisation	31
IV.	RESULTATS.....	39
1.	RESULTATS EXPERIMENTAUX DE L'ENQUETE PRELIMINAIRE	39
1.1	Lieux d'émission	39
1.2	Pièces réceptrices	40
2.	APPROCHE DE MODELISATION.....	41
2.1	Choix des valeurs	41
2.2	Validation du modèle douche	42
3.	COMPARAISONS DES RESULTATS.....	45
V.	RECOMMANDATIONS.....	47
1.	AMELIORATION DES METHODES DE MODELISATION DE L'EXPOSITION	47
2.	AMELIORATION DE LA PRISE EN COMPTE DE L'EXPOSITION AUX SPC	48
3.	GESTION DU RISQUE LIE À L'EXPOSITION AUX THM ET AUX AUTRES SPC.....	49
	Conclusion.....	51
	Bibliographie.....	53
	Liste des annexes.....	I
	Abstract.....	XX

Liste des tableaux et des figures

Figures :

Figure 1 : Exemple de procédé de traitement d'eau potable (Usine de Méry-sur-oise).....	3
Figure 2 : Distribution des concentrations en THM dans l'eau alimentant la population française [10].....	4
Figure 3 : Influence de la largeur d'ouverture d'une fenêtre sur le TRA dans 2 maisons situées aux USA [43].....	16
Figure 4 : Comportement du modèle douche (CLF) et mesures en situation réelle (formaldéhyde) de la variation de la concentration en polluant dans l'air en fonction du renouvellement d'air (RA)	43
Figure 5 : Comparaisons entre concentrations en chloroforme prédites et observées lors d'une douche expérimentale	44

Tableaux :

Tableau 1 : Liste des VTR associées à l'exposition par inhalation aux THM.....	6
Tableau 2 : Débits extraits réglementaires dans chaque pièce de service en fonction du nombre de pièces principales d'un logement.....	9
Tableau 3 : Débits total extrait et débit réduit de cuisine réglementaires exprimés en m ³ /h ..	10
Tableau 4 : constantes de Henry [36]	12
Tableau 5 : Pourcentage de type de débits observés non réglementaires par type de débits mesurés	18
Tableau 6 : Classes de contamination en THM utilisées dans le cadre de la campagne logements.....	21
Tableau 7 : Perméabilité à l'air en vol/h sous 1 Pa	24
Tableau 8 ; Classe de largeur d'ouverture de fenêtres et d'intensité de l'aération et taux de renouvellement d'air associé.....	34
Tableau 9 : Concentrations des quatre THM dans l'air de la salle de bain des 2 logements enquêtés exprimées en µg/m ³	39
Tableau 10 : Concentrations des quatre THM dans l'air de la cuisine des 2 logements enquêtés exprimées en µg/m ³	40
Tableau 11 : Concentrations des quatre THM dans l'air de la chambre des 2 logements enquêtés exprimées en µg/m ³	40
Tableau 12 : Formule de calcul de la constante de Henry utilisée [Staudinger, 2000]	41

Tableau 13 : Valeurs utilisées pour le test de sensibilité du modèle.....	42
Tableau 14 : Comparaison des concentrations en chloroforme expérimentales et prédites par le modèle dans l'air pour une douche	44
Tableau 15 : Valeurs de concentration en chloroforme prédites et observées dans les salles de bain des 2 logements tests. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	45

Liste des sigles utilisés

AFFSA : Agence française de Sécurité Sanitaire des Aliments

ATSDR: Agency for Toxic Substances and Diseases Registry

BDCM: Bromodichlorométhane

CMA : Concentrations Maximales Acceptables

COT : Carbone Organique Total

DBCM : Dibromochlorométhane

DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales

DRASS : Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales

ERU : Excès de Risque Unitaire

InVS: Institut de Veille Sanitaire

LERES : Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Environnement et Santé

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OQAI : Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur

OR: Odds ratios

SISE-EAUX : Système d'information des Services Santé Environnement-EAUX. Il s'agit d'un outil de gestion informatique à destination des DDASS et des DRASS qui regroupe les données administratives, techniques et analytiques de la distribution d'eau en France.

SPC : Sous-Produits de Chloration

TBM : Tribromométhane

TCM : Trichlorométhane

THM : Trihalométhanes

TRA : Taux de Renouvellement d'Air

UDI : Unité de Distribution

VGAI : Valeur Guide pour la qualité de l'Air Intérieur

VTR : Valeur Toxicologique de Référence

Introduction

La chloration des eaux est le procédé le plus couramment utilisé dans les unités de production d'eau potable pour éliminer les risques liés à la présence de microorganismes pathogènes, comme les bactéries (gastro-entérites, salmonelloses, ...) et les virus (hépatites A et E, gastro-entérites ...) [1]. Cependant, cette étape de désinfection engendre, au contact de la matière organique, une grande quantité de sous-produits de chloration (SPC) (plus de 250 familles ont été répertoriées à ce jour) [2].

Les trihalométhanes (THM), qui se forment par réaction entre le chlore, la matière organique et les ions bromures, sont les principaux SPC rencontrés et sont généralement pris comme indicateurs de la contamination de l'eau potable. Ils regroupent 4 composés particulièrement volatils : le chloroforme ou trichlorométhane (TCM) et les THM bromés : le bromoforme ou tribromométhane (TBM), le dibromochlorométhane (DBCM) et le bromodichlorométhane (BDCM). L'ingestion d'eau du robinet n'est pas la seule voie d'exposition de la population aux THM. Dans l'habitat, l'inhalation est une voie qui doit particulièrement être prise en considération en raison de la très grande volatilité de ces composés [3]. La contamination de l'air des logements par les SPC se produit par dégazage de ces substances aux divers points d'utilisation de l'eau (salles de bain et cuisines, au moment de la toilette, de la préparation des repas et des tâches ménagères) [4].

L'étude de la présence des THM dans l'air intérieur et l'évaluation de leur impact est à replacer dans le contexte plus global de la récente prise en compte de l'impact sanitaire des polluants de l'air intérieur. En France, le budget espace-temps de la population générale se répartit de la manière suivante : 15% en extérieur et 85% dans des espaces clos (habitat principalement et lieu de travail) [5]. L'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) a mis en évidence pour certains Composés Organiques Volatils (COV) (benzène, formaldéhyde, CO₂, ...) de nombreux dépassements des valeurs guides dans les logements français [6]. Ces résultats ont permis de lancer les premières recherches sur l'impact sanitaire des COV présents dans l'air intérieur comme le formaldéhyde et le benzène mais les THM ne font pas partie des substances étudiées. Par ailleurs, de nombreux autres composés contenus dans l'eau du robinet peuvent aussi se volatiliser dans l'air intérieur (radon, tetrachloroéthylène, trichloroéthylène, tétrachlorure de carbone, ...) [7].

Suite à un appel à projet de recherche, le Laboratoire d'Etude et de Recherche en Environnement et Santé (LERES) s'est engagé dans un travail dont l'objet est la détermination de la contamination de l'air intérieur des habitats par les THM, en vue d'une évaluation de l'exposition à ces substances par inhalation (Projet Pollprox). Ce projet comporte une première phase de détermination des niveaux et des déterminants de la

contamination de l'air des habitats par les THM. La collecte des données est prévue grâce à une enquête sur le terrain, où des prélèvements seront effectués dans 60 logements du département de l'Ille-et-Vilaine, qui permettra l'élaboration des relations prédictives de la concentration en THM dans l'air en fonction de ses principaux déterminants.

Ce mémoire s'inscrit dans ce projet et à pour but de fournir dans une première partie des outils pour améliorer la caractérisation de la contamination de l'air intérieur par les THM. Ces outils doivent ensuite permettre une exploitation optimisée des résultats de l'enquête logements, ainsi des protocoles d'évaluation et des indicateurs du renouvellement d'air seront construits. Enfin, dans une dernière partie, il sera réalisé une approche d'application de modèle de prédiction de la contamination de l'air intérieur par les THM.

I. ELEMENTS DE CONTEXTE RELATIFS AUX THM ET A L'AIR INTERIEUR

Cette partie présente les éléments de compréhension disponibles dans la littérature et utiles pour aborder la problématique de la contamination par les THM de l'air intérieur.

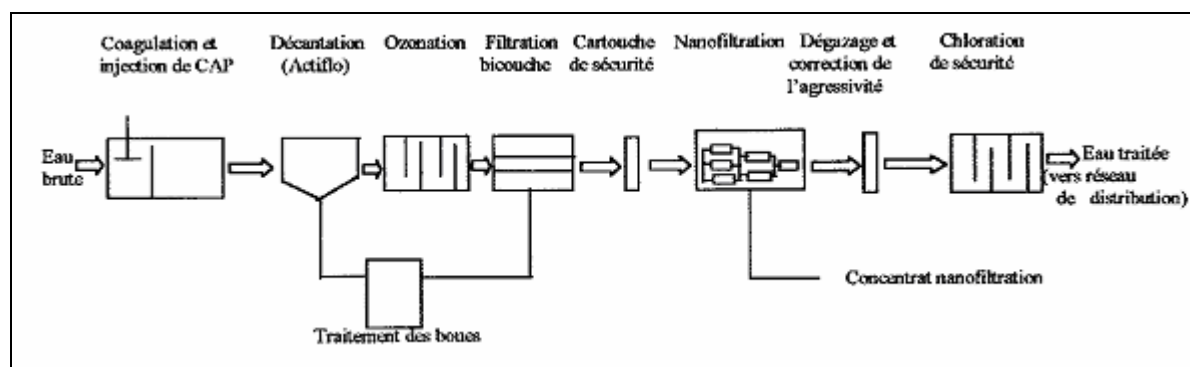
1. ORIGINE DE LA CONTAMINATION

1.1 Traitement de l'eau potable

Les THM présents dans l'eau potable proviennent principalement de l'étape de chloration, réalisée en fin de traitement de potabilisation, et leur principal précurseur est la matière organique naturelle (MON) [8]. La quantité de MON est généralement plus élevée dans les eaux superficielles que dans les eaux souterraines. Afin de limiter la concentration en THM dans l'eau potable, il est primordial d'éliminer au maximum la quantité de MON initialement présente dans l'eau brute et de doser avec précision la quantité de chlore à ajouter lors de l'étape de désinfection.

La réduction des MON est essentiellement réalisée en début de filière grâce aux étapes de coagulation, floculation, décantation et filtration. Une étape d'affinage (filtration sur membrane ou adsorption sur charbon actif) peut également être ajoutée en fin de filière dans le cas où l'eau brute est chargée de matières organiques persistantes. La figure 1 présente un exemple de procédé de traitement de l'eau pour une ressource en eau superficielle.

Figure 1 : Exemple de procédé de traitement d'eau potable (Usine de Méry-sur-oise)



(Source : <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/duue/decaux/fig12.gif>)

La quantité optimale de chlore à ajouter est déterminée en laboratoire par des essais de demande en chlore.

Le chloroforme est généralement le THM majoritaire dans l'eau chlorée, suivi du BDCM, du DBCM et du bromoforme [9 et 10]. Sa proportion peut cependant varier en fonction de la teneur de l'eau brute en bromures (formation de THM bromés) et selon le pH de l'eau [11].

1.2 Evolution des concentrations dans le réseau d'alimentation en eau potable.

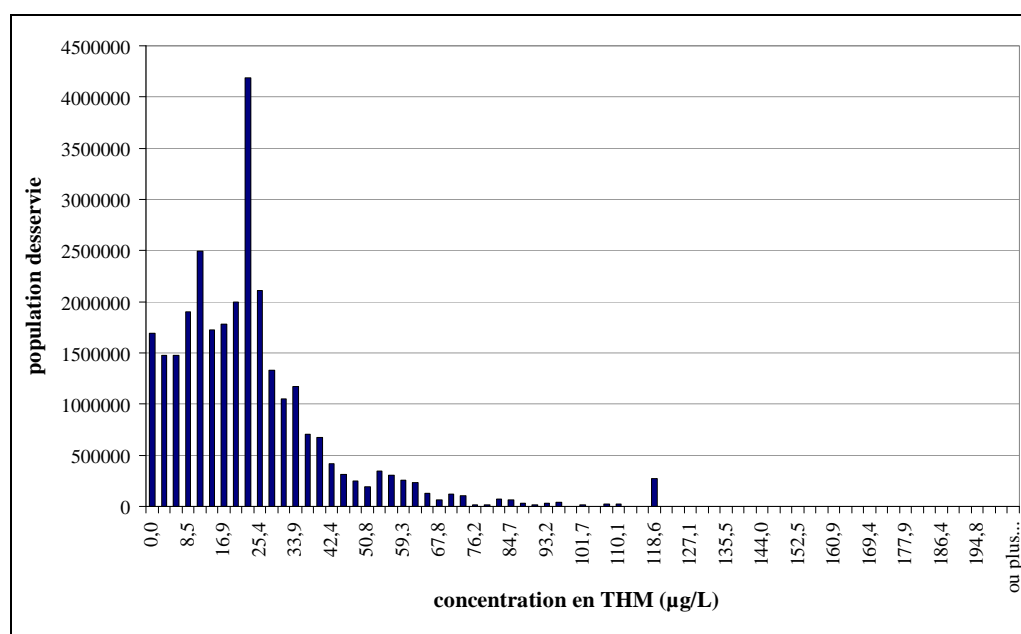
Une UDI (Unité de Distribution) fournit une eau de qualité homogène. Cependant, les concentrations en THM peuvent évoluer le long du réseau d'alimentation, en particulier

quand l'eau en sortie d'usine contient peu de chlore libre [9]. Une expertise des SPC menée conjointement par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA) et par l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) sur 3 sites a mis en évidence une augmentation des concentrations en THM dans un rapport allant de 2 à 4 entre la sortie d'usine et un point éloigné du réseau. Cette augmentation semble plus dépendre de la demande en chlore (qui dépend elle-même de la charge en MON) en sortie d'usine que de la présence de postes de rechloration le long du réseau [9].

De plus, des variations saisonnières (influence des pics saisonniers de précipitations sur la teneur en MO de l'eau brute) et horaires (au cours de la même journée) ont aussi été mis en évidence [12].

Le graphique présenté figure 2 explicite la distribution de la contamination en THM de l'eau mesurée au robinet du consommateur pour l'ensemble de la population française.

Figure 2 : Distribution des concentrations en THM dans l'eau alimentant la population française [10]



Il est à préciser que les valeurs de contamination du réseau dans le département de l'Ille et Vilaine sont globalement supérieures aux valeurs nationales. L'utilisation plus importante de ressources d'eaux superficielles dans ce département en est une des principales causes. Un pic de concentration saisonnier est régulièrement observé dans la région de Rennes pendant la période d'août à octobre [13]. Les données de contamination pour le département de l'Ille-et-Vilaine sont fournies en Annexe I.

2. IMPACTS SANITAIRES

2.1 Sources d'exposition

Les sources d'exposition aux THM peuvent être diverses mais elles ont toutes pour même origine l'eau potable. La contamination de l'air intérieur se produit par dégazage de ces substances (constantes de Henry élevées) aux divers points d'utilisation de l'eau.

Les principaux lieux où la population est potentiellement exposée aux THM sont les halls des piscines et les habitations.

Les piscines sont les lieux où la contamination de l'atmosphère intérieure peut être la plus forte. Les réactions du chlore sur la matière organo-azotée apportée par les baigneurs (sueur, urine, cosmétiques, ...) conduit à la formation supplémentaire de SPC susceptibles de se transférer dans l'air. On compte parmi ces substances les THM (principalement le chloroforme) et la trichloramine [2].

La contamination atmosphérique de l'habitat par les THM, quant à elle, a pour principale origine l'utilisation domestique de l'eau potable dans les salles de bain (douche) et les cuisines (préparation d'aliments, vaisselle). La douche, qui est considérée comme l'activité la plus contaminante et la plus exposante, a donné lieu à de nombreuses études. En revanche, les niveaux de contamination atmosphérique par les THM dans l'habitat, en général, sont encore peu renseignés, notamment en France [6].

2.2 Voies d'exposition

Les voies identifiées d'exposition aux THM sont multiples. L'ingestion d'eau du robinet est la voie la plus communément évaluée. Il apparaît néanmoins que l'inhalation et le contact cutané sont des voies d'exposition aux THM à prendre en considération en raison de leur forte volatilité [4] et de leur grande perméabilité cutanée [14]. En effet, il a été montré que la dose absorbée par inhalation et par voie cutanée pendant une douche de 10 minutes serait supérieure ou égale à celle due à l'ingestion de deux litres d'eau par jour [14 et 15]. De plus, certaines études concluent que l'exposition par inhalation associée à l'émission de COV, dont font partie les THM, lors de l'utilisation d'eau potable pourrait être jusqu'à six fois supérieure à celle associée à l'ingestion de deux litres d'eau par jour [4]. La voie d'exposition étudiée lors de ce stage sera l'inhalation.

2.3 Effets sur la santé

2.3.1 Effets cancérigènes

Les THM sont au cœur des préoccupations sanitaires en raison du caractère cancérigène possible pour l'homme (groupe 2B)¹ voire du caractère cancérigène probable (groupe B2)²

¹ Ce classement a été établi par l'IARC-Centre International de Recherche sur le Cancer.

² Ce classement a été établi par l'USEPA - U.S. Environmental Protection Agency.

du TCM (ingestion et inhalation) et du BDCM (orale). Le TBM et le DBCM sont, quant à eux, respectivement classés, pour la voie orale, B2 et C (cancérogène possible) par l'US-EPA, alors que ces deux composés sont classés 3 (inclassable) par l'IARC [1]. Il existe de nombreuses VTR associées aux risques par inhalation de chacun des composés. Le tableau 1 recense les différentes VTR associées aux risques cancérogènes de chaque THM.

Tableau 1 : Liste des VTR associées à l'exposition par inhalation aux THM

Type de composés	Source de la VTR	Année	Valeur	Effets
CLF	OMS [16]	2004	CMA=140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Hépatite toxique Carcinome hépatique chez la souris
	ATSDR[1]	1997	VTR=98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	USEPA[1]	2001	ERU = $2,3 \cdot 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	
BDCM	OEHHA [17]	2008	ERU = $3,7 \cdot 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	-
DBCM	OEHHA [17]	2008	ERU = $2,7 \cdot 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	-
BRF	USEPA [1]	1991	ERU = $1,1 \cdot 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Tumeur du foie chez la souris

Ces résultats ont été calculés à partir d'expériences en laboratoire et il a été observé des différences entre les effets observés chez l'animal et ceux observés chez l'homme [1]. Des études épidémiologiques ont montré, avec des Odds Ratios (OR) faibles (compris entre 1,2 et 1,7) mais significatifs, une association entre l'utilisation d'eau chlorée ou la présence de concentrations élevées en THM dans l'eau, et la survenue de certains cancers, principalement les cancers colo-rectaux et de la vessie [13, 12, 18]. Par ailleurs, la forte prévalence de l'exposition ainsi qu'une suspicion de relation dose-réponse sans seuil pourrait conduire à un impact sanitaire important.

La découverte du potentiel cancérogène de ces SPC a justifié leur récente prise en compte dans la surveillance de la qualité des eaux alimentaires en Europe. En revanche, la mise en place d'un réseau de surveillance épidémiologique des effets sanitaires de la chloration des eaux est jugée comme non pertinent par l'InVS au vu du faible nombre de cas supplémentaires attendus pour une population exposée selon un scénario moyen (0,3 pour 900 000 personnes). Cependant, la question de la pertinence et de la faisabilité d'un suivi épidémiologique dans les endroits où les concentrations en THM sont élevées (scénario élevé d'exposition) reste encore à explorer [9].

2.3.2 Effets sur le développement et la reproduction

Une association entre concentration en chloroforme et risques reprotoxiques (faibles poids à la naissance, avortements spontanés, mortinatalité et accouchement prématuré) a été trouvée [1, 19]. Cependant, ces résultats restent à confirmer car les associations entre exposition et risque varient selon les études et les OR trouvés sont faiblement significatifs.

Par ailleurs, deux études (une cohorte rétrospective et une cas-témoins) ont abouti à une association significative entre exposition aux THM et retard de croissance (Risques Relatifs compris entre 1,5 et 1,8) [1]. Enfin, aucune relation dose-effet n'a été rapportée et aucune VTR n'a été élaborée spécifiquement pour les effets des THM sur le développement embryofœtal et la reproduction [1].

2.4 Populations exposées, populations sensibles

En tenant compte des trois voies d'exposition, les personnes utilisant l'eau potable pour la boisson, la cuisine, les tâches ménagères et les douches ou les bains, sont potentiellement exposées aux THM. Cette population représente l'ensemble des foyers raccordés à une UDI, c'est-à-dire plus de 99% de la population française selon une étude du ministère de la Santé parue en 2005 [20].

Les populations sensibles pour l'ingestion sont les femmes enceintes en raison des possibles risques reprotoxiques [19]. Bien qu'il n'existe pas d'études concernant le risque par inhalation, on peut supposer que les enfants et les nourrissons constituent une population plus vulnérable aux effets potentiellement cancérigènes des THM au vu de leur débit respiratoire important comparé à leur taille et du renouvellement rapide de leurs cellules. A l'heure actuelle, peu d'études ont porté sur l'établissement d'une relation entre ventilation et santé. La plupart d'entre elles se sont focalisées sur les immeubles de bureau dans lesquels une association positive a été trouvée [21].

3. REGLEMENTATION APPLICABLE AUX THM ET A LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

3.1 Trihalométhanes

Il n'existe pas à l'heure actuelle de réglementation relative aux teneurs en trihalométhanes dans l'air intérieur. La réglementation concerne uniquement les concentrations en THM dans l'eau potable.

Au niveau international, l'OMS a publié des valeurs guides concernant les différents composés [22] :

- 300 µg/L pour le chloroforme ;
- 60 µg/L pour le BDCM ;
- 100 µg/L pour le DBCM ;
- 100 µg/L pour le bromoforme.

Afin de tenir compte de la présence simultanée de ces substances et d'une éventuelle addition de leur toxicité, l'équation suivante doit être respectée:

$$\frac{CHCl_3}{300} + \frac{CHBrCl_2}{60} + \frac{CHBr_2Cl}{100} + \frac{CHBr_3}{100} \leq 1$$

Il faut préciser que ces valeurs guides définissent des concentrations maximales acceptables (CMA) mais qu'elles n'ont aucune portée juridique. Cependant, la valeur de la norme pour le chloroforme a été revue à la hausse par rapport à la précédente mise à jour faite en 1993 (de 200 à 300µg/L) en raison d'une diminution de l'exposition totale à ce produit (auparavant largement utilisé comme anesthésiant) [22].

L'Agence Américaine de l'environnement (USEPA) a fixé la norme en THM totaux³ à 80 µg/L pour les réseaux d'eau potable desservant plus de 10 000 habitants [23].

La directive 98/83/CE du conseil de l'Union Européenne du 3 Novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixe les normes pour les THM totaux à 100 µg/L [24]. Il est rajouté en note que les états membres doivent si possible, c'est-à-dire sans compromettre la désinfection, s'efforcer d'atteindre une limite inférieure. L'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine est la transcription en droit français de cette directive et fixe la limite de qualité en THM totaux à 150µg/L jusqu'au 25 décembre 2008 et à 100 µg/L après cette date, et ce, au point de mise en distribution et en tout point du réseau de distribution [25]. Il n'est en revanche pas mentionné de limites particulières pour chaque composé. Cette limite de qualité de 100µg/L, qui ne tient compte que de l'exposition par ingestion [14], est très rarement dépassée en France (Cf Figure 2).

Depuis 2003, dans le cadre de l'application du plan Vigipirate, les exploitants des unités de production d'eau potable ont pour exigence réglementaire de maintenir une teneur en chlore résiduel de 0,3 mg/L en sortie des réservoirs et de viser une concentration de 0,1 mg/L en tout point du réseau [26].

Le contrôle de la teneur en THM se fait au point de mise en distribution et au robinet du consommateur dès que l'eau subit une chloration, conformément à l'annexe 13-12 du décret du 21 mai 2003 [27]. Les fréquences annuelles d'échantillonnages et d'analyses sont reportées en annexe II. En France, cette surveillance relève de la compétence des Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS). L'état de la contamination de l'eau au point de distribution est ensuite renseigné via la base de données

³ Les THM totaux sont la somme des concentrations de chloroforme, bromoforme, BDCM et DBCM.

SISE-EAUX qui regroupe les données issues du contrôle sanitaire. Les THM sont les seuls SPC à faire l'objet d'une surveillance continue en France [9].

Pour ce qui est de l'exposition par inhalation, des valeurs guides existent seulement pour le chloroforme. L'OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment) préconise un seuil d'exposition de 40 µg/jour pour un niveau de risque non significatif et de 300 µg/m³ pour l'exposition chronique. Les organes cibles sont le foie et le système nerveux central. Il faut préciser que les rares données disponibles chez l'humain sur l'exposition chronique par inhalation au chloroforme proviennent d'études menées sur des travailleurs exposés à de fortes doses [17].

3.2 Le renouvellement d'air

La ventilation dans les logements est une obligation légale fixée par l'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983. Tous les logements postérieurs à 1982 doivent satisfaire les exigences suivantes [28]:

- « l'aération doit être générale et permanente », « Le système d'aération doit comporter des entrées d'air dans toutes les pièces principales », « des sorties d'air dans les pièces de services, au moins dans les cuisines, les salles de bain et les cabinets d'aisance », et « l'air doit pouvoir circuler librement des pièces principales vers les pièces de service » (Art. 1),
- « une pièce à la fois principale et de service (i.e. équipement de cuisine dans une chambre) doit comporter une entrée et une sortie d'air » (Art. 2).

Dans le tableau 2 sont notés les débits extraits réglementaires dans chaque pièce de service en fonction du nombre de pièces principales d'un logement.

Tableau 2 : Débits extraits réglementaires dans chaque pièce de service en fonction du nombre de pièces principales d'un logement

Nombre de pièces principales du logement	Débits extraits exprimés en m ³ /h				
	Cuisine	Salle de bains ou de douches communes ou non avec un cabinet d'aisances	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisances	
				Unique	Multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

Ces exigences de débits extraits doivent être réalisées dans les conditions climatiques moyennes d'hiver (Art. 3).

Par ailleurs, l'article 4 stipule que ces valeurs peuvent être abaissées par des dispositifs de réglage à condition que le débit réduit minimal en cuisine et le débit total minimal dans le logement soit au moins égaux aux valeurs reportées dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Débits total extrait et débit réduit de cuisine réglementaires exprimés en m³/h

	Nombre de pièces principales						
	1	2	3	4	5	6	7
Débit total minimal en m ³ /h	35	60	75	90	105	120	135
Débit minimal en cuisine en m ³ /h	20	30	45	45	45	45	45

Enfin, l'article 9 stipule que : « le débouché du conduit [de sortie d'air], situé en toiture, doit être tel que l'évacuation de l'air s'effectue correctement vers l'extérieur, sans refoulement vers les logements ».

Les valeurs de débits sont généralement calculées d'après les quantités de dioxyde de carbone émises par les occupants d'un logement.

Dans un souci d'économie d'énergie, il a été introduit de manière successive la modulation de débit : apparition du double débit d'extraction en cuisine (arrêté du 24 mars 1982) et de la variation du débit extrait en fonction de l'humidité de l'air du logement (arrêté du 28 octobre 1983).

Par ailleurs, de nombreuses recommandations à destination du public relatives à l'aération d'un logement (Ademe, Anah,) existent et sont facilement consultables. L'ANAH (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat) a publié un guide technique sur l'aération des logements comportant des préconisations d'entretien des grilles d'aération, d'ouverture de fenêtres ainsi que d'étanchéité d'un logement [29]. L'ADEME a elle aussi publié en 2008 un guide pratique de ventilation de l'habitat [30].

Concernant l'entretien du système de ventilation, le propriétaire est tenu de faire vérifier au moins une fois par an les installations de ventilation [29]. Par ailleurs, les arrêtés du 25 janvier 1985 et du 30 mai 1989 imposent au propriétaire ou au syndic d'un immeuble équipé d'installations collectives de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) auxquelles sont raccordés des appareils à gaz de faire entretenir et vérifier périodiquement l'ensemble des installations et d'en assurer la maintenance [29].

II. DETERMINANTS DE LA CONTAMINATION DE L'AIR INTERIEUR PAR LES THM

La présence de THM dans l'air intérieur est due au dégazage des THM présents dans l'eau. L'identification des pièces sources de la contamination, la cuisine et la salle de bain, et des déterminants de la concentration dans l'air, a été réalisée par de nombreux auteurs, en particulier pour la douche [3, 4, 31]. Ceci justifie la sélection de ces pièces pour la campagne de prélèvements. Les déterminants de la concentration dans l'air vont être présentés en fonction des différentes pièces échantillonnées dans un logement pendant la campagne avec une attention particulière pour le renouvellement d'air qui est le paramètre qui conditionne la fuite des polluants des pièces sources vers les pièces cibles (salon et chambre).

1. IDENTIFICATION DES DETERMINANTS DE LA CONCENTRATION DANS LA DOUCHE

1.1 Concentration dans l'eau.

La concentration en THM dans l'eau est un facteur qui influence d'une manière importante la quantité transférée dans l'air. Il a été observé une évolution linéaire de la concentration en chloroforme dans l'air en fonction de la concentration en chloroforme dans l'eau [14]. Ce coefficient de proportionnalité air/eau diffère selon les études et varie de 3,3 à 17 [18].

1.2 Débit d'eau

L'augmentation du débit d'eau entraîne une plus forte aérosolisation dans la douche. Ceci entraîne donc une augmentation de la surface d'échange entre l'eau et l'air et, en conséquence, une accumulation plus rapide des THM au sein de la cabine de douche [32]. L'augmentation de la quantité de polluants transférée dans l'air avec le débit semble relativement limitée lorsque les débits sont faibles (entre 6,1 et 9,1 L/min). Cependant, cette augmentation est toujours proportionnelle au débit [33].

1.3 Coefficient de transfert de masse

La contamination de l'air pendant une douche se produit par transfert de masse des THM à partir de l'eau. La masse de THM transférée est souvent modélisée en utilisant le coefficient de transfert de masse global (K_L). D'après la théorie de la résistance aux deux films, l'inverse du coefficient de transfert de masse global pour n'importe quel composé chimique dissous dans l'eau peut être exprimé comme la somme de l'inverse des résistances à l'échange entre la phase liquide (eau) et la phase gazeuse (air) [34]. L'aire inter faciale (A) correspond à la surface du film entre le liquide et le gaz que les molécules traversent quand elles se vaporisent dans l'air. Il est cependant souvent difficile d'évaluer l'aire inter faciale sur laquelle

se produit le transfert de masse [35], c'est pourquoi on définit un terme global $K_L A$. L'inverse du coefficient de transfert de masse global pour n'importe quel composé dissous dans l'eau peut donc être défini ainsi :

$$\frac{1}{K_L A} = \frac{1}{k_l A} + \frac{1}{k_g A H_c}$$

Avec K_L = coefficient de transfert de masse global (L/T), A = aire inter faciale (L^2), k_l = coefficient de transfert de masse dans la phase liquide (L/T), k_g = coefficient de transfert de masse dans la phase gazeuse (L/T), et H_c = constante de la loi de Henry sans dimension.

La constante de Henry traduit la partition d'un composé entre l'eau et l'air à l'équilibre. Les THM sont des molécules volatiles, dont la constante de Henry est très élevée. La dépendance de cette constante vis-à-vis de la température est souvent modélisée par une équation de type Van't Hoff [36] :

$$\log H_c = A - \frac{B}{T}$$

où A (sans dimension) et B (K) sont des paramètres d'ajustements et T exprime la température (K).

Pour les composés très volatils tels que les THM, le terme $k_g A H_c$ est très supérieur à $k_l A$, la résistance au transfert de masse dans la phase gazeuse est faible. Ainsi le coefficient global de transfert de masse peut alors être confondu avec le coefficient de transfert de masse en phase liquide.

1.4 Température de l'eau

Le tableau 4 donne les valeurs des constantes de Henry pour des températures de 20°C et de 40°C.

Tableau 4 : Constantes de Henry [36]

THM	Constantes de Henry	
	20°C	40°C
TCM (Chloroforme)	0,126	0,314
BDCM	0,075	0,218
DCM	0,035	0,108
TBM (Bromoforme)	0,017	0,050

Une élévation de la température entraîne une augmentation de la volatilisation des THM. De plus, la température exerce aussi une influence sur le transfert de masse, bien que la forme exacte de la relation ne soit pas connue et que les seules données existantes concernent le chloroforme. Il peut néanmoins être avancé que la température de l'eau a une influence limitée sur la volatilisation pour une douche prise dans les conditions dites de confort (c'est-à-dire une température comprise entre 33 et 45°C) [37, 38]. Cette affirmation ne peut être avancée que pour le chloroforme, la grande volatilité de ce composé diminuant l'impact

d'une augmentation du transfert de masse. Les autres THM, qui ont une volatilité plus faible, sont plus sensibles à une augmentation de la température [35].

1.5 Type de jet

Le type de jet issu d'une pomme de douche est le résultat de l'interaction de la pression de l'eau, du débit d'écoulement de l'eau et de la taille des trous de la pomme de douche [32]. De la même façon que le débit d'eau impacte l'aérosolisation de l'eau et ainsi la quantité de THM transférée dans l'air, le type de jet va conditionner la taille des gouttes et ainsi la surface d'échange eau-air. Une diminution du diamètre des gouttes d'eau entraîne une augmentation de la surface d'échange à l'interface eau/air (A) et favorise ainsi la volatilisation des THM à partir de l'eau [35; 37].

1.6 Renouvellement de l'air

1.6.1 Définitions

Le renouvellement d'air d'une cabine de douche comme d'une pièce va conditionner sa concentration en polluant. Le taux de renouvellement d'air (TRA) est déterminé par le rapport entre le débit d'air dans une enceinte donnée et le volume de cette enceinte. Il s'exprime en volumes par heure (vol/h).

Le renouvellement d'air est défini comme étant la somme du [39] :

- renouvellement d'air spécifique dû au système de ventilation (VMC simple ou double flux, ventilation naturelle, ventilateurs locaux, ...),
- renouvellement d'air supplémentaire :
 1. *transparence* : dépend de l'âge de l'habitation.
 2. *tirage thermique* : mouvement de convection lié à une masse volumique différente des masses d'air. Il est pris en compte seulement dans les maisons car la hauteur de tirage entre orifices y est suffisamment importante.
 3. *vent* : celui-ci est proportionnel à la hauteur de l'habitation.
- renouvellement d'air dû à l'ouverture des fenêtres.

D'après Delaune [40], le renouvellement d'air est différent selon les pièces, bien que ces différences soient relativement faibles (de 10 à 36%) quand les portes des pièces principales sont laissées ouvertes.

1.6.2 Déterminants du renouvellement d'air

Le renouvellement d'air est influencé par de nombreux facteurs. Il s'agit donc en premier lieu de les identifier afin de pouvoir ensuite l'estimer avec la meilleure précision possible.

1.6.2.1 Conditions atmosphériques

▪ **Pression et température**

La différence de température entre l'extérieur et l'intérieur d'une habitation va entraîner un écart de pression. Il existe ainsi dans les habitations un plan de pression neutre (PPN) qui correspond à la hauteur à laquelle la pression intérieure est identique à la pression extérieure. En dessous de ce PPN, l'écart de pression fait pénétrer l'air dans le bâtiment (dépression), au-dessus, la surpression expulse l'air à l'extérieur [41]. On suppose ainsi que dans les habitations naturellement ventilées, l'air rentre dans les étages inférieurs et sort par les étages supérieurs. Ceci est communément appelé tirage thermique ou encore « effet de cheminée ». Il en résulte que dans les étages supérieurs, l'air est relativement plus ancien que dans les étages inférieurs. Par ailleurs, lorsque le vent souffle, l'air entre par la façade exposée, traverse le bâtiment et sort par le côté opposé. L'air est donc plus ancien dans les pièces abritées du vent [42].

Quand il n'y a pas d'aération (fenêtres fermées), ce sont les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur qui influencent principalement les taux de renouvellement d'air. Plus celles-ci sont importantes, plus le renouvellement d'air est important (donc pendant la période hivernale). Une augmentation de 10°C de la différence entre la température extérieure et intérieure induirait une augmentation de 0,16 à 0,20 h⁻¹ du renouvellement d'air [43].

▪ **Vent**

D'après de nombreux auteurs, le vent influence le renouvellement d'air de deux manières différentes : selon sa direction par rapport au logement et selon sa vitesse. Néanmoins, cet effet est faible comparé aux autres déterminants que sont la pression et la température [43].

Cependant, l'absence de vent et de différences de température ne signifie pas pour autant absence de renouvellement d'air. En effet, les fluctuations naturelles de température et de pression dues à la turbulence de l'air extérieur produisent un renouvellement d'air. Ce phénomène suggère aussi qu'une différence de température donnée produit un renouvellement d'air minimum qui est gouverné par les caractéristiques du logement (géométrie, infiltration, âge du logement, hauteur,...) [44].

En effet, des TRA variant entre 0.25 h⁻¹ et 0.5h⁻¹ dans des appartements et des maisons (volumes des appartements sensiblement identiques) ont été observés [43 ; 44 ; 45, 46]. De même, un TRA de 0.24 h⁻¹ a été observé dans une salle de classe où les fenêtres et les bouches de ventilation étaient fermées [47]. Un taux de ventilation basique (infiltration) relativement stable est généralement observé [45, 46]. Dans les immeubles naturellement ventilés, le renouvellement d'air est aussi principalement influencé par les conditions atmosphériques [48].

1.6.2.2 Caractéristiques du bâti

D'une manière générale, les facteurs liés aux caractéristiques du logement et agissant sur le taux de renouvellement d'air sont multiples. Les principaux sont : la géométrie et la surface des pièces qui vont influencer sur les circuits préférentiels de l'air, l'âge du bâtiment et la qualité des ouvrants qui vont influencer sur l'étanchéité à l'air, et la hauteur du logement (le TRA est une fonction croissante de cette hauteur). Il faut cependant remarquer que cette affirmation peut être contredite dans le cas de maisons à plusieurs étages [43]. Enfin, le type de système de ventilation (VMC simple ou double flux, ventilation naturelle, aucun système, ...) va influencer le TRA. Ces caractéristiques vont donner plus ou moins d'importance aux conditions météorologiques et aux comportements d'aération des occupants.

Il convient de souligner l'influence que peuvent avoir des ouvrants de ventilation naturelle car bien que ce système soit moins efficace qu'une VMC, le renouvellement d'air obtenu est généralement supérieur à 0.52 h^{-1} (calcul fait par analyse des concentrations en CO_2) [47].

Les mouvements d'air se font préférentiellement des salles de vie vers la cuisine ou la salle de bains dès qu'un système de ventilation mécanique est présent dans une habitation [49]. Ceci amène certains auteurs à considérer que les débits d'air provenant des pièces de service (i.e. cuisine, salle de bain et WC) où sont localisées des VMC, peuvent être considérés comme négligeables en raison de la dépression causée par la ventilation. Il pourrait donc être considéré que, si un appartement est équipé d'une VMC, la part d'air contaminé par les activités réalisées dans la salle de bain et la cuisine et amenée dans les pièces réceptrices (chambre et salon) sera négligeable [40].

1.6.2.3 Comportement des occupants

Le renouvellement d'air est très dépendant des conditions d'ouverture des fenêtres et c'est donc le **comportement des habitants d'un logement** qui est le **principal déterminant** du taux de renouvellement d'air. Les échanges d'air sont ainsi conditionnés par l'occupation d'un logement et les ouvertures de fenêtres [49]. La part du comportement dans le taux de renouvellement d'air total varie selon les auteurs : si la valeur de la ventilation basique est comparée avec celle influencée par le comportement des occupants, 87% du TRA serait influencé par le comportement des habitants [46] et 63% dans le cas de bâtiments naturellement ventilés selon Kvisgaard [45]. Ceci explique pourquoi les plus importants TRA sont mesurés quand plusieurs fenêtres sont ouvertes. De plus, l'influence du comportement est aussi prépondérante dans le cas de bâtiments ventilés grâce à une ventilation mécanique ou l'entretien des bouches d'aération est déterminant dans la qualité de la ventilation [45]. L'impact du comportement des occupants explique l'effet saisonnier très marqué du renouvellement d'air (ouverture des fenêtres en été).

Il existe aussi beaucoup d'autres variables difficiles à mesurer ou à maintenir constantes. De plus, certains de ces paramètres sont interdépendants : la hauteur d'un logement influant sur l'impact du vent. Ceci explique pourquoi une relation simple ne puisse être élaborée pour le calcul du taux de renouvellement d'air, en particulier pour le mettre en relation avec une largeur d'ouverture d'une fenêtre. [43].

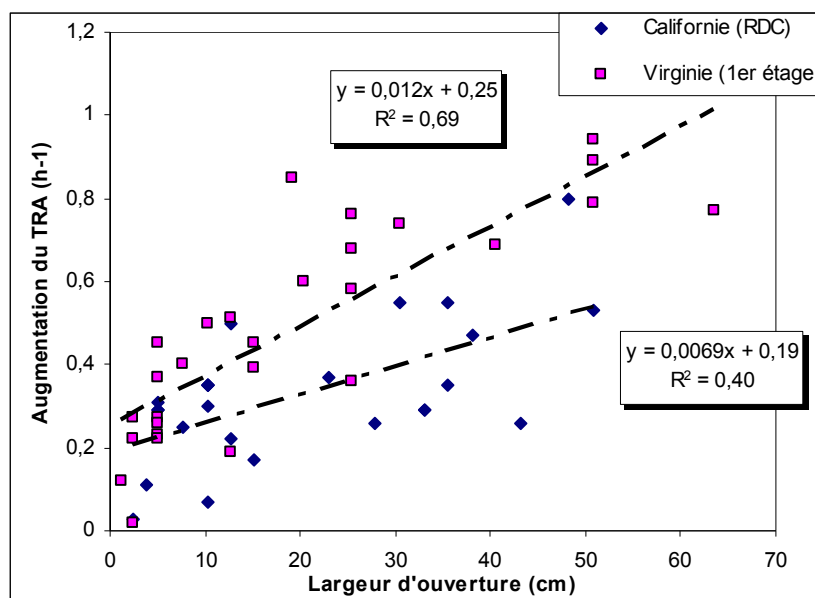
Dans le paragraphe suivant sont répertoriés les facteurs influant sur l'efficacité du renouvellement d'air dû à l'ouverture des fenêtres (déterminant principal du renouvellement).

- Influence de la largeur d'ouverture d'une fenêtre.

Il a été observé une certaine augmentation du taux de renouvellement d'air en fonction de la largeur d'ouverture d'une fenêtre ou d'une porte. Cependant, la forme exacte de cette relation ne peut pas être déterminée à cause des conditions complexes associées aux maisons étudiées qui sont habitées [43].

Un exemple des résultats obtenus dans l'étude de Howard Reed (2002) est présenté dans la figure 3. Les pièces étudiées sont : une salle de jeu dans une maison située dans l'Etat de Californie (USA) et une salle à manger dans une maison située dans en Virginie (USA). Plusieurs largeurs d'ouverture de la fenêtre sont expérimentées afin de connaître l'influence sur le renouvellement de l'air :

Figure 3 : Influence de la largeur d'ouverture d'une fenêtre sur le TRA dans 2 maisons situées aux USA [43]



Il est à noter que des résultats similaires ont été obtenus avec une porte d'entrée ouverte.

- Ouverture de plusieurs fenêtres (plus de deux)

Ce type d'ouverture est celui qui produit le plus grand impact en terme de renouvellement d'air loin devant l'impact de la vitesse du vent ou des écarts de température entre intérieur et extérieur pour le cas où les fenêtres sont fermées.

Il a été observé, pour une ventilation naturelle, le plus faible temps de résidence moyen de l'air grâce à une ventilation croisée (fenêtres situées sur 2 murs opposés) avec 2 fenêtres ouvertes et plus. L'ouverture de 2 fenêtres est plus efficace en terme de renouvellement d'air si ces fenêtres sont situées sur 2 murs opposés que si elles se situent sur le même mur [44].

D'après la principale étude sur le renouvellement d'air lié à l'ouverture des fenêtres [43], celui-ci est principalement une fonction de la hauteur en élévation des fenêtres et de la largeur d'ouverture. De plus, l'ouverture des portes et des fenêtres produit la plus forte augmentation dans le taux de renouvellement d'air mesuré. Niachou [44] a lui aussi testé l'influence de l'ouverture de plus de deux fenêtres en ventilation croisée. Il n'en résulte pas d'augmentation significative du renouvellement d'air mais plutôt un phénomène inverse qui est probablement provoquée par d'autres facteurs d'influence.

D'une manière générale, lorsque plusieurs logements sont enquêtés, les auteurs s'accordent pour dire qu'il est généralement impossible d'expliquer l'ensemble des variations du taux de renouvellement d'air mesurées. De plus, le faible nombre de logements enquêtés est aussi un facteur limitant la représentativité des mesures. Il faut remarquer que les études sur le renouvellement d'air disponibles dans la littérature concernent presque exclusivement un nombre limité de logements, allant de 2 [43] à la dizaine [46]. Enfin, une grande variabilité des mesures est généralement observée dans les études [43, 44, 45, 46, 49].

1.6.3 *Etat de la ventilation dans les logements français [50].*

Les résultats présentés ci-dessous proviennent du volet sur la ventilation dans les logements de l'enquête nationale logements de l'OQAI [50].

La part la plus ancienne du parc de logements français, c'est-à-dire celle qui n'est pas soumise aux exigences de réglementation en matière de ventilation représente aujourd'hui encore la moitié du parc (24 672 135 logements représentés dans ce parc). La VMC et la ventilation naturelle équipent à eux deux 70% des logements, alors que 21,4% ne disposent d'aucun dispositif particulier.

Par ailleurs, il apparaît que les différentes situations de ventilation (VMC, ventilation naturelle, ...) amènent à des taux de renouvellement d'air identiques dans les chambres lorsque les fenêtres sont fermées, et ce quelque soit la période.

▪ Ventilation Mécanique

La VMC équipe 34% des logements collectifs et 36% des logements individuels en France. 56% des logements français (Calcul réalisé sur un échantillon de 104 logements) ont un débit minimal inférieur au débit réglementaire. Le tableau 5 présente le pourcentage de débits observés non réglementaires par type de pièce du logement.

Tableau 5 : Pourcentage de type de débits observés non réglementaires par type de débits mesurés

Cuisine débit réduit	Salle de bain	WC	Logements débit total minimal
46	63,5	62	56

▪ Les causes identifiées de ces débits non réglementaires sont :

- VMC arrêtée : 7%
- Pas d'extraction dans au moins une pièce de service : 36%
- Au moins une bouche d'extraction en mauvais état (encrassée, obturée, masquée) : 28%.

La moyenne des débits d'air extraits dans la cuisine est de $39,9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (104 logements).

▪ Rôle des occupants

D'après l'enquête, le comportement des occupants fait varier significativement les niveaux de renouvellement d'air. De plus, l'ouverture de la porte ou de la fenêtre dans la chambre (chambre principale du logement) a des effets équivalents. Le RA étant maximum quand une porte et une fenêtre sont ouvertes. Enfin, il apparaît que ces pratiques d'ouverture et de fermeture des portes et des fenêtres sont indépendantes des systèmes de ventilation installés dans les logements.

2. SITUATIONS D'EXPOSITION DANS LE LOGEMENT

La contamination de l'air intérieur par les THM se faisant au niveau des points d'utilisation d'eau du robinet et certaines activités comme la cuisine et la douche ayant été identifiées comme les plus contaminantes et les plus exposantes, les activités émettrices de THM peuvent ainsi être confondues avec les pièces où se fait cette contamination. Une démarche pièces par pièces permet alors de mieux distinguer les situations d'exposition : les pièces « émettrices » de THM (salle de bain et cuisine) et les pièces « réceptrices » de la contamination (salon et chambre).

2.1 Pièces sources

La salle de bain est selon une majorité d'auteurs le lieu qui participe le plus à la contamination de l'air intérieur et où l'exposition aux THM est la plus importante. Les

quantités produites par les activités réalisées dans la salle de bain sont le produit d'une durée (de douche, bain, toilette,...) par un débit d'eau, une quantité de THM présents dans l'eau et un coefficient de transfert de l'eau à l'air. Le taux de ventilation dépend de l'ouverture de la porte/l'infiltration à travers la porte, de l'ouverture d'une fenêtre/l'infiltration par la fenêtre et de la présence ou non d'une VMC.

Trois situations d'exposition sont généralement retenues. La douche serait l'activité liée à l'utilisation d'eau la plus contaminante et la plus exposante [14, 32]. La prise de bain est aussi associée à une forte production mais en comparaison, un bain de 20 minutes produirait trois fois moins de THM qu'une douche de 30 minutes [32]. Enfin, la présence dans la salle de bain après l'un de ces deux événements ainsi que l'eau utilisée lors de la toilette sont aussi des facteurs d'exposition par inhalation à ces polluants.

Dans la cuisine, plusieurs activités peuvent conduire au transport de THM de l'eau vers l'air. En premier lieu, les activités de cuisine : ébullition de l'eau (pâtes, riz, soupe), cuisson à la vapeur (cocotte-minute), faire rissoler les aliments... De plus, les activités comme la vaisselle et le lavage des aliments, qui nécessitent l'utilisation d'eau chaude, produisent un relargage de THM [4, 9]. Enfin, l'ouverture d'un lave vaisselle produit aussi une bouffée de THM. Les quantités produites par les activités de cuisine sont le produit d'une durée (de cuisson, de lavage, d'ouverture de lave-vaisselle,...) par un débit d'eau, une quantité de THM présents dans l'eau et un coefficient de transfert de l'eau à l'air.

Bien que les volumes d'eau mis en jeu dans la cuisine soient inférieurs à ceux utilisés pour une douche ou un bain, les températures plus élevées assurent une forte dispersion aérienne des THM. Il a ainsi été montré qu'une ébullition d'une durée de 5 minutes entraîne une volatilisation de chaque THM de l'eau comprise entre 88% [51] et 98% [52]. Il faut cependant remarquer que l'augmentation de l'exposition par inhalation due à la volatilisation de THM entraîne une baisse de l'exposition par ingestion dont il faut tenir compte lors d'une évaluation globale de l'exposition aux THM. L'exposition doit être calculée sur l'ensemble de la durée des activités de cuisine, repas compris, correspondant à la durée de présence dans la cuisine.

La dose d'exposition interne est calculée en croisant ces dernières valeurs avec le poids corporel de référence, l'efficacité d'absorption des THM via le système respiratoire et le volume d'air inhalé par heure.

2.2 Pièces de vie

La contamination des pièces de vie (chambre et salon) se fait exclusivement par brassage de l'air contaminé provenant de la salle de bain et/ou de la cuisine à l'intérieur du logement. Elle dépend donc en premier lieu du renouvellement d'air, mais aussi du nombre et de la durée des activités contaminantes (i.e. douches/bains, cuisson, vaisselle, nettoyage des

aliments). Cette contamination est aussi dépendante du moment de l'émission de THM par rapport au moment de l'aération ainsi que de la position de la pièce de vie par rapport aux pièces sources. Les concentrations mises en jeu sont ici beaucoup plus faibles que dans les pièces sources mais les durées d'exposition y sont bien plus importantes (environ 8 heures dans la chambre pendant la nuit et 8 heures dans le salon pendant le week end). Selon Jo (2005) [3], l'exposition dans l'air intérieur d'un logement (hors douche) représente 5% de l'exposition domestique totale. Cependant, aucune mesure dans la salle de bain ni dans les autres pièces du logement n'est faite dans cette étude, les concentrations dans l'air étant déduites à partir de celles mesurées dans l'eau. Il est donc probable que ces concentrations soient sous estimées.

Il est à souligner que d'autres activités peuvent conduire à l'émission de THM. L'air intérieur peut être contaminé par des THM sans pour autant que ceux-ci proviennent de l'eau du robinet. Par exemple, le chloroforme est régulièrement détecté dans des immeubles de bureau [53]. L'utilisation d'eau de javel peut produire un biais car celle-ci va émettre une quantité importante de THM par réaction du chlore sur la matière organique présente sur les surfaces. De la même manière, le stockage de produits comme des solvants ou de l'eau de javel, l'utilisation d'imprimantes et de fax, ainsi que des décapants à peinture ou encore la fumée de tabac sont des sources potentielles de chloroforme. Ainsi des concentrations importantes ($16 \mu\text{g.m}^{-3}$) ont été mesurées dans une atmosphère enfumée par le tabac [54]. Des travaux de rénovation, une activité professionnelle ou la présence de fumeurs dans un logement peuvent ainsi être sources de confusion lors de l'enquête.

III. QUANTIFICATION DE LA CONTAMINATION DE L'AIR INTERIEUR EN VUE D'UNE EVALUATION DE L'EXPOSITION

1. METHODES D'APPROCHES

1.1 Approches directe et indirecte.

La plupart des approches d'évaluation de l'exposition aux THM réalisées en France sont des approches indirectes au niveau collectif [9, 18]. Ces approches souffrent du manque de données sur la contamination aérienne des logements français et se basent uniquement sur les données de contamination de l'eau potable issues de la base SISE-EAUX dont sont ensuite extrapolées les concentrations dans l'air. Les bilans quantitatifs d'analyse de l'incertitude réalisés dans ces deux rapports pointent justement l'absence de prise en compte de l'aération de la salle de bain ainsi que les coefficients de transfert eau/air dans les sources de variation spécifique à la concentration en chloroforme dans l'air.

La méthode directe permet quant à elle de fournir les données nécessaires à l'élaboration de relations entre déterminants et concentrations dans l'air via une exploitation statistique des résultats des concentrations en THM sur le terrain, et ainsi de réduire les incertitudes liées en particulier au paramètre renouvellement d'air.

C'est dans ce but que le LERES a élaboré son étude afin d'obtenir des relations prédictives de la concentration dans l'air en fonction de ses principaux déterminants.

1.2 Organisation de la campagne logements

L'enquête logements menée par le LERES porte sur un échantillon de 60 logements situés dans le département de l'Ille et Vilaine et choisis aléatoirement parmi les 409 000 logements du département (Chiffres 1999) [55a].

1.2.1 Critères de choix des logements.

La contamination du réseau est le premier critère de choix des logements. La population a été divisée en terciles en fonction de la qualité de l'eau l'alimentant à partir des données nationales de contamination. Les trois classes de contamination alors définies sont données dans le tableau 6.

Tableau 6 : Classes de contamination en THM utilisées dans le cadre de la campagne logements

Classe de contamination	Niveau de contamination
Faible	2,1 – 15,6 µg/L
Moyen	15,6 – 25,2 µg/L
Fort	> 25,2 µg/L

Trois UDI représentatives de chacune de ces classes d'eau ont alors été choisies, le nombre de logements dans chacune de ces classes devant être assez proche. Le nombre de

logements retenus dans chacune des classes est, pour une contamination faible, de 12 logements ; moyenne, de 24 logements ; et forte, de 24 logements.

Le deuxième critère de choix des logements pour l'enquête est la présence ou non d'une fenêtre dans la salle de bain. Le nombre de logements avec et sans fenêtre dans la salle de bain devant être équivalent pour chaque classe de contamination du réseau.

Enfin, la densité d'occupation du logement est le troisième et dernier critère de choix des habitations. Ce paramètre est calculé à partir de la méthode de calcul de l'indice de peuplement fourni par l'INSEE et se divise en trois classes : sous-peuplé, normalement peuplé ou surpeuplé [55b]. Un nombre égal de logements sous-peuplés et de logements peuplés normalement ou surpeuplés est alors recruté. La méthodologie complète de choix des logements est fournie en Annexe III.

Les critères d'exclusion pour le recrutement des logements sont : habitation singulière (chambre d'hôtel, maisons de retraite, studio, pièce indépendante, construction provisoire, logement dans un immeuble collectif à usage autre que d'habitation), activité professionnelle dans le logement et/ou dans l'immeuble où est situé le logement et travaux de réhabilitation prévus (sources potentielles de chloroforme).

1.2.2 Organisation de la campagne de prélèvements

Il est envisagé des échantillonnages d'air intérieur dans quatre pièces, les deux pièces dites « sources » (salle de bain et cuisine) et les pièces « réceptrices » (salon et chambre).

Dans la salle de bain, trois échantillons sont prélevés : un avant la douche (afin de connaître le bruit de fond en THM dans la salle de bain), un dans la cabine de douche pendant une douche simulée, c'est-à-dire dans les conditions d'utilisation des habitants du logement, et enfin un dans la salle de bain après la douche. Ces prélèvements sont réalisés de manière à pouvoir caractériser l'exposition des personnes lors de leur passage dans la salle de bain. La durée de la douche simulée est de 10 min et correspond à la valeur moyenne du temps de contact de cet événement [56]. La température et le débit de l'eau sont mesurés et un échantillon d'eau est prélevé afin de connaître les concentrations en THM.

Les prélèvements en cuisine sont réalisés pendant toute la durée des activités de cuisine réalisées par les occupants, c'est-à-dire du lavage des aliments jusqu'à la vaisselle. Ces prélèvements permettent de la même manière de caractériser l'exposition des occupants dans la cuisine.

Les prélèvements dans ces deux pièces sont réalisés par les enquêteurs.

Enfin, des prélèvements sont prévus dans les pièces « réceptrices » : le salon pendant la journée et la chambre pendant la nuit. Ces prélèvements sont réalisés par les occupants eux-mêmes, une fiche d'utilisation du matériel leur étant fournie. Des mesures du renouvellement d'air sont prévues dans quelques logements. La synthèse des prélèvements par pièces est fournie en annexe IV.

Les prélèvements d'air sont collectés par adsorption dans des tubes en inox garnis de poudre de Tenax TA. L'analyse se fait par désorption thermique par chauffage dans un courant de gaz inerte (Hélium gamme 2) puis par reconcentration dans un piège à froid (-30°C) et chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse. La limite de quantification pour les 4 THM est de 0,5 µg/m³.

Ces données doivent permettre d'établir ensuite des relations prédictives des niveaux de concentrations en THM dans l'air de chacune des pièces du logement en fonction de leurs principaux déterminants et permettre ainsi une évaluation de l'exposition. C'est pourquoi la méthodologie de recueil des données doit associer efficacement questionnaires, mesure, exploitation des données et modélisation afin d'avoir l'information la plus complète possible pour évaluer l'exposition. Ces outils vont être présentés dans leur diversité avec un « focus » fait sur les méthodes de détermination du renouvellement d'air.

2. OUTILS DE RECUEIL DES DONNEES

2.1 Questionnaire

2.1.1. Construction du questionnaire

Lors de l'enquête logements, des questionnaires sont prévus pour renseigner les habitudes de vie des occupants, les caractéristiques du logement en général et de chaque pièce où est effectué un prélèvement, ... Un carnet journalier est aussi laissé à disposition des habitants pour renseigner les paramètres relatifs aux prélèvements dans le salon et dans la chambre (durée des prélèvements, aération, nombre de douches/bains prises, ...). Ce questionnaire doit permettre de recueillir les informations nécessaires à l'interprétation des concentrations mesurées, c'est pourquoi une attention particulière doit être apportée à son élaboration. Les informations relatives à la configuration du logement et aux systèmes d'aération peuvent être considérées comme fiables car elles sont collectées par l'enquêteur. En revanche, les données sur l'aération ainsi que sur les temps de prélèvement dans le salon et dans la chambre sont sujettes à un biais de mémorisation de l'occupant.

2.1.2. Prélèvements et mesure de l'exposition

Afin d'avoir des données précises en terme d'exposition, les questionnaires doivent permettre au préleveur d'effectuer les échantillonnages dans les conditions habituelles d'utilisation de l'eau par l'occupant (température, débit, ...). Ils doivent également permettre de fournir des données sur les durées de prélèvement et les budget-espace-temps des habitants du logement pour les prélèvements salon et chambre.

2.1.3. Evaluation du renouvellement d'air

Les questionnaires peuvent permettre d'approcher la valeur du renouvellement d'air global en calculant chacune de ses composantes : renouvellement supplémentaire dû au tirage thermique, à la perméabilité et au vent, RA dû à l'ouverture des fenêtres et RA dû au système de ventilation. L'OQAI, dans son document relatif à l'évaluation du renouvellement d'air, a recensé des méthodes de calcul des différents facteurs le composant [39]. Ces facteurs peuvent être renseignés au travers de données facilement collectables par l'enquêteur sur le terrain.

2.1.3.1. Infiltration

- Transparence.

La transparence est la somme de la perméabilité à l'air d'un bâtiment liée aux défauts d'étanchéité et de celle liée aux orifices d'entrée d'air (P_{ea}). La perméabilité due aux défauts d'étanchéité peut être estimée grâce aux valeurs de perméabilité à l'air d'un logement en fonction de son âge reportées dans le tableau 7 [39].

Tableau 7 : Perméabilité à l'air en vol/h sous 1 Pa

Age	Maison individuelle (vol/h)	Appartement (vol/h)
Avant 1975	0,45	0,22
1975-1981	0,35	0,17
Après 1982	0,30	0,15

La volonté de réduire au maximum les pertes d'énergie dues à l'infiltration d'air dans les nouveaux bâtiments a conduit à une réduction de plus en plus importante de la perméabilité. Par ailleurs, il peut être supposé que la perméabilité due aux défauts d'étanchéité est la même dans toutes les pièces d'un logement et est égale à celle trouvée sur l'ensemble du logement. Ces données peuvent ainsi être utilisées afin d'atteindre la valeur de la perméabilité dans une pièce.

La perméabilité due aux orifices d'entrée d'air peut être calculée avec la formule suivante :

$$P_{ea} = 6,71 (HPIE+1) / (2,5*HSRF), \text{ pour une ventilation mécanique.}$$

$$P_{ea} = 10,06 (HPIE+1) / (2,5*HSRF), \text{ pour une ventilation naturelle.}$$

Avec HPIE = nombre de pièces de l'habitation.

$$HSRF = \text{surface du bâtiment (m}^2\text{).}$$

Toutes ces valeurs sont données à dire d'experts [39].

- Vent.

Le renouvellement d'air dû au vent est dépendant de la hauteur de l'habitation. D'après l'OQAI, la formule permettant d'approcher sa valeur s'écrit comme suit :

$$N_{vent} = 0,5P / [1+2,3 (N/P)^2], \text{ pour des maisons et appartements jusqu'au 3}^{ème} \text{ étage.}$$

$$N_{vent} = 0,85P / [1+1,35 (N/P)^2], \text{ pour des appartements du 4}^{ème} \text{ au 10}^{ème} \text{ étage.}$$

$N_{\text{vent}} = 1,1P / [1 + 1,05 (N/P)^2]$, pour des appartements au-dessus du 10^{ème} étage.

Avec P = transparence du logement exprimée en vol/h sous 1 Pascal [39].

N = taux spécifique de renouvellement d'air dû à la ventilation naturelle ou à la VMC ($N=0$ si absence de système de ventilation).

- Tirage thermique.

Le tirage thermique doit être pris en compte seulement dans les maisons individuelles car la hauteur de tirage entre orifices y est suffisamment importante [39]. Les formules suivantes sont proposées par l'OQAI :

$N_{\text{tt}} = 0,19P$, pour une maison à 2 niveaux.

$N_{\text{tt}} = 0,12P$, pour une maison à 1 niveau.

Avec P = transparence de la maison exprimée en vol/h sous 1 Pascal [39].

Ici encore, le renouvellement d'air calculé est global pour toute l'habitation et ne fournit pas de données pièce par pièce.

2.1.3.2. Système de ventilation

- VMC.

Les valeurs de renouvellement d'air dû à un système mécanique de ventilation disponibles dans la littérature oscillent entre 0,8 et 3,9 vol/h.

La formule de calcul suivante est utilisée pour le calcul de la part du RA associée à la VMC sur l'ensemble d'un logement :

$$N = 18 (HPIE+1) / (2,5*HSRF) \quad [39]$$

Avec $HSRF$ = surface du logement (m^2)

$HPIE$ = nombre de pièces

- Ventilation naturelle.

Les valeurs disponibles dans la littérature oscillent entre 0,39 et 0,52 vol/h et sont donc proches des valeurs obtenues pour l'infiltration. La formule de calcul suivante est donnée dans la littérature :

$$N = 14,5(HPIE+1) / (2,5*HSRF) \quad [39]$$

2.1.3.3. Ouverture des fenêtres.

Le renouvellement d'air moyen dans les questionnaires peut être estimé comme étant le produit d'une fréquence et d'une durée d'ouverture. Cependant, il existe des incertitudes importantes sur l'évaluation de ces deux termes qui rendent les résultats peu précis [39]. Il est alors préconisé d'utiliser une classification en 3 catégories :

Classe 1 : ouvre rarement les fenêtres, c'est-à-dire moins de 2h/j,

Classe 2 : ouvre souvent les fenêtres, c'est-à-dire 2 à 4h/j,

Classe 3 : ouvre très souvent les fenêtres, c'est-à-dire plus de 4h/j.

Les valeurs du renouvellement d'air associées à ces classes sont dépendantes de la situation d'aération dans laquelle est la pièce (fenêtre seule, courant d'air,...). L'OQAI teste deux valeurs différentes (2 vol/h et 5 vol/h) pour des chambres (échantillon de 53 chambres) afin de comparer les méthodes de prédiction du renouvellement d'air décrites dans cette partie avec les mesures. Il en ressort que pour des renouvellements d'air inférieurs à 1,5 vol/h, soit pour près de 95% des renouvellements d'air mesurés dans les chambres, l'hypothèse d'un TRA de 2 vol/h pour l'ouverture des fenêtres est celle qui semble la mieux adaptée.

2.2 Métrologie

2.2.1 Prélèvements des THM dans l'air

La finalité de la démarche retenue pour la réalisation de l'enquête logements est d'obtenir des données en vue d'une évaluation de l'exposition. La hauteur de prélèvement doit être adaptée aux activités ayant lieu dans les logements. Ainsi, les mesures sont effectuées à la hauteur des voies respiratoires, soit à environ 1 m 50 du sol, dans la douche, la salle de bain, la cuisine et le salon ; et à 50cm du sol dans la chambre.

Par ailleurs, il a été démontré que la fraction de COV mesurée lors d'études en douche expérimentale est dans la plupart des cas plus faible que la fraction réellement libérée dans l'atmosphère [34]. Les résultats montrent que la représentativité des mesures varie entre 43 et 93% de la fraction réellement émise. Plusieurs causes possibles ont été avancées, bien qu'aucune ne suffise à expliquer entièrement ces écarts : brassage insuffisant de l'air de l'enceinte, inexactitudes dans les mesures expérimentales ou encore « puits » à COV non identifiés [34]. On peut cependant supposer que la représentativité des mesures est néanmoins suffisante pour le calcul de l'exposition. En effet, les prélèvements se font au niveau des voies respiratoires et n'ont donc pas besoin de représenter les concentrations moyennes dans l'ensemble de la douche.

2.2.2 Renouvellement d'air

Les techniques de mesure du renouvellement d'air et le choix de la méthode sont présentés dans cette partie.

2.2.2.1 Emploi de gaz traceurs

2.2.2.1.1 Types de gaz.

On utilise généralement des gaz traceurs pour mesurer le taux de renouvellement d'air. Le type de gaz le plus couramment utilisé est l'hexafluorure de soufre (SF_6), car il est détectable à de très faibles concentrations et n'a pas d'odeur [43, 44, 46, 48, 57]. Le SF_6 présente de nombreux autres avantages [48] :

- coût faible,
- facilement disponible,
- non inflammable,
- non explosif,
- pas d'effets nocifs pour l'homme,
- stable chimiquement,
- ne réagit pas avec d'autres composés.

Cependant, du fait de sa densité relativement importante ($d=5,11$), ce gaz peut avoir tendance à se stratifier et à s'accumuler au niveau du sol si la ventilation se fait par des ouvertures en hauteur [57]. Il existe deux types de méthodes d'utilisation de ce gaz qui sont détaillées dans le paragraphe suivant.

L'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N_2O) est aussi utilisé comme gaz traceur [44, 57]. Il présente l'avantage de mieux se disperser et de moins se stratifier que le SF_6 . Cependant, c'est un gaz à effet de serre qui de plus est naturellement présent dans l'atmosphère, ce qui peut introduire un biais au moment de la mesure.

L'hélium peut aussi être utilisé mais pose des problèmes d'utilisation liés à sa stratification importante [40]. Le recours à ce gaz comme moyen de détermination du renouvellement d'air semble être aujourd'hui marginal.

Le méthylcyclohexane perfluoré et le protoxyde d'azote ont aussi été utilisés comme composé traceur [58].

Enfin, le dioxyde de carbone (CO_2) est aussi utilisé mais, comme l'oxyde nitreux, il est déjà naturellement présent dans l'air. Cependant, il n'est pas émis dans l'air intérieur, sauf si des fumeurs sont présents. La technique réside donc dans le suivi de la variation des concentrations naturellement présentes dans l'air et non dans l'injection du gaz [39, 47, 49].

Les gaz traceurs présentent souvent l'inconvénient de s'adsorber sur les murs et le mobilier et aussi de réagir avec des constituants de l'air et/ou les parois d'un logement. Ceci a pour conséquence d'induire une surestimation du renouvellement d'air. Le SF_6 permet d'éviter ce biais.

2.2.2.1.2 Méthodes utilisées

- Méthode de décroissance d'un gaz traceur.

Un gaz traceur est injecté dans une pièce. L'injection est stoppée, l'air est brassé de manière à avoir une concentration en gaz homogène [44]. La décroissance du gaz est ensuite mesurée. La pente du logarithme de la décroissance en gaz donne la valeur du taux de renouvellement d'air pour la pièce [35].

- Méthode de dosage d'une concentration constante.

Cette méthode nécessite l'utilisation d'un système d'échantillonnage et de dosage automatisé et interconnecté. Le gaz traceur est injecté de manière à maintenir une concentration constante dans le local. Cette injection en continu ne nécessite pas de période de mélange et donc d'avoir un mélange parfait. On peut connaître grâce à cette méthode le taux de renouvellement d'air pour une zone particulière d'une pièce. Ainsi, la quantité d'air extérieur qui rentre dans chaque zone peut être déterminée [48].

Cette méthode est particulièrement appropriée à la mesure de taux de ventilation dans des immeubles avec des systèmes de ventilation à volume d'air variable (VAV system) et pour des locaux de grande superficie ayant des géométries complexes avec des taux de renouvellement d'air variables selon l'endroit. L'effet du taux de renouvellement d'air peut être mesuré par le contrôle continu de la concentration en gaz traceur.

Cette méthode est utilisée dans l'étude de Chao [48] dans le but de déterminer certains paramètres de ventilation comme le taux de renouvellement d'air, l'efficacité de l'échange d'air et l'apport d'air frais dans un bureau et dans un appartement situés à Hong-Kong. Le but du travail est de comparer cette méthode avec celle de la décroissance en gaz traceur. Iwashita et Akasaka mesurent le taux de ventilation total (avec les occupants) puis le taux de ventilation basique (sans la présence des occupants) et les comparent entre eux pour connaître l'influence du comportement des habitants [46]. Il s'avère que cette méthode fournit des résultats comparables à ceux de la méthode de décroissance en gaz traceur. Néanmoins, cette méthode présente certaines limites :

- les mesures des concentrations en gaz traceur et des taux d'injection sont nécessaires. Ceci implique un matériel de contrôle et de dosage pointu supplémentaire. Ces contraintes induisent un coût plus élevé lié au matériel (contrôle multi points ; système de dosage ; mesure du gaz traceur).
- Il est requis une stabilité des concentrations dans la pièce avant de lancer les mesures de TRA. La durée nécessaire pour obtenir une concentration constante peut aller jusqu'à plus de 12 heures si le renouvellement d'air est important (fenêtres du logements ouvertes) [48].

- Analyse de CO₂.

Il existe plusieurs méthodes de mesure du taux de renouvellement d'air basées sur l'évolution des concentrations de CO₂ et sur le niveau connu d'émission de CO₂. L'OQAI en a identifié cinq différentes, qu'ils ont utilisées afin de connaître le TRA dans des chambres [39] :

- méthode de la croissance : identification des phases de croissances des teneurs en CO₂ résultant de l'occupation de la pièce.
- méthode de la décroissance : mesures des teneurs en CO₂ faites après occupation de la pièce.
- méthode de la moyenne hebdomadaire : équation de bilan de masse en régime établi.
- méthode des paliers : on applique la méthode précédente à une phase plus courte où la concentration en CO₂ est relativement constante.
- méthode du maximum : cette méthode fournit la valeur minimale du renouvellement d'air de la pièce pendant la période d'occupation.

Le principal inconvénient lié à l'emploi de ces méthodes réside dans l'hypothèse d'une concentration homogène dans la pièce, hypothèse qui peut devenir imprécise si le renouvellement d'air est élevé ou si l'occupation de la pièce est faible par rapport à son volume.

D'une manière générale, la mesure d'un taux de renouvellement d'air par les techniques de suivi de gaz traceurs permet seulement de connaître la vitesse du renouvellement, mais non l'origine de l'air. Celui-ci peut correspondre à de l'air brassé à l'intérieur du logement sans que cet air soit un air « neuf » pour le bâtiment. Ceci se vérifie particulièrement dans le cas des chambres lorsque les portes sont maintenues ouvertes. Il en résulte une surestimation du renouvellement d'air [39].

2.2.2.2 Méthode de l'Aérosol

La méthode dite "PAH" (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) a été développée pour mesurer les débits d'air extérieur dans les bâtiments. Cette méthode a l'avantage de nécessiter une instrumentation simple : un analyseur par photo-ionisation mesure la concentration en particules de suie générées par le trafic automobile. Cette concentration varie avec le temps, et les variations à l'intérieur d'un bâtiment, résultants de l'infiltration d'air, sont en retard par rapport aux variations à l'extérieur. Une analyse en composantes spectrales des variations de concentration dans l'air intérieur et extérieur permettrait, sous certaines conditions, de mesurer le débit d'air d'infiltration. On peut ainsi connaître la part d'air neuf dans le renouvellement de l'air et en déduire celle provenant de l'intérieur du bâtiment [59].

Par ailleurs, il a été découvert que les particules de l'air intérieur et celles de l'air extérieur ont la même variation temporelle, ce qui semble confirmer la pertinence d'une telle technique [60]. Cependant, cette technique est encore au stade expérimental et nécessite un coût d'acquisition de l'équipement non négligeable, elle ne sera pas retenue par conséquent pour l'enquête.

La mesure de décroissance du gaz traceur SF₆ sera utilisée pour mesurer le renouvellement d'air dans les logements, et uniquement, pour des raisons de moyens humains, sur quelques-uns des logements enquêtés. Il s'agit d'utiliser de la meilleure manière possible les données obtenues pour approcher la valeur du TRA et celle de l'air neuf apportées dans les pièces enquêtées.

2.2.2.3 Anémomètre

L'anémomètre est utilisé dans certaines études sur le terrain afin de vérifier le débit d'extraction au droit des ventilations mécaniques contrôlées (VMC) dans les pièces de service [39, 40].

Selon Delaune [40], l'application d'une méthode mixte, couplant mesure de la décroissance en gaz traceur dans les pièces de vie et mesure des débits extraits par la VMC dans les pièces de service, permet d'accéder aux échanges d'air entre l'ensemble des pièces principales et les pièces de service.

2.2.2.4 Choix de la méthode

Les protocoles pour la détermination du renouvellement d'air proposés ici sont inspirés de la méthode utilisée par Coppalle [43] et de la méthode mixte [40]. Ils consistent à observer l'impact du système de ventilation puis du comportement des occupants (ouverture des fenêtres) sur le TRA et d'accéder ainsi à la part de la ventilation due à l'infiltration et à l'ouverture des fenêtres. On peut supposer que ces 2 facteurs amènent uniquement de l'air neuf dans le logement. En revanche, la part liée au système de ventilation dans les pièces de services, qui correspond à de l'air brassé dans le logement, est mesurable via un anémomètre placé au droit de la bouche d'extraction. Les valeurs trouvées pourront être comparées à celles mesurées par décroissance du gaz traceur.

Le détail des protocoles est présenté en Annexe V.

2.2.3 Bioindicateurs

La détermination de l'exposition aux THM par inhalation peut être faite par l'utilisation de bioindicateurs. Trois types de fluides différents peuvent être prélevés : le sang, l'air exhalé et les urines [61, 62]. La plupart des études ont utilisé la mesure de l'air exhalé [61]. En effet, une corrélation a été trouvée entre les niveaux de chloroforme mesurés dans l'air exhalé et ceux mesurés dans l'air d'une douche. En revanche, dans la cuisine, le lavage de vaisselle à la main a été associé à un doublement de la concentration sanguine en THM.

La mesure des THM dans l'air exhalé présente de nombreux avantages par rapport à l'analyse sanguine. En effet, cette technique est non-invasive et permet donc d'avoir un meilleur taux de participation pour les études d'exposition. De plus, la simplicité de cette

méthode permet d'envisager des mesures en continu afin de suivre l'évolution de la concentration des produits étudiés. Enfin, ces mesures peuvent aussi permettre d'évaluer et de détecter des changements au cours du temps dans la charge corporelle.

Les résultats trouvés semblent assez encourageants. Pour le chloroforme dans la douche, Gordon [61] trouve des corrélations significatives (coefficients de Spearman) entre contamination de l'air et air exhalé, concentration dans le sang et air exhalé, contamination de l'air et concentration dans le sang, et enfin entre contamination de l'eau et concentration dans le sang. Pour l'évènement contaminant causé par le bain, seules les corrélations entre concentrations dans l'eau et air exhalé ainsi que concentration dans le sang et concentrations dans l'air sont significatives.

L'utilisation de bioindicateurs, bien qu'intéressante dans la perspective d'une évaluation de l'exposition, est néanmoins peu appropriée aux objectifs visés pour l'enquête.

2.3 Modélisation

2.3.1 *Renouvellement d'air*

Pour expliquer les concentrations en THM mesurées lors de la campagne afin d'estimer la masse émise en THM par les événements contaminants, la connaissance du TRA (terme de fuite) au moment du prélèvement est nécessaire. Cependant, celle-ci est difficile à obtenir par la mesure directe, et cette mesure ne pourra être réalisée sur tous les logements pour des raisons techniques ainsi que de temps de présence chez l'habitant. L'approche de modélisation peut alors servir à accéder aux données sur le renouvellement d'air lorsque les mesures font défaut.

2.3.1.1 Etat de l'art

Certains modèles mathématiques permettent sous certaines conditions de prédire le renouvellement d'air dû à la ventilation naturelle en prenant en compte les paramètres température intérieure et extérieure de l'air et vitesse du vent [63, 64]. Par exemple, il a été créé un modèle mathématique qui permet de calculer des taux de ventilation naturelle en fonction de deux paramètres clés : le vent et les forces thermiques [63]. Ce modèle envisage trois situations : une ventilation créée par les forces thermiques uniquement, par des vents favorables et par des vents contraires. Cependant, ce modèle ne s'applique que pour des bâtiments à masse thermique très faible, c'est-à-dire des bâtiments agricoles et industriels principalement et ne s'applique pas pour plus de deux ouvertures, ce qui limite son champ d'application. D'une manière générale, ces modèles schématisent les caractéristiques du logement (entrées d'air, géométrie, ...). De plus, la plupart des modèles nécessitent des paramètres d'entrée difficilement collectables lors d'une enquête : hauteur entre ouvertures d'entrée d'air, flux thermique.

Enfin, un modèle simple de prédiction du renouvellement d'air prenant en compte l'ouverture des fenêtres et celui provoqué par l'infiltration et le système de ventilation a été construit et a pu être testé grâce à une bonne documentation des pratiques d'ouverture des fenêtres [49].

$$Tra = Tra1 + Tra2 * OF$$

Avec OF=0 si la fenêtre est fermée et 1 si elle est ouverte. Tra1 correspond au renouvellement d'air sans ouverture des fenêtres et Tra2 au TRA dû à l'ouverture des fenêtres.

2.3.1.2 Choix d'une méthode de détermination du TRA dans les logements

Une approche couplant mesures, questionnaires et modélisation peut permettre d'approcher les valeurs du TRA et d'optimiser l'exploitation des résultats. Il s'agit alors maintenant de construire un indicateur agrégeant les données fournies par ces méthodes et sélectionner celles qui sont pertinentes et simples à recueillir.

2.3.1.2.1 Présentation de l'indicateur

Afin d'estimer d'une manière simple le renouvellement d'air avec les outils disponibles pour l'enquête, il est utile de construire un indicateur prenant en compte à la fois le comportement des occupants (Nombre d'ouverture de fenêtres/portes*Temps d'ouverture), le type de système de ventilation du logement (VMC, naturelle ou autre) et les caractéristiques du logement.

L'indicateur proposé reprend le principe du modèle proposé par [49]. La relation se présente sous la forme suivante :

$$TRA = \frac{TRA_v * (T - \sum_{i=0}^N t_i) + TRA_f * (\sum_{i=0}^N t_i)}{T}$$

Avec N = nombre d'ouvertures de fenêtres.

t_i = durée de l'ouverture des fenêtres pendant l'évènement d'ouverture i (h).

TRA_f = taux de renouvellement d'air moyen dû à l'ouverture des fenêtres (h^{-1}).

TRA_v = taux de renouvellement d'air moyen dû au système de ventilation et à l'infiltration (h^{-1}).

TRA = taux de renouvellement d'air moyen sur la période de mesure (h^{-1})

T = Durée de la période de mesure (h).

Le TRA sera donc exprimé en volumes d'air échangé pendant la période d'un évènement contaminant (théoriquement de l'émission de la bouffée de THM à la disparition complète, ou, lors des prélèvements sur le terrain, durant la période de mesure), ce qui permettra donc de connaître l'influence du terme de fuite.

Le TRA global pour une pièce et pour une période donnée sera pris comme égal au système de ventilation et à l'infiltration si les fenêtres restent fermées et égal à la somme du renouvellement d'air dû à la ventilation et à l'infiltration et de celui dû à l'ouverture des fenêtres en pondérant par la durée d'ouverture en situation d'ouverture.

2.3.1.2.2 Recueil des données

▪ *Comportement des habitants*

L'information sur le comportement des occupants (Nombre d'ouvertures et durées d'ouverture) est accessible via les carnets journaliers et ce pour chaque pièce. Les informations sur la largeur d'ouverture devraient pouvoir être regroupées en différentes sous-classes. Deux classes dans les questionnaires peuvent ainsi être suffisantes : étroite et large ; un nombre plus important induirait des biais de classification. Ces valeurs permettent une bonne adéquation entre valeurs prédites et valeurs mesurées [39]. Une intensité d'aération (situation d'aération dans l'ensemble de la pièce et du logement par rapport à la pièce) doit aussi correspondre à cette largeur. Il faut remarquer que d'après l'OQAI, l'ouverture des fenêtres et des portes d'entrée ont des effets équivalents sur le renouvellement d'air d'une chambre. Il peut ainsi être proposé les trois classes suivantes : faible (une fenêtre ou une porte ouverte), moyenne (une fenêtre et une porte), élevée (courant d'air). On obtient ainsi 6 cas d'ouvertures des fenêtres auquel il faut corrélérer 6 types de renouvellement d'air différents.

▪ *Valeurs du TRA associée*

Une recherche bibliographique sur les différents TRA rencontrés en situation réelle a été effectuée et présentée en partie II.1.6.2 afin d'essayer d'identifier une gamme de renouvellement d'air en fonction du type de ventilation (fenêtre, VMC, aucune) et des éventuelles combinaisons.

Des mesures réalisées sur le terrain ont servi à vérifier leur bonne adéquation avec les données bibliographiques. Une expérience a ainsi été conduite afin de connaître le renouvellement d'air minimal et l'impact de l'ouverture d'une fenêtre dans une chambre. Le SF₆ a été utilisé comme gaz traceur et le prélèvement a été réalisé au dessus de la tête du lit. Les résultats trouvés sont en accord avec ceux identifiés dans la recherche bibliographique. Ces résultats sont présentés en Annexe VI.

En situation « minimale » de ventilation du logement, donc lorsque les fenêtres sont fermées et la ventilation coupée, on pourra estimer les valeurs de TRA via les questionnaires (âge du logement, hauteur, orientation par rapport aux vents dominants) et l'utilisation des formules mathématiques [OQAI] ainsi que par la mesure et la comparaison avec les données bibliographiques. La part liée au système de ventilation peut être obtenue par la mesure

(infiltration, VMC, ventilation naturelle) et les questionnaires (nombre de pièces, état des conduits d'aération, âge du logement, ...).

En situation « fenêtres ouvertes », les questionnaires permettront de savoir dans quel type d'aération est le logement (fenêtre ouverte/fermée, courant d'air, ...), quelle est la largeur d'ouverture et l'intensité de l'aération. La bibliographie et la mesure permettent de corrélérer les configurations d'aérations à un type de TRA.

Enfin, il est important de noter les conditions météorologiques du jour de prélèvement (pression atmosphérique, température et vent). Ces informations serviront à affiner le paramètre « intensité de l'aération ».

En tenant compte des valeurs trouvées dans la littérature, les renouvellements d'air suivants peuvent être attribués aux différentes classes d'aération. Le tableau 8 propose les valeurs de TRA associées à ces classes.

Tableau 8 : Classe de largeur d'ouverture de fenêtres et d'intensité de l'aération et taux de renouvellement d'air associé

Largeur d'ouverture	Intensité de l'aération (pièce)	TRA (h⁻¹)
Etroite	Faible (1fenêtre ou une porte)	2
	Moyenne (1 fenêtre+1 porte)	4
	Elevée (2 fenêtres opposées ou courant d'air)	10
Large	Faible	5
	Moyenne	10
	Elevée	15

La combinaison de ces informations peut permettre d'approcher correctement la valeur du renouvellement d'air dans les conditions réelles. La liste des critères pertinents à recueillir est fournie en annexe VII.

L'élaboration de relations prédictives sur les concentrations grâce aux données recueillies lors de l'enquête permettra de traiter les valeurs manquantes de concentrations par un traitement statistique des données. Cependant, des approches de type déterministe ont été développées aussi dans ce sens. C'est pourquoi une approche de modélisation a été faite afin de tester sa pertinence.

2.3.2 Concentrations en THM dans l'air.

2.3.2.1 Etat de l'art

De nombreux modèles de prédiction de la concentration en COV dans l'air intérieur intégrant le paramètre renouvellement d'air ont été développés [4, 7, 8, 33, 34, 37, 38, 65]. Un modèle pour prédire les concentrations en COV dans la salle de bain et dans la douche a été développé par Little [34]. Ce modèle à deux compartiments simule le transfert des

contaminants de l'eau du robinet vers l'air intérieur. La concentration en contaminant dans l'eau du robinet est considérée comme constante et l'air intérieur comme non pollué. Ce modèle a été appliqué pour une salle de bain et complété par un autre modèle prédisant aussi les concentrations émises lors des activités de cuisine [4]. La pertinence de l'application de ce modèle sera discutée plus loin dans ce document.

Enfin, il est aussi possible de simuler l'exposition aux THM via des modèles déterministes. Des logiciels de simulation de la dispersion de polluants comme les THM dans l'air peuvent modéliser l'exposition et la dose reçue de THM résultant de l'utilisation d'eau du robinet pour une personne grâce à la prédiction des concentrations dans l'air à travers la maison. Le logiciel TEM (Total Exposure Model) a été utilisé pour prédire l'exposition et la dose absorbée de chloroforme [66]. Les paramètres d'entrées de ce logiciel sont : caractéristiques du logement, habitudes d'utilisation de l'eau et activité de l'occupant, source d'eau et propriétés chimiques du polluant, volume respiré, température de l'eau et caractérisation de la source par type d'équipement fournissant l'eau. Le logiciel de prédiction des concentrations en contaminant BREEZE permet aussi de modéliser le volume d'air échangé entre plusieurs espaces ventilés d'un immeuble naturellement ventilé [42]. Enfin, Le logiciel ConsExpo permet également de prédire des scénarios d'exposition en calculant les concentrations de produits chimiques inhalées par un sujet.

2.3.2.2 Choix du modèle

L'approche de modélisation retenue dans cette partie a été une approche déterministe. Au vu du faible nombre de données de l'enquête disponibles, une approche de modélisation statistique était exclue. Un état des lieux des modèles de dispersion de THM suite à l'utilisation d'eau a donc été fait, et un modèle a été choisi puis testé avec les données issues de l'enquête préliminaire. Les résultats sont présentés dans la partie IV.

Le choix du modèle doit tenir compte en premier lieu du type d'émission du polluant. Nous sommes ici en présence d'un polluant dont l'émission est ponctuelle (prise de douche, cuisine).

2.3.2.2.1 Critères de sélection

Le choix d'un algorithme de modélisation s'est fait en tenant compte de plusieurs critères. Tout d'abord, le modèle doit permettre de représenter la concentration émise dans les pièces principales, c'est-à-dire la cuisine et la salle de bain (douche), ainsi que le terme de fuite (renouvellement d'air). Par ailleurs, les déterminants des concentrations identifiés dans la bibliographie doivent pouvoir être exprimés par ce modèle.

Ensuite, les variables du modèle retenu devaient pouvoir être renseignées au travers des données de l'enquête logement (questionnaires et mesures), c'est-à-dire tenir compte des

contraintes liées aux conditions de terrain qui sont différentes des conditions de laboratoire. Ainsi, bien que de nombreux modèles aient été développés pour simuler l'émission de COV lors d'une douche, certains paramètres sont impossibles à renseigner lors d'une enquête de terrain. C'est le cas de la concentration en THM dans l'eau du siphon, paramètre utilisé dans les modèles de [37, 38, 65]. Par ailleurs, les différents types de jets (pluie et massant) ainsi que la taille des gouttes ne sont pas pris en compte dans les questionnaires.

De plus, les modèles de prédictions des concentrations en COV et en THM dans l'air [4, 7, 8, 33, 34, 37, 38], ont été principalement développés pour prédire les concentrations dans des douches expérimentales et ne sont pas extrapolés à la salle de bain ou aux autres pièces.

Le modèle retenu pour la douche est celui de Lin [4] développé à partir de celui de Little [34] ; pour la salle de bain, le modèle retenu est celui de Little [34]. Enfin, pour la modélisation des concentrations dans la cuisine, le modèle retenu est celui de Lin [4]. Ils reprennent d'une manière simplifiée les équations développées par Little [34] qui sont utilisées dans la grande majorité des études portant sur la modélisation de la dispersion de COV dans l'air ambiant.

2.3.2.2.2 Modélisation de la concentration dans l'air.

- Pour la douche.

Le modèle est développé à partir de la loi de Henry et de la théorie du double film. Le débit d'air et le débit d'eau ainsi que la concentration en THM dans l'eau arrivant dans la douche sont supposés constants. Enfin, la concentration initiale en THM dans l'air de la cabine de douche est supposée être égale à zéro.

Le calcul de la concentration en contaminant (C_d) se fait avec la formule suivante :

$$C_d = (1 - \exp(-b * t)) * (a / b)$$

avec $a = \frac{Q_L C_{in} (1 - \exp(-N))}{V_s}$ et $b = \frac{Q_L / m (1 - \exp(-N)) + Q_{GD}}{V_s}$ [4]

Dans ces équations, C_d représente la concentration en THM dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), V_s le volume de la cabine de douche (m^3), C_{in} la concentration en THM dans l'eau du robinet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Q_L le débit d'eau utilisé (m^3/min), m la constante de Henry et N le transfert de masse. Le renouvellement d'air est donné par Q_{GD} (m^3/min).

- Pour la salle de bain.

Le modèle retenu pour la salle de bain est celui développé par Little [34]. Il est supposé une absence de contamination en THM provenant des autres pièces et que la concentration initiale en THM dans la salle de bain et la douche est égale à zéro.

$$C_{sdb} = \frac{ac}{-be - cd} - \frac{ac * \exp(r_1 t)}{-be - cd - r_1^2} + \frac{ac * \exp(r_2 t)}{be + cd + r_2^2}$$

Avec

$$r_{12} = 0,5(e - b) \pm 0,5(e - b) * \sqrt{b^2 + e^2 + 2be + 4cd} \quad [34]$$

$$\text{et } c = \frac{Q_{GD}}{V_{Sdb}} ; d = \frac{Q_{GD}}{V_d} ; e = \frac{-Q_{GD} - Q_{Gsdb}}{V_{Sdb}} \quad [34]$$

Ici, C_{sdb} représente la concentration dans l'air de la salle de bain ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Q_{Gsdb} le renouvellement d'air dans la salle de bain (m^3/min) et V_{sdb} , son volume (m^3).

On supposera pour le calcul que le renouvellement d'air dans la salle de bain est le même que dans la douche.

- Pour les activités de cuisine.

1. Activités de préparation du repas et de vaisselle :

Le modèle suivant a été développé par Lin [4]. Ce modèle est, similairement au modèle pour la douche, basé sur la loi de Henry et sur la théorie du double film. On suppose ici que l'air de la cuisine est bien homogénéisé et sans contamination préalable par les THM, que le débit d'eau et le débit d'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur est constant et que la concentration en THM dans l'eau est constante.

$$C_c = C_{in} \frac{Q_L}{Q_G} f(1 - e^{-tQ_{GC}/V_c}) \quad [4]$$

Avec C_c la concentration en THM dans l'air de la cuisine ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), V_c le volume de la cuisine (m^3), Q_{GC} le renouvellement d'air dans la cuisine (m^3/min) et f l'efficacité de transfert (-).

2. Pendant les activités de cuisine:

Ce modèle, qui prédit le transport de THM dans l'air suite au procédés de cuisson (vapeur, ébullition, est basé sur l'hypothèse que la totalité des THM présents dans l'eau est relarguée dans l'air de manière instantanée.

$$C_c = \frac{M}{V_c} e^{-tQ_{GC}/V_c} \quad [4]$$

Avec M , la masse de contaminant dans l'eau transférée dans l'air (μg) et t le temps d'évaporation de l'eau utilisée pour la cuisson (min).

- Phase de décroissance de la pollution.

Les THM constituent une source de pollution ponctuelle liée à l'utilisation d'eau du robinet. La phase de décroissance peut ainsi être modélisée de manière simple en prenant en compte comme paramètres d'entrée la concentration en polluant dans l'air, le renouvellement d'air qui constitue le terme de fuite, le volume de la pièce et le temps écoulé après la fin de l'émission des polluants.

Ce modèle est ainsi applicable à l'ensemble des activités polluantes et s'écrit comme suit :

$$C_{air} = C_i * e^{-t_i Q_i / V_i}$$

avec C_i la concentration émise dans l'air par l'activité i , Q_i le taux de ventilation dans la pièce i , V_i , le volume de cette pièce et t_i le temps écoulé après émission.

La faisabilité de l'utilisation des modèles de prédiction du renouvellement d'air et de la contamination de l'air des pièces « sources » doit maintenant être étudiée par une comparaison avec les données de la bibliographie et avec celles obtenues lors de l'enquête logements.

IV. RESULTATS.

Les résultats expérimentaux présentés dans cette partie sont uniquement ceux de la phase test de la campagne logement. En effet, de nombreux problèmes de validation des protocoles ont eu pour conséquence un retard dans le lancement de la campagne qui n'a pu débuter avant la phase de rédaction de ce rapport. Deux logements ont été recrutés afin de tester la pertinence des méthodes définies pour mener l'enquête logements. Ils se situent dans la classe de contamination forte de l'eau potable [10] et présentent des valeurs élevées en DBCM et en BDCM. Quatre pièces ont fait l'objet de prélèvements et se répartissent en deux sous-groupes : les pièces de service où sont émis les THM et les pièces de vie réceptrices de la contamination.

1. RESULTATS EXPERIMENTAUX DE L'ENQUETE PRELIMINAIRE

1.1 Lieux d'émission

Les résultats obtenus dans les deux logements tests confirment les tendances observées dans la bibliographie. En effet, les concentrations les plus élevées sont rapportées dans la salle de bain et la douche dans les deux logements. La mesure des déterminants ($T^{\circ}\text{eau}$, débit, $[\text{THM}]_{\text{eau}}$) montre aussi des valeurs proches de celles rencontrées dans la littérature.

1.1.1 Salle de bain.

Le tableau 9 présente les résultats mesurés dans la salle de bain lors des prélèvements dans les deux logements tests (notés A et B).

Tableau 9 : Concentrations des quatre THM dans l'air de la salle de bain des 2 logements enquêtés exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Logement A	CLF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BDCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DBCm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BRF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[THMt] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Salle de bain avant	61,59	0,00	0,00	4,78	66,37
Pendant la douche	48,85	6,85	5,08	2,91	63,69
Salle de bain après	10,23	0,40	3,02	3,20	16,85
Logement B	CLF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BDCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DBCm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BRF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[THMt] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Salle de bain avant	7,23	0,00	0,64	3,86	11,74
Pendant la douche	11,99	5,12	1,97	2,61	21,69
Salle de bain après	6,24	4,76	6,93	4,83	22,76

Le chloroforme est le composé majoritairement retrouvé dans les logements à l'exception du logement B après la douche. Ce résultat confirme la grande volatilité de ce composé qui, bien que minoritaire dans l'eau, est majoritaire dans l'air. On peut cependant observer certains résultats a priori aberrants comme des valeurs de concentrations en THM totaux maximales dans l'air de la salle de bain avant la douche ou encore des concentrations dans

la salle de bain après la douche supérieures à celles trouvées pendant la douche. Ces résultats semblent mettre en évidence des problèmes analytiques (matériel de prélèvement et d'analyse).

1.1.2 Cuisine.

Le tableau 10 présente les concentrations des 4 espèces de THM trouvées dans les cuisines des 2 logements tests.

Tableau 10 : Concentrations des quatre THM dans l'air de la cuisine des 2 logements enquêtés exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	CLF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BDCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DBCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BRF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[THMt] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Logement A	11,27	0,32	0,49	0,51	12,60
Logement B	0,11	0,15	0,38	0,53	1,16

Les concentrations dans la cuisine confirment que le chloroforme est le composé qui est le plus présent dans l'air. Les différences observées dans les deux logements peuvent s'expliquer par le fait que la cuisine du logement B est de type cuisine américaine et donne sur un salon-salle à manger, ce qui crée un espace de dilution des THM beaucoup plus important.

1.2 Pièces réceptrices

Le tableau 11 présente les résultats obtenus lors de la campagne test dans la chambre et le salon des 2 logements enquêtés.

Tableau 11 : Concentrations des quatre THM dans l'air de la chambre des 2 logements enquêtés exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Logement A	CLF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BDCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DBCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BRF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[THMt] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Chambre	2,79	0,22	0,34	0,28	3,62
Salon	1,47	0,07	0,17	0,22	1,94
Logement B	CLF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BDCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DBCM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BRF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	[THMt] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Chambre	0,35	0,05	0,21	0,22	0,83
Salon	0,27	0,00	0,07	0,18	0,52

Des concentrations en THM faibles et parfois inférieures à la limite de quantification sont trouvées dans les deux logements. La plupart de ces résultats sont à considérer avec prudence car, excepté pour les concentrations en chloroforme dans le salon et la chambre du logement A, les concentrations trouvées sont en dessous de la limite de quantification ($0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

2. APPROCHE DE MODELISATION

Un état des lieux des modèles de dispersion de THM suite à l'utilisation d'eau a été fait dans la partie III.2.3. Le modèle choisi a été ensuite testé avec les données issues de l'enquête préliminaire.

2.1 Choix des valeurs

La plupart des termes d'entrée ont pu être renseignés grâce aux données du questionnaire comme les volumes des pièces, le débit et la température de l'eau dans les conditions habituelles d'utilisation, ainsi que les durées des différentes activités contaminantes. Les prélèvements en THM au robinet nous fournissent la concentration des quatre espèces dans l'eau. Enfin, les valeurs de la constante de Henry (H) et du transfert de masse (N) ont été obtenues grâce à la littérature.

Pour le calcul de la constante de Henry (H), des formules de calcul prenant en compte la température de l'eau (T) existent pour chaque THM. Les formules utilisées sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12 : Formule de calcul de la constante de Henry utilisée [36]

THM	Log H
Chloroforme	$5,343 - (1830/T)$
Bromodichlorométhane	$6,143 - (2130/T)$
Dibromochlorométhane	$6,296 - (2273/T)$
Bromoforme	$5,476 - (2120/T)$

Si le calcul de la constante de Henry est relativement aisé pour les 4 THM, il est en revanche difficile de calculer la valeur du transfert de masse. Il n'existe pas de formule de calcul du transfert de masse pour aucun des quatre composés. En effet, ce paramètre est une fonction croissante du débit, de la température de l'eau et de la taille des gouttes. C'est pourquoi un seul composé a finalement été retenu dans la modélisation : le chloroforme, car les valeurs concernant son transfert de masse associé [34] sont les seules exploitables.

L'efficacité de transfert (stripping factor f) est calculée avec l'équation suivante :

$$f = 7,95 \ln (H) + 68,17 \text{ [33]}$$

Cette équation permet de calculer l'efficacité de transfert quelque soit le type de composé. De plus, les valeurs trouvées pour le chloroforme avec cette équation correspondent à celles rapportées dans d'autres études [33]. Cependant, cette relation ne prend pas en compte le fait que les efficacités de transfert sont dépendantes du temps pendant une douche. En effet, le terme f est une fonction décroissante du temps, ce phénomène de décroissance étant particulièrement important pour les composés faiblement volatils [33]. Cette formule est donc bien appropriée pour un composé tel que le chloroforme.

Enfin, le renouvellement d'air est calculé à partir des données fournies par l'enquête logements (type et état du système de ventilation, ouverture/fermeture des portes et fenêtres, age et hauteur du logement,) qui sont ensuite croisées avec l'indicateur. Les valeurs de débit de VMC sont prises égales aux valeurs réglementaires en l'absence de mesures sur le terrain.

L'ensemble des données nécessaires pour l'utilisation des modèles est listé en Annexe VIII.

La réponse du modèle aux concentrations mesurées dans les deux logements tests pourra ainsi être étudiée. Ces résultats pourront ensuite être comparés aux concentrations dans l'air mesurées lors de la campagne logements.

2.2 Validation du modèle douche

2.2.1 Test de sensibilité du modèle

Les tests de sensibilité ont été restreints aux modèles douche et salle de bain. Le modèle pour la cuisine n'intégrait pas les concentrations dans l'air pour toute la durée des activités de cuisine mais seulement pour des activités ponctuelles (ébullition, vaisselle, lavage), interdisant ainsi des comparaisons avec les concentrations mesurées sur le terrain. Les paramètres d'entrée retenus pour le test de sensibilité sont : le coefficient de transfert de masse (N), la concentration en chloroforme dans l'eau ($[CLF]_{\text{eau}}$), le volume de la cabine de douche et la durée de la douche. Le débit d'eau et la température ne sont pas testés en raison de la grande incertitude sur leur transfert de masse associé.

Leurs valeurs ont ensuite été modifiées de 10% par rapport aux valeurs types disponibles dans la littérature. Les valeurs types et les résultats des tests sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13 : Valeurs utilisées pour le test de sensibilité du modèle

Paramètres	Valeur type	Source	$\Delta C_{\text{airdouche}}$ (%)	ΔC_{airSDB} (%)
Volume douche	1,9 m ³	[Jabbour, 2007]	1,9	4,1
N	0,9	[Little]	6,1	6,095
$[CLF]_{\text{eau}}$	10,3 µg/L	Sise-Eaux (Ille-et-Vilaine)	10	10
Durée douche	10 min	[CIBLEX]	3,3	13,1

Les paramètres d'entrée ont le même comportement qu'en conditions réelles. Ainsi, une évolution linéaire de la concentration en chloroforme dans l'air de la douche en fonction de la concentration dans l'eau avec un coefficient de proportionnalité de 5,1 est observée. Une évolution linéaire des concentrations est aussi obtenue en faisant varier le volume de la douche. Enfin, la concentration dans l'air en fonction de la durée de la douche suit une évolution de type logarithmique.

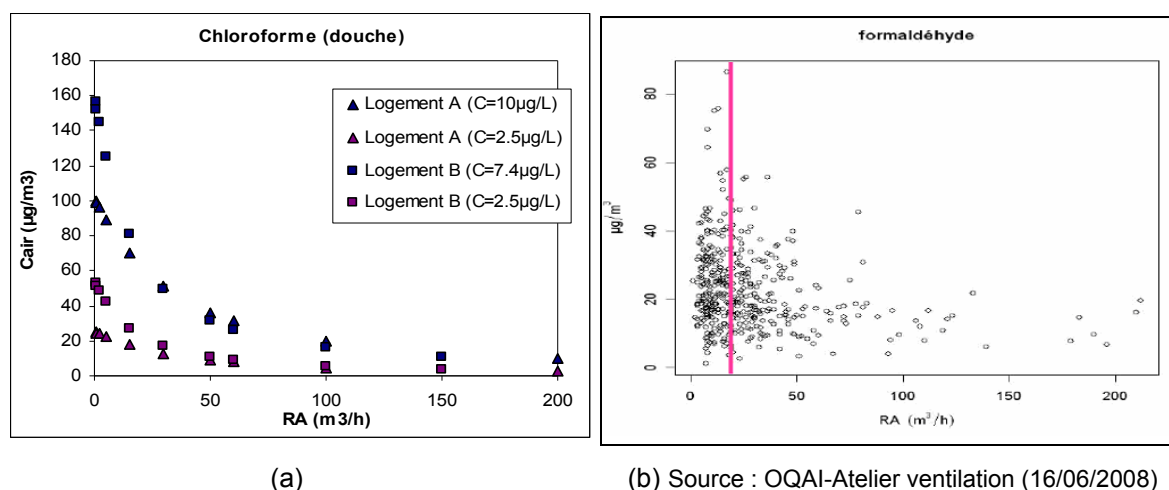
Le modèle douche et dans une moindre mesure le modèle salle de bain sont particulièrement sensibles à la concentration en chloroforme dans l'eau. Il est donc

nécessaire d'avoir des mesures les plus précises possibles de concentrations en THM dans l'eau pour l'utilisation des deux modèles.

Les valeurs du TRA ont été modifiées de manière à balayer le spectre des valeurs trouvées dans la littérature, dans des situations réelles, afin d'étudier la réponse du modèle. Toutes les autres variables sont maintenues constantes et sont extraites des résultats de l'enquête préliminaire et de la bibliographie.

La figure 4a ci-dessous présente les différentes valeurs de concentration en chloroforme dans l'air de la cabine de douche obtenues avec le modèle retenu [Lin, 2000] en fonction du renouvellement d'air. La figure 4b présente les variations de concentration en formaldéhyde dans l'air en fonction de la ventilation. Cette substance chimique est une des plus fréquemment rencontrée dans les logements et possède une volatilité importante en conditions de température et d'humidité élevées [50].

Figure 4 : Comportement du modèle douche (CLF) et mesures en situation réelle (formaldéhyde) de la variation de la concentration en polluant dans l'air en fonction du renouvellement d'air (RA)



L'étude des figures montre que le modèle prédit une influence du renouvellement d'air sur les concentrations en chloroforme dans l'air intérieur identique à celle observée pour le formaldéhyde dans des conditions réelles. En effet, l'évolution des concentrations en fonction du renouvellement d'air semble suivre une courbe exponentielle décroissante pour les deux composés, même si ceux ci ont des caractéristiques physico-chimiques différentes.

2.2.2 Comparaisons avec des douches expérimentales

Les résultats présentés dans le tableau 14 donnent les valeurs expérimentales de concentration en chloroforme dans l'air obtenues dans d'autres études [14, 38, 37], les valeurs obtenues par modélisation ainsi que le pourcentage d'erreur entre ces deux méthodes.

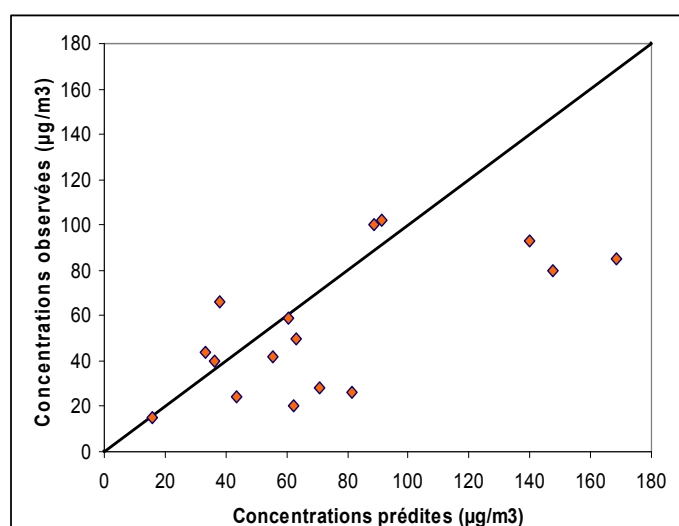
Tableau 14 : Comparaison des concentrations en chloroforme dans l'air expérimentales et prédites par le modèle douche

Etude	Vol douche (m ³)	TRA (h ⁻¹)	[CLF] _{eau} (µg/L)	Débit eau (L/min) et type de jet	Durée douche (min)	Temp (°C)	[CLF] _{air} (µg/m ³)	[CLF] _{air} Modèle Lin (µg/m ³)	Erreur (%)
Jo, (1990) [14]	1,5	0	40	8,7 ± 1,1	10	40 ± 2	326,9	1027	214,2
Tancrède, (1992) [38]	1,5	1,4	1,4	13,5	10	42	56	56,9	1,6
Keating, (1997) [37]	1,53	7,6	55600	3,1 – 3,8 jet+spray	10	40	287500 (spray) 475000 (jet)	35,8.10 ⁴ – 43,5.10 ⁴	

Les résultats montrent que le modèle semble prédire avec une précision acceptable les concentrations de chloroforme dans l'air d'une douche, ce composé étant celui majoritairement émis par les activités liées à l'utilisation d'eau du robinet. Une tendance à la surestimation qui peut être très prononcée pour des concentrations dans l'air très fortes est observée, ce qui donne néanmoins des valeurs conservatrices de concentrations dans l'air. Ce modèle peut néanmoins être utilisé pour prédire les concentrations dans l'air de la cabine de douche et la salle de bain des logements enquêtés.

La figure 5 compare les concentrations en chloroforme prédites par le modèle avec celles observées lors des essais menés au laboratoire dans une douche expérimentale [35].

Figure 5 : Comparaisons entre concentrations en chloroforme prédites et observées lors d'une douche expérimentale



Ces résultats confirment la tendance à la surestimation des concentrations prédites par le modèle pour des concentrations observées proches de 100µg/m³.

3. COMPARAISONS DES RESULTATS

Dans le tableau 15 sont présentées, pour la salle de bain et la douche, les concentrations en chloroforme observées dans les logements tests et celles prédites par les modèles. Les valeurs de TRA ont été calculées à partir des informations recueillies dans le questionnaire, de la littérature et des valeurs réglementaires pour la part du TRA due à la VMC. Un système de VMC classique équipe les deux logements enquêtés et était en fonctionnement pendant les mesures.

Tableau 15 : Valeurs de concentration en chloroforme prédites et observées dans les salles de bain des 2 logements tests. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	Logement A		Logement B	
	Observées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Prédites ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Prédites ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Pendant douche	48,85	45,69	11,99	19,52
Après douche	10,25	5,1	6,24	6,05

Une certaine corrélation entre valeurs observées et valeurs prédites est observée. Il doit cependant être souligné que la validité des résultats expérimentaux est probablement sujette à caution et qu'un nombre plus important de résultats terrain est nécessaire pour connaître la solidité du modèle.

L'utilisation de modèles déterministes a permis de confronter leur pertinence pour l'évaluation de l'exposition. Le modèle testé présente l'avantage de modéliser les différentes situations d'émissions et d'exposition de courte durée. Cependant, ces modèles sont imparfaits et peuvent amener à une surestimation importante de l'exposition. Le principal point faible des modèles douche/salle de bain testés réside dans le calcul du coefficient de transfert de masse. La prédiction la plus exacte est faite en utilisant le modèle douche avec les données de Tancrede [38] dont sont issues les valeurs du coefficient de transfert de masse, ce qui montre que ce paramètre est déterminant. L'acquisition des données relatives au coefficient de transfert de masse est une étape très importante pour améliorer la prédiction du modèle. Il s'agit du principal point faible des modèles, les valeurs étant tirées de la littérature. De plus, le test de sensibilité a permis de montrer l'importance de la qualité des données sur les concentrations en THM dans l'eau.

Enfin, une analyse précise de leur capacité à prédire les concentrations observées lors de l'enquête n'a pu être faite au vu du faible nombre de données disponibles (2 logements enquêtés) au moment de la rédaction de ce rapport. Une application aux résultats futurs de l'enquête serait donc nécessaire pour conclure sur la faisabilité d'une utilisation à d'autres logements de ces modèles douche/salle de bain.

V. RECOMMANDATIONS

1. AMELIORATION DES METHODES DE MODELISATION DE L'EXPOSITION

1.1 Elaboration de relations prédictives de l'évolution de la concentration en THM dans l'air intérieur en fonction du TRA.

La recherche bibliographique sur les déterminants du renouvellement d'air et ses méthodes de mesure a permis de mettre en évidence la grande complexité de son calcul et la nécessité d'entreprendre de nouvelles études. Elles concernent en priorité :

- Le recueil de données descriptives de l'état de la ventilation sur l'ensemble des logements français. Ces données doivent permettre de fournir des informations sur les systèmes de ventilation (défaillances des systèmes mécaniques et causes de ces défaillances,...), les pratiques d'ouverture des fenêtres dans les pièces de vie et les pièces de service et l'influence du comportement des occupants sur le renouvellement d'air. Les travaux de l'OQAI ont permis de fournir des premiers éléments dans ce sens.
- L'élaboration de relations prédictives du renouvellement d'air en fonction de ses principaux déterminants afin de pouvoir construire des relations prédictives plus précises de la contamination de l'air par les THM, mais aussi par d'autres COV provenant du dégazage aux points d'utilisation de l'eau, en fonction de ses principaux déterminants dont le renouvellement d'air. Ces relations prédictives doivent tenir compte des facteurs saisonniers qui peuvent être importants, mais aussi des paramètres physico-chimiques des polluants, des conditions météorologiques, des habitudes d'occupation et des caractéristiques du logement.

1.2 Connaissance des niveaux en THM dans les réseaux de distribution

L'élaboration de relations prédictives doit aussi tenir compte de la qualité des données disponibles. Or, il a été démontré que les concentrations dans l'eau au robinet du consommateur peuvent varier grandement en fonction de la saison, de la distance au point de mise en distribution,

Le laboratoire d'études et de recherches en hydrologie de l'AFSSA conduit actuellement un projet en partenariat avec l'InVS dont le but est l'élaboration de modèles prédictifs de l'évolution des concentrations en Sous Produits de Désinfection dans l'eau. Les résultats de cette étude pourraient être utilisés par le LERES dans l'élaboration d'un modèle prédictif.

Enfin, étant donné la longue période de latence (de 30 à 40 ans) des effets cancérigènes suspectés (vessie et colo-rectal), l'évaluation de l'exposition aux THM nécessite de disposer de données rétrospectives. Pour les périodes où elles font défaut (absence de contrôle, modification des techniques de désinfection), il est particulièrement utile de faire appel à des modèles prédictifs de contamination de l'eau [9, 12].

2. AMELIORATION DE LA PRISE EN COMPTE DE L'EXPOSITION AUX SPC

Peu de données concernant les effets des THM par inhalation sont disponibles dans la littérature. Il paraît donc important de poursuivre les études toxicologiques. Elles permettront de confirmer les effets cancérigènes et reprotoxiques des THM et d'arriver également à une cohérence entre les données animales et les données humaines. Des valeurs guides pour la qualité de l'air intérieur (VGAI) applicables aux THM pourront, de ce fait, être établies.

Il existe de nombreux autres sous-produits de chloration (SPC) dans l'eau potable. Les THM sont principalement étudiés en raison de leur forte proportion dans l'eau de distribution. Néanmoins, leur qualité d'indicateur de la contamination de l'eau en SPC est aujourd'hui remise en question. Il est désormais admis que les THM ne sont pas les seuls composés responsables de la toxicité de l'eau chlorée. En effet, il s'avère que d'autres SPC présents dans l'eau potable peuvent être plus toxiques que les THM et constituent un risque potentiel pour la santé humaine qui n'a pas aujourd'hui encore été évalué. Le MX (3-chloro-4-(dichlorométhyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone) serait un puissant mutagène (classé 2B : cancérigène possible, par l'IARC), et bien qu'il soit présent à des concentrations beaucoup plus faibles que les THM, il serait responsable du tiers de la mutagénicité de l'eau de boisson chlorée.

La cancérigénicité d'autres SPC comme les acides haloacétiques (acide dichloroacétique et acide trichloroacétique principalement) et haloacétonitriles (dichloroacétonitrile) est aussi suspectée mais peu de données toxicologiques sont disponibles à ce jour [1]. Une confirmation des effets de ces autres SPC est indispensable pour pouvoir mener une étude sur leur impact sanitaire.

La toxicité et la concentration des mélanges des SPC sont aussi actuellement largement inconnus. L'élaboration de limites de qualité de l'eau pour l'ensemble des SPC paraît donc irréaliste à court terme. Ainsi, il pourrait être pris en compte pour la mesure de l'exposition aux SPC d'autres paramètres que la concentration en THM tels que la matière organique, les bromures ou le pH afin d'améliorer la valeur prédictive de la toxicité de la chloration de l'eau à partir des données THM [9].

Des études épidémiologiques portant sur l'exposition à l'eau chlorée ont identifié des maladies à impact fort (incidence élevée et mortalité importante). Compte tenu de ces résultats, des recommandations de limitation de production de SPC doivent être faites en agissant, par exemple, sur les procédés de désinfection de l'eau potable.

Des actions de gestion du risque peuvent ainsi être menées à plusieurs niveaux.

3. GESTION DU RISQUE LIÉ À L'EXPOSITION AUX THM ET AUX AUTRES SPC

Malgré l'absence de données disponibles sur la contamination des logements, la réduction du risque lié aux THM par inhalation peut se faire en agissant à plusieurs niveaux : techniques de traitement de l'eau potable, ressources en eau et aération du logement.

- Modification des techniques de traitement.

Il existe deux approches de réduction de la formation des SPC, dont les THM sont les composés majoritaires, dans les stations de traitement d'eau potable : l'emploi de méthodes de désinfection alternatives et l'élimination de la matière organique avant l'étape de désinfection.

Les traitements de désinfection alternatifs existants ne présentent pas les avantages du traitement par chloration : production d'autres sous produits de désinfection et pouvoir de désinfection plus faible (traitement par des chloramines) ou absence de résiduel dans l'eau traitée et nécessité d'emploi d'un second désinfectant à caractère rémanent (traitement par ozonation ou rayonnement UV). De plus, il a été démontré que des changements de l'agent de désinfection peuvent augmenter les niveaux de plomb au robinet. Par ailleurs, il est utile de rappeler que les risques pour la santé associés aux agents pathogènes présents dans l'eau sont beaucoup plus grands que ceux associés aux THM. Ainsi, une modification du traitement de désinfection ne doit surtout pas compromettre son efficacité d'élimination des agents pathogènes présents dans l'eau.

La réduction de la charge organique dans une eau brute est la technique de minimisation de la formation des SPC la plus efficace [67]. Elle peut être réalisée par l'amélioration des procédés traditionnels de traitements des eaux, par une filtration sur membrane ou par l'ajout de procédés d'affinage comme l'adsorption sur charbon actif ou la préoxydation [67].

Ce type d'action présente l'avantage de réduire à la fois les risques liés à l'inhalation de THM mais aussi ceux par ingestion et contact cutané. Néanmoins, leur application peut nécessiter des coûts d'investissement élevés et la présence d'opérateurs qualifiés (filtration sur membranes ou sur charbon actif). Cette solution technique est cependant, de par son efficacité, la plus à même de réduire les risques. Une étude coûts/bénéfices pourra être réalisée.

Dans l'éventualité où les techniques de réduction des SPC entraîneraient un coût de changement de process impossible à prendre en charge pour une collectivité, il est envisageable, si cela est possible, de recourir à une autre ressource en eau potable (eau souterraine par exemple, car moins chargée en MON).

- Aération

Il est estimé que le budget espace temps de la population française dans des espaces clos est en moyenne de 85%. L'exposition aux THM par inhalation pourrait être réduite par des pratiques régulières d'aération et des meilleurs débits d'extraction dans les pièces de service.

Le Grenelle de l'environnement a fixé comme objectif de réduire les consommations d'énergie de plus d'un tiers d'ici l'horizon 2020 en engageant un chantier de rénovation énergétique des bâtiments résidentiels existants et de diviser par 4 la consommation énergétique du parc résidentiel en 40 ans [68]. Ces travaux posent le problème de la possible augmentation du confinement des logements. Face aux enjeux sanitaires liés à la pollution de l'air intérieur et à l'isolation de plus en plus importante des logements, la qualité des systèmes de ventilation est appelée à jouer un rôle primordial afin de concilier performances énergétiques et qualité de l'air. Un débat commence à émerger sur l'opportunité de généraliser les systèmes de ventilation mécanique au vu du coût énergétique qu'ils peuvent représenter. Une attention particulière doit donc être portée sur l'efficacité des systèmes de ventilation.

Une augmentation des débits réglementaires d'extraction des systèmes mécaniques pourrait être une solution de réduction de l'exposition aux THM dans l'air intérieur. Cependant, au vu des nombreuses non-conformités des débits d'extraction qui ont pu être relevées, cette action doit se faire en aval d'un renforcement de la périodicité du contrôle et de l'entretien des systèmes de ventilation.

- Actions de sensibilisation du public

Les risques liés à l'utilisation de l'eau potable sont depuis longtemps une problématique sensible, c'est pourquoi un effort d'information de la population autour du risque THM paraît important. Il serait utile de distribuer aux foyers raccordés à un réseau public de distribution d'eau potable des brochures pédagogiques sur les risques liés aux THM et les précautions à prendre pour en réduire les effets. Ces brochures pourraient contenir des recommandations d'aération des pièces sources après utilisation de la douche et de la cuisine. Elles permettraient ainsi également de réduire l'exposition due aux autres COV potentiellement cancérigènes, qu'ils proviennent ou non de l'eau potable.

Conclusion

L'exposition par inhalation de la population aux trihalométhanes (THM) est une problématique complexe qui croise des enjeux relatifs à la qualité de l'eau potable et de l'air intérieur. De nombreux résultats d'études indiquent que l'exposition par inhalation aux THM doit être prise en compte au vu de son importante contribution à l'exposition totale.

L'étude de l'exposition par inhalation aux THM dans l'habitat a été entamée par le LERES au début de l'année 2007 avec le lancement du projet « Pollprox ». Une campagne de prélèvements réalisée dans le département de l'Ille-et-Vilaine a été lancée dans le but de connaître les niveaux de contamination de l'air intérieur des logements et de parvenir à la connaissance des mécanismes qui sous-tendent cette contamination.

L'objectif central de ce mémoire, qui s'inscrit dans ce projet, était de fournir des outils d'aide à l'évaluation de l'exposition dans les pièces de vie et les pièces sources afin d'améliorer la connaissance relative aux déterminants des concentrations dans l'air puis de comparer leur pertinence aux résultats de la campagne « été ».

Une synthèse bibliographique a permis de définir les principaux déterminants de la concentration en THM dans l'air et en particulier de recenser les paramètres influant sur le renouvellement d'air et les outils permettant son estimation. Des modèles déterministes de prédiction de la contamination de l'air intérieur des logements par les THM ont été testés et ont montré des premiers résultats encourageants. L'évaluation de la pertinence de ces outils n'a malheureusement pas pu être faite en raison d'un report du lancement de l'enquête terrain. Une application des modèles aux futurs résultats de cette enquête permettra de confirmer les premières tendances observées lors de ce stage.

Ce mémoire a également permis d'identifier des pistes de recherche pour améliorer la connaissance des déterminants de l'exposition aux THM (concentration dans l'eau, renouvellement d'air).

Certaines recommandations peuvent être faites de manière préventive en raison des risques possibles liés à ces substances, comme la réduction de la charge en matière organique et la diffusion de recommandations d'aération au grand public.

Bibliographie

- [1] InVS (2004). Evaluation des risques sanitaires des sous-produits de chloration de l'eau potable. Partie 1. Caractérisation des dangers : effets sanitaires et valeurs toxicologiques de référence, 1-44.
- [2] Villanueva C.M., Kantor K.P., Grimalt J.O., Malats N., Silverman D., Tardon A., Garcia-Closas R., Serra C., Carrato A., Castano-Vinyals G., Marcos R., Rothman N., Real F.X., Dosemeci M., Kogevinas M. (2007). Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. *American Journal of Epidemiology*, 165, 148-156.
- [3] Jo W.K., Kwon K.D., Dong J.I., Chung Y. (2005). Multi-route THM exposure in households using municipal tap water treated with chlorine or ozone-chlorine. *Science of the Total Environment*, 39: 143-152.
- [4] Lin T.F., Hoang S.W. (2000). Inhalation exposure to THMs from drinking water in south Taiwan. *The Science of the Total Environment*, 246: 41-49.
- [5] AFSSET. (2007). Rapport groupe de travail AFSSET. Propositions de valeurs guides de qualité de l'air intérieur : Document cadre et éléments méthodologiques.
- [6] OQAI. (2007). « Campagne nationale logements, Etat de la qualité de l'air dans les logements français, Rapport final ». Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 183 p.
- [7] Mc Kone. (1987). Human exposure to VOC in household tap water. *Environmental Science and Technology*, 21:1194-1201.
- [8] Nazir M., Khan F. I. (2005). Human health risk modeling for various exposure routes of THMs in potable water supply. *Environmental modeling and software*, 21: 1416-1429.
- [9] InVS. (2007). Evaluation des risques sanitaires des sous-produits de chloration de l'eau potable. Partie 2 – Estimation de l'exposition, caractérisation du risque et faisabilité d'une surveillance épidémiologique des pathologies liées à la surchloration dans la population générale.

[10] SISE-EAUX. Base de données

[11] Institut National de santé Publique-Québec. Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine, Décembre 2002.

<http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/198-CartableEau/Trihalomethanes.pdf>, consulté le 14 mai 2008.

[12] Arbuckle T.E., Hrudey S.E., Krasner S.W., Nuckols J.R., Richardson S.D., Singer P., Mendola P., Dodds L., Weisel C., Ashley D.L., Froese K.L., Pegram R.A., Schulz I.R., Reif J., Bachand A.M., Benoit F.M., Lynberg M., Poole C., Waller K. (2002). Assessing Exposure in Epidemiologic Studies to Disinfection by-Products in Drinking Water: Report from an International Workshop. *Environmental Health Perspectives*, 110 (1):53-60.

[13] Villanueva C. M., Gagnière B., Monfort C., Nieuwenhuijsen M. J., Cordier S. (2006). Sources of variability in levels and exposure to trihalomethanes. *Environmental research*, 103: 211-220.

[14] Jo K. J., Weisel C. P., Liroy P.J. (1990). Routes of Chloroform exposure and body burden from showering with chlorinated tap water. *Risk analysis*, 10 (4): 575-580.

[15] Jo K. J., Weisel C. P., Liroy P.J. (1990). Chloroform exposure and the health risk associated with uses of chlorinated tap water. *Risk analysis*, 10 (4): 581-585.

[16] OMS. 2004. Concise International Chemical Assessment. Document : Chloroform, Genève.

[17] OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment). Toxicity criteria database. Proposition 65 NSRLs and MADLs

Chloroforme :

<http://www.oehha.ca.gov/risk/ChemicalDB/nsrl-madl.asp?name=Chloroform&number=67663>, consulté le 15 mai 2008.

[18] Jabbour V., Mouly D., Beaudou P., Dor F. (2007). Estimation de l'exposition de la population française au chloroforme présent dans les réseaux d'eau potable. *Environnement, Risques et Santé*: 6 (4): 289-300.

[19] Toledano M. B., Nieuwenhuijsen M. J., Best N., Whitaker H., Hambly P., de Hoogh C., Fawell J., Jarup L., Elliott P. (2005). Relation of trihalomethane concentrations in public water supplies to stillbirth and birth weight in three water regions in England. *Environmental Health Perspectives*, 113 (2): 225-232.

[20] Ministère de la Santé et des Solidarités (2005). L'eau potable en France, situation 2002-2004. 1-51.

[21] Kirchner S. (2005). Impact de la ventilation dans les écoles sur la santé respiratoire. http://rsein.ineris.fr/actualite/actu_pdf/33_SKirchner.pdf, consulté le 29 mai 2008.

[22] OMS. 2006. Guidelines for drinking-water quality, third edition, incorporating first addendum. Volume 1 – Recommendations.

[23] USEPA (1998). National primary drinking water regulations: disinfectants and disinfection byproducts. <http://www.epa.gov/OGWDW/mdbp/dbpfr.html>, consulté le 30 juin 2008.

Réglementation :

[24] Directive 98/83/CE du conseil de l'Union Européenne du 3 Novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine

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

[26] Direction Générale de la Santé. Circulaire DGS/SD7A n°2003-524/DE/19-03 du 7 novembre 2003, <http://www.sante.gouv.fr/adm/dagpb/bo/2003/03-48/a0483680.htm>, consulté le 01 août 2008.

[27] République française. Décret n°2003-461 du 21 mai 2003 relatif à certaines dispositions réglementaires du code de la santé publique. JORF n°122 du 27 mai 2003. <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000595201&dateTexte=>, consulté le 08 juillet 2008.

[28] Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983
http://www.savelys.fr/pdf/arret_24031982.pdf, consulté le 25 juillet 2008

[29] ANAH Fiche technique Aération des logements

http://www.anah.fr/nos-conseils-techniques/fiches-techniques/pdf/Aeration_des_logements.pdf, consulté le 16 mai 2008.

[30] ADEME <http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/ventilation/rub3.htm>, consulté le 07 juillet 2008

[31] Uyak V. (2005). Multi pathway risk assessment of trihalomethanes exposure in Istanbul drinking water supplies. *Environment international*, 32: 12-21.

[32] Kerger B.D., Schmidt C. E., Paustenbach D. J. (2000). Assessment of airborne exposure to Trihalomethanes from tap waters in residential showers and baths. *Risk analysis*, 20 (5): 637-651.

[33] Moya J., Howard-Reed C., Corsi R.L.(1999). Volatilization of chemicals from tap water to indoor air from contaminated water used for showering. *Environment, Science and Technology*, 33: 2321-2327.

[34] Little J. C. (1992). Applying the two-resistance theory to contaminant volatilization in showers. *Environmental Science and Technology*, 26 (7):1341-1349.

[35] Bessoneau V. (2008). Détermination de la contamination de l'air des douches par les trihalométhanes en fonction de ses principaux déterminants. Mémoire de master II recherche Chimie et microbiologie de l'eau. Université de Poitiers, Rennes et Limoges.

[36] Staudinger J., Roberts P.V. (2001). A critical compilation of Henry's law constant temperature dependence relations for organic compounds in dilute aqueous solutions. *Chemosphere*, 44: 561-576.

[37] Keating G.A., McKone T.E., Gillett J.W. (1997). Measured and estimated air concentrations of chloroform in showers: effects of water temperature and aerosols. *Atmospheric Environment*, 31: 123-130.

[38] Tancrède M., Yanagisawa Y., Wilson R. (1992). Volatilization of volatile organic compounds from showers-I. Analytical method and quantitative assessment. *Atmospheric environment*, 26A (6):1103-1111.

[39] OQAI. (2003). Enquête nationale logements. Partie 1, Chapitre 3, Titre 3 : Annexe évaluation du renouvellement d'air.

[40] Delaune T., Roger P., Valton P. (1986). Mesures de ventilation dans l'habitat équipé de ventilation mécanique contrôlée. Agence française pour la maîtrise de l'énergie (Commanditaire) et Comité scientifique et technique de l'industrie du chauffage, de la ventilation et du conditionnement d'air (COSTIC). N° de rapport: AFME - 85-04-1129.

[41] Simon F., Hauglustaine J. M., Baltus C., Liesse S. (2001). Brochure : La ventilation et l'énergie –Guide pratique pour les architectes.

[42] Walker R. R., Hayes S. D., White M K. How effective is natural ventilation? A study of local mean age of air by modelling and measurement. Proceedings of the 17th Annual AIVC Conference, Gothenburg, Suède, Septembre 1996 (1996, ISBN 0 946075 90 5, 2 Vols plus supplement, Code CP17).

[43] Howard Reed C., Wallace L. A. (2002). The effect of opening windows on air change rates in two homes. *Journal of the air & Waste management association*, 52: 147-159.

[44] Niachou K., Hassid S., Santamouris M., Livada I. (2008). Experimental performance investigation of natural, mechanical and hybrid ventilation in urban environment. *Building and environment* : 43 : 1373-1382.

[45] Kvisgaard B., Collet P. F. (1990). The user's influence on air change. Air change rate and air tightness in buildings, ASTM STP 1067, American Society for Testing and Materials, Philadelphia: 67-76.

[46] Iwashita G., Akasaka H. (1996). The effects of human behaviour on natural ventilation rate and indoor air environment in summer-a field study in southern Japan. *Energy and buildings*, 25: 195-205.

[47] Griffiths M., Eftekhari M. (2008). Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom. *Energy and buildings*, 40: 556-560.

[48] Chao C. Y., Wan M. P., Law A. K. (2004). Ventilation performance using constant concentration dosing strategy. *Building and Environment*, 39: 1277-1288.

[49] Coppalle A., Beaudeau P., Delmas V. (2002). Le transfert extérieur/intérieur des polluants atmosphériques : approches statistiques et physiques utiles pour le calcul de l'exposition des populations. *Pollution atmosphérique*, 175 : 407-419.

[50] Kirchner S., Lucas J.-P., Ribéron J. (2008). Atelier de l'OQAI : Etat de la ventilation dans les logements, CSTB, Lundi 16 juin 2008.

[51] Krasner, S. W., Wright J. M. (2005). The effect of boiling water on disinfection by-product exposure. *Water research*, 39: 855-864.

[52] Batterman S., Huang A.T., Wang S., Zhang L. (2000). Reduction of ingestion exposure due to volatilization. *Environmental Science and Technology*, 34: 4418-4424.

[53] Chao C.Y., Chan G.Y. (2001). Quantification of indoor VOCs in twenty mechanically ventilated buildings in Hong-Kong. *Atmospheric Environment*, 35: 5895-5913.

[54] INERIS. (2005). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Le chloroforme.

http://rsde.ineris.fr/fiches/fiche_Chloroforme_VF.pdf, consulté le 02 juin 2008.

[55] INSEE. Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques.

(a) http://www.insee.fr/fr/insee_regions/bretagne/zoom/chif_cles/fregdep/fdep35.htm, consulté le 01 août 2008

(b) http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=12265®_id=19&page=pages_de_profils/P08_34/sources_definitions_biblio.htm, consulté le 05 août 2008

[56] USEPA. (1997). Exposure factors handbook. Washington:US EPA.

[57] Laporthe S., Virgone J., Castanet S. (1999). A comparative study of two tracer gases: SF₆ and N₂O. *Building and environment*. 36: 313-320.

[58] Egorov A.I., Tereschenko A.A., Altshul L.M., Vartiainen T., Samsonov D., LaBrecque B., Mäki-Paakkanen J., Drizhd N.L., Ford T.E. (2003). Exposure to drinking water chlorination by-products in a Russian city. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206, 539-551.

[59] Office fédéral suisse de l'énergie. Rapport annuel 2000. Application de traceurs passifs pour l'étude des mouvements d'air et de contaminants, 5p.

www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009205.pdf&name=000000210381.pdf, consulté le 14 mai 2008.

[60] Tippayawong N., Khuntong P., Nitatwichit C., Khunatorn Y., Tantakitti C. (2008). Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments. *Building and environment, In Press, Corrected proof*.

[61] Gordon S. M., Brinkmann M. C., Ashley D. L., Blount B. C., Lyu C., Masters J., Singer P. C. (2006). Changes in breath Trihalomethanes Levels Resulting from household water-use activities. *Environmental Health Perspectives*, 114(4): 514-521.

[62] Backer L. C., Lan Q., Blount B. C., Nuckols J. R., Branch R., Lyu C. W., Kieszak S. M., Brinkman M. C., Gordon S. M., W. Flanders D., Romkes M., Cantor K. P. (2008). Exogenous and Endogenous Determinants of Blood Trihalomethane Levels after Showering. *Environmental Health Perspectives*, 116 (1): 57-63.

[63] Li Y., Delsante A. (2001). Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. *Building and environment*, 36 : 59-71.

[64] Luo Z., Zhao J., Gao J., He L. (2007). Estimating natural-ventilation potential considering both thermal comfort and IAQ issues. *Building and environment*, 42 : 2289-2298.

[65] Chen M.J., Wu K.Y., Chang L. (2003). A new approach to estimating the volatilization rates of shower water-contained volatile organic compounds during showering. *Atmospheric Environment*, 37: 4325-4333.

[66] Lynberg M, Nuckols JR, Langlois P, Ashley A, Singer P, Mendola P, Wilkes C, et al. (2001). Assessing Exposure to Disinfection By-products in Women of Reproductive Age Living in Corpus Christi, Texas, and Cobb County, Georgia: Descriptive Results and Methods. *Environmental Health Perspectives*, 109 (6): 597-604.

[67] Santé Canada (2006). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Document technique: Les Trihalométhanes.

<http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/trihalomethanes/index-fra.php>, consulté le 02 août 2008.

[68] Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire. Le Grenelle de l'environnement, Synthèse groupe de travail n°1. <http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr/grenelle-environnement/spip.php?article214>

Liste des annexes

Annexe I : Classes de contamination de l'eau potable par les THM dans le département de l'Ille et Vilaine (au point de mise en distribution).

Annexe II : Fréquences annuelles d'échantillonnage et d'analyses au point de mise en distribution et d'utilisation.

Annexe III : Méthodologie de choix des logements (enquête logements).

Annexe IV : Synthèse des prélèvements par pièces prévus pour l'enquête (logement type).

Annexe V : Protocoles de calcul du renouvellement d'air

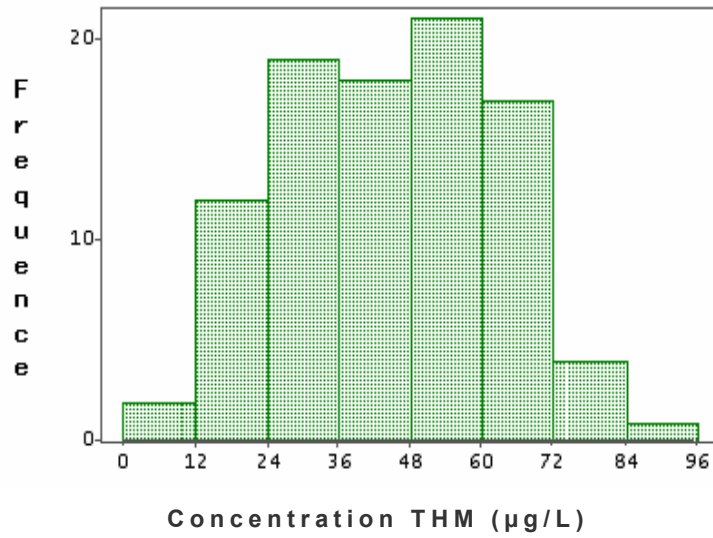
Annexe VI : Mesure du renouvellement d'air dans une chambre

Annexe VII : Paramètres à collecter pour l'évaluation du renouvellement d'air

Annexe VIII : Paramètres d'entrée pour la modélisation

ANNEXE I

Classes de contamination de l'eau potable par les THM dans le département de l'Ille et
Vilaine (au point de mise en distribution)



Nombre d'Unité de Distribution : 95.

ANNEXE II

Fréquences annuelles d'échantillonnage et d'analyses au point de mise en distribution et d'utilisation.

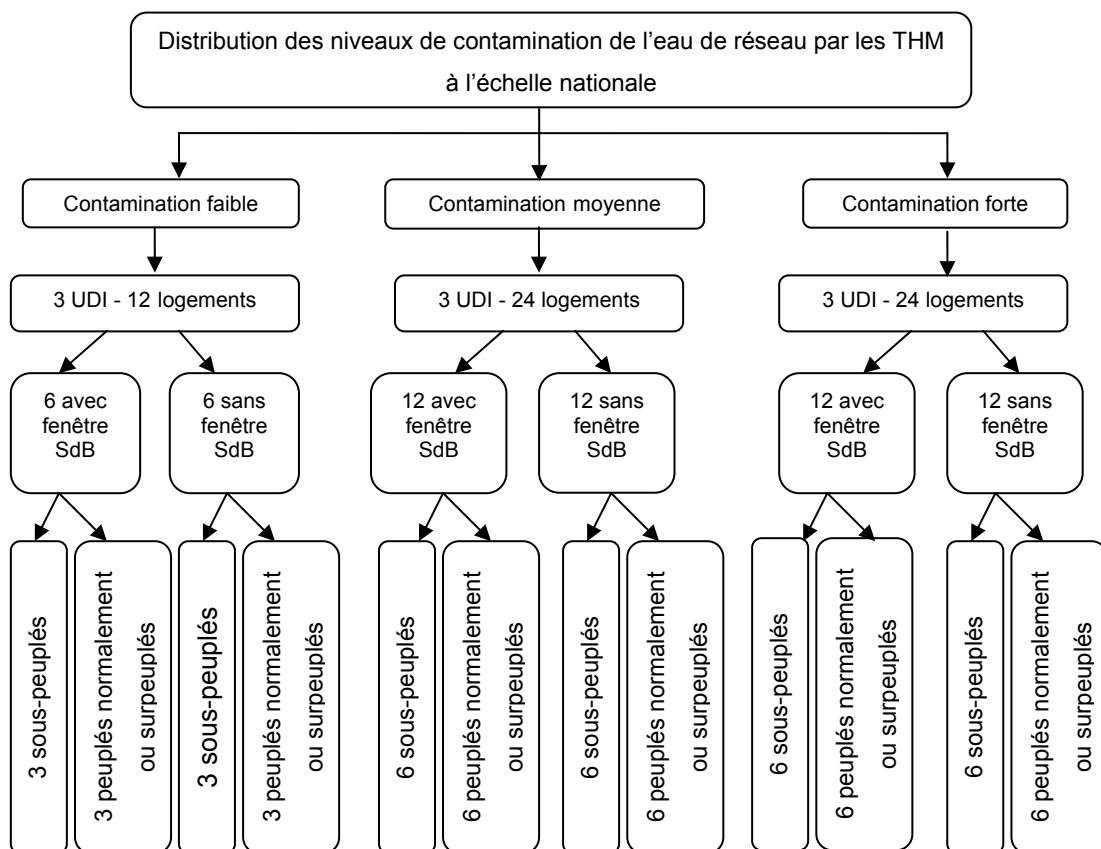
POPULATION DESSERVIE	DEBIT m ³ /j	TYPES ET FREQUENCES D'ANALYSES			
		P1	P2*	D1***	D2**
0 à 50 habitants.....	0-10	1	Entre 0,1 et 0,2	Entre 2 et 4	Entre 0,1 et 0,2
50 à 499 habitants.....	10-99	2	Entre 0,2 et 0,5	Entre 3 et 4	Entre 0,2 et 0,5
500 à 1999 habitants.....	100-399	2	1	6	1
2000 à 4 999 habitants.....	400-999	3	1	9	1
5000 à 14999 habitants.....	1000-2999	5	2	12	2
15 000 à 29 999 habitants.....	3000-5999	6	3	25	3
30 000 à 99 999 habitants.....	6000-19999	12	4	61	4
100 000 à 149 999 habitants.....	20 000-29 999	24	5	150	5
150 000 à 199 999 habitants.....	30 000-39 999	36	6	210	6
200 000 à 299 999 habitants.....	40 000-59 999	48	8	270	8
300 000 à 499 999 habitants.....	60 000-99 999	72	12	390	12
500 000 à 625 000 habitants.....	100 000-125 000	100	12	630	12
> 625 000 habitants.....	> 125 000	144	12****	800*****	12****

* L'analyse P2 est à faire en complément d'une analyse P1.
 ** L'analyse D2 est à faire en complément d'une analyse D1.
 *** Pour les populations supérieures à 500 habitants, le nombre d'analyses à effectuer est obtenu par interpolation linéaire entre les chiffres fixés dans la colonne D1 (le chiffre étant arrondi à la valeur entière la plus proche). Le chiffre inscrit dans la colonne D1 correspond à la borne inférieure de chaque classe de débit.
 **** Pour cette catégorie, une analyse supplémentaire doit être réalisée par tranche supplémentaire de 25 000 m³/j du volume total.
 ***** Pour cette catégorie, 3 analyses supplémentaires doivent être réalisées par tranche supplémentaire de 1 000 m³/j du volume total.

Source : http://ile-de-france.sante.gouv.fr/santenv/eau/regle/d_1220cod.pdf

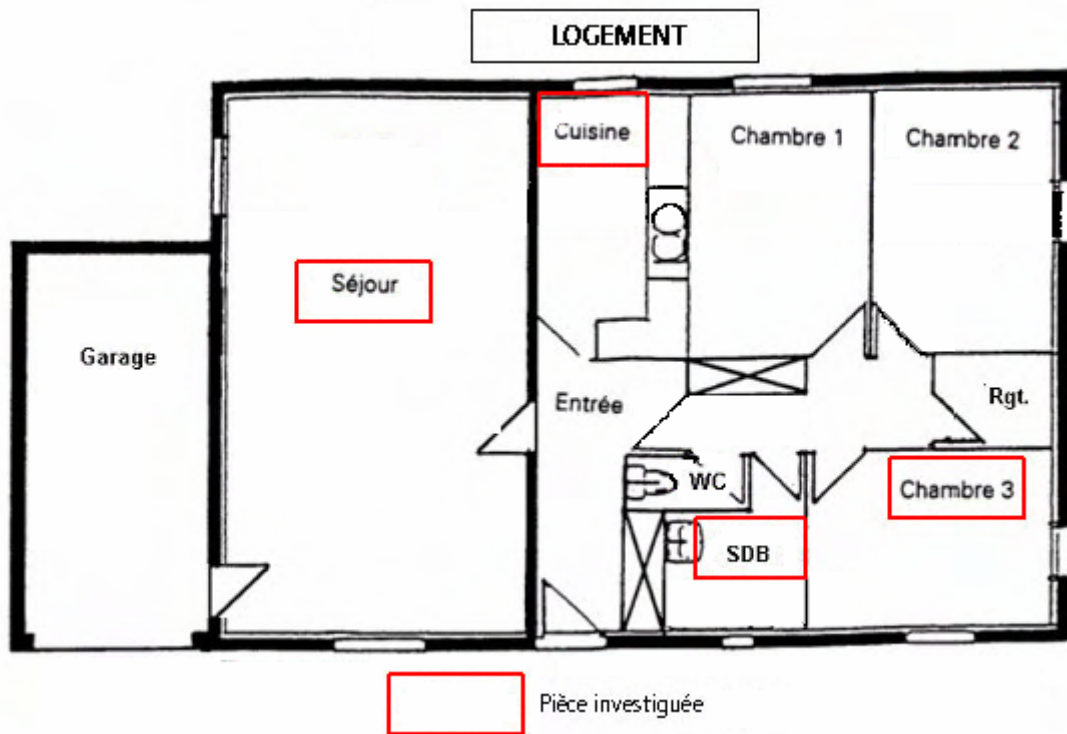
ANNEXE III

Méthodologie de choix des logements (enquête logements)



ANNEXE IV

Synthèse des prélèvements par pièces prévus pour l'enquête (logement type).



ANNEXE V

Protocoles de calcul du renouvellement d'air

Les différents cas de ventilation pouvant être rencontrés sont présentés sur la même base que les critères de sélection des logements, c'est-à-dire présence ou non d'une fenêtre, le second critère étant la présence ou non d'un système de ventilation.

Le matériel utilisé pour ces expériences sera une bonbonne de SF₆ pour l'injection du gaz traceur et un analyseur de gaz photoacoustique qui prélève une faible quantité d'air toutes les 34 secondes.

1) Pièce borgne (sans fenêtre).

1.1 Avec VMC.

Dans ce type de pièce, la mesure par décroissance du SF₆ peut être couplée à une mesure du débit d'extraction de la VMC afin d'avoir la part du TRA due à ce système. La porte de la pièce devra être fermée.

Protocole :

- Fermeture de la/des portes, arrêt de la VMC (ne pas boucher le détalonnage des portes).
- Disperser et homogénéiser le gaz traceur (ventilateur).
- Mesurer la décroissance en SF₆. → *Infiltration*.
- Lancer la VMC.
- Mesure. → *Part supplémentaire liée au système de ventilation*.

1.2 Sans VMC (ventilation naturelle).

Protocole :

- Fermeture de la/des portes, boucher entrées/sorties d'air (ne pas boucher le détalonnage des portes).
- Disperser et homogénéiser le gaz traceur (ventilateur).
- Mesurer la décroissance en SF₆. → *Infiltration*.
- Déboucher entrées/sorties d'air.
- Mesure. → *Part supplémentaire liée au système de ventilation*.

1.3 Aucun système de ventilation.

Dans ces pièces, on pourra considérer le renouvellement d'air supplémentaire comme égal à la transparence du bâtiment. On peut aussi supposer que dans ce type de pièce, la porte est généralement laissée ouverte afin de compenser l'absence de système d'aération. La mesure du renouvellement d'air peut être faite par décroissance du gaz traceur. On pourra aussi tester la faisabilité d'une mesure avec un simple anémomètre.

2) Pièce comportant des fenêtres.

2.1 Ouverture des fenêtres.

Dans certains cas, des mesures de renouvellement d'air par ouverture des fenêtres seront faites. Il s'agit ici de définir un protocole permettant une estimation la plus précise possible du renouvellement d'air.

2.1.1 Avec VMC.

On doit prendre en compte l'influence de la VMC, de l'infiltration et de l'ouverture des fenêtres. Dans ce type de pièce, la mesure par décroissance du SF₆ peut être couplée à une mesure du débit d'extraction de la VMC afin d'avoir la part du TRA due à ce système.

Protocole :

- Fermer les portes et les fenêtres, arrêter la VMC (ne pas boucher le détalonnage des portes).
- Disperser et homogénéiser le gaz traceur (ventilateur).
- Mesurer la décroissance en SF₆. → *Infiltration*
- Lancer la VMC.
- Mesure. → *Part supplémentaire liée au système de ventilation*
- Ouvrir les fenêtres et laisser les portes fermées (Delaune, 1986).
- Mesure → *Part supplémentaire liée à l'aération.*

Difficultés prévisibles : Il sera peut être nécessaire d'émettre une nouvelle bouffée de SF₆ à l'issue de la mesure de la part de renouvellement liée à la ventilation

2.1.2 Sans VMC (ventilation naturelle).

Protocole :

- Fermer les portes et les fenêtres, colmater les entrées ou sorties d'air naturelles (ne pas boucher le détalonnage des portes).
- Disperser et homogénéiser le gaz traceur (ventilateur).
- Mesurer la décroissance en SF₆. → *Infiltration.*
- Déboucher entrées ou sorties d'air.
- Mesure. → *Part supplémentaire liée au système de ventilation.*
- Ouvrir les fenêtres et laisser les portes fermées (Delaune, 1986).
- Mesure → *Part supplémentaire liée à l'aération.*

Difficultés prévisibles : Il sera peut être nécessaire d'émettre une nouvelle bouffée de SF₆ à l'issue de la mesure de la part de renouvellement liée à la ventilation

2.1.3 Aucun système de ventilation.

Protocole :

- Fermer les portes et les fenêtres (ne pas boucher le détalonnage des portes).
- Disperser et homogénéiser le gaz traceur (ventilateur).
- Mesurer la décroissance en SF₆. → *Infiltration*
- Ouvrir les fenêtres et laisser les portes fermées (Delaune, 1986).
- Mesurer la décroissance en SF₆. → *Part supplémentaire liée à l'aération.*

2.2 Pas d'ouverture des fenêtres.

2.2.1 Avec VMC.

Il doit être pris en compte l'influence de l'infiltration (tirage thermique et vent) et de la VMC.

Protocole :

- Mesurer portes et fenêtres fermées, VMC coupée pour avoir le renouvellement d'air supplémentaire (tirage thermique et vent). Puis mesure avec VMC allumée à son niveau habituel.

Les 2 situations permettront de mieux connaître l'influence de la VMC sur la concentration en polluants par la connaissance du renouvellement d'air lié à la VMC. Cette mesure du renouvellement d'air se fera par décroissance de gaz traceur SF₆.

2.2.2 Sans VMC (ventilation naturelle).

Protocole :

- Mesure portes et fenêtres fermées pour avoir le renouvellement d'air supplémentaire (tirage thermique et vent). Mesure des débits d'air sous la porte (connaissance de l'apport d'air brassé).

2.2.3 Aucun système de ventilation.

Dans ce type de pièce, le renouvellement d'air se fait uniquement grâce à l'infiltration.

Protocole :

- Fermer les portes
- Disperser et homogénéiser le gaz traceur (ventilateur).
- Mesurer la décroissance → *Infiltration.*

ANNEXE VI

Mesures du renouvellement d'air dans une chambre

Fenêtre fermée (vol/h)	Fenêtre ouverte (ouverture large) (vol/h)
0,325	11,8

- Conditions météorologiques : anticycloniques
Vent : moyen
- Caractéristiques de la pièce:
 - Orientation : ouest
 - Surface : 9,1 m²
 - Volume : 22,7m³
 - Section fenêtre : 1,19 m²
 - Ventilation : VMC coupée, pas de colmatage du détalonnage.Présence de languettes d'aération naturelle au dessus de la fenêtre.

ANNEXE VII

Paramètres à collecter pour l'évaluation du renouvellement d'air

<i>Salle de bain</i>	<i>Cuisine</i>	<i>Chambre</i>	<i>Salon</i>	<i>Logement</i>
Présence d'un système de ventilation	Présence d'un système de ventilation	Présence d'un système de ventilation	Présence d'un système de ventilation	Age de la construction
Fréquence Fonctionnement VMC	Fréquence Fonctionnement VMC	Fréquence Fonctionnement	Fréquence Fonctionnement	Etage ou nombre de niveaux
	Fréquence Fonctionnement hotte aspirante			
Etat VMC	Etat VMC			
Nombre fenêtres	Nombre fenêtres	Nombre fenêtres	Nombre fenêtres	
Nombre portes	Nombre portes	Nombre portes	Nombre portes	
Ouverture fenêtre	Ouverture fenêtre	Ouverture fenêtre	Ouverture fenêtre	
Largeur ouverture	Largeur ouverture	Largeur ouverture	Largeur ouverture	
Ouverture porte	Ouverture porte	Ouverture porte	Ouverture porte	
Surface et hauteur	Surface et hauteur	Surface et hauteur	Surface et hauteur	

ANNEXE VIII

Paramètres d'entrée pour la modélisation

<i>Variables</i>	<i>Unités</i>	Logement Enquêté
		- Nom -
Débit eau	m ³ /min	
[Chloroforme] _{eau} [BDCM] _{eau} [DBCM] _{eau} [Bromoforme] _{eau}	µg/m ³	
Température eau	K	
Volume douche Volume cuisine Volume Sdb	m ³	
Volume eau cuisine	m ³	
Durée douche tps passé ds sdb après Durée pré cuisine Durée vaisselle Tps passé ds cuisine	Min	
Aération		
Qair cuisine Qair SDB pendant douche Qair après douche	m ³ /min	

Abstract

CONTRIBUTION TO THE EVALUATION OF HOUSEHOLD INHALATION EXPOSURE TO TRIHALOMETHANES

Water disinfection by chlorine in water treatment plants (WTP) generates a great number of by-products, including Trihalomethanes (THM). Inhalation exposure to THM must be taken into account in risk assessments considering its important contribution to total exposure. A sampling campaign realised in Ille-et-Vilaine (Brittany) was launched in order to assess contamination levels of housings' air (bathrooms, kitchen, living room and bedroom) and to improve the knowledge of the mechanisms which control it. Control factors of THM concentration in the air are numerous (water temperature and flow, water THM concentration, aerosolisation, air change rate,...), among with air change rate is of great concern. It controls speed of THM disappearance and the contamination of other housings' rooms. The literature shows a multiplicity of influencing factors and point the difficulties related to their evaluation (distinction new air/circulating air,...). Selection of relevant data and development of models make possible to approach values of air change rate. Feasibility of using deterministic models to estimate air THM concentration was studied and have shown a good adequacy between experimental and predicted values in the bathroom, where exposure is the most important one. These results need to be compared in a future work with the whole data of the investigated residences.

This work also made it possible to identify tracks of research to improve knowledge in THM exposure by identifying the gaps of the evaluation of control factors. Recommendations can be made preventively in reasons of possible risks related to these substances, like an improvement in the reduction of the organic matter in WTP and the diffusion of ventilation recommendations brochures' to the population.

Key words:

THM, indoor air, exposure, inhalation, ACR, modelling, investigation, housings.