



# Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP

Rapport final

**BRGM/RP-63675-FR**

Août 2014

Guide réalisé dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques du BRGM – subvention 2013 n° 2100991812

**Leprond H., Lion F., Colombano S.**

Avec la collaboration de

**Windholtz J.**

**Vérificateur :**

Nom : ROUVREAU L.

Date : 17/06/2014

Signature :

**Approbateur :**

Nom : LALLIER S.

Directeur Adjoint de la Direction Eau Environnement et Écotechnologies

Date : 17/06/2014

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Avertissement

Ce rapport présente un état des connaissances des mesures constructives applicables dans le domaine des Sites et Sols Pollués (SSP) valable à la date de rédaction du document.

La liste des mesures constructives dressée ci-après peut ne pas être exhaustive. Son objectif est de présenter les principales mesures constructives utilisées dans le domaine des SSP.

**Mots-clés :** Mesures constructives, Intrusion, Vapeurs, Composés volatils, Méthodologie, Bâtiment, Perméation, Corrosion, Couverture, Surface

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Leprond H., Lion F., Colombano S. avec la collaboration de Windholtz J.** (2014) – Guide sur les mesures constructives. Rapport final BRGM/RP-63675-FR, 172 p., 26 fig., 19 tabl., 5 ann.

## Synthèse

Depuis le début des années 2000, l'urbanisation croissante, notamment au droit d'anciennes friches industrielles ou à proximité d'installations industrielles, a fait émerger le besoin d'intégrer des dispositions constructives à de nombreux projets comportant une problématique de pollution des sols ou/et des eaux souterraines. La prise en considération de tels dispositifs s'inscrit dans la méthodologie nationale en matière de sites et sols pollués, mise en place par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) entrée en vigueur en 2007. **Les principaux objectifs des mesures constructives sont, d'une part, d'assurer durablement l'adéquation d'un usage (existant ou envisagé) avec une pollution existante (cas d'une pollution chronique ou accidentelle migrant hors site) ou résiduelle (cas d'une réhabilitation) au droit d'un site, et, d'autre part, de s'affranchir, autant que possible, de l'évolution réglementaire des référentiels (évolution en général vers un abaissement des seuils), qui pourrait remettre en cause, à plus ou moins long terme, le niveau d'exposition admis pour les usagers.** Ces mesures viennent ainsi compléter des travaux plus conventionnels de dépollution des sols ou/et des eaux.

Ce guide a pour objectif, de présenter les principales mesures constructives pouvant être mises en œuvre dans le domaine des sites et sols pollués en regard des problématiques liées **aux remontées de gaz de sols en provenance de la sub-surface, à la perméation de composés volatils au travers d'une canalisation, à la pollution des sols de surface et la corrosion de biens matériels.** Dans chacun de ces cas, le retour d'expérience montre que les mesures constructives sont d'autant plus efficaces, plus simples et moins coûteuses, qu'elles sont étudiées en amont d'un projet et intégrées à sa réalisation.

L'intrusion de substances volatiles dans le bâti, historiquement prise en compte en raison du Radon (gaz naturel radioactif), concerne aussi de nombreux composés chimiques d'origine anthropique tels que les hydrocarbures de types pétroliers ou les solvants chlorés. **Le principe de base consiste d'abord à empêcher ou limiter l'intrusion de vapeurs dans un bâtiment ou, à défaut, à limiter leur accumulation.** Étancher ou réduire les surfaces d'échanges, éviter les chemins préférentiels liés au passage de réseaux, mettre en place des vides-sanitaires ventilés sous le bâtiment, mettre les bâtiments en surpression, drainer et aspirer les gaz constituent les principaux principes à suivre. Si l'efficacité de ces dispositifs ne se révèle pas suffisante ou lorsqu'ils ne peuvent pas être mis en place (pour des raisons techniques ou en raison de l'opposition de l'occupant), la limitation de l'accumulation de vapeurs dans le bâtiment (par exemple en augmentant le taux de renouvellement de l'air) sera privilégiée.

Les mesures constructives peuvent être passives (ne consommant pas d'énergie électrique) ou actives (utilisant des équipements consommant plus ou moins en permanence de l'électricité). Les techniques passives ne sont souvent pas suffisantes pour stopper l'entrée de polluants dans un bâtiment, notamment dans le cas de fortes concentrations. Elles constituent néanmoins un préalable fréquent pour limiter le flux d'entrée de vapeurs dans un bâtiment dans l'attente de la mise en œuvre de mesures constructives actives pleinement efficaces. Ces dernières offrent généralement de meilleurs résultats et sont, par conséquent, les systèmes les plus utilisés lorsqu'une diminution importante des concentrations de vapeurs dans l'air intérieur est nécessaire. *A contrario*, en plus de la consommation énergétique, différents éléments complémentaires doivent également être bien appréhendés et pris en compte : entretien, nuisances (sonore, esthétique,...), durée de vie, accès ponctuels par des tiers,....

L'intrusion de substances volatiles dans les réseaux de transport d'eau potable (transfert de vapeurs depuis le sol jusqu'à l'intérieur d'une canalisation non métallique) bien que relativement

rare ne doit pas être un phénomène complètement occulté. **La mesure préventive susceptible de diminuer ce risque consiste à éviter tout contact entre des canalisations d'eau potable et des sols pollués.** Lorsque cela est impossible, le recours à des canalisations métalliques ou multicouches (présence d'une couche métallique entre deux couches non métalliques) doit être privilégié. Dans les cas où le phénomène de perméation a été mis en évidence, il convient soit de remplacer *a minima* la canalisation contaminée (un nettoyage à grande eau est insuffisant) et de remblayer les tranchées avec des matériaux sains, soit en l'absence d'excavation, d'assurer le remplacement de la conduite par l'intérieur (rechemisage).

Lorsque les teneurs résiduelles dans les sols et/ou les eaux dépassent sensiblement le fond géochimique (naturel ou anthropique), la mise en place d'une couverture de surface sur des sols pollués peut permettre de supprimer la majorité des voies d'exposition. Ainsi, **substituer ou recouvrir les sols pollués par une couche minimum de 30 à 50 cm de matériaux sains séparés du terrain en place par (en fonction des situations et des pollutions) un grillage avertisseur, un géotextile, une géomembrane, des matériaux de drainage sur une couche d'argile constitue une mesure classique.**

Le phénomène de corrosion (dégradation de l'état d'un matériau en lien notamment avec une pollution environnementale chimique et/ou biologique) touche principalement les métaux, mais peut également toucher les bétons (ainsi que ses armatures si le béton est armé) et d'autres matériaux non métalliques (PVC, PEHD constituant les réseaux enterrés, etc.). Les composés organiques classiquement rencontrés dans le domaine des SSP ne sont pas connus comme pouvant corroder les métaux et bétons armés dans des conditions dites « normales ». Dans le cas des matériaux non métalliques, deux causes principales ont été répertoriées : la solvation (c'est-à-dire la diffusion de molécules de solvant dans le polymère) et l'apparition de craquelures sous l'effet de composés chimiques et de stress mécanique (par exemple, des frottements). Les solutions dépendent du support considéré et du type de corrosion. **Une méthode courante dans la plupart des cas peut être la protection par l'application de revêtements adaptés.**

Quelle que soit la problématique, **des études environnementales préliminaires et de conception, réalisées par des équipes de spécialistes pluridisciplinaires, doivent être menées afin de définir les modalités de mise en œuvre, de réception et de contrôle des mesures constructives mais aussi permettre, si nécessaire, leur validation par les services de l'Etat ou tout autre acteur pertinent (aménageur / promoteur).**

Compte tenu des objectifs attendus aussi bien en matière de santé et de sécurité des occupants d'un bâtiment que de la protection des biens matériels, d'autres aspects tels que **le suivi, l'entretien et la maintenance de la mesure constructive sont des éléments qui doivent être définis dès le stade de l'étude.** Il est également indispensable qu'une réflexion sur la réévaluation éventuelle de l'efficacité de ces dispositions, leur adaptation voir leur arrêt soient menées le plus en amont possible du projet.

**Enfin, les modalités de conservation de la mémoire, de partage de l'information entre les différents acteurs du dossier, de communication et de répartition des responsabilités** (qui fait quoi, qui paye,...) notamment au regard des usagers ou occupants concernés (travailleurs, propriétaires, locataires) **sont souvent les clés pour assurer la réussite de tels projets.**

# Sommaire

<b>1. Contexte et objectifs .....</b>	<b>15</b>
<b>2. Enjeux .....</b>	<b>17</b>
<b>3. Mesures constructives et plan de gestion.....</b>	<b>19</b>
3.1. LA PLACE DES MESURES CONSTRUCTIVES DANS LA METHODOLOGIE NATIONALE EN MATIÈRE DE SITES ET SOLS POLLUES.....	19
3.2. LES MESURES CONSTRUCTIVES AU CŒUR DU PLAN DE GESTION .....	20
3.3. L'INCIDENCE DES MESURES CONSTRUCTIVES DANS LE PLAN DE GESTION.....	21
<b>4. Prévenir l'intrusion de substances volatiles dans le bâti.....</b>	<b>23</b>
4.1. GÉNÉRALITÉS.....	23
4.1.1. Contexte .....	23
4.1.2. Produits rencontrés.....	23
4.1.3. Mieux comprendre les enjeux au travers d'une analogie avec le dioxyde de carbone.....	24
4.1.4. L'intrusion de vapeurs dans un bâtiment.....	25
4.2. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA MIGRATION DES POLLUANTS DANS LES BÂTIMENTS .....	25
4.2.1. Les facteurs environnementaux .....	25
4.2.2. Les facteurs de construction .....	27
4.3. AGIR LORS DE LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU BÂTIMENT .....	29
4.3.1. Principe.....	29
4.3.2. Limiter la surface d'échange ou modifier les usages des parties basses.....	29
4.3.3. Mise en place d'un vide sanitaire .....	29
4.4. LES TECHNIQUES PASSIVES .....	30
4.4.1. Principe.....	30
4.4.2. Agir sur la structure d'un bâtiment.....	30
4.4.3. Agir sur la ventilation naturelle .....	40
4.4.4. De l'efficacité des mesures passives seules .....	43
4.5. LES TECHNIQUES ACTIVES.....	44
4.5.1. Principe.....	44
4.5.2. Empêcher l'intrusion de vapeurs dans un bâtiment.....	45
4.5.3. Limiter l'accumulation de vapeurs dans un bâtiment.....	57
4.5.4. De l'efficacité des mesures actives .....	62

<b>5. Prévenir l'intrusion de substances volatiles dans les réseaux .....</b>	<b>63</b>
5.1. PRÉSENTATION DE LA PERMÉATION .....	63
5.2. LES PARAMETRES INFLUENÇANT LA PERMÉATION.....	64
5.2.1. Influence du type de canalisation.....	64
5.2.2. Influence des paramètres physico-chimiques environnants.....	65
5.2.3. Influence des polluants.....	65
5.3. LES SOLUTIONS POSSIBLES VIS-À-VIS DE LA PERMÉATION.....	68
5.3.1. Mise en évidence de la perméation .....	68
5.3.2. Diminuer les risques de perméation .....	69
<b>6. Assurer une couverture des sols de surface .....</b>	<b>73</b>
6.1. PRINCIPES ET OBJECTIFS .....	73
6.2. MESURES CONSTRUCTIVES EXISTANTES.....	73
6.2.1. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux sanitaires par ingestion et le ré- envol de poussières.....	73
6.2.2. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux sanitaires par ingestion de légumes/fruits autoproduits.....	74
6.2.3. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux sanitaires par ingestion d'eau potable polluée .....	76
6.2.4. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux environnementaux (protection de la ressource en eau).....	76
<b>7. Limiter la corrosion des biens matériels.....</b>	<b>79</b>
7.1. PRESENTATION DU PHÉNOMÈNE DE CORROSION .....	79
7.1.1. Définition .....	79
7.1.2. Différents types de corrosion .....	79
7.2. LES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA CORROSION .....	81
7.2.1. La corrosion des matériaux métalliques.....	81
7.2.2. La corrosion des bétons armés .....	83
7.2.3. La corrosion des matériaux non métalliques.....	86
7.3. LES SOLUTIONS POSSIBLES VIS-A-VIS DE LA CORROSION .....	88
7.3.1. Mise en évidence d'une corrosion .....	88
7.3.2. Lutter contre la corrosion des métaux.....	89
7.3.3. Lutter contre la corrosion des bétons.....	92
<b>8. Mesures constructives : comment choisir ?.....</b>	<b>97</b>
<b>9. Définir les contrôles et les principes du plan de surveillance.....</b>	<b>99</b>
9.1. PRISE EN COMPTE DE LA PROBLÉMATIQUE AU STADE DU DIAGNOSTIC .....	99
9.1.1. Définir une méthodologie de travail .....	99

9.1.2. Cas de l'intrusion de vapeurs .....	101
9.1.3. Cas de la perméation .....	106
9.1.4. Cas du recouvrement des sols de surface .....	106
9.1.5. Cas de la corrosion de biens matériels .....	106
<b>9.2. ETAT DES LIEUX CONTRADICTOIRE ET RÉCEPTION DES MESURES CONSTRUCTIVES .....</b>	<b>107</b>
9.2.1. Etat des lieux avant travaux .....	107
9.2.2. Etat des lieux après travaux et réception des mesures constructives.....	107
<b>9.3. CONTRÔLE ET SURVEILLANCE APRÈS MISE EN PLACE DES MESURES CONSTRUCTIVES .....</b>	<b>107</b>
9.3.1. Cas de l'intrusion de vapeurs.....	108
9.3.2. Cas de la perméation (alimentation en eau potable) .....	109
9.3.3. Cas du recouvrement des sols de surface .....	109
9.3.4. Cas de la corrosion des biens matériels.....	110
<b>9.4. QUELQUES ELEMENTS DE RETOUR D'EXPÉRIENCE .....</b>	<b>110</b>
9.4.1. Cadre général.....	110
9.4.2. Recommandations relatives à la surveillance et à la maintenance de la mesure constructive et décision de son arrêt éventuel.....	112
9.4.3. Conservation de la mémoire et transmission des informations.....	113
9.4.4. Gestion de la communication.....	113
<b>10. Les écueils à éviter / les bonnes pratiques .....</b>	<b>115</b>
<b>10.1. LE DIAGNOSTIC INITIAL, UNE ÉTAPE CRUCIALE À NE PAS NÉGLIGER .....</b>	<b>115</b>
10.1.1. Cas de l'intrusion de vapeurs – Les caractéristiques du bâti et de ses usages	115
10.1.2. Cas de la perméation .....	116
10.1.3. Cas du recouvrement des sols de surface.....	116
10.1.4. Cas de la corrosion des biens matériels.....	117
<b>10.2. EVITER CERTAINS EFFETS INDÉSIRABLES .....</b>	<b>117</b>
10.2.1. Cas de l'intrusion de vapeurs .....	117
10.2.2. Cas de la perméation .....	118
10.2.3. Cas du recouvrement des sols de surface.....	118
<b>10.3. CONCEPTION ET RÉCEPTION DE LA MESURE CONSTRUCTIVE : QUELQUES RECOMMANDATIONS DE BASE.....</b>	<b>118</b>
<b>11. Quelques notions de coûts.....</b>	<b>121</b>
11.1. CAS DE L'INTRUSION DE VAPEURS.....	121
11.2. CAS DE LA PERMEATION.....	122
11.3. CAS DU RECOUVREMENT DES SOLS DE SURFACE .....	122

11.4. CAS DE LA CORROSION .....	122
11.5. COÛT DE LA SURVEILLANCE .....	122
11.6. COÛT DES SERVITUDES .....	123
<b>12. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>125</b>
<b>13. Bibliographie.....</b>	<b>127</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Les éléments constitutifs du Plan de Gestion [1] .....	20
Figure 2 : Le phénomène de tirage thermique, l'un des mécanismes d'intrusion de vapeurs dans un bâtiment [4] .....	26
Figure 3 : Chemins préférentiels pour l'entrée de polluants dans les bâtiments [6].....	28
Figure 4 : Etanchéification des voies d'entrée des vapeurs [5] .....	30
Figure 5 : Photographie représentant l'application d'une membrane en spray .....	32
Figure 6 : Exemple de mise en œuvre d'une membrane le long d'une paroi moulée verticale (Source : Documentation technique et commerciale, société CETCO) .....	33
Figure 7 : Exemple de couverture pour collecter les émanations gazeuses [10].....	33
Figure 8 : Cuvelage des fondations d'un bâtiment .....	34
Figure 9 : Ouverture périscopique [6] .....	39
Figure 10 : Principe de la ventilation d'un vide sanitaire [18] .....	40
Figure 11 : Principe de la ventilation naturelle par balayage.....	42
Figure 12 : Principe des barrières de dilution passive [22].....	43
Figure 13 : Mesure du rayon d'influence engendré par une aspiration dans le sol [24] .....	45
Figure 14 : Test de dépressurisation sous dalle [4].....	46
Figure 15 : Principe de la mise en dépression du sous bassement [26].....	48
Figure 16 : Principe du SDSD (a) et du SDSM (b) [27] .....	49
Figure 17 : Etanchéité de deux membranes [6] .....	52
Figure 18 : Fixation de la membrane dans le mur [31].....	53
Figure 19 : Principe de ventilation mécanique simple flux par balayage (vue en coupe) .....	59
Figure 20 : Principe de ventilation mécanique simple flux par balayage (vue en plan) [32] .....	59
Figure 21 : Principe d'une VMC Double Flux [33] .....	60
Figure 22 : Exemple de couverture de surface afin de prévenir l'ingestion des terres, le réenvol de poussières [47] .....	74
Figure 23 : Exemple de couverture de surface afin de prévenir la remontée de pollution, l'ingestion des terres, le réenvol de poussières [47] .....	74
Figure 24 : Exemple de couverture de surface destinée à protéger les eaux souterraines [47] .....	76

Figure 25 : Les différentes corrosions du béton [54].....	80
Figure 26 : Contrôle des débits d'une VMC .....	109

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Densités des substances volatiles par rapport à l'air généralement rencontrées dans les problèmes d'intrusions de vapeurs dans des bâtiments.....	24
Tableau 2 : Comparaison de perméabilité entre un béton avec cendres volantes et un béton normal [14] .....	35
Tableau 3 : Avantages et inconvénients des revêtements et membranes d'étanchéité .....	36
Tableau 4 : Présentation de quelques grilles de ventilations .....	41
Tableau 5 : Application des différentes techniques de dépressurisation .....	55
Tableau 6 : Débits recommandés ou réglementés dans différents bâtiments .....	61
Tableau 7 : Valeurs indicatives dans les sols en vue de la sélection du matériau constituant une canalisation [43, 44] .....	66
Tableau 8 : Valeurs limites hollandaises dans les sols au-dessus la qualité de l'eau pourrait être altérée selon le type de canalisation [44].....	67
Tableau 9 : Valeurs limites hollandaises dans les eaux environnantes au-dessus la qualité de l'eau pourrait être altérée selon le type de canalisation [44] .....	68
Tableau 10 : Paramètres organoleptiques et risque sanitaire [38].....	68
Tableau 11 : Temps de pénétration à travers une canalisation en PB de différents polluants [41].....	70
Tableau 12 : Seuil d'imperméabilité pour différents composés chimiques selon le tuyau utilisé [45].....	71
Tableau 13 : Valeurs limites dans les sols au-delà desquelles l'usage d'un tuyau en métal peut être remis en question.....	82
Tableau 14 : Valeurs limites pour les classes d'exposition aux attaques chimiques pour les sols (norme NF EN 206-1) .....	84
Tableau 15 : Valeurs limites pour les classes d'exposition aux attaques chimie dans les eaux (norme NF EN 206-1) .....	85
Tableau 16 : Nombre de visites typique ou idéalisé de contrôle au stade de l'étude [63] .....	103
Tableau 17 : Durée typique ou idéalisée de contrôle au stade de l'étude [63] .....	103
Tableau 18 : Emission de polluants volatils par différents produits de consommation courante [60].....	104
Tableau 19 : Liste non exhaustive des différentes pratiques susceptibles d'interférer avec des prélèvements d'air intérieur.....	105

## Liste des annexes

- Annexe 1 Avantages et inconvénients des différentes mesures constructives découlant d'une problématique d'intrusion de vapeurs
- Annexe 2 Outil d'aide à la décision
- Annexe 3 Proposition d'un modèle de recueil d'informations pour la visite d'un bâtiment en vue de la mise en place de mesures constructives
- Annexe 4 Eléments relatifs aux coûts engendrés par la mise en place de mesures constructives
- Annexe 5 Etudes de cas : Cas d'une maison standard de 100 m<sup>2</sup>

## Glossaire

µm	Micromètre
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styène (matière plastique)
AIR.H	Association Initiative Réglementation Hygiène
ALLIE'AIR	Bureau d'étude aéraulique et acoustique
ARR	Analyse des Risques Résiduels
ASTEE	Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement
BBC	Bâtiment Basse Consommation
BTEX	Benzène Toluène Ethylbenzène Xylènes
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
CETIAT	CEntre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques
CFG	Comité Français des Géosynthétiques
Cl <sup>-</sup>	Ion chlorure
cm	Centimètre
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DIUO	Dossier d'Intervention Ulérieure sur l'Ouvrage
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
DTU	Document Technique Unifié
EPI	Equipement de Protection Individuelle
H <sub>2</sub> S	Sulfure d'hydrogène
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
ICEB	Institut pour la Conception Ecoresponsable du Bâti
INERIS	Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des risqueS
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
InVS	Institut de Veille Sanitaire
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEPTAB	Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués aux Bâtiments
m.s <sup>-1</sup>	Mètre par seconde
m <sup>2</sup>	Mètre carré
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
MEDDTL	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
Mg <sup>2+</sup>	Ion magnésium

mm	Millimètre
NH <sub>3</sub>	Ammoniac
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ion ammonium
NOx	Oxydes d'azote
NPHE	Niveau des Plus Hautes Eaux
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OQAI	Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur
Pa	Pascal
PB	PolyButylène
PCE	Tétrachloroéthylène
PE	PolyEthylène
PEHD	PolyEthylène Haute Densité
pH	Potentiel hydrogène
PVC	PolyVinylChloride
Rn	Radon
SDS	Système de Dépressurisation du Sol
SDSD	Système de Dépressurisation Sous Dalle
SDSM	Système de Dépressurisation Sous Membrane
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ion sulfate
SSP	Sites et Sols Pollués
TCE	Trichloroéthylène
TGAP	Taxe Générale sur les Activités Polluantes
USA	Etats-Unis d'Amérique
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

Dans ce document, le terme d'extracteur désigne une machine aspirant de l'air. Un ventilateur désigne une machine soufflant de l'air.



# 1. Contexte et objectifs

La méthodologie nationale relative à la gestion des sites et sols pollués entrée en vigueur en 2007 prévoit, si cela est nécessaire, la mise en place de mesures constructives dans un processus de gestion (cf. 3.2).

Cependant, il n'existe à l'heure actuelle, en France, aucun guide méthodologique de référence adossé aux textes de 2007 permettant de répertorier les différentes mesures constructives pouvant être mises en œuvre dans le domaine des sites et sols pollués. Le présent document a pour vocation de combler ce manque avec toutes les réserves relatives au degré de précision nécessaire au dimensionnement ou à l'exhaustivité des techniques existantes au regard des évolutions constantes des techniques de construction.

Les besoins sont également croissants en raison de différents facteurs : requalification d'anciennes friches industrielles, mise en œuvre de politiques publiques de renouvellement urbain, mais aussi volonté de limiter la conquête de nouveaux espaces agricoles en périphérie des agglomérations. Il devient ainsi usuel que ces projets d'aménagement ou de reconversion, nécessitent outre le recours à des travaux de dépollution proprement dits, l'intégration de dispositions constructives.

Pour de multiples raisons technico-économiques (mais pas seulement), il n'est parfois pas possible de traiter complètement les sols (ou les nappes) et de maîtriser totalement les sources et leurs impacts sur l'environnement. Il en résulte la nécessité de s'assurer de l'adéquation du niveau de pollution résiduelle au droit du site (notamment au droit des futurs bâtiments) avec les usages existants ou envisagés. De même, des mesures de gestion peuvent être nécessaires dans le cas où des usages existants seraient remis en cause à l'extérieur d'un site (exemple de remontées de vapeurs dans des bâtiments riverains). Pour y parvenir, il convient alors de combiner aux mesures de dépollution classiques des mesures constructives afin d'assurer un risque sanitaire acceptable.

Il convient également de rappeler que, lors de leur mise en place, les mesures présentées ci-après ne se substitueront pas aux contraintes réglementaires et aux normes de conception qui resteront à respecter [1]. Le lecteur sera invité à se reporter aux références indiquées à la fin de ce rapport s'il souhaite de plus amples détails, notamment réglementaires, techniques ou scientifiques.

Plus encore que lors de la conception et la mise en œuvre de systèmes de dépollution, la mise en place de mesures constructives doit être l'occasion de prendre en compte la spécificité de chaque contexte d'intervention et l'importance de la communication et de la pédagogie avec les riverains ou les occupants des bâtiments ainsi que d'utiliser toutes les compétences particulières de professionnels issus du domaine des sites et sols pollués mais aussi de l'extérieur (compétence en thermique, climatisation / ventilation, BTP,...).

Ce guide dresse un état de l'art des principales mesures constructives et propose un outil d'aide à la décision quant au choix de la (ou les) mesure(s) constructive(s) la(les) plus adaptée(s) pour un cas de figure donné. Les aspects relatifs à l'élaboration et à la définition d'un plan de surveillance de l'efficacité de ces mesures sont également traités.



## 2. Enjeux

Dès lors que la mise en place de mesures constructives dans une problématique de pollution est envisagée, il faut comprendre que les enjeux associés sont très importants et que les objectifs et moyens à mettre en œuvre sont complètement distincts. Plus précisément, sur ce sujet, deux types d'enjeux ou cas de figures principaux peuvent être rencontrés :

- le réaménagement d'un site potentiellement pollué (notamment dans le cas de la gestion d'une pollution résiduelle) ;
- la gestion d'une pollution chronique ou accidentelle au droit ou en aval d'un site pollué.

Dans le cas du réaménagement d'une friche industrielle, l'objectif principal est d'assurer une protection durable (voire sans limite de durée) ou tout du moins avec une durée de vie la plus longue possible. Il s'agit, en particulier, de s'affranchir d'une évolution réglementaire des référentiels – généralement effectuée à la baisse des seuils, par exemple les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) – qui pourrait remettre en cause à plus ou moins long terme l'exposition des usagers et donc le projet d'aménagement avant même que les travaux n'aient débuté. Ainsi, dans le cadre d'un projet de réaménagement, une Analyse des Risques Résiduels (ARR), réalisée lors de l'élaboration d'un plan de gestion sur la base des VTR en vigueur à un instant « t » et ayant conclu à une pollution résiduelle compatible avec l'usage futur, pourrait conclure différemment à l'issue des travaux, en cas d'abaissement des VTR. La mise en œuvre de mesures constructives apparaît alors comme une sécurité complémentaire apportée au projet d'aménagement et leur justification s'en trouve automatiquement confortée. Elles offrent, en effet, des marges de manœuvre supplémentaires, tout en assurant une meilleure efficacité et un coût plus faible que si elles devaient être mises en œuvre, par défaut, à l'issue du réaménagement du site.

Le recours à des dispositions constructives peut également être nécessaire lorsque les limites techniques des procédés de dépollution sont atteintes. Il s'agit dans ce cas-là de protéger les usagers contre la pollution résiduelle (si les risques restent suffisamment importants pour remettre en cause un usage), temporairement (cas où la pollution va continuer à diminuer, sous l'effet de l'atténuation naturelle par exemple) ou durablement (cas d'une source extérieure au site ou inaccessible, qui n'aurait pu être traitée de façon suffisante pour qu'une dégradation de la situation ne puisse être écartée à l'avenir). Dans ces différents cas, cette disposition permet de sécuriser l'ensemble des acteurs, même si le principe initial des textes de 2007 (enlèvement de la source) a bien été respecté.

Dans le cas de la gestion d'une pollution chronique ou accidentelle, l'objectif prioritaire est de mettre en sécurité des usagers (bureaux, habitations, etc.) qui travaillent ou habitent au droit ou en aval d'un site pollué et qui n'ont pas la connaissance d'une éventuelle exposition à une pollution. Il s'agit ensuite de mettre en œuvre les mesures constructives adéquates, puis de les laisser, *a minima*, le temps des opérations de dépollution et de surveillance. Il est néanmoins envisageable, à terme, de lever tout ou partie des mesures constructives (ce qui est difficilement envisageable dans le cas d'un projet d'aménagement).

Quel que soient les cas de figures exposés ci-dessus, les mesures constructives présentées dans le présent guide visent à traiter les problématiques suivantes :

- les remontées des gaz de sols en provenance de la sub-surface. Il s'agit d'éviter que des vapeurs ne se retrouvent dans l'air intérieur ou de limiter leur concentration afin de garantir les usages des locaux ;
- la perméation, c'est-à-dire la diffusion de polluants volatils à travers les canalisations. Elle constitue également une voie de transfert vers les occupants d'un bâtiment (par ingestion ou par inhalation) ;
- la gestion d'une pollution des sols de surface ;
- la gestion de la corrosion des biens matériels.

## 3. Mesures constructives et plan de gestion

### 3.1. LA PLACE DES MESURES CONSTRUCTIVES DANS LA MÉTHODOLOGIE NATIONALE EN MATIÈRE DE SITES ET SOLS POLLUÉS

La mise en place de mesures constructives s'inscrit pleinement dans la méthodologie nationale en matière de sites et sols pollués, mise en place par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et entrée en vigueur en 2007 [1].

Les mesures constructives sont ainsi évoquées à différentes reprises dans les textes de 2007.

Dans la partie 2.2 de l'Annexe 2 de la note ministérielle du 8 février 2007, il est rappelé qu'il conviendra d'identifier les enjeux à protéger, et en premier lieu, les personnes susceptibles d'être affectées directement ou indirectement par les pollutions. « *Dans le cas de substances présentes dans les eaux souterraines pouvant émettre des vapeurs toxiques, la situation sera très différente que l'on considère des locaux d'habitations construits sur des vides sanitaires ou des caves ventilées, ou que l'on considère des locaux construits à même le sol. De même, l'ingestion directe des terres par les jeunes enfants peut se produire et induire [...] des effets sur la santé [...].* » La partie 2.3.3 s'intéresse également aux atteintes aux ouvrages de génie civil : « *Les substances polluantes contenues dans les sols et les eaux souterraines, qui peuvent être amenées à entrer en contact avec des ouvrages [...] peuvent avoir sur celui-ci des effets néfastes tels que la corrosion et/ou l'altération des caractéristiques mécaniques ou d'étanchéité.* »

De même, dans la note ministérielle du 8 février 2007, traitant de l'implantation sur des sols pollués d'établissements accueillant des populations sensibles, il est clairement précisé que : « *les opérations de dépollution [seront] complétées par des particularités constructives lorsque des pollutions résiduelles persistent (par exemple : vide sanitaire systématique si les polluants sont susceptibles de dégager des vapeurs toxiques)* ». Dans la note ministérielle du 8 février 2007 traitant des Installations Classées, de la prévention de la pollution des sols et de la gestion des sols pollués, il est demandé aux préfets de départements de veiller à ce que les exploitants retiennent « *[les mesures] qui conduisent à supprimer de façon pérenne les possibilités de contact entre les pollutions (terres, vapeurs,...) et les personnes* », dans les cas où « *[les mesures qui permettent l'élimination des pollutions compte tenu des techniques disponibles et de leurs coûts] sont impossibles ou insuffisantes.* »

### 3.2. LES MESURES CONSTRUCTIVES AU CŒUR DU PLAN DE GESTION

Sans re-détailler l'ensemble du processus de gestion tel que défini dans la circulaire et ses annexes du 08 février 2007, les points fondamentaux d'un Plan de Gestion peuvent être rappelés pour mémoire :

- il convient tout d'abord d'analyser les enjeux liés au site étudié (présence de populations, de milieux sensibles à proximité, risques engendrés, etc.) ;
- la priorité doit ensuite être donnée à la maîtrise des sources (notamment concentrées) puis, à défaut, à la maîtrise de leurs impacts. Cette maîtrise peut passer, suivant la complexité des contextes, par des travaux de réhabilitation (enlèvement total ou partiel de la source), par un confinement de la source ou par un traitement des impacts (traitement d'un panache ou d'une lentille,...) ;
- la définition et l'étude de différents scénarios de gestion sur la base du bilan coûts/avantages permettant d'offrir le meilleur compromis sur la base de différents critères transparents et argumentés : considérations techniques, environnementales, sanitaires et économiques ;
- à l'issue du bilan coûts/avantages, les éléments relatifs à la description et la hiérarchisation des différentes mesures de gestion possibles, la sélection de la (ou des) technique(s) de réhabilitation retenue(s) et la validation des scénarios de gestion sont alors présentés. Si des pollutions restent présentes au droit du site, les mesures constructives viennent compléter des mesures de dépollution « classiques » pour s'assurer de l'adéquation de cette pollution résiduelle avec l'usage du site conformément à la partie 4.3 de l'Annexe 2 de la note ministérielle du 8 février 2007 qui rappelle les mesures de gestion envisageables, à savoir « le traitement des terres polluées sur site ou hors site, les mesures constructives actives ou passives, les mesures de confinement, les possibilités de régénération ou d'atténuation naturelle » ;
- l'Analyse des Risques Résiduels dite « prédictive » (ARR) valide alors sur le plan sanitaire et, a posteriori, l'ensemble des mesures de gestion proposées et détaillées dans le Plan de Gestion.

La Figure 1 schématise l'élaboration du Plan de Gestion.

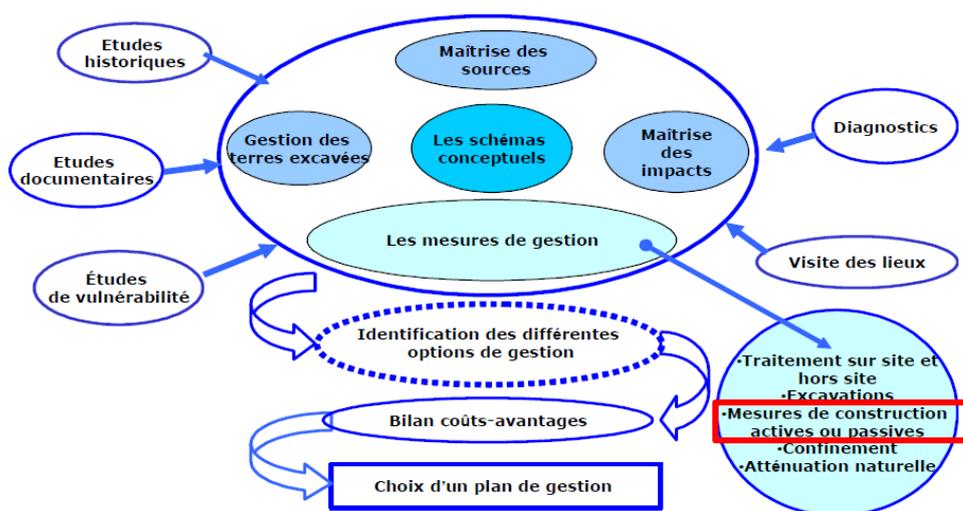


Figure 1 : Les éléments constitutifs du Plan de Gestion [1].

### **3.3. L'INCIDENCE DES MESURES CONSTRUCTIVES DANS LE PLAN DE GESTION**

Après que les mesures constructives ont été intégrées au cœur du Plan de Gestion (cf. § 3.2) et dans la mesure où elles répondent, généralement, à des problématiques de court, moyen ou long terme, les modalités de contrôle et de surveillance de leur efficacité et de leur pérennité doivent également être traitées dans ce document, au même titre que les autres mesures de gestion.

Ainsi, des éléments propres aux mesures constructives seront présents dans les parties du Plan de Gestion, détaillant :

- la conception et le dimensionnement de ces mesures ;
- la validation des mesures de gestion par l'ARR dite « finale » ;
- les modalités précises de contrôle de leur efficacité à l'issue des travaux ;
- les modalités précises du plan de surveillance des milieux selon la notion de bilan quadriennal développée dans les textes de 2007.

Enfin, ces éléments seront repris dans les modalités de conservation de la mémoire et, le cas échéant, en cas de mise en place de restrictions d'usage.



## 4. Prévenir l'intrusion de substances volatiles dans le bâti

### 4.1. GÉNÉRALITÉS

#### 4.1.1. Contexte

Une étude réalisée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) en novembre 2006 (actualisée en mai 2007) a démontré que l'air intérieur des bâtiments est généralement plus pollué que l'air extérieur (y compris en dehors de toute problématique liée aux sites et sols pollués) [2]. Ces polluants résultent généralement de plusieurs facteurs (notamment d'activités anthropiques telles que l'utilisation de produits ménagers et d'appareils thermiques, ou la présence de composés chimiques volatils dans certains équipements) et ont tendance à s'accumuler dans les bâtiments en raison de faibles taux de renouvellement d'air.

Dans le domaine des sites et sols pollués, parmi les différentes voies d'exposition, les problématiques liées à la remontée des vapeurs dans les bâtiments sont généralement les plus fréquentes et les plus difficiles à gérer, en raison d'une part des difficultés à « prédire » les concentrations dans les lieux de vies à partir de mesures réalisées dans les sols et les eaux souterraines et de modèles mathématiques, et d'autre part de la difficulté à établir la « contribution » réelle de la pollution du site étudié à la qualité de l'air mesurée.

#### 4.1.2. Produits rencontrés

Parmi les nombreux composés volatils susceptibles d'être mesurés dans l'air, les hydrocarbures de types pétroliers (essence, gasoil, etc.) et les solvants chlorés, (dont la caractéristique est, pour la plupart d'entre eux, d'être très volatils et très toxiques à faible dose) constituent classiquement les principaux polluants rencontrés dans le domaine des sites et sols pollués.

Une autre pollution, d'origine naturelle celle-ci, est fréquemment rencontrée dans l'air et nécessite également des mesures de gestion. Elle concerne le Radon, gaz radioactif présent naturellement dans les sols granitiques.

Afin de fixer les idées et donner des éléments de comparaison par rapport aux différents composés volatils mis en jeu dans ce type de problématique, le Tableau 1 ci-dessous rappelle les densités de différentes substances volatiles.

SUBSTANCES CONSIDÉRÉES	Densité du gaz / air (sans unité)	Odeur et seuil organoleptique (mg/m <sup>3</sup> )
Monoxyde de carbone	0,97	inodore
Dioxyde de carbone	1,53	inodore
Ammoniac	0,77	piquante (de 0,34 à plus de 50)
Méthane	0,55	Inodore
Sulfure d'hydrogène	1,19	Œuf pourri (0,028 – 0,140)
<sup>222</sup> Rn	9,73	Inodore
Mercure	6,93	Inodore
<b>BTEX</b>		
Benzène (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	2,70	Aromatique (16)
Toluène (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	3,18	Aromatique (3,8 – 18,9)
Ethylbenzène (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	3,66	Aromatique (8,7 – 607,9)
Xylènes	3,66	Aromatique (0,3 – 4,3)
<b>COHV</b>		
Tétrachloroéthène (C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )	5,72	Ether (34 – 340)
Trichloroéthène (C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> )	4,53	Douce (107,5 – 537,3)
1,2-dichloroéthène (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	3,34	Odeur qui rappelle celle du chloroforme (24 – 79)
Chlorure de vinyle (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl)	2,15	Ethérée (inodore à faible concentration) (7670)
<b>HCT</b>		
C <sub>5</sub> -C <sub>6</sub> aliphatiques	≈ 3	Hydrocarbures (885 – 1475)
C <sub>6</sub> -C <sub>8</sub> aliphatiques	≈ 3,5	Hydrocarbures (176 – 1025)
C <sub>8</sub> -C <sub>10</sub> aliphatiques	≈ 4,5	Hydrocarbures (233,6 – 934)
Naphtalène (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> )	4,42	Goudron (0,5)

Tableau 1 : Densités des substances volatiles par rapport à l'air généralement rencontrées dans les problèmes d'intrusions de vapeurs dans des bâtiments.

#### 4.1.3. Mieux comprendre les enjeux au travers d'une analogie avec le dioxyde de carbone

Une analogie entre la migration diffuse du CO<sub>2</sub> issu de stockages profonds vers la surface du sol et la remontée de polluants volatils peut être réalisée.

Le CO<sub>2</sub> est susceptible de migrer verticalement par advection et diffusion jusqu'à la surface, avant d'être émis dans l'air intérieur (lieux de vie) ou extérieur (air ambiant). Ces deux milieux sont des milieux d'exposition des populations.

Cependant, les enjeux pour la santé des populations associées à ces deux milieux diffèrent :

- si le CO<sub>2</sub> est libéré dans une zone ouverte ou plane, il se disperse rapidement dans l'air, car le taux de dilution atmosphérique des flux de gaz du sol est très élevé et instantané ;
- en revanche, dans les environnements clos, ou les dépressions topographiques propices à l'accumulation des gaz, les concentrations en CO<sub>2</sub> inhalables par les populations peuvent augmenter.

Les enjeux sanitaires à considérer sont donc associés à l'intrusion du CO<sub>2</sub> souterrain dans les environnements clos (habitations et autres milieux de vie), et plus rarement, les émissions vers l'air extérieur, lorsqu'elles ont lieu dans des environnements présentant des reliefs et des points bas abrités des vents [3].

Les problématiques de migration, de dilution, ainsi que les enjeux sanitaires associés dans le cadre du CO<sub>2</sub> sont ainsi comparables à ceux d'une pollution volatile.

#### **4.1.4. L'intrusion de vapeurs dans un bâtiment**

Une pollution volatile, présente dans le sol au droit d'un bâtiment (existant ou à construire), peut emprunter des voies préférentielles de transfert, depuis le sol de la sub-surface vers l'air intérieur, liées à la vétusté d'un bâtiment, mais aussi à des modes ou défauts de conception et de construction de l'ouvrage (fissuration de dalle béton, mauvaise étanchéité autour de réseaux traversant les dalles, mauvaise étanchéité entre les différents niveaux d'un bâtiment, défaut ou insuffisance de ventilation, etc.).

Les parties suivantes s'attachent à présenter les facteurs favorisant ces transferts et les principaux moyens existants pour y remédier.

## **4.2. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA MIGRATION DES POLLUANTS DANS LES BÂTIMENTS**

La migration des polluants du sol vers le bâtiment est influencée par les facteurs environnementaux et les facteurs de construction.

**L'identification de facteurs favorisant** la migration des gaz à l'intérieur d'un bâtiment **constitue une première étape indispensable** puisqu'elle va influencer le diagnostic (et donc ses résultats) et le choix de la (ou des) mesure(s) constructive(s) à mettre en place [4].

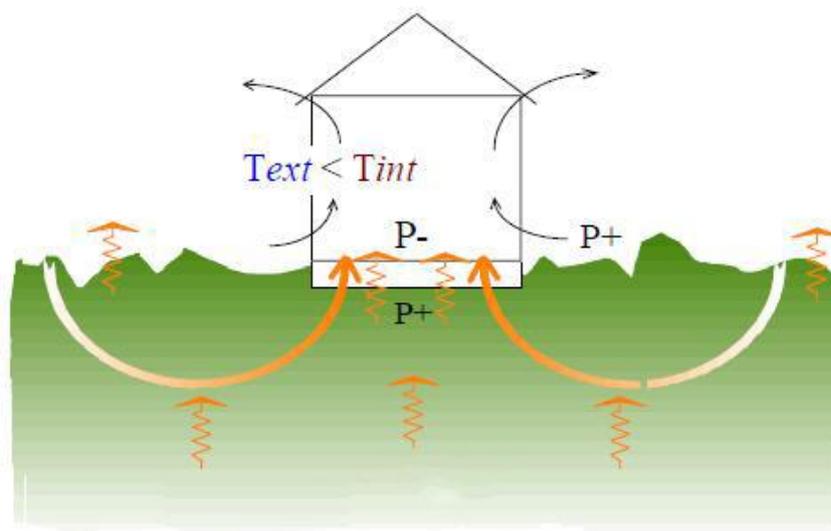
### **4.2.1. Les facteurs environnementaux**

Les facteurs environnementaux influent largement sur l'intrusion de vapeurs de composés polluants [5,6]. Sont ainsi identifiés :

- les conditions géologiques. La migration des polluants est favorisée lorsque le sol est sec ou constitué de particules grossières comme le gravier. Un substrat poreux, ou présentant un réseau de fissures, favorise également la circulation des gaz dans le sol, et de facto, leur transfert vers les bâtiments. A l'inverse, un sol humide, avec une part de particules fines importante, ou un sol de type argileux, retardent la migration depuis le sol vers l'air intérieur ;
- la concentration en polluant. La migration augmente avec la concentration en polluant. Il s'agit d'un phénomène de diffusion, considéré comme prépondérant dans le sol, loin des fondations [71] ;
- le type de polluant. Une molécule linéaire circule plus facilement sous forme vapeur qu'une molécule non linéaire voire aromatique ;
- la proximité de la source de pollution. La migration des gaz du sol vers la dalle du bâtiment diminue avec la distance ;
- les conditions climatiques. Les conditions climatiques influent directement sur la remontée de composés volatils via le phénomène de tirage thermique présenté à la Figure 2.

L'air chaud ayant une densité plus faible a tendance à monter. Par un phénomène de convection, l'air intérieur, généralement plus chaud que l'air extérieur, migre vers les étages supérieurs (ou le plafond), ce qui crée une dépression dans les étages inférieurs (ou les parties basses d'une pièce) favorisant l'aspiration des gaz de la sub-surface vers le bâtiment [71]. A ce phénomène de tirage (ou de pompage) thermique, s'ajoute également une ventilation intérieure plus faible en hiver qu'en été, qui favorise une accumulation des vapeurs dans le bâtiment.

Par ailleurs, dans les régions fortement ventées (bord de mer par exemple ou fond de vallée), un effet Venturi peut également exister : une pression plus importante apparaîtra sur le côté exposé au vent et une aspiration (dépression) sur le côté sous le vent. L'air extérieur pénètre dans le bâtiment (à travers les ouvertures comme les fenêtres, les portes et les fissures) sur le côté au vent. L'air intérieur est attiré sur le côté sous le vent, réduisant la pression de l'air intérieur par rapport à l'extérieur ;



- Figure 2 : Le phénomène de tirage thermique, l'un des mécanismes d'intrusion de vapeurs dans un bâtiment [4]

- les processus de biodégradation. En fonction des conditions biogéochimiques, le polluant pourra, ou non, être biodégradé avant de pénétrer dans le bâtiment. En cas de biodégradation, la taille des molécules diminue, engendrant ainsi une augmentation de leur volatilité.

Ces facteurs permettent d'expliquer pourquoi l'intérieur d'un bâtiment peut être, naturellement, un espace de convergence et d'accumulation des polluants volatils. En revanche, la possibilité d'intrusion des vapeurs dans un bâtiment ou plutôt la facilité avec laquelle ces vapeurs vont pouvoir pénétrer dans celui-ci est généralement liée aux facteurs de construction présentés ci-après.

#### 4.2.2. Les facteurs de construction

De nombreux facteurs de construction ou équipements ont une influence non négligeable sur la pénétration des polluants dans les bâtiments [5], comme l'illustre la Figure 3.

- Le procédé même de construction, tels que (présentation selon leur effet limitant ou facilitant) :
  - la présence d'un vide sanitaire ventilé sous le bâtiment, qui constitue une barrière de dilution sous le bâtiment, qui n'existe pas lors d'un contact direct des murs ou/et de la dalle du bâtiment avec le sol ;
  - la présence de pièces enterrées ou semi enterrées, qui augmente la surface de pénétration de vapeurs dans le bâtiment, par rapport à un bâtiment de plain-pied ;
  - la présence en sous-sol ou en partie inférieure des vides sanitaires, de dalles (dallages) béton qui, lorsqu'elles sont en bon état, limitent fortement l'intrusion de vapeurs, par rapport à un sol en matériaux plus perméables (plancher, terre battue) ;
  - la présence de murs poreux, facilitant ainsi l'intrusion de vapeurs dans le bâtiment ;
  - la présence d'ouvrages reliant différents niveaux d'un bâtiment et permettant la circulation de l'air sans contrôle [7] (ascenseurs, cages d'escalier, vide-ordures, canalisations et réseaux traversants...) ;
  - le type de soubassement et ses conditions de réalisation (un radier réalisé d'un seul tenant avec un béton hautes performances sera plus étanche qu'un dallage indépendant en raison d'un taux de fissuration plus faible et de l'absence de fissures sur la périphérie de la dalle) [71] ;
  - les caractéristiques du béton (porosité, perméabilité, proportion de granulats, proportion eau/ciment, conditions de séchage de la dalle) ;
  - etc.
- Des systèmes tels que les extracteurs mécaniques, les hottes de cuisine, accentuent la dépression naturelle du bâtiment, s'ils ne sont pas couplés à des entrées d'air extérieur suffisantes.
- Les fourneaux, chaudières et cheminées accentuent également la dépression dans le bâtiment. Ce tirage se manifeste également en l'absence de feu, étant donné que les clapets des fourneaux et cheminées ne sont pas étanches. Pour limiter cet effet de tirage, il s'agit alors de positionner des entrées d'air au plus près de ces installations ou de connecter ces installations directement avec l'air extérieur.
- Le chauffage d'un bâtiment contribue à la pénétration des gaz en favorisant le tirage thermique. A cela, s'ajoute une ventilation plus faible en hiver qu'en été. Les concentrations mesurées dans un bâtiment peuvent ainsi être plus importantes en période hivernale qu'en période estivale.

Par ailleurs, les planchers chauffants peuvent favoriser la pénétration de vapeurs dans le bâtiment, notamment lorsqu'ils ne sont pas étanches (joints de dilatation, passages des réseaux, voire fissures).

- Les espacements et fissures liés au vieillissement d'un bâtiment. L'ancienneté de la construction d'un bâtiment, les matériaux utilisés (béton de mauvaise qualité...), le phénomène de retrait / gonflement des argiles ou des désordres géotechniques (type cavités) peuvent conduire à un vieillissement important d'un bâtiment et se traduire par l'apparition de fissures dans les murs ou au niveau du sous-bassement.

- Les pratiques de construction peuvent avoir un impact et favoriser des voies préférentielles de transfert de polluants au sein des bâtiments. Ainsi le passage de canalisations ou gaines électriques traversant les murs ou les sols peut constituer une voie préférentielle, si le scellement des tuyauteries ou l'isolation des conduits ne sont pas réalisés dans les règles de l'art.
- La mauvaise utilisation ou le mauvais entretien de mesures de protection contre la pénétration de gaz peuvent également favoriser l'intrusion de vapeurs à l'intérieur d'un bâtiment [6]. Lorsque de telles mesures (actives notamment, voir partie 4.5.) existent, un contrôle régulier des installations réalisé par une entreprise spécialisée (voir partie 9.3.1.) est capital (défaillance ou arrêt du système par l'occupant). Il est également nécessaire que les documents écrits nécessaires à l'entretien de cette installation existent et puissent être transmis aux éventuels propriétaires ou occupants suivants (voir parties 9.4 et 10.3).
- L'ajout d'extensions à un bâtiment ayant fait l'objet de mesures constructives peut également rendre ces mesures moins efficaces voire inopérantes : circulation de l'air ou étanchéité entravées, etc.

Par ailleurs, la réalisation de bâtiments de plus en plus économes en énergie et donc de plus en plus étanches, peut conduire à un taux de renouvellement de l'air insuffisant si le système de ventilation mis en place n'a pas été correctement dimensionné et/ou installé. Par conséquent, les polluants peuvent avoir tendance à s'accumuler dans le bâtiment. Dans ce cas ou en cas de doute, le recours à un spécialiste de la ventilation pour régler le dispositif est recommandé.

Néanmoins, il a également été démontré dans le cadre du projet Quad-BBC, financé par l'ANR, et auquel ont participé l'AIR.H, le CETIAT, le CSTB, le LEPTAB, ALLIE'AIR et l'INERIS, que le renforcement de l'étanchéité à l'air dans des bâtiments BBC améliore l'efficacité de la ventilation dans l'ensemble du bâtiment, en permettant de retrouver les flux et les transferts d'air prévus à la conception en diminuant les fuites ou entrées d'air parasites (si le système de ventilation a été correctement dimensionné et installé) [8]. Dans tous les cas, une aération complémentaire par ouverture des fenêtres est recommandée, en privilégiant des ouvertures courtes mais fréquentes.

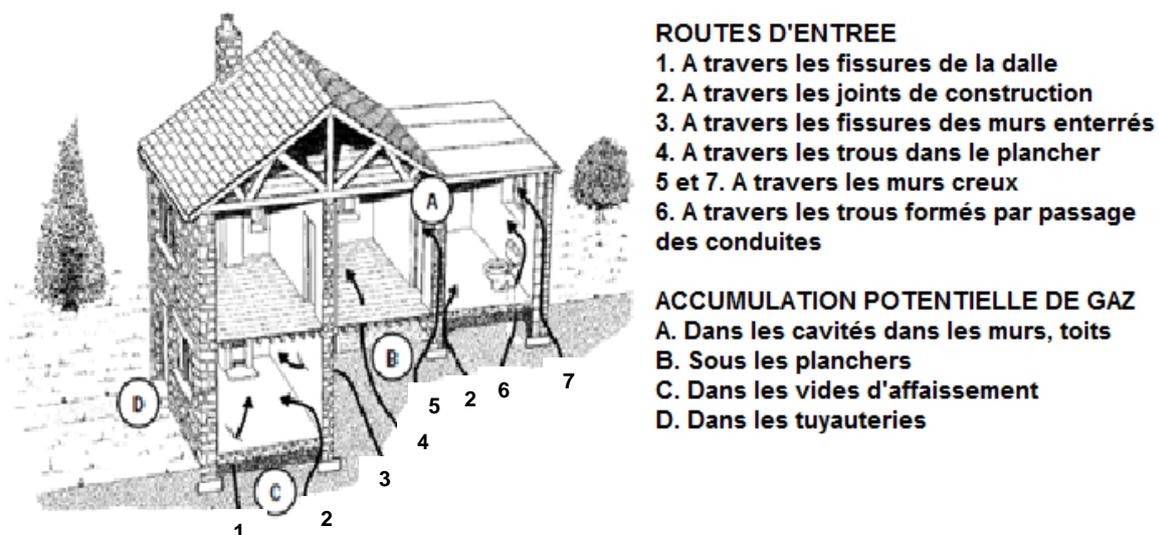


Figure 3 : Chemins préférentiels pour l'entrée de polluants dans les bâtiments [6].

En complément des facteurs de construction précédemment énumérés, quelques grands principes de construction d'un nouveau bâtiment sont utilement rappelés et présentés dans la partie 4.3.

### **4.3. AGIR LORS DE LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU BÂTIMENT**

#### **4.3.1. Principe**

La mise en œuvre de mesures constructives lors de la réalisation d'un bâtiment nouveau peut être envisagée selon différents principes (qui peuvent être combinés) :

- limiter la surface d'échange entre le bâtiment et le sol où se situe la source de la pollution ;
- rendre la surface d'échange la plus étanche possible aux substances volatiles ;
- créer un volume « tampon » entre le sol et les pièces où l'exposition est la plus sensible ou importante ;
- capter et évacuer les volatils afin de prévenir toute intrusion à l'intérieur des locaux.

#### **4.3.2. Limiter la surface d'échange ou modifier les usages des parties basses**

Afin de limiter la surface d'échange, il peut être envisagé de ne pas construire en sous-sol [4] ou dans le cas contraire en n'y positionnant aucun usage favorisant de longues expositions. Il peut également être envisagé de privilégier des constructions verticales plutôt que de plain-pied (réduction de l'emprise au sol du bâtiment et compensation par une augmentation de sa hauteur). Les éléments relatifs à l'accessibilité des bâtiments aux personnes handicapées et au stationnement des véhicules associés aux usagers, pour ne citer que ces exemples, doivent alors être pris en compte dès le stade de conception.

Si une construction en sous-sol est néanmoins réalisée, il peut être envisagé de limiter l'usage des sous-sols à des activités pour lesquelles l'exposition sera limitée (parking, locaux techniques, réseaux informatiques, salle d'archivage,...). Une ventilation mécanique adéquate sera alors mise en place, le renouvellement d'air permettant de limiter l'accumulation de vapeurs dans le sous-sol et leur migration vers les étages supérieurs.

À l'image des bâtiments construits dans certaines zones inondables, la construction d'un bâtiment sur pilotis pourrait constituer une mesure constructive pertinente. Les seules voies d'entrées des polluants au sein des bâtiments seraient alors les pilotis et les éventuels réseaux entrants. Travailler sur l'étanchéité de ces pilotis contre les vapeurs (protection éventuelle contre la corrosion) ou contre des polluants présents dans les sols s'avèrera néanmoins moins compliqué à long terme, qu'assurer l'étanchéité de tout un soubassement.

Une autre mesure consiste à limiter les traversées de dalles ou de membranes étanches en privilégiant les entrées de réseaux par des murs latéraux non enterrés. Cette mesure peut nécessiter la prise en compte d'autres facteurs (détérioration possible des réseaux apparents ou gel pour les canalisations d'eau en hiver).

#### **4.3.3. Mise en place d'un vide sanitaire**

Une autre mesure consiste à mettre en place un vide sanitaire (total ou partiel) sous un bâtiment afin de créer un volume tampon. Cette mesure est détaillée dans la partie 4.4.2.b).

Lorsque ces précautions ne s'avèrent pas suffisantes ou lorsque des mesures constructives doivent être mises en place dans des bâtiments existants, différents types de techniques (passives ou actives) peuvent être mises en œuvre et sont détaillées dans les parties 4.4 et 4.5.

## 4.4. LES TECHNIQUES PASSIVES

### 4.4.1. Principe

Le terme « technique passive » renvoie à tous les dispositifs qui permettent d'assainir l'air intérieur sans faire appel à une consommation énergétique quel que soit le type, de manière continue ou quotidienne. Il s'agit donc de systèmes ou solutions autonomes, dès lors qu'ils ont été mis en place.

### 4.4.2. Agir sur la structure d'un bâtiment

#### a) *Étanchéification*

- **Principe**

Seuls quelques matériaux (certains métaux et le verre) présentent une très faible perméabilité aux gaz. Les matériaux de construction (béton, brique, plâtre...) ne sont pas, pour la plupart, pleinement hermétiques à la pénétration des gaz. De plus, tous les points faibles de la structure sont susceptibles de créer autant de chemins préférentiels potentiels pour l'entrée d'un polluant dans un bâtiment. Ces défauts d'étanchéité peuvent être de nature très variée (voir Figure 4 ci-dessous) :

- fissures et joints dans le radier et les murs ;
- passages de réseaux (canalisations et câbles) à travers le bâti ;
- soupiraux dans les murs du sous-sol ;
- cheminées ;
- grandes surfaces telles que des sols de cave en terrain naturel, en gravier ;
- parties de construction perméables (planchers sur poutres, hourdis, murs en pierres) ;
- etc.

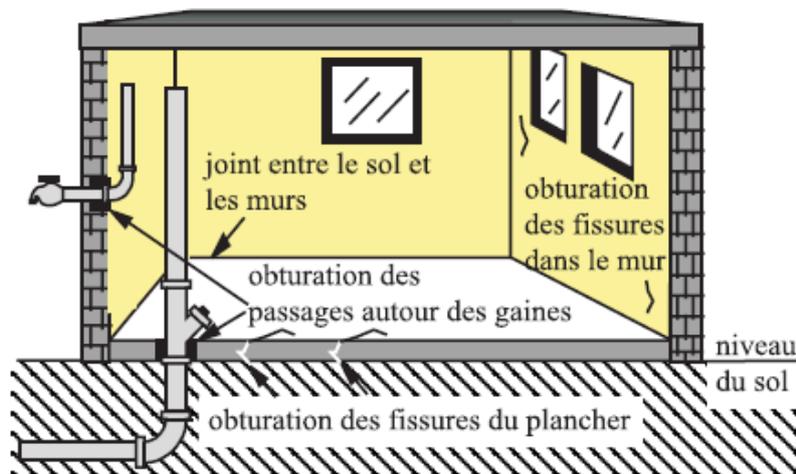


Figure 4 : Étanchéification des voies d'entrée des vapeurs [5].

L'étanchéification du bâtiment consiste alors à le rendre moins perméable aux gaz et à empêcher les mouvements d'air menant à l'entrée des polluants par ces chemins. Plusieurs solutions indépendantes les unes des autres sont disponibles et consistent à :

- **colmater** la maçonnerie enterrée ;
- appliquer un **revêtement** sur une dalle béton ;
- interposer **une barrière extérieure d'étanchéité sur les fondations et parties inférieures du bâtiment.**

Lors de la construction d'un nouveau bâtiment, une alternative aux mesures précédentes consiste à **réaliser une dalle de béton de meilleure qualité**. Cette dernière mesure peut être étudiée dès le stade de conception du bâtiment.

Pour des bâtiments existants, le recours à cette technique reviendrait à casser au préalable les dalles existantes, ce qui rend bien souvent cette solution inapplicable, notamment si un plancher chauffant est présent. Dans ce cas de figure, il faudra plus généralement s'assurer, auprès d'un spécialiste, que les mesures constructives envisagées (quelles soient passives ou actives, voir parties 4.4 et 4.5) ne risquent pas d'endommager le système de chauffage par le sol ou de diminuer les caractéristiques intrinsèques du plancher chauffant et l'efficacité de la mesure constructive envisagée.

- **Colmater la maçonnerie et/ou appliquer un revêtement de surface**

De manière curative sur les bâtiments existants, toutes les fissures et tous les défauts d'étanchéité doivent être obturés en insérant des joints d'étanchéité (principalement à l'aide de ciment à prise rapide ou de joints en matériaux synthétiques). Les supports doivent être préparés et propres pour que l'efficacité de ces travaux soit maximale. Cette méthode peu onéreuse, rapide et aisée à mettre en œuvre ne peut pas être considérée comme pérenne (l'origine de la fissuration peut être liée au vieillissement de la dalle, qui s'aggravera avec l'apparition de nouvelles fissures ou à des déformations de structure qui peuvent aussi se poursuivre). A minima, un contrôle visuel régulier de ces réparations est nécessaire pour permettre la reprise de ces travaux de colmatage autant que de besoin. Ce type de mesure doit être considéré davantage comme une action immédiate, dans l'attente de la mise en œuvre d'une solution définitive et ou plus efficace.



L'identification visuelle de macro-fissures et leur traitement, ne suffisent souvent pas, l'entrée des polluants étant toujours possible via des microfissures, dont le traitement est plus complexe et nécessite la mise en place d'un revêtement de surface (voir ci-dessous) adapté aux supports rencontrés et à l'ensemble de la superficie mise en jeu. La mise en place de ce revêtement de surface (plus onéreux et plus contraignant pour un éventuel usager) peut nécessiter le recours à des études complémentaires, réalisées par des entreprises spécialisées, afin de s'assurer de leur efficacité, compte tenu de la porosité du matériau ou de la présence réelle de microfissures. Ces travaux ont généralement une durée de vie et une efficacité plus importante, malgré un coût potentiellement élevé (voir **Annexe 4**).

Pour réaliser une étanchéité de surface, plusieurs solutions sont ainsi recensées :

- La **réfection complète** de la surface d'une pièce par ragréage ou la réalisation d'une nouvelle dalle béton de bonne qualité (idéalement réalisée en une seule opération, sans raccord, avec un béton « haute performance »). L'ajout d'une feuille synthétique préfabriquée (voir ci-après) à cette dalle béton est généralement conseillé. La réfection complète d'un mur à l'aide d'un ciment mélangé à des adjuvants peut également être envisagée ;
- Les **feuilles synthétiques préfabriquées (généralement du PolyÉthylène Haute Densité (PEHD))** sont relativement peu onéreuses et faciles à mettre en place. Ces produits existent sous forme « souple » en rouleaux (ils sont utilisés pour étancher la partie inférieure des stockages de déchets, ou de retenues d'eaux), mais aussi sous forme de plaques rigides, équipées de picots, qui permettent de les rendre solidaire d'un béton (avant sa prise). Un endommagement lors de la mise en place (ce qui est plus fréquent pour les films souples) ou un mauvais raccordement entre les feuilles (qui doivent être raccordées par thermosoudure, tâche assurée par des poseurs habilités à cette opération) peut nuire à l'étanchéité. Ainsi, il est plus judicieux de poser ces feuilles sur un sol aplani ne présentant pas d'objet pointu ou contondant (ou sur un géosynthétique anti poinçonnant), afin d'éviter tout endommagement et d'utiliser des membranes suffisamment épaisses [6].



Des recommandations concernant le raccordement de deux membranes sont présentées dans la partie 4.5.2.d). Un contrôle qualité lors de l'installation est essentiel pour assurer une bonne étanchéité de l'installation [6]. L'étanchéité des soudures peut être vérifiée par mise en pression du canal qui sépare les deux cordons de soudure (doubles soudures) et l'étanchéité globale en injectant sous la membrane de la fumée ou un gaz traceur (par exemple un mélange d'Azote et d'Hélium [9]) facilement détectable à l'aide d'appareil de mesures spécifiques [6]. Enfin lorsque les feuilles restent accessibles, un contrôle régulier de leur intégrité est nécessaire.

- Les **revêtements à base de polymère**. Ils se distinguent par leur très bonne adhérence avec le béton et l'acier et leur bonne résistance aux contraintes mécaniques. Deux classes de résines sont principalement reconnues : les **résines époxy** et les **résines polyuréthanes**. La deuxième catégorie résiste mieux aux microfissures.
- Il existe enfin des **membranes appliquées en spray** (exemple : procédé Liquid Boot®, développé par la société CETCO). Une photographie de la mise en place de ce produit est présentée en Figure 5.



Figure 5 : Photographie représentant l'application d'une membrane en spray.

Remarque :

Il faut signaler que, dans le cas de la mise en place de géomembrane ou composés géosynthétiques, la prise en compte du fascicule n° 10 « Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes » (en cours de révision) élaboré par le CFG est préconisée de même que le recours à des entreprises certifiées ASQUAL pour la mise en œuvre de ces produits.

• **Étanchéité extérieure**

Dans les bâtiments en construction, l'intégration d'une membrane aux fondations peut être envisagée pour lutter contre l'infiltration de gaz. Généralement en PEHD ou PVC, elles sont placées avant coulage du radier et rabattues ensuite de manière à couvrir tous les murs enterrés (cas des films souples), ou intégrées à la dalle lorsque celle-ci est coulée (plaques rigides). Ces produits sont également utilisés dans les parois moulées verticales afin d'assurer une protection latérale (horizontale) contre les infiltrations d'eau, mais aussi de gaz.



Figure 6 : Exemple de mise en œuvre d'une membrane le long d'une paroi moulée verticale (Source : Documentation technique et commerciale, société CETCO).

Lorsqu'ils sont intégrés aux fondations d'un bâtiment, ils doivent être mis en place au-dessus d'une couche de matériaux filtrants (massif filtrant et drain) qui permettra de drainer et d'évacuer les gaz. L'évacuation des gaz est nécessaire afin de prévenir l'accumulation de gaz sous la membrane et à terme dans le bâtiment si une ouverture se produisait dans la membrane. Les événements (exutoires du gaz) doivent être positionnés dans un « point haut » (le gaz monte), notamment si l'évacuation des gaz est assurée par un système passif (ventilation naturelle) comme présenté dans la partie 4.5.2.d) (Figure 7). Le système peut également être associé à un système d'extraction actif (ventilation, mise en dépression). Il est préférable que cette mesure soit étudiée dès la conception du projet afin de juger de son impact financier. Les caractéristiques intrinsèques de cette mesure rendent son installation impossible sur un bâti existant sans des travaux très importants. Son installation doit être contrôlée afin de s'assurer de l'absence de dommages.

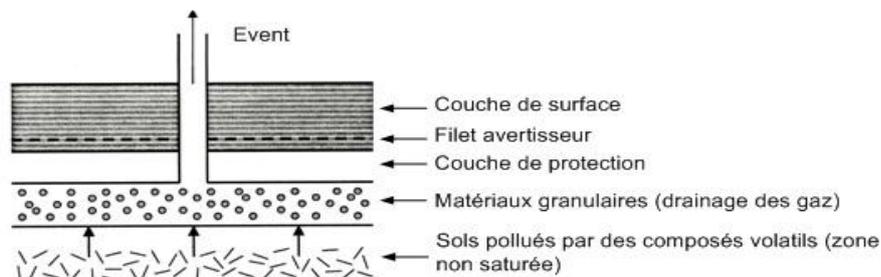


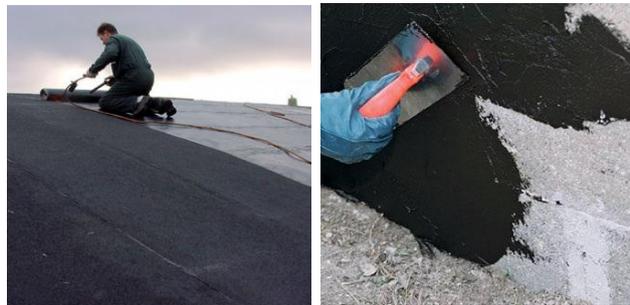
Figure 7 : Exemple de couverture pour collecter les émanations gazeuses [10].

Le principe de cette méthode se rapproche du cuvelage externe parfois installé sous (voire autour) d'un bâtiment afin de gérer la remontée des niveaux d'eau, comme le présente la Figure 8.



Figure 8 : Cuvelage des fondations d'un bâtiment.

Des revêtements bitumineux peuvent également être appliqués sur les murs latéraux extérieurs. On rappelle pour mémoire que leur durée de vie varie selon leur exposition aux rayonnements solaires, ce qui dans notre cas ne posera pas de problème, les murs à étancher étant a priori enterrés. La durée de vie est généralement assez élevée (de l'ordre de 30 à 40 ans).



Sur les bâtiments existants, l'application d'une résine imperméabilisante sur la partie enterrée des murs extérieurs nécessite d'importants travaux (terrassement le long des murs) avec la prise en compte de risques géotechniques, les risques liés à la présence de réseaux enterrés et la gêne pour les usagers qui en découlent. Cette solution, onéreuse et risquée, est principalement employée lorsque d'autres problématiques sont susceptibles d'être rencontrées (infiltrations d'eau de nappe dans un sous-sol par exemple). Elle pourra ainsi être couplée à la mise en place d'un massif drainant permettant de gérer l'eau de la nappe, notamment si la qualité des eaux est altérée.

Remarque :

*En cas de contact possible entre les membranes envisagées et des liquides organiques présents dans la nappe (notamment de la phase flottante dans la zone de battement de la nappe), une étude de la résistance de la membrane à la pollution en présence devra être réalisée (voir paragraphe 7.2.3.).*

- **Améliorer la qualité du béton**

La fissuration du béton au cours du temps est liée à plusieurs types de facteurs. Elle débute dès la phase de séchage, avec une intensité plus ou moins importante :

- sa composition : teneur en eau, nature du ciment, teneur en ciment et en agrégat, nature et dosage des additifs éventuels, humidité, température ;
- ses conditions de mise en œuvre et ses caractéristiques structurelles : la façon dont la dalle est coulée, le mode et le type de ferrailage, son épaisseur, sa superficie, le fait qu'elle soit réalisée d'un seul tenant ou en plusieurs parties, l'existence de raccords, joints de dilatation, le temps et les conditions de séchage etc. ;

- ses conditions d'utilisation : l'usure mécanique liée au mouvement du sol, aux déformations de la structure du bâtiment [11], à l'entretien etc..

Lors de la conception d'un bâtiment ou lors de la réfection de certaines dalles, il est possible d'améliorer les performances du béton afin de réduire le risque de fissuration. Plusieurs solutions sont ainsi envisageables :

- renforcer le béton avec des métaux ferreux ou des fibres ;
- favoriser un béton de haute qualité (peu poreux) en augmentant la teneur en ciment ou en diminuant la teneur en eau par ajout d'adjuvants spécifiques tels que les super-plastifiants et les adjuvants minéraux.

#### Les super-plastifiants [12, 13]

Ce sont des polymères utilisés dans l'industrie du béton. L'addition d'adjuvants dans la composition du béton permet notamment de jouer sur la teneur en eau du béton et donc de le rendre moins perméable à l'air et aux polluants volatils.

L'introduction de ces composés ne doit jamais se faire à sec : ils peuvent être introduits par exemple dans l'eau de gâchage avant le mélange avec le ciment. Le recours et l'utilisation de ces composés doivent être réalisés par une entreprise spécialisée afin d'assurer un bon dosage, une bonne homogénéisation du mélange et surtout une bonne application.

#### Les adjuvants minéraux

Des adjuvants minéraux en poudre, à l'instar des cendres volantes, peuvent améliorer encore davantage la perméabilité des bétons. Les cendres volantes et les matériaux pouzzolaniques, comme les cendres volcaniques, l'argile et les schistes calcinés, peuvent remplacer une partie du ciment [12, 14]. Ils peuvent ainsi contribuer à augmenter la résistance finale et l'imperméabilité du béton comme le montre le Tableau 2 ci-dessous. Les cendres volantes peuvent remplacer jusqu'à un tiers de la quantité de ciment initiale.

Béton utilisé	Perméabilité estimée (m.s <sup>-1</sup> )
Béton avec cendres volantes	< 10 <sup>-13</sup>
Portland normal (eau/ciment = 0,4)	10 <sup>-12</sup>

Tableau 2 : Comparaison de perméabilité entre un béton avec cendres volantes et un béton normal [14]

Ces deux types d'adjuvants permettent d'obtenir des bétons haute performance qui se caractérisent par une forte compacité et une très faible porosité. En découlent alors des performances spécifiques :

- o résistance à la corrosion,
- o faible perméabilité (à l'eau, à l'air, au gaz...), ce qui constitue une barrière d'étanchéité,
- o gain en termes de coût (baisse de la consommation en eau et en ciment),
- o intérêt environnemental : valorisation de coproduits industriels, obtenus à partir des résidus de l'industrie du papier, pour certains super-plastifiants.

- **Étanchéification : conclusion**

L'amélioration de l'étanchéité d'un bâtiment est une étape indispensable, en particulier, dans des bâtiments anciens, pour diminuer le nombre de points d'entrée des gaz. Ces solutions d'étanchéification ne sont classiquement pas suffisantes à elles-seules ; elles constituent un préalable à la mise en œuvre de toute autre mesure constructive. D'une part, il se peut que toutes les fissures et autres points d'entrées n'aient pas été décelés (notamment les microfissures, invisibles à l'œil), et d'autre part, la pérennité de l'étanchéification n'est pas assurée car :

- de nouvelles fissures peuvent apparaître au niveau de la dalle ;
- le revêtement peut être dégradé chimiquement ou mécaniquement (lors de l'installation, suivant l'utilisation du bâtiment ou suite à des passages répétés sur le revêtement).

Ainsi, elles sont généralement combinées avec d'autres mesures constructives (voir ci-dessous) afin de réduire davantage, et de façon pérenne, l'intrusion de vapeurs et les risques sanitaires qui peuvent en découler.

Un résumé des avantages et inconvénients est présenté dans le Tableau 3.

Avantages	Inconvénients
Coûts faibles à modérés Peu de gêne pour l'occupant Aucune partie mécanique Pas de consommation d'énergie Généralement applicable sur des bâtis existants avec peu de contraintes.	Fragilité lors de l'installation ou dans le temps Le moindre trou dans le revêtement diminue l'efficacité de la mesure

*Tableau 3 : Avantages et inconvénients des revêtements et membranes d'étanchéité.*

**b) Mise en place d'un vide sanitaire**

- **Principe**

Le vide sanitaire permet de créer un matelas d'air, ventilé ou non, entre le sol décapé et le plancher bas. Il est constitué par le volume compris entre la ceinture en murs maçonnés périphérique ou soubassement, le plancher (la dalle) en partie supérieure et le sol.

Il est généralement ventilé pour :

- des raisons de salubrité, en renouvelant l'air humidifié ;
- réduire les condensations sur les parois froides ;
- réduire les concentrations en gaz du sol (ex. : Radon).

De nombreux types ou plutôt configurations de vide sanitaire existent. Ils peuvent être enterrés/semi-enterrés, aérien (hors sol) ; intégral en couvrant l'ensemble de la surface du bâtiment, partiel (sous une seule partie du bâtiment) ; d'un seul tenant ou compartimenté, comprendre une galerie principale ou non. Ces caractéristiques auront une influence sur la ventilation du vide sanitaire et par conséquent, sur l'efficacité du vide sanitaire en tant que mesure constructive.

Sa mise en place, réalisable uniquement dans le cas de nouveaux bâtiments, est d'ailleurs prévue dans la circulaire de février 2007, relative aux établissements sensibles construits sur des sites pouvant notamment présenter une pollution volatile.

On recourt généralement à un vide sanitaire dans les cas suivants :

- sols argileux, sujets aux mouvements de terrain (gonflements, dilatations, retraits), ...
- terrains :
  - en pente (talus) avec des risques de déplacement de construction, pente > 4 %,
  - constitués de remblais,
  - en banquette avec risques de tassements différentiels,
  - en cuvette qui recevrait des eaux de ruissellement,
  - hétérogènes avec là-aussi des risques de tassement différentiels ;
- pour tenir compte de problèmes d'humidité ou liés aux nappes phréatiques et à l'inondabilité.

À titre informatif, il faut signaler qu'une modélisation informatique étudiant l'influence de différentes hypothèses de construction d'un vide sanitaire sur l'efficacité de sa ventilation a été réalisée par Partners In Technology [15].

Les différentes hypothèses modélisées ont été les suivantes [15]:

- création d'un volume vide, ne présentant pas d'obstacles à l'intérieur ;
- présence de polystyrène sous le plancher de l'étage supérieur ;
- mise en place d'une membrane de drainage constituée d'une double couche étanche de 40 mm d'épaisseur ;
- remplissage du vide avec des matériaux granulaires drainant, avec ou sans réseau de drainage (tuyaux crépinés).

Remarque :

*Le remplissage d'un vide sanitaire par des matériaux drainants granulaires est généralement envisageable pour des problématiques de faible importance et si la nappe phréatique n'est pas trop proche du vide sanitaire. Le remplissage du vide sanitaire empêche toutefois toute intervention ultérieure dans le vide sanitaire.*

- **Normes de construction**

Pour mémoire, un vide sanitaire est réputé accessible, s'il présente l'ensemble des caractéristiques suivantes (voir DTU 65.10) :

- accès de surface minimale de 0,60 m<sup>2</sup>, la plus petite dimension étant au moins égale à 0,6 m ;
- hauteur libre minimale. On distingue les deux cas suivants :
  - en maison individuelle, cette hauteur libre est de 0,60 m minimum ;
  - en habitat collectif et autres bâtiments (tertiaire, hôpitaux, ...), la hauteur libre générale est de 0,60 m minimum ; elle est de 1,30 m au droit des canalisations. Cette hauteur

libre peut être ramenée à 1,0 m sous des saillies linéaires du gros œuvre ne supportant pas, par en-dessous, des canalisations ;

- hauteur libre maximale : 1,80 m (sinon cela devient une pièce habitable).

La trappe d'accès pourra être placée soit à l'intérieur (en général horizontalement dans une pièce de service), soit à l'extérieur (horizontalement ou verticalement). Dans le cas d'une mesure constructive, la trappe sera dans la mesure du possible installée en extérieur, afin de limiter les voies préférentielles. **Si ce n'est pas envisageable, l'étanchéité de la trappe devra être étudiée et améliorée.**

Un vide sanitaire non accessible aura, quant à lui, la hauteur est de l'ordre de celle de 2 blocs superposés hourdés au mortier, c'est-à-dire de l'ordre de 0,40 à 0,45 m le plus souvent, avec une hauteur minimum de 0,20 m. Son intérêt reste limité, car aucune intervention n'est possible en cas de problème dans le vide sanitaire (par exemple, en cas de fuite sur une canalisation d'eau).

Lors de la conception de mesures constructives associées à un projet d'aménagement nouveau (bâtiment à construire), il est préférable de privilégier un vide sanitaire accessible dès le stade de la conception, afin de pouvoir y accéder facilement et y installer éventuellement un Système de Dépressurisation Sous Membrane (SDSM). Une hauteur de 0,6 m constituera donc un minimum, l'objectif étant de faciliter le travail éventuel d'opérateur dans ce vide sanitaire. Préalablement à l'entrée dans le vide sanitaire (espace confiné), toutes les mesures de sécurité doivent être prises (vérification du taux d'oxygène, d'explosivité, de la présence de vapeurs, etc.).

Lors de la réalisation du vide sanitaire, le sol est généralement décapé et aplani en surface. Il doit également être exempt de tous dépôts ou matières combustibles, susceptibles d'engendrer des moisissures ou d'être à l'origine d'émissions de composés volatils.

#### Remarque :

*L'efficacité du vide sanitaire en tant que mesure constructive pourra être renforcée par la mise en place préventive d'un Système de Dépressurisation Sous Membrane (voir partie 4.5.2.d).*

- **Normes de ventilation des vides sanitaires**

Une ventilation, a minima naturelle, du volume du vide-sanitaire est nécessaire, y compris en dehors de toute problématique de sites et sols pollués. Aucun texte réglementaire (sauf le DTU 61.1 spécifique à la présence d'un chauffage au gaz) ne semble exister dans ce domaine. Ainsi, elle doit répondre à **quatre exigences majeures** [16], non seulement en fonction du type de « toit » du vide sanitaire et de l'humidité apparente du sol qui le porte, mais aussi et surtout pour assurer sa pérennité et son rôle. Ces exigences définissent différentes sections de ventilation, issues de méthodes de calcul dont les valeurs et les notions sont directement liées aux raisons qui les motivent.

- **La durabilité, l'hygiène et la salubrité.** Pour cette première exigence, un vide sanitaire sera considéré comme ventilé si la surface totale des bouches de ventilation est au moins égale à 0,05% de la surface du vide sanitaire (soit 5 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) (exemple : pour 100 m<sup>2</sup>, la surface de ventilation sera de 500 cm<sup>2</sup>).
- **La thermique.** Un vide sanitaire sera considéré comme fortement ventilé si la surface de ventilation est supérieure à 15 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. Il sera faiblement ventilé si la surface de ventilation est comprise entre 5 et 15 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.
- **L'utilisation du gaz naturel,** comme source d'énergie principale ou secondaire du bâtiment pour le chauffage d'un bâtiment ou l'alimentation d'une gazinière. Le passage

de canalisations de transport de gaz dans un vide sanitaire est réglementé par la norme NF DTU 61.1 Parties 2 et 3. Les exigences sont les mêmes que pour l'exigence Durabilité.

- **La fonction anti-Radon**, pour les zones concernées (31 départements en France métropolitaine). Dans ce cas, un vide sanitaire devra être ventilé par un flux d'air d'un débit compris entre 1,5 et 5 m<sup>3</sup>/h et par m<sup>2</sup>. Ainsi, pour un vide sanitaire de 100 m<sup>2</sup>, le débit sera compris entre 150 et 500 m<sup>3</sup>/h.

**L'INERIS préconise par ailleurs dans son rapport de 2005 un taux de ventilation de 1,1 vol/h pour un vide sanitaire [17].**

Il convient de noter que certains conduits verticaux existent et peuvent assurer un renouvellement d'air de 1 à 1,5 volumes par heure (principe comparable au tirage naturel d'une cheminée). Leur efficacité augmente avec la hauteur de la ventilation haute. Dans tous les cas, lors de la mise en place d'un vide sanitaire, il faut prendre garde à ne pas laisser de zone morte, non ventilée. Néanmoins, ces solutions sont rarement rencontrées dans la pratique.

Compte tenu de ces éléments, dès lors que la mise en place d'un vide sanitaire est envisagée dans le cadre d'une problématique SSP, il conviendra de se rapprocher, dès le stade de la conception, d'une société spécialisée (entreprise du BTP, architecte, bureau d'étude ventilation ou/et thermique ...) pour assurer le bon dimensionnement de l'ouvrage ainsi que la prise en compte de toutes les contraintes : ventilation, volet thermique, accessibilité,...

Dans le cas d'un vide sanitaire enterré/semi-enterré, une ouverture péricopique sera nécessaire (voir Figure 9 et Figure 10).

Dans le cas d'un vide sanitaire aérien, une ou plusieurs ouvertures latérales pourront être réalisées dans les murs (de part et d'autre du bâtiment) afin de ventiler le sous-sol.

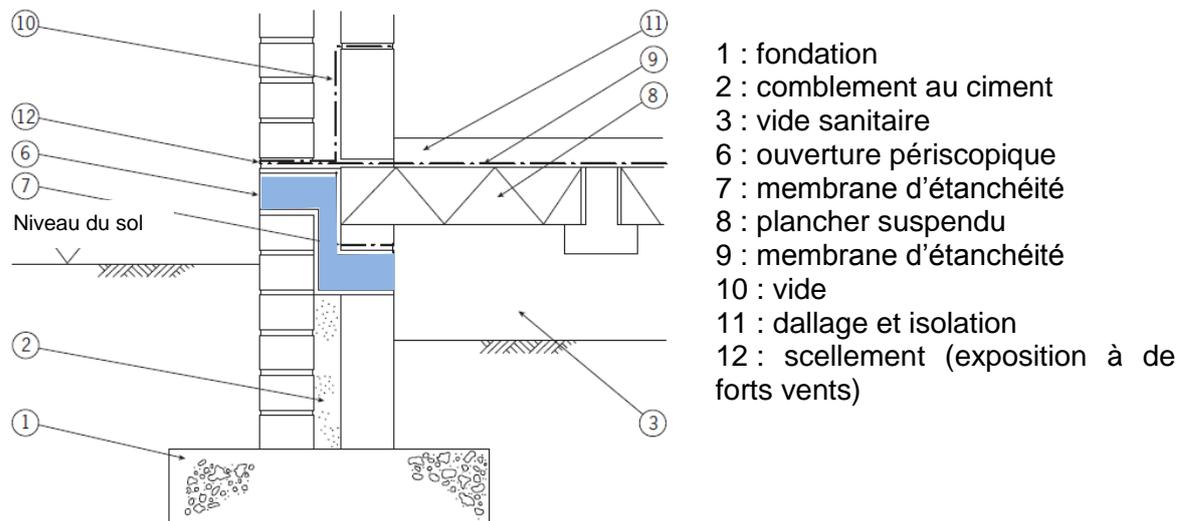


Figure 9 : Ouverture péricopique [6].

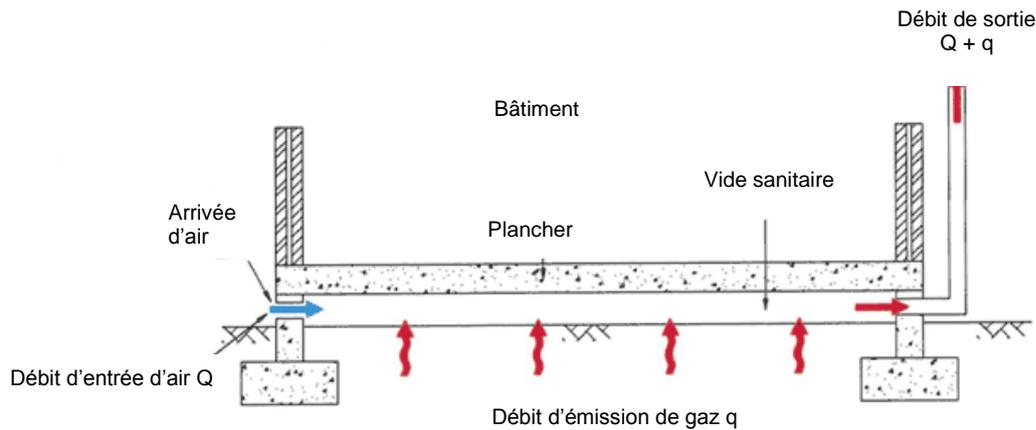


Figure 10 : Principe de la ventilation d'un vide sanitaire [18].

#### 4.4.3. Agir sur la ventilation naturelle

Lorsqu'il n'est pas possible et/ou suffisant d'agir sur la structure du bâtiment pour assainir l'air intérieur, une amélioration de sa ventilation peut être envisagée. Qu'elle soit naturelle ou mécanique (voir partie 4.5.3), elle repose sur la réduction des concentrations en polluants par l'apport d'air extérieur et l'évacuation de l'air vicié. Cette méthode ne doit cependant pas être considérée comme suffisante à elle seule : **seule la réduction des émissions de polluants à la source permet d'agir de façon durable.**

##### a) Élimination des facteurs créant une dépression dans le bâti

Comme cela a été présenté dans la partie 4.2.1, l'air du sol s'infiltré dans les bâtiments en raison du tirage thermique naturel, l'air intérieur plus chaud que l'air extérieur montant et créant une dépression à la base du bâtiment. Cette dépression peut être accentuée dans les bâtiments possédant des systèmes de ventilation par extraction mal conçus. En effet, l'apport d'air extérieur est insuffisant pour compenser entièrement l'extraction d'air intérieur.

Dans ce type de cas de figure, une dépression supplémentaire de l'ordre de 20 Pa peut ainsi être créée [19]. Ce phénomène contribue à augmenter l'infiltration d'air du sol.

Une solution consiste alors à créer des ouvertures dans les murs extérieurs, équipées de grilles de ventilation, pour augmenter l'apport d'air frais dans les locaux et compenser ainsi la dépression créée par le système de ventilation par extraction. Cet apport d'air contribue par ailleurs à mieux homogénéiser la qualité de l'air intérieur, et donc à limiter les concentrations en polluants. Cette mesure, peu onéreuse et facile à mettre en place, peut engendrer une gêne pour les occupants, notamment en hiver par l'apport d'air frais généré.

À titre indicatif, différents modèles de grilles de ventilation et leurs débits associés sont présentés dans le Tableau 4.

Type	Caractéristiques	Débites classiques	Photos
Entrée d'air autoréglable	Garantissent un débit d'air neuf constant, quelles que soient les conditions atmosphériques ou l'occupation des pièces	Calibrés de 15 à 45 m <sup>3</sup> /h (débit réel dépendant de l'extraction réalisée dans la pièce)	
Entrée d'air hygroréglable	Assurent l'amenée d'air neuf et la répartition des débits entrant dans le logement en fonction du taux d'humidité.	Calibrés de 6 à 45 m <sup>3</sup> /h (débit réel dépendant de l'extraction réalisée dans la pièce)	
Grille de ventilation (entrée d'air)	Création d'une ouverture dans le mur et camouflage esthétique de l'ouverture	Pas de calibration, dépend de la section de la grille, de l'appareil soufflant ou aspirant l'air ou de l'exposition au vent	
Grille de ventilation (sortie d'air)	- Présence d'ailettes - Evite l'entrée d'air quand l'extracteur est à l'arrêt.	Pas de calibration, dépend de la section de la grille, dépend de l'extracteur évacuant l'air aspiré dans la pièce	

Tableau 4 : Présentation de quelques grilles de ventilations.

De même, comme cela a été évoqué au paragraphe 4.2.2, les fourneaux, chaudières et cheminées situés dans l'habitation, qui utilisent l'air intérieur comme air de combustion provoquent une dépression supplémentaire dans les locaux. Pour compenser cette consommation supplémentaire d'air intérieur, il convient alors d'installer une entrée d'air permettant un apport direct d'air extérieur au plus près de ces équipements, ce qui permet de limiter la circulation d'air frais dans la pièce, ou de connecter ces installations directement avec l'air extérieur.

### b) Aération naturelle

L'aération naturelle, par le biais de l'ouverture des fenêtres et autres entrées d'air, par la mise en place de conduits spécifiques, ou encore par la suppression du calfeutrement autour des portes et fenêtres, augmente le renouvellement de l'air intérieur et permet de mieux répartir les concentrations en produits polluants.

Ainsi, il est classiquement recommandé que chaque pièce de service soit pourvue d'une sortie d'air (fixe ou réglable manuellement) raccordée à un conduit d'évacuation fonctionnant par

tirage naturel. Chaque pièce principale sera, quant à elle, équipée d'un orifice d'entrée d'air neuf de type autoréglable (ajustement de la section de passage de l'air en fonction du vent) dans les logements récents. Il convient de noter que ce mode de ventilation n'est plus utilisé dans les constructions neuves, sauf dans certaines pièces techniques donnant sur l'extérieur (local poubelles, local vélo, chaufferie, etc.). La Figure 11 illustre le principe de la ventilation naturelle par balayage.

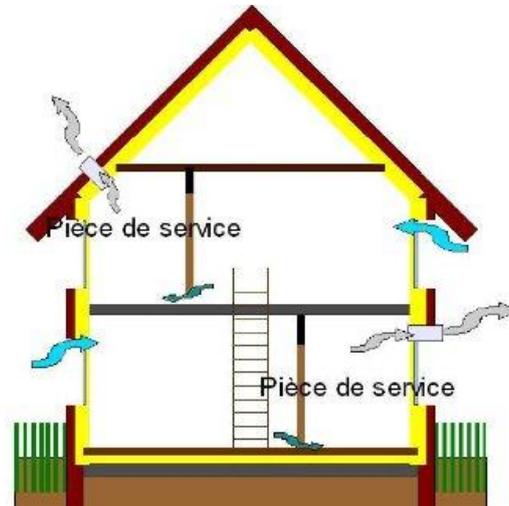


Figure 11 : Principe de la ventilation naturelle par balayage.

Dans certains cas (établissements recevant du public, parkings, etc.), le taux de renouvellement de l'air est réglementé. Il peut être réalisé par une aération naturelle ou par des moyens mécaniques automatiques, si l'aération naturelle ne s'avère pas suffisante pour atteindre les débits minimaux.

Un tableau présentant les débits minimaux ou le taux de renouvellement nécessaires est présenté dans le Tableau 6 de la partie 4.5.3.c). A titre informatif, un rappel des principaux textes réglementaires en vigueur est présenté dans la partie 4.5.3.a).

Toutefois, l'efficacité de l'aération naturelle dans les habitations existantes est très imprévisible, car fortement dépendante des conditions climatiques et des pratiques « non-contrôlables » de l'utilisateur de la pièce ou du bâtiment [20] (ouverture des fenêtres, bouchage des arrivées d'air, inconfort). Son efficacité sera plus importante pour les nouvelles constructions, où chaque caractéristique pour améliorer l'action de la méthode est introduite dès la conception des plans. Il est ainsi capital que le positionnement des entrées et sorties d'air soit pertinent (en général à l'opposé l'une de l'autre pour obtenir une circulation d'air optimale) [20]. Néanmoins, cela induit aussi, lors des périodes de basses températures, des circulations d'air froid dans une pièce qui peuvent alors poser problème pour les usagers : calfeutrement des entrées, mauvais ressentis,....

Dans le cas d'un vide sanitaire mal ventilé, l'ajout d'ouvertures supplémentaires (cf. Tableau 4), correctement situées et dimensionnées, peut permettre de diminuer significativement les concentrations en polluants dans ce volume [20], pour un coût modéré (cf. **Annexe 4**) [21].

### c) Mise en place d'une barrière de dilution passive

Le principe de cette mesure repose sur la pose de conduits en géocomposite verticalement dans le sol autour des fondations du bâtiment. Ces conduits sont connectés à un réseau dans lequel une légère dépression est appliquée par circulation naturelle d'air frais. Le phénomène provoque alors l'aspiration des gaz du sol. La Figure 12 ci-après illustre le principe de cette méthode.

L'efficacité d'un tel système a été démontrée pour la protection contre le méthane et le dioxyde de carbone, en réduisant en quasi-totalité les concentrations initialement présentes dans les locaux. Par ailleurs, cette méthode offre plusieurs avantages : rapidité d'installation, coûts réduits, et indépendance vis-à-vis de la qualité du sous-sol. Un contrôle régulier de l'installation semble toutefois nécessaire afin de s'assurer que le réseau n'est pas bouché ou endommagé ce qui limiterait la circulation d'air et donc l'efficacité de la dilution.

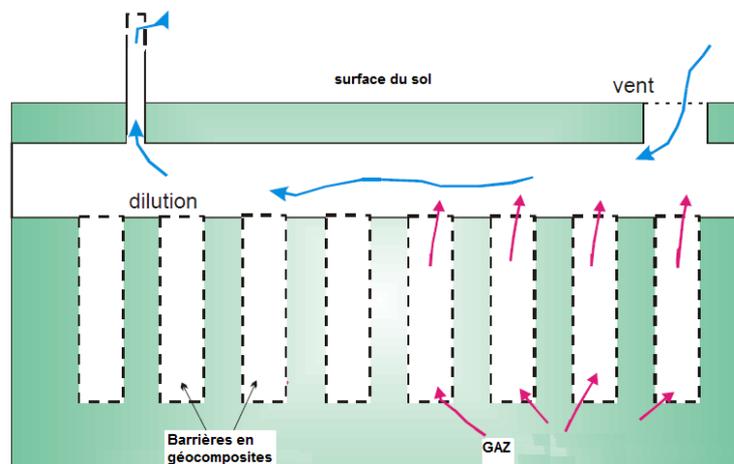


Figure 12 : Principe des barrières de dilution passive [22].

Ces conduits étant enterrés, il est généralement difficile de contrôler leur état et leur efficacité unitaire au cours du temps.

#### 4.4.4. De l'efficacité des mesures passives seules

Malgré leur diversité, les techniques passives ne sont généralement pas suffisantes à elles-seules pour stopper l'entrée de polluants dans un bâtiment. Celle-ci est commandée par d'autres facteurs que la seule présence de voies d'entrée visibles (dépression de la zone occupée, perméation, etc.).

**Ces mesures constituent néanmoins un préalable indispensable pour limiter le flux d'entrée de vapeurs dans un bâtiment. Il est indispensable, d'une manière générale, de privilégier la lutte contre les intrusions de substances volatiles, plutôt que la diminution de leur concentration après intrusion par accroissement du renouvellement d'air.**

En particulier, l'étanchéification des points de faiblesse du bâti (fissures, réseaux, etc.) constitue un préalable indispensable, et doit être réalisée au plus tôt afin de juger de son effet le plus rapidement possible.

Les techniques passives n'étant, à elles-seules, pas suffisantes, elles doivent généralement être complétées par d'autres mesures constructives, dites « actives ». Une partie du système « actif » peut être intégré préventivement dès le stade de la conception d'un bâtiment neuf, et n'être mis réellement en fonctionnement ou complété que si les mesures passives sont insuffisantes. Ainsi, des réseaux de drainage pourront être mis en place de manière préventive sous une dalle béton, et seront simplement reliés à l'atmosphère dans un premier temps. S'il s'avère que cette mesure passive n'est pas suffisante au vu des contrôles de qualité (concentrations) effectués ultérieurement, un extracteur d'air pourra être ajouté en sortie de réseau, afin d'augmenter l'extraction des vapeurs présentes sous la dalle.

Remarque :

*Il convient de noter que l'efficacité du système de dépressurisation du sol passif sera significativement réduite si une nappe souterraine est proche. Il est raisonnable de considérer qu'une distance de 1,5 m constitue un minimum nécessaire entre le niveau le plus haut de la nappe (niveau des plus hautes eaux et la cote basse du dispositif). [23]*

*Le lecteur est également invité à se reporter à l'étude réalisée par le CSTB pour le compte de l'ADEME, dans lequel un outil de dimensionnement de système de dépressurisation des sols passif a été développé [71].*

## **4.5. LES TECHNIQUES ACTIVES**

### **4.5.1. Principe**

Les techniques actives diffèrent des techniques dites passives dans le sens où elles supposent l'utilisation d'une source d'énergie et d'un matériel plus sophistiqué, dans le but de provoquer un mouvement d'air (extraction, surpression,...) dans ou sous un bâtiment. Chaque système actif nécessite ainsi la mise en place de différents matériels : extracteurs (versus ventilateurs pour insuffler de l'air), conduits d'aspiration (ou insufflation) et de rejet et d'un mécanisme de contrôle voire d'alarme en cas de dysfonctionnement.

Les techniques actives peuvent suivre deux principes :

- empêcher l'intrusion des vapeurs dans les pièces à vivre en les captant avant qu'elles n'atteignent les pièces à vivre. Lorsque cela est possible, cette solution est toujours à privilégier ;
- limiter l'accumulation des polluants dans les locaux, en augmentant le renouvellement de l'air dans les pièces à vivre, afin de revenir à des risques acceptables.

Ces deux techniques peuvent être utilisées indépendamment l'une de l'autre ou de manière concomitante.

Remarque :

*Les techniques actives présentent différents types d'inconvénients et de contraintes qu'il faut souligner : des coûts énergétiques (fonctionnement en continu), la nécessité de mettre en place une maintenance et de la financer, des nuisances sonores ou esthétiques. Ces aspects, qui ne doivent pas être négligés lors de la phase de conception, sont abordés et développés, plus particulièrement, au paragraphe 4.5.2 du présent rapport.*

#### 4.5.2. Empêcher l'intrusion de vapeurs dans un bâtiment

##### a) Réalisation d'essais de faisabilité ou test pilote (norme NFX 31-620-3)

Compte tenu de l'influence potentielle des caractéristiques du sol et de la configuration du sous-bassement, la réalisation d'essai de faisabilité ou d'essai pilote sur le terrain doit être intégrée à la démarche de conception, afin de s'assurer du bon dimensionnement des composantes du dispositif (matériel sélectionné) et de l'efficacité du dispositif. Ces essais permettront, par ailleurs, de prendre en compte différentes contraintes : niveaux sonores, esthétique de l'équipement, modalités de raccordement et de comptabilisation de la consommation énergétique, report d'alarme, ...

Pour information, la Figure 13 illustre la mesure du rayon d'influence liée à une aspiration dans le sol.

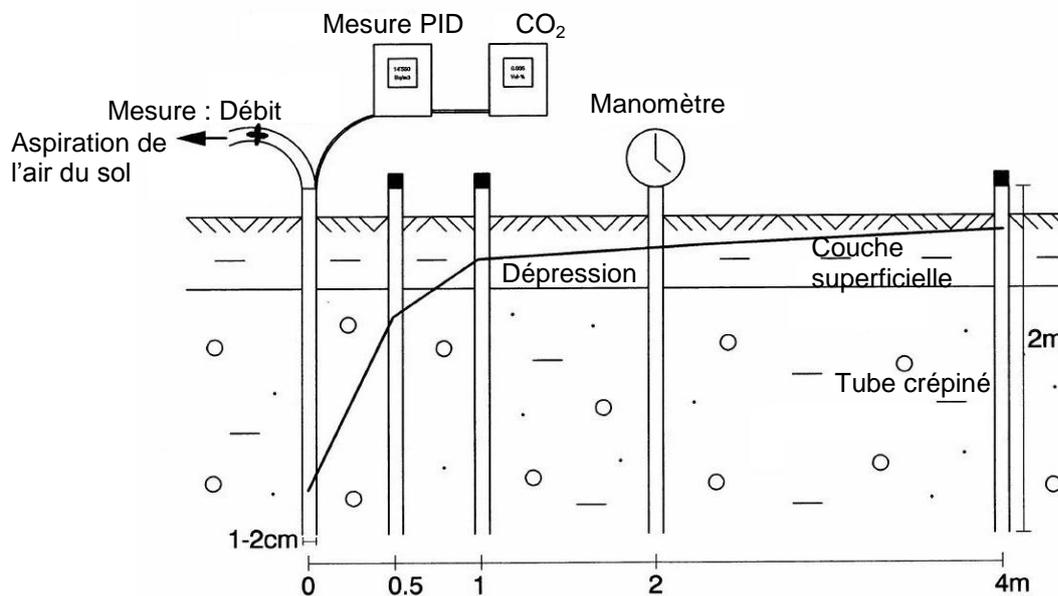


Figure 13 : Mesure du rayon d'influence engendré par une aspiration dans le sol [24].

À la différence d'un venting classique, la dépressurisation sous dalle ne cherche pas à dépolluer un sol en aspirant tous les polluants présents. Cette dépression a pour objectif d'aspirer les vapeurs remontant **naturellement** jusqu'à la surface afin d'éviter leur intrusion dans le bâtiment. Ainsi, dans le cas d'un milieu relativement perméable, l'objectif est d'obtenir **et maintenir dans le temps** une dépression minimale de la manière la plus homogène possible sous toute la surface de la dalle. Dans les cas de terrains moins perméables, mais permettant tout de même d'atteindre des rayons d'actions suffisants pour que la solution soit viable aussi bien d'un point de vue technique, qu'économique ou esthétique, l'aspiration engendrera une dépression locale plus importante. Il est généralement admis qu'une dépression minimum de 4 à 10 Pa est suffisante pour qu'un système de dépressurisation sous dalle soit efficace [25, 7]. **Il n'est pas recommandé d'appliquer une dépression trop importante sous la dalle, afin de ne pas risquer de mobiliser le panache gazeux et d'augmenter les arrivées de vapeurs sous le bâtiment. Ainsi, une plage de dépression de 4 à 10 Pa sera l'objectif à atteindre, sauf cas particulier. Il s'agira aussi de vérifier qu'une dépressurisation est observée sur l'ensemble de l'emprise du bâtiment concerné par la problématique de remontée de vapeurs.**

Préalablement à l'installation d'un Système de Dépressurisation Sous Dalle (SDSD, présenté dans le paragraphe 4.5.2.d) - cas de l'aspiration au travers d'une dalle existante), il convient de s'assurer de la pertinence du dispositif, notamment en mesurant la dépression créée sous la dalle pour différents extracteurs d'air et en vérifiant que le rayon d'action engendré sous la dalle par les extracteurs [4] est globalement adapté. La Figure 14 illustre la réalisation de ces tests.

Dans le cas de la création d'une nouvelle dalle sur un massif drainant, la porosité de celui-ci étant importante, la réalisation de tests préalables n'est pas forcément indispensable, exception faite du cas de grandes surfaces, pour lesquelles il sera nécessaire de vérifier que la dépression est effective sur l'ensemble de l'emprise. Dans ce cas, la répartition et le nombre de tuyaux d'aspiration à mettre en place sont à étudier tout particulièrement. Le retour d'expérience dans ce domaine est peu important. À titre d'information, Partners In Technology [15] préconise de placer un tuyau d'aspiration tous les 2 à 3 mètres de large, dans un vide sanitaire remblayé avec des graviers de 20 mm de diamètre et ventilé **passivement**.

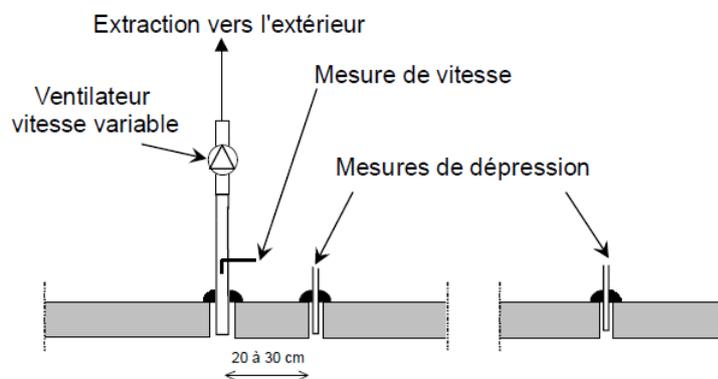


Figure 14 : Test de dépressurisation sous dalle [4].

Enfin, préalablement à l'installation définitive de l'extracteur, des mesures des niveaux sonores sont à prévoir (état hors fonctionnement / état en fonctionnement).

Par exemple, lors de l'essai, l'extracteur sera installé à l'emplacement final prévu pendant au moins 1 journée et 1 nuit, afin que les occupants du bâtiment puissent s'assurer de l'absence de nuisances sonores générées par le dispositif. Le cas échéant, les dispositions nécessaires seront prises lors de l'installation finale de l'équipement afin de parvenir à une émergence acceptable (par exemple : mise en place d'un caisson d'insonorisation, réalisation d'un cabanon autour de l'extracteur, enfouissement de l'extracteur, etc.).

Enfin, les équipements étant sensibles aux risques de gel ou de condensation, ces contraintes doivent être également prises en compte.

Remarque :

*La réalisation d'un essai constitue une occasion importante du point de vue communication avec les occupants et usagers des locaux notamment pour percevoir et prendre en compte leurs motifs d'inquiétude : bruit, perception visuelle de l'équipement, dégradation lors de l'installation, ...*

### **b) Mise en surpression d'un bâtiment**

La mise en surpression d'un bâtiment consiste à insuffler mécaniquement de l'air frais dans les locaux de manière à créer une légère surpression (généralement de l'ordre de 2 à 15 Pa, à adapter au bâtiment et à la problématique rencontrée) limitant l'entrée du polluant dans les pièces utilisées [6]. Cette méthode requiert la mise en application d'un système de ventilation spécifique : une ventilation simple flux par insufflation ou une ventilation double flux déséquilibrée (insufflation supérieure à l'extraction) (voir partie 4.5.3.c)). Cette mesure est applicable sur les bâtiments bien étanches, ce qui est généralement difficile à obtenir, et n'est valable que si aucune dépression ne vient perturber son fonctionnement, comme l'ouverture des fenêtres par exemple.

Le principal inconvénient lié à cette mesure réside dans les pertes énergétiques engendrées en hiver, soit en injectant de l'air froid extérieur dans les pièces à vivre (déperdition énergétique qu'il faudra compenser par une augmentation du chauffage), soit en préchauffant l'air froid extérieur avant son insufflation dans le bâtiment. Dans ce dernier cas, il y a également un risque d'augmentation de la condensation dans les parois par pénétration d'air chaud et humide. En l'absence d'étude spécifique, cette méthode est plus difficile à mettre en place dans des bâtiments résidentiels que dans des bâtiments non résidentiels.

Lorsque l'on cherche à mettre en surpression (ou également en dépression), ce n'est pas le débit insufflé (ou extrait) qui compte, mais les pertes de charges créées par les introductions d'air (portes, fenêtres, ouvertures avec registres,...), qui sont très dépendantes des caractéristiques du réseau et de l'installation à mettre en place. Le recours à une société spécialisée est fortement recommandé pour le dimensionnement de ce type d'installation. De même, des mesures et contrôles précis des concentrations de polluants dans les gaz de sol, dans le vide sanitaire et dans l'air des pièces à vivre devront être réalisés afin d'adapter le dispositif à la problématique rencontrée (débit d'intrusion de vapeur, seuils à atteindre,...).

### **c) Mise en dépression ou en surpression d'un vide sanitaire**

Les bâtiments sans cave sont souvent construits sur des vides sanitaires de plus ou moins grandes dimensions, normalement munis d'ouvertures d'aération. Une disposition optimale de ces ouvertures, si elles sont en nombre suffisant, peut suffire à assurer un renouvellement satisfaisant de l'air pollué et ainsi protéger efficacement les occupants du bâtiment. Dans le cas contraire, un extracteur peut être installé pour favoriser le renouvellement de l'air du vide sanitaire. Cet extracteur pourra être utilisé pour mettre le vide sanitaire en dépression ou en surpression.

- **Mise en dépression d'un vide sanitaire**

L'extracteur va créer une dépression dans le vide sanitaire (généralement de l'ordre de 2 à 15 Pa, valeur à adapter au bâtiment et à la problématique rencontrée) (Figure 15), afin que les pièces utilisées soient en surpression par rapport au sous-bassement. La remontée des vapeurs du vide sanitaire vers les pièces à protéger sera ainsi empêchée.

La mise en dépression du vide sanitaire nécessite une bonne étanchéité, que ce soient des murs latéraux ou du plancher du bâtiment, ce qui est généralement difficile à obtenir. L'association d'une étanchéité du vide sanitaire avec une distribution optimale et un nombre adéquat d'ouvertures permettra de générer et de contrôler un flux d'air suffisant. Le vide sanitaire doit également comporter le moins d'obstacles possibles, afin d'éviter l'existence de



#### d) Mise en place d'un drainage des gaz du sol

- **Principe**

Cette technique est la plus couramment utilisée et la plus décrite dans la littérature. Elle consiste à créer une dépression dans le sol, sous ou à proximité d'un bâtiment, afin d'empêcher la pénétration de l'air du sol. On parle alors de Système de Dépressurisation du Sol (SDS). Dans ce cas, une interface physique doit être présente (existante ou à créer) entre le bâtiment et le sol ; généralement constituée d'une dalle en béton, elle va limiter les apports d'air parasites (provenant du bâtiment ou de l'air ambiant). Cette interface doit être rendue la moins perméable possible (à minima obturation préalable des joints de dilatation et des fissures).

Deux techniques principales existent : le Système de Dépressurisation Sous Dalle (SDSD) et le Système de Dépressurisation Sous Membrane (SDSM). Généralement installées dans un vide sanitaire, leurs principes respectifs sont illustrés en Figure 16 et détaillés dans la suite du rapport.

Ainsi, dans une cave en terre battue, la création d'une dalle béton sur massif drainant sera privilégiée. Une membrane d'étanchéité pourra être installée entre le massif et le béton. Dans le cas d'un vide sanitaire, une membrane d'étanchéité pourra être installée sur toute la surface du vide sanitaire. Une aspiration sera réalisée sous la membrane, afin d'aspirer les vapeurs provenant du sol sous-jacent.

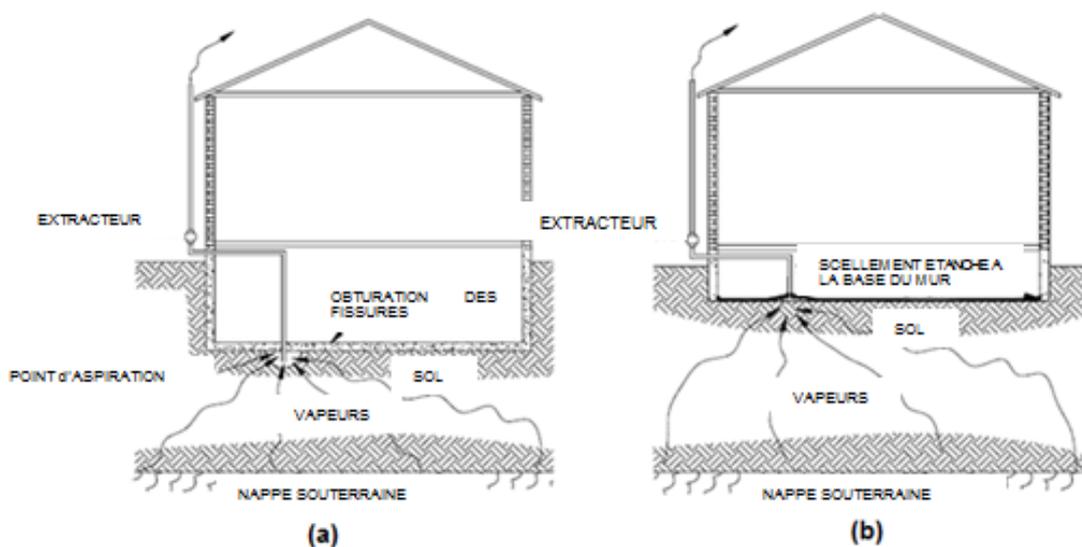


Figure 16 : Principe du SDSD (a) et du SDSM (b) [27].

La mise en œuvre de ce type de techniques passe par :

- une description préalable de la géologie locale ;
- La réalisation d'essais de faisabilité ou de test pilote sur le terrain (voir paragraphe 4.5.2.a) (prestations B111 et B112 au sens de la norme NFX 31-620-3).

- **Prise en compte de la géologie locale**

La géologie et les caractéristiques du sol sous-jacent (notamment sa perméabilité) peuvent avoir une influence très importante sur la dépression engendrée dans le sol. Ainsi, des éléments relatifs aux rayons d'actions et dépressions attendus en fonction du type de sol sont présentés ci-après :

***Présence d'une couche superficielle très perméable (sable, gravier,...)***

Dans le cas d'un sol non couvert, la perméabilité du sol superficiel étant très importante, il y a un échange direct avec l'air atmosphérique, ce qui entraîne généralement de faibles rayons d'influence (de l'ordre du mètre, voire moins). Néanmoins, dans le cas du SDS, le retour d'expérience montre aussi que des sols très perméables (de type sableux) présents sous une dalle peuvent permettre d'obtenir de bons rayons d'influence et de bonnes dépressions sous la dalle d'un bâtiment. Il est probable que la présence d'une dalle présentant une perméabilité faible après rebouchage des éventuelles défauts d'étanchéité réduit de manière considérable les échanges avec l'air atmosphérique, ce qui augmente d'autant le rayon d'influence. De même, les fondations extérieures des bâtiments peuvent empêcher ces échanges avec l'air atmosphérique et faciliter l'obtention de bons rayons d'influence et une bonne dépression dans le volume délimité par les fondations du bâtiment. *A contrario*, la présence éventuelle de fondations au centre du bâtiment peut limiter fortement le rayon d'influence sous la partie centrale du bâtiment.

***Présence d'une couche superficielle peu perméable (type limoneux) sur un horizon très perméable (type alluvionnaire)***

Lorsqu'une importante couche d'alluvions (20 m suivant la bibliographie) est présente sous une couche superficielle moins perméable, la bonne perméabilité des alluvions et l'important volume d'air du sol permettent d'obtenir des rayons d'influences très importants (supérieurs à 10 mètres), la couche superficielle moins perméable permettant d'isoler l'air des alluvions de l'air atmosphérique. Afin de pouvoir mesurer ces rayons d'influence et assurer un contrôle efficace de la dépression réalisée, il est important que les points de mesures soit installés jusque dans les alluvions, et non pas uniquement dans la couche limoneuse moins perméable.

***Non-homogénéité de sol***

Dans certains cas, une couche géologique perméable relativement locale peut se trouver dans une couche géologique moins perméable (cas d'un chenal sablo-graveleux dans un horizon limoneux ou argileux, ou d'une lentille sableuse dans un milieu argileux). Dans ce cas, le rayon d'influence sera limité, malgré une bonne perméabilité locale. Les effets de la dépression seront concentrés spatialement, notamment si cette passée sablo-graveleuse est humide ou gorgée d'eau. Cette configuration est de nature à remettre en cause le choix de la mesure constructive.

- **Mise en dépression du dispositif de drainage**

Lorsque le choix de l'appareil d'extraction est réalisé, l'étape suivante consiste à assurer la mise en dépression du dispositif de drainage. L'objectif est de réduire les concentrations en polluants à l'intérieur du bâtiment en récupérant par pompage les gaz du sol de la manière la plus homogène possible, et en les rejetant à l'atmosphère avant qu'ils n'entrent à l'intérieur du bâtiment. Plusieurs techniques sont disponibles :

- la mise en dépression sous la dalle, aussi appelée **Système de Dépressurisation Sous Dalle (SDSD)** est une méthode efficace pour empêcher la pénétration dans le bâtiment des polluants volatils [27]. Généralement, un orifice est creusé dans le sol au travers de la dalle à l'intérieur du bâtiment, afin de réduire la pression de l'air sous la dalle par aspiration verticale. Lorsque que cette technique est correctement dimensionnée et installée, le SDSD est la technique la plus efficace pour diminuer la concentration de polluants dans les bâtiments, et c'est cette méthode qui est la plus utilisée dans le domaine lorsqu'une diminution de 50 % de la quantité de polluants est requise. Des diminutions de concentrations jusqu'à 99,5 % ont même été constatées dans certains contextes [23].

Un point d'aspiration peut permettre l'aspiration des gaz et la mise en dépression d'une surface jusqu'à 250 m<sup>2</sup> sur une structure simple (sans obstacles et avec une perméabilité à l'air ad hoc) [28].

En cas d'absence d'information concernant les fondations du bâtiment, si un sous-sol présente différents niveaux enterrés et/ou si le test pilote ne permet pas d'obtenir des informations suffisamment précises concernant leur rayon d'influence, plusieurs points d'aspiration peuvent être mis en place (au moins un par pièce, par exemple) [28]. Ils doivent être localisés suffisamment près des chemins d'entrée des polluants dans le bâtiment (cela suppose que ces points d'entrée ont été identifiés lors du diagnostic préalable). En effet, pour être efficace, la dépression du sous-sol doit être maintenue au plus proche des entrées majeures de polluants. Par ailleurs, chaque point d'aspiration doit être protégé d'un film géotextile pour éviter l'entrée de graviers/sables/limons dans le réseau.

**L'opérateur doit s'assurer que la dépression maintenue soit de l'ordre de 4 à 10 Pa [25, 7].** Si une dépression plus faible est obtenue, l'installation devra faire l'objet d'une surveillance renforcée. **Il a néanmoins été démontré qu'une dépression d'1 Pa peut être suffisante dans certains cas pour diminuer les concentrations de composés volatils sous la dalle [29].** Dans tous les cas, le prestataire devra justifier de son choix par des mesures sur le terrain de l'existence d'une dépression en toute circonstance (été / hiver, périodes pressiométriques distinctes,...) et pendant toute la durée de fonctionnement de l'installation.

Il peut également être envisagé de réaliser une mise en dépression par aspiration horizontale [28], bien que cette méthode ne soit pas la plus utilisée. Cette méthode peut être rendu nécessaire en raison de la présence de réseaux dans la dalle du bâtiment (plancher chauffant par exemple) ou pour des raisons esthétiques (demande de l'occupant). Dans ce cas, l'entrée se fera par l'extérieur du bâtiment en perçant les murs latéraux après avoir décaissé le sol. Cette méthode est plus délicate et généralement plus onéreuse que le percement vertical de la dalle directement à l'intérieur du bâtiment. Dans certains cas, une tranchée drainante sous une dalle peut également être réalisée ;

Remarque :

*Différents retours d'expérience en France montrent qu'il est également possible d'adapter certains systèmes initialement prévus pour gérer l'intrusion de Radon pour traiter l'intrusion de certains composés volatils (notamment BTEX et H<sub>2</sub>S). La gestion de l'intrusion de vapeurs de solvants chlorés à l'aide de ces systèmes n'a, pour l'instant, pas été éprouvée.*

- la mise en dépression sous membrane, appelée aussi **Système de Dépressurisation Sous Membrane (SDSM)** est une autre technique envisageable pour les sols plus perméables (terre, graviers, sables,...) dans les espaces peu fréquentés (vide sanitaire). Une membrane (d'une épaisseur minimale de 250 à 400 µm si le lieu n'est pas fréquenté, ou d'une épaisseur plus importante si cette membrane est susceptible de subir des sollicitations mécaniques) imperméable aux gaz (PolyEthylène Haute Densité par exemple) peut être posée de manière à recouvrir le sol dans son intégralité [30]. Elle devra être lestée et si nécessaire recouverte d'une mince couche (5 à 6 cm) de mortier maigre voire de sable (protection contre les UV) pour garantir sa pérennité dans le temps. Dans ce cas, on aura préalablement vérifié qu'aucun matériau susceptible de poinçonner la membrane n'est présent sur le sol ou dans le matériau recouvrant.

La mise en place d'une membrane continue sur toute la surface concernée par le SDSM sera privilégiée. Néanmoins si cela n'était pas possible, une attention particulière sera portée à l'étanchéité au niveau des jonctions entre les lés (Figure 17). Ainsi, un recouvrement minimal de 15 cm est préconisé. Bien que la bibliographie indique que la fixation de la membrane peut être réalisée à l'aide d'un scotch double-face adéquat après nettoyage des surfaces à coller [6], il est fortement recommandé que la jonction soit réalisée par soudure thermique. Dans ce dernier cas, il faudra être vigilant vis à vis des préconisations du fabricant afin de ne pas endommager la membrane lors de cette soudure [15] et pratiquer un contrôle des soudures (ces opérations de pose, soudure et contrôle sont réalisés par des entreprises spécialisées et disposant des agréments nécessaires).

Remarque :

Comme indiqué précédemment dans ce document, dans le cas de la mise en place de géomembrane ou composés géosynthétiques, la prise en compte du fascicule n°10 « Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes » (en cours de révision) élaboré par le CFG est tout à fait préconisée de même que le recours à des entreprises certifiées ASQUAL.

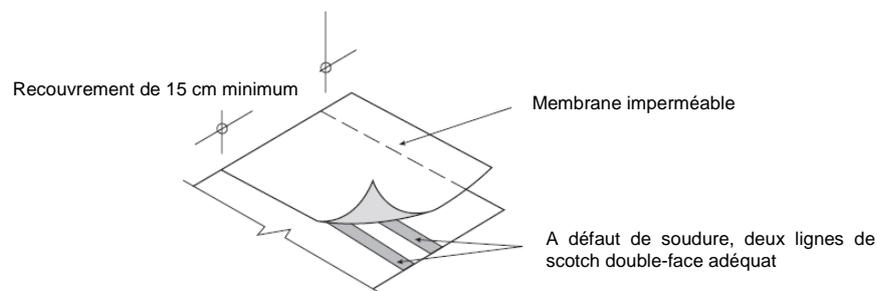


Figure 17 : Etanchéité de deux membranes [6].

Remarque :

Les risques ultérieurs d'interférences lors de mesures d'air doivent être évalués préalablement à l'utilisation de scotch double-face pour assurer la jonction des membranes. Dans le cas où ces risques seraient importants, la soudure thermique est à privilégier.

Pour éviter l'accumulation des vapeurs sous la membrane, un tube plastique (PVC, PEHD à définir en fonction des composés volatils mis en jeu) est inséré à travers un trou découpé dans cette membrane. Afin de favoriser la mise en dépression, la membrane est étanchée au niveau du raccordement. L'étanchéité du dispositif le long des murs de la pièce devra être réalisée avec le plus grand soin. Pour cela, la membrane pourra être fixée au mur à l'aide d'un « plat alu » ou équivalent (voir Figure 18). Une attention particulière sera portée sur l'étanchéité entre le mur et la membrane ainsi qu'au niveau des vis de fixation dans le mur (perçement de la membrane).

En cas d'utilisation de bois à la place de l'alu, il faut prévoir de traiter le bois en conséquence contre les insectes ou le pourrissement. Il existe également des systèmes complets (géocomposites d'étanchéité et de drainage), constitués d'une géomembrane imperméable, d'un géotextile drainant et de tubes crépinés entre les deux couches. Dans tous les cas, la mise en place d'un géotextile entre le sol et la membrane permettra à la fois de protéger la membrane contre tout risque de poinçonnement et à la fois d'uniformiser l'aspiration sous la membrane en évitant que la membrane ne se colle contre le sol. Un contrôle qualité est impératif pour s'assurer du bon positionnement du dispositif.

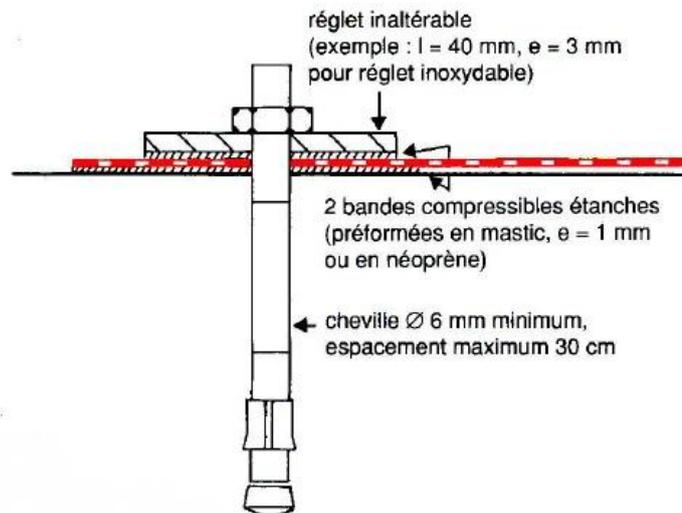


Figure 18 : Fixation de la membrane dans le mur [31].

L'efficacité de la mesure peut être largement remise en cause si la membrane est endommagée, ou si le système d'extraction est arrêté en cas de panne ou malveillance ;

- **la mise en place d'une dalle en béton directement sur le film imperméable qui recouvre un massif filtrant.** Cette solution sera privilégiée dans le cas d'une cave sur terre battue ; cette configuration étant de nature à faciliter les intrusions de vapeurs dans un bâtiment. Dans le cas d'une maison individuelle, la dalle béton aura une épaisseur minimale de 12 cm et sera obligatoirement armée (norme NF P 11-213-3 et DTU 21). Selon la norme, dans le cas d'un local à usage autre qu'industriel, l'épaisseur minimum sera de 13 cm (armée ou non), et de 15 cm (armée ou non) dans le cas d'un local de type industriel. L'aplanissement et le compactage du massif de graviers (diamètre des graviers de 2 cm minimum) seront soigneusement réalisés afin d'éviter que l'étanchéité par membrane ne puisse être remise en cause si le massif drainant venait à se compacter naturellement et que le poids du béton de la dalle endommageait la membrane. Il est également préconisé que l'épaisseur de la couche drainante soit 100 mm plus grande que le diamètre du tuyau

de drainage et que son épaisseur soit de 150 mm minimum [6]. Par ailleurs, la membrane devra être protégée de tout risque de poinçonnement par la mise en place de géotextiles.

Pour cette technique, des précautions particulières doivent être prises en cas de mitoyenneté. En effet, la couverture d'un sol de cave en terre battue peut favoriser la migration vers le bâtiment voisin en créant un chemin préférentiel.

- **Principaux facteurs influençant le choix d'une technique de dépressurisation**

Plusieurs éléments sont à prendre en compte préalablement au choix de la technique active car ils peuvent perturber sensiblement sa mise en place ou/et son efficacité :

- la structure du vide sanitaire (exemple compartimentée) ou l'inaccessibilité du vide sanitaire ne permet pas la mise en place d'une dépression active sous une membrane, les alternatives peuvent consister à :
  - assurer une aération (naturelle ou mécanique), de manière à maintenir le soubassement en dépression par rapport au bâtiment. Il convient également de rappeler qu'une dépressurisation passive est moins efficace qu'une dépressurisation active,
  - mettre en place un réseau de drainage des gaz du sol en périphérie du bâtiment, perpendiculairement à l'axe du front du panache gazeux, pour l'intercepter. Le dimensionnement du réseau (rayon d'influence) est alors primordial ;
- la porosité des murs de fondations ou la présence de sols perméables : le maintien d'une dépression est difficile, voire impossible à réaliser. Il est alors préférable d'appliquer une surpression dans les lieux occupés, ou d'opter pour une autre mesure constructive ;
- dans certains cas, la mise en dépression des murs peut s'avérer nécessaire. Un ou plusieurs points de succion sont alors insérés à l'intérieur du mur [28] ou dans l'espace permettant le passage du réseau électrique. Des doubles-cloisons peuvent aussi être construites. Après avoir renforcé l'étanchéité du mur à l'aide d'une membrane, d'un enduit ou de ciment mélangé à un adjuvant, un tuyau sera placé entre la double-cloison et le mur et relié à un extracteur.

Afin d'éviter de créer une dépression trop importante, qui pourrait augmenter l'aspiration de vapeurs derrière la double-cloison, une ouverture peut être réalisée dans la double cloison afin que l'air de la pièce puisse être aspiré. Cette ouverture est placée le plus loin possible du point d'aspiration, afin d'obtenir une circulation d'air optimale. Le dispositif peut être complété par l'installation d'un clapet anti-retour, afin d'éviter que l'air derrière la double cloison ne s'introduise dans la pièce en cas de défaillance du système d'aspiration. Cette méthode est habituellement utilisée en complément des autres systèmes de dépressurisation.

Il convient enfin de garder en mémoire que les tuyaux d'aspiration sont principalement fixés aux murs extérieurs des bâtiments, avec les éventuelles conséquences esthétiques (perception visuelle non négligeable) que cela peut engendrer. Cette question doit être abordée au préalable avec l'occupant (usager du bâtiment) afin de s'assurer de son accord avant tout test ou dimensionnement et trouver la localisation du point de rejet le plus satisfaisant.

Selon la typologie du soubassement, l'une ou l'autre des techniques sera privilégiée car plus efficace, comme le décrit le Tableau 5.

	Dépressurisation du sous-sol	Dépressurisation sous membrane	Dépressurisation dans les murs
Dallage ou dalle portée sur terre-plein	X		(X)
Pièce avec sol en terre battue	X		(X)
Dalle sur vide sanitaire		X	(X)

Tableau 5 : Application des différentes techniques de dépressurisation.

Rappel :

Comme signalé dans le cadre des mesures passives, il est tout à fait possible d'installer un Système de Dépressurisation de Sol, de manière préventive et passive, et de ne le mettre en service qu'en cas de nécessité [23], surtout dans le cas de milieux perméables (vide sanitaire, massif drainant). Les conduits assurent alors un tirage naturel des gaz en raison de phénomènes naturels, tels que les différentiels thermiques, les gradients de pression et le vent, qui créent une dépression naturelle dans la tuyauterie. Ainsi, l'air présent dans les tuyaux circulant à l'intérieur du bâtiment sera réchauffé et aura donc tendance à monter, ce qui créera une dépression à la base de la tuyauterie. De plus, la pression plus élevée sous la dalle que la pression atmosphérique favorisera la circulation de l'air. Enfin, le vent existant au-dessus de l'exutoire créera une dépression en sortie de tuyau qui aspirera l'air vers le haut. Cette aspiration peut être augmentée par l'installation d'une turbine rotative activée par le vent au sommet de la cheminée d'évacuation. Si cela ne s'avérait pas suffisant sur la base de résultats d'analyses et de modélisations, l'ajout d'un extracteur mécanique sera réalisé dans un deuxième temps.

Comme indiqué dans le paragraphe 4.4.4, l'efficacité du système de dépressurisation du sol passif sera significativement réduite en présence d'une nappe souterraine proche [23]. Le lecteur pourra se reporter à l'étude de l'ADEME et du CSTB indiquée dans le paragraphe 4.4.4 présentant un outil de dimensionnement d'un système de dépressurisation du sol passif [71].

- **Réglage de la dépression engendrée par le dispositif**

La dépression créée est ajustée par un réglage électrique de la puissance de l'extracteur, qui permet également de réduire les consommations électriques et les nuisances sonores générées par le système d'aspiration.

Dans le cas d'un système ayant plusieurs points d'aspiration, des vannes de réglages peuvent être installées au niveau des tuyaux d'aspiration afin d'ajuster précisément chaque aspiration.

- **Contrôle de la dépression engendrée par le dispositif**

Afin de s'assurer que la dépression engendrée par le dispositif (sous la dalle existante, sous la nouvelle dalle sur massif drainant ou sous la membrane) est suffisante, des points de contrôle doivent être installés afin de pouvoir mesurer la dépression créée (par exemple lors de la surveillance à chaque visite ou inspection).

Dans le cas d'une dalle béton, les points de contrôle seront installés au travers de la dalle. Leur mise en place sera étudiée afin de ne pas créer de chemins préférentiels pour les gaz. Ils seront équipés de bouchons amovibles étanches. Par ailleurs, leur scellement en surface sera réalisé à l'aide d'un mélange bentonite-ciment. Afin de s'assurer de l'étanchéité des points de contrôle, un suivi des concentrations du CO<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub> dans les gaz de sols lors de sa purge sera un minimum. Il est rappelé que la concentration en CO<sub>2</sub> doit augmenter et celle de l'O<sub>2</sub> diminuer afin de confirmer l'absence de pénétration de l'air atmosphérique (par exemple, un taux d'O<sub>2</sub> de 20 % montre que l'étanchéité est défectueuse).

Le contrôle de la dépression créée par le dispositif sera réalisé à l'aide d'un (ou plusieurs) dispositif(s) de mesure permanent(s) (qu'il(s) fonctionne(nt) en continu ou non), pouvant également être reliés à un système d'alarme via une connexion internet ou téléphonique. Ainsi, des capteurs de pression différentielle, mesurant la différence de pression effective entre l'air sous la dalle et la pièce, seront privilégiés.

Remarque :

*L'utilisation de manomètres, à la place des capteurs de pression différentielle, peut également être envisagée. Néanmoins, lorsque ces manomètres sont reliés aux tuyaux d'aspiration (et non connectés directement aux points de contrôle réalisés à travers la dalle), ils ne permettent pas de vérifier la dépression effective sous la dalle, mais seulement de l'estimer à l'aide de tests réalisés lors de la mise en service du dispositif. Il conviendra, dans ce cas, de prouver que la seule mesure réalisée à l'aide du manomètre suffira à garantir l'existence, en permanence, d'une dépression suffisante sous la dalle. Ainsi, dans le cas d'une membrane étanche, un piquage à travers le tuyau d'aspiration peut être créé afin de connecter directement un manomètre.*

- **Évacuation de l'air du dispositif de drainage**

Les points d'aspiration sont reliés à un réseau plastique (PVC, PEHD à définir en fonction des composés volatils mis en jeu) de l'ordre de 100 mm de diamètre.

Remarque :

*Le type de canalisations sera également défini en fonction de leur résistance aux dépressions susceptibles d'être mises en place. Il sera ainsi choisit entre des tuyaux dits d'« écoulement » (plus fragiles), des tuyaux « pressions » ou en ABS,...*

Les gaz sont aspirés au moyen d'un extracteur suffisamment puissant pour maintenir la dépression. La puissance et le type d'extracteur sont déterminés à l'aide d'essais préalables, réalisés sur place. Les conduits sont placés à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment, pour des raisons techniques ou esthétiques. L'air rejeté doit obligatoirement être évacué au-dessus du toit (au moins 30 cm au-dessus du toit), à au moins 3 m de l'ouverture la plus proche (éviter les refoulements) et à au moins 3 m de l'habitation la plus proche [6, 27]. L'extrémité de la cheminée d'évacuation sera équipée d'une protection contre la pluie [6].

S'il existe un voisinage immédiat, l'utilisation d'un extracteur avec rejet d'air peut provoquer des nuisances et sera donc installé de manière à éviter toute gêne.

Dans tous les cas, la qualité de l'air rejeté sera contrôlée. L'absence de traitement au point de rejet devra être justifiée au regard de la qualité de l'air aspiré (réalisation d'un bilan massique par exemple).

Le risque de condensation de l'humidité de l'air du sol dans le conduit de rejet situé en extérieur (principalement en hiver) est à prendre en compte afin que l'extracteur ne soit pas endommagé par la condensation [28].

#### 4.5.3. Limiter l'accumulation de vapeurs dans un bâtiment

##### a) *Cadre réglementaire*

Sans s'engager dans un descriptif exhaustif de la réglementation en matière de ventilation des bâtiments, les principaux textes auxquels le lecteur pourra se reporter sont rappelés ci-après :

- dans le résidentiel :
  - le décret du 22 octobre 1955 et l'arrêté du 14 novembre 1958 relatifs à l'aération des logements neufs introduisent le principe d'aération par pièce, réalisée soit par ouverture des fenêtres, soit de façon permanente (au moyen de grilles d'aération ou d'un système de ventilation) ;
  - l'arrêté du 22 octobre 1969 relatif à l'aération des logements neufs fixe le principe de la ventilation générale et permanente des logements, par ventilation naturelle des conduits à tirage naturelle, ou par ventilation mécanique. Dans les deux cas, les pièces principales doivent comporter des entrées d'air et l'évacuation de l'air se fait dans les pièces de service (cuisine, salles d'eau, toilettes), l'air pouvant circuler librement des pièces principales vers les pièces de service ;
  - les arrêtés du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983 relatifs à l'aération des logements neufs, en vigueur pour les nouvelles constructions ont conservé le principe de ventilation générale et permanente de l'arrêté de 1969 mais fixent des exigences de débits minimums d'air extrait dans les pièces de service, et autorisent la modulation des débits ;
- dans les bâtiments à usage autre que résidentiel :
  - ils sont soumis aux exigences du Règlement Sanitaire Départemental ou du Code du Travail (Titre 1<sup>er</sup>, Chapitre II) selon que les usagers exercent une activité salariée ou non.

##### b) *Mise en place d'une ventilation mécanique*

Le principe consiste à favoriser la circulation de l'air dans différentes parties d'un bâtiment en utilisant un équipement spécifique. La ventilation mécanique peut ainsi être assurée au niveau du soubassement (vide sanitaire, cave,...), mais également au niveau de la cellule occupée. Elle permet un renouvellement plus important de l'air dans le bâtiment, et limite ainsi l'accumulation de vapeurs à l'intérieur de ce bâtiment. **Dans des conditions normales d'utilisation, la ventilation forcée peut permettre un renouvellement de l'air jusqu'à 5 volumes/heure [10].** Dans le cas d'un nouveau bâtiment BBC, il faudra néanmoins s'attacher à vérifier que cette ventilation est compatible avec les objectifs BBC, la surventilation ne faisant pas partie des exigences BBC.

La ventilation mécanique dans un vide sanitaire ayant été abordée dans le paragraphe 4.5.2.c), cette partie abordera uniquement la ventilation dans des pièces à vivre.

### c) **Ventilation des pièces dans un bâtiment**

La ventilation des pièces d'un bâtiment peut également être envisagée afin de limiter l'accumulation des vapeurs de gaz dans ces pièces. Lorsque cela est possible, on privilégiera les procédés permettant de mettre le bâtiment en surpression afin de limiter les intrusions de vapeurs.

Différents types de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) existent :

#### - **VMC Simple Flux par Insufflation (voir paragraphe 4.5.2.b)**

Le principe de la mise en surpression d'un bâtiment ou d'un local a été présenté dans le paragraphe 4.5.2.b).

On notera cependant que la VMC Simple Flux par Insufflation est généralement utilisée pour des locaux à usage spécifique avec un contrôle précis (par exemple les laboratoires, les salles de mesures,...).

Elle n'est généralement pas mise en œuvre dans les bâtiments à usage résidentiels (système non réglementaire pour du neuf car non présenté dans le Règlement Thermique 2012). On y privilégiera la VMC Simple Flux par Extraction ou la VMC Double Flux dès qu'elle est possible. Dans ce dernier cas, on pourra déséquilibrer le dispositif afin d'insuffler plus d'air que l'on en extrait et ainsi mettre le bâtiment en surpression. L'insufflation d'air dans les bâtiments résidentiels reste envisageable pour les vides sanitaires.

#### - **VMC Simple Flux par Extraction.**

Dans le cas d'une VMC Simple Flux par Extraction, il s'agit d'extraire l'air du bâtiment (généralement dans les pièces humides voire dans les couloirs) et de laisser rentrer l'air extérieur dans les pièces fréquentées par de petites arrivées d'air dans les fenêtres ou par des entrées d'air créées dans les murs. **On prendra garde dans ce cas à créer suffisamment d'arrivées d'air afin de ne pas créer une dépression trop importante dans la maison.**

Quelques consignes sont à respecter lorsque la mise en place d'un système de ventilation par extraction mécanique est proposée, comme d'assurer une ventilation sur le principe du balayage (Figures 19 et 20) afin d'éviter les zones mortes. L'air doit circuler librement dans chaque recoin du bâtiment, sans obstacles : aménagements d'air adaptés, passages aménagés sous les portes, etc.

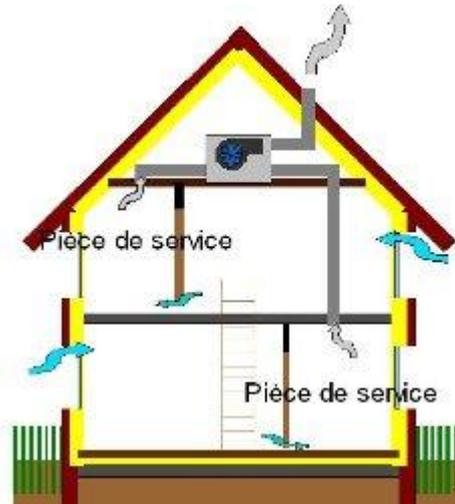


Figure 19 : Principe de ventilation mécanique simple flux par balayage (vue en coupe).

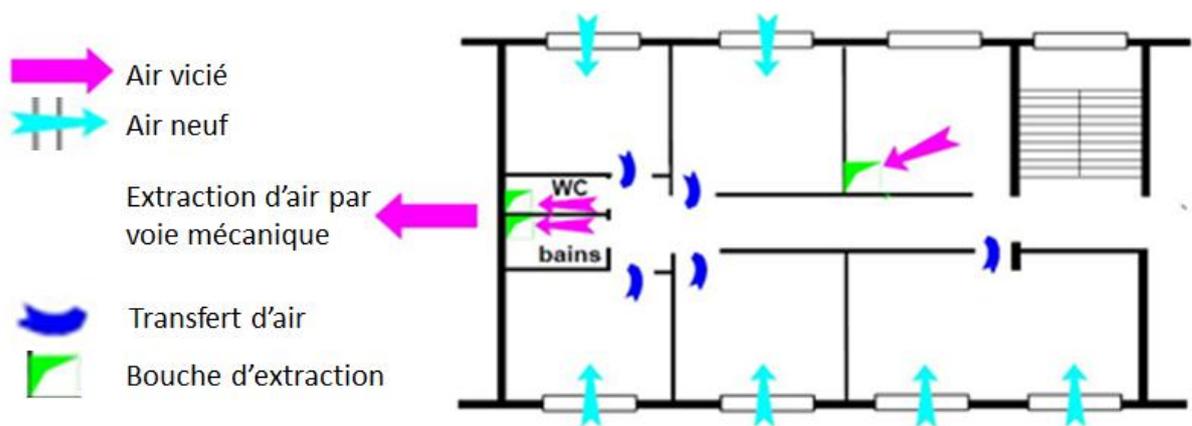


Figure 20 : Principe de ventilation mécanique simple flux par balayage (vue en plan) [32].

Ce système, bien que relativement peu onéreux par rapport à une VMC Double Flux (voir ci-dessous), est très sensible vis-à-vis des paramètres physiques :

- l'épaisseur des murs à percer (pour le passage des gaines ou la création de nouvelles entrées d'air dans les murs extérieurs),
- l'existence d'ouverture dans les fenêtres,
- la présence d'une gaine technique verticale, de combles ou de faux plafonds pour passer les réseaux,
- le caisson de la VMC doit rester accessible,
- etc.,

mais aussi des comportements de l'occupant. En effet, avec de faibles différences de pression entre les pièces du bâtiment, le système peut être perturbé par tirage thermique mais aussi à l'ouverture des portes [32]. Enfin, une attention particulière doit être portée aux conditions climatiques. En effet, si le climat est froid, une sur-ventilation du bâtiment peut induire un inconfort pour l'occupant et conduire à une perte énergétique.

Remarque :

À titre informatif, des travaux sont en cours au niveau de l'Union Européenne visant à interdire à la vente à l'horizon 2020 les systèmes de Ventilation Mécanique Contrôlé Simple Flux (y compris dans le cadre d'une rénovation d'un bâtiment existant) compte tenu de leur efficacité énergétique. En effet, l'Union Européenne souhaite privilégier des dispositifs plus économes en énergie (Directive 2009/125/EDC liée à « l'éco-design »).

- **VMC Double flux [33]**

Il s'agit d'insuffler de l'air extérieur filtré dans les pièces fréquentées du bâtiment, et d'extraire l'air intérieur vicié des pièces humides (Figure 21). La différence avec la VMC simple flux réside dans le fait que les deux circuits passent dans un échangeur thermique à plaques, dans lequel la chaleur de l'air vicié préchauffe l'air neuf avant qu'il soit insufflé dans les pièces (récupération jusqu'à plus de 90% dans les modèles récents). Les deux circuits sont indépendants l'un de l'autre, chacun possédant son propre ventilateur. L'ajout d'une résistance thermique permet de chauffer davantage l'air neuf si nécessaire. En été, l'air insufflé peut généralement être également refroidi et diminuer la température de la pièce (climatisation). Enfin, il est possible de régler une VMC Double Flux afin que le débit d'air insufflé soit supérieur au débit d'air extrait, ce qui permet de **mettre le logement en légère surpression et de limiter les intrusions de vapeurs**.

L'installation d'une VMC Double Flux est plus onéreuse et plus contraignante (double réseau de conduits, isolation thermique de ces conduits, coffrages pour cacher les conduites, coût du caisson Double Flux et de l'échangeur thermique, besoin de place dans les combles, faible hauteur sous plafond,...). L'économie se réalise sur le long terme, grâce à la récupération de l'énergie dans l'échangeur thermique.

Il est généralement complexe d'intégrer cette installation dans un bâtiment existant. En effet, il est rare qu'une gaine verticale existe entre les différents niveaux. Il est donc nécessaire pour passer les gaines de percer les différents planchers. Afin d'éviter toute création de chemin préférentiel, l'étanchéification des passages de gaines devra être réalisés avec un résilient adéquat (généralement de la mousse polyuréthane, du mortier adhésif ou équivalent). L'intégration d'une VMC Double Flux est bien plus aisée et efficace dans une nouvelle construction.

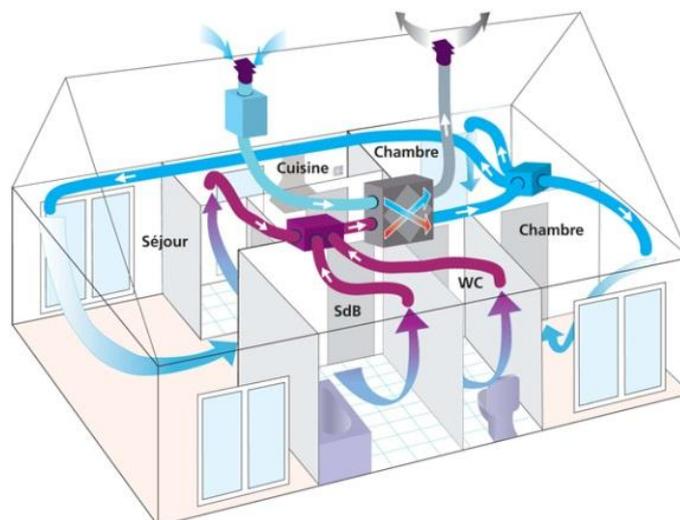


Figure 21 : Principe d'une VMC Double Flux [33].

présente, en fonction de l'usage d'un bâtiment, différents débits réglementaires à respecter ou des débits recommandés pour leur ventilation.

Type de bâtiment		Pièce	Débits en m <sup>3</sup> /h	Source
Résidentiel individuel (débits dépend du nombre de pièces principales dans la maison)	Extraction d'air vicié	Salle de bain	15 à 30	<b>Arrêté du 24/03/1982, modifié le 28/10/1983</b>
		WC	15 à 30	
		Cuisine	20 à 45 (au minimum)	
		Débit total minimal à extraire	35 à 135	
	Insufflation d'air neuf	Pièce à vivre	30 et 0,5 vol/h	<b>Recommandations ICEB [34]</b>
Tertiaire/collectif		Pièce	Débits d'air neuf en m <sup>3</sup> /h et par occupant	<b>Règlement sanitaire départemental type Article 64</b>
		Locaux d'enseignement	15	
		Chambre collectives, bureaux,	18	
		Locaux de vente ou à usage sportif	22 à 25	
		Salle de bains / WC individuels	15	
		WC / salle de bains collectif	30 à 60	
		Salle de lavage /repassage	5 par m <sup>2</sup> de surface	
		Cuisines	10 à 25 <sup>1</sup>	
Activité salariée		Bureau	25	<b>Code du travail</b>
		Restauration, réunion	30	
		Atelier	45	
		Autres locaux	60	
Parcs de stationnement			900 m <sup>3</sup> /h et par voiture	<b>Arrêté du 31 janvier 1986, modifié en 2006</b>

Tableau 6 : Débits recommandés ou réglementés dans différents bâtiments.

<sup>1</sup> Suivant le nombre de repas servis simultanément

#### **4.5.4. De l'efficacité des mesures actives**

Les techniques actives correctement dimensionnées et installées offrent très souvent des résultats meilleurs que les systèmes passifs utilisés seuls. Ce sont les systèmes les plus utilisés lorsqu'une diminution importante des concentrations de vapeurs dans l'air intérieur est nécessaire. Ainsi, différents retours d'expérience tendent à montrer une diminution des concentrations dans les bâtiments de l'ordre d'un facteur 10 à 100 pour les Systèmes de Dépressurisation Sous Dalle, et de l'ordre d'un facteur 2 à 10 pour les systèmes de type VMC. Il est néanmoins rappelé que les techniques passives ne doivent pas être mises de côté pour autant. Elles constituent généralement un préalable nécessaire avant la mise en place de toute technique active, dont elles vont renforcer l'efficacité si celles-ci devaient être mises en place. Ces mesures actives engendrent néanmoins quelques inconvénients : elles consomment de l'énergie électrique, nécessitent un entretien annuel, peuvent engendrer une nuisance sonore et leur durée de vie est nettement inférieure à celle du bâtiment [19].

## 5. Prévenir l'intrusion de substances volatiles dans les réseaux

Les canalisations d'eau potable se doivent d'assurer et de maintenir la qualité de l'eau qu'elles véhiculent. Par conséquent, elles doivent jouer le rôle de barrière et protéger les eaux de toutes contaminations internes et externes. Cependant, les canalisations enterrées, lorsqu'elles traversent une zone polluée, peuvent être sujettes à un phénomène physique : la perméation.

### 5.1. PRÉSENTATION DE LA PERMÉATION

C'est un phénomène qui consiste en un transfert de vapeur depuis le sol jusqu'à l'intérieur d'une canalisation, même sous pression. Dans les zones très polluées, le phénomène de perméation peut apparaître sans même qu'il y ait contact des sols contaminés avec les canalisations ou les joints...

Les molécules de gaz de petites tailles peuvent en effet passer à travers la structure d'un matériau poreux par diffusion, sans nécessairement de défaillance mécanique du plastique [35]. Les conduites (eau, gaz...) représentent alors autant d'entrées potentielles de produits polluants dans les bâtiments. La perméation dans les réseaux de distribution d'eau potable apparaît lorsque des contaminants migrent à travers la paroi de la canalisation ou à travers des jonctions qui assurent un lien entre les différents canaux [36]. Dans 89 % des cas recensés aux USA, il s'agit d'accidents liés à des produits pétroliers sous forme pure (flottant ou solutions non aqueuses), provenant de fuites ou de déversements [35]. Dans 95 % des cas, la contamination des sols à l'origine de la perméation s'est produite après l'installation de la canalisation [35].

Les contaminants usuellement rencontrés dans les mécanismes de perméation à travers les canalisations flexibles sont des composés organiques lipophiles tels que les solvants chlorés, les HAP (notamment les plus légers), ou encore les BTEX. Ces derniers ont la particularité de diffuser facilement au travers de ces matériaux, d'altérer éventuellement le matériel et de migrer dans l'eau potable [36, 37].

Ce processus physico-chimique implique trois étapes [35] :

- le contaminant s'accumule préférentiellement à l'interface entre le sol et la paroi de la canalisation (par absorption ou adsorption) ;
- le contaminant diffuse à travers les pores du matériau ;
- le contaminant quitte la phase solide et diffuse pour atteindre le fluide qui circule dans la canalisation (désorption ou évaporation).

La perméation reste toutefois un phénomène relativement rare. Elle est fonction de nombreux paramètres présentés dans les paragraphes suivants.

#### Remarque :

*Lorsque des canalisations d'eaux usées traversent des zones polluées, elles peuvent également être sujettes à la perméation. Les canalisations d'eaux usées débouchant directement dans les pièces à vivre par l'intermédiaire des éviers, lavabos, douches ou WC, les substances volatiles peuvent ainsi être libérées dans l'air intérieur de la maison. C'est une des raisons pour lesquelles il n'est, par exemple, pas recommandé de réaliser de prélèvements d'air intérieur à proximité de ces ouvertures.*

## 5.2. LES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA PERMÉATION

### 5.2.1. Influence du type de canalisation

Deux catégories de canalisations sont à distinguer : les canalisations métalliques d'une part (en fonte ductile ou en acier) et les canalisations non métalliques d'autre part (en PVC, PE, PEHD et PB).

Les canalisations en acier sont hautement résistantes à la perméation [38]. La perméation est généralement associée à des conduits et joints non métalliques.

#### Remarque :

*Il existe également des canalisations en matériau multicouches qui peuvent se révéler une solution intéressante. Ces canalisations sont composées au minimum de trois couches superposées : une couche interne, une couche externe en PE et une barrière en aluminium entre les deux [39]. La couche en aluminium est totalement imperméable et empêche la perméation des gaz.*

#### **a) La perméation à travers les canalisations**

Les canalisations flexibles impliquées dans les phénomènes de perméation sont généralement en PE, PB et dans une moindre mesure en PVC. Ces trois types de matériaux sont utilisés dans les conduites de transport de l'eau du robinet.

La perméation de canalisations en PE et en PB peut être effective pour de faibles concentrations de polluants dans les sols contaminés. Pour le PE, la propension de perméation au polluant va dépendre de la densité du matériau constitutif de la canalisation : plus la densité est importante, moins les polluants pourront diffuser à travers le matériau [40].

En ce qui concerne les canalisations en PVC, les coefficients de diffusion des substances sont bien plus faibles que pour les canalisations en PE et PB. Cette différence provient de la matrice en elle-même : le PVC est un polymère amorphe, alors que le PE et le PB sont des caoutchoucs semi-cristallins, plus poreux. La perméation à travers le PVC pourrait alors en théorie prendre des milliers d'années [38]. Cependant, certains composants, à l'instar du chlore, utilisé pour désinfecter l'eau en sortie de traitement, peuvent faire gonfler le polymère accélérant ainsi son vieillissement, ce qui favorise la perméation à travers ce matériau [40].

Enfin, l'épaisseur de la paroi de la canalisation a également une influence sur la perméation, qui augmente avec la diminution de l'épaisseur [35]. Le diamètre d'une canalisation en polymères plastiques et l'épaisseur de sa paroi étant généralement liés pour des raisons techniques (plus le diamètre d'une canalisation augmente, plus l'épaisseur de la paroi augmente), la perméation augmente également avec la diminution du diamètre des canalisations en polymères plastiques.

#### **b) La perméation à travers les joints de canalisations**

Si les canalisations en plastique sont soumises à une perméation potentielle, les joints utilisés sont aussi susceptibles d'être soumis à un mécanisme de perméation. Ceux qui sont le plus couramment utilisés sont des joints en caoutchouc à base de styrène-butadiène, caoutchoucs chlorés, fluorés...

Une étude du Plastic Pipe Institute a permis de comparer la capacité de diffusion de certains composés à travers différents types de joints [41]. Les joints en caoutchouc à base de styrène-butadiène ou d'acrylonitrile butadiène sont plus appropriés pour des sols contaminés. La deuxième solution est toutefois plus onéreuse.

Les composés organiques diffusent 5 à 100 fois plus vite à travers les joints qu'à travers de la canalisation elle-même. Néanmoins, les conséquences en termes de contamination des eaux sont modérées puisque la surface de transfert de masse associée aux joints est bien plus faible que celle de la canalisation. De plus, ces joints sont généralement localisés dans des endroits où le débit est continu et soutenu : la dilution est donc accrue [38].

### **5.2.2. Influence des paramètres physico-chimiques environnants**

Le perméation d'un composé chimique au travers d'une canalisation est un phénomène complexe, dépendant de nombreux paramètres [36, 38], parmi lesquels :

- la nature et l'activité chimique des sols environnants ;
- le taux de matière organique sur laquelle s'adsorbent les polluants, dans les sols ;
- le niveau de la nappe et le taux d'humidité dans le sol (cela détermine si la perméation provient de la phase aqueuse ou gazeuse) ;
- le temps d'exposition ;
- la température environnante (la perméation augmente généralement avec la température) ;
- le débit et la turbulence du liquide dans la canalisation (les composants s'accumulent dans les extrémités de conduites et pas dans les sections principales où le diamètre et le débit sont beaucoup plus importants) ;
- le temps de stagnation du liquide dans la canalisation ;
- etc.

### **5.2.3. Influence des polluants**

#### **a) Influence du composé chimique**

La perméation au travers d'une canalisation dépend enfin de la nature même du polluant lui-même, notamment :

- de la concentration en polluant (la perméation augmente avec la concentration) ;
- du type de composé (les molécules linéaires, flexibles et symétriques, diffusent jusqu'à 1 000 fois plus vite que les molécules rigides [42]. Un polluant de structure moléculaire similaire au polymère va pénétrer aussi plus rapidement) ;
- de la présence d'un mélange de composants (la présence d'un composant très perméable augmente la perméabilité des autres composants peu perméables) ;
- de la répartition du polluant entre les phases gazeuse, solide et aqueuse (cela détermine la mobilité du polluant dans les sols).

Les polluants organiques les plus concernés par la perméation sont :

- perméation importante : polluants organiques volatils, composés organiques lipophiles : aromatiques alkylés et hydrocarbures chlorés. Plus précisément, cela concerne les BTEX, les chlorés (trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, dichlorométhane) et les chlorobenzènes ;
- perméation faible : composés polaires : cétones et phénols, alcanes légers (cyclohexane), certains HAP (naphtalène), certains aldéhydes (benzaldéhyde);
- en revanche, les molécules complexes comme les pesticides ne traversent pas les conduites.

## b) Influence des concentrations

- **Préambule**

Les tableaux présentés ci-après n'ont pas vocation à se substituer à l'expertise du prestataire SSP pour effectuer un contrôle de la qualité des sols en cas de doute ou d'indice organoleptique.

- **Dans les sols environnants la canalisation**

Le Tableau 7 présente des valeurs limites, utilisées au Royaume-Uni, pour différents polluants au-dessus desquelles il est recommandé d'apporter une attention particulière à la sélection du matériau constituant la canalisation, afin de limiter les risques de perméation.

	Polluant	Valeurs limites dans les sols (mg/kg MS)		Polluant	Valeurs limites dans les sols (mg/kg MS)
Composés organiques	Goudron de houille	50	Composés organiques	Benzène	0,5
	Cyclohexane	50		Toluène	50
	Tétrachlorocarbène	0,15		Xylènes	2,5
	Trichloroéthylène	1,5		Ethylbenzènes	-
	Tétrachloroéthylène	0,5		Propylbenzènes	-
	1,2-dichloroéthylène	-		1,3,5-Triméthylbenzène	25
	1,1,1-trichloroéthane	-		Phénol	5
	dichloropropane	-		Chlorophénols	1
	bromométhane	20		Dichlorophénols	3
	Chlorobenzène	0,1		Trichlorophénols	5
	Dichlorobenzènes	0,015		HAP	50
	Trichlorobenzènes	0,25		HCT	50

Tableau 7 : Valeurs indicatives dans les sols en vue de la sélection du matériau constituant une canalisation [43, 44].

Le Tableau 8 présente les valeurs limites recommandées par les organismes hollandais dans les sols au-dessus desquels la qualité de l'eau potable circulant dans des tuyaux en plastique pourrait être altérée. **Compte tenu des différences entre les valeurs présentées dans les deux tableaux (7 et 8), il est recommandé de retenir les valeurs les plus basses comme valeur limite au-delà de laquelle une attention particulière quant au choix du matériau utilisé est nécessaire.**

Polluant	Valeurs limites dans les sols (mg/kg MS)		Polluant	Valeurs limites dans les sols (mg/kg MS)	
	Tuyau en PE	Tuyau en PVC		Tuyau en PE	Tuyau en PVC
Tétrachlorocarbone	1	Aucune	Benzène	0,1	2 000
Trichloroéthylène	0,01	500	Toluène	0,25	2 000
Tétrachloroéthylène	0,1	400	Xylènes	0,1	3 000
1,2-dichloroéthylène	0,2	2 500	Ethylbenzènes	0,5	2 000
1,1,1-trichloroéthane	0,5	30 000	Propylbenzènes	2	3 000
Dichloropropane	0,2	1 000	1,3,5-Triméthylbenzène	0,1	3 000
Bromométhane	-	-	Phenol	45	Aucune
Chlorobenzène	0,3	1 500	Chlorophénols	5	Aucune
Dichlorobenzènes	-	-	Dichlorophénols	-	-
Trichlorobenzènes	-	-	Trichlorophénols	5	Aucune

Tableau 8 : Valeurs limites hollandaises dans les sols au-dessus la qualité de l'eau pourrait être altérée selon le type de canalisation [44].

- **Dans les eaux environnantes**

Le Tableau 9 présente les valeurs limites recommandées par les organismes hollandais pour les eaux qui peuvent rentrer en contact avec la paroi extérieure de la canalisation au-dessus desquelles la qualité de l'eau potable circulant dans des tuyaux en plastique pourrait être altérée (eaux météoriques, eaux de ruissellement, nappe souterraine, polluées ou en contact avec des terres polluées,...).

Il est d'ores et déjà rappelé que les concentrations présentées dans le Tableau 9 ne sont valables que dans le cas d'un composé seul. Dans le cas d'un mélange de composés, les synergies d'actions de mélange de contaminants ont tendance à diminuer encore ces seuils [38].

Polluant	Valeurs limites dans les eaux environnantes (µg/L)		Polluant	Valeurs limites dans les eaux environnantes (µg/L)	
	Tuyau en PE	Tuyau en PVC		Tuyau en PE	Tuyau en PVC
Tétrachlorocarbone	20	Aucune	Benzène	10	450
Trichloroéthylène	10	275	Toluène	15	125
Tétrachloroéthylène	25	40	Xylènes	10	50
1,2-dichloroéthylène	20	850	Ethylbenzènes	10	40
1,1,1-trichloroéthane	10	1 100	Propylbenzènes	10	15
Dichloropropane	20	275	1,3,5-Triméthylbenzène	3	5
Bromométhane	-	-	Phénol	23 000	Aucune
Chlorobenzène	5	50	Chlorophénols	4 000	Aucune
Dichlorobenzènes	-	-	Dichlorophénols	-	-
Trichlorobenzènes	-	-	Trichlorophénols	35	Aucune

Tableau 9 : Valeurs limites hollandaises dans les eaux environnantes au-dessus la qualité de l'eau pourrait être altérée selon le type de canalisation [44].

### 5.3. LES SOLUTIONS POSSIBLES VIS-À-VIS DE LA PERMÉATION

#### 5.3.1. Mise en évidence de la perméation

La majorité des polluants concernés par les phénomènes de perméation sont les composés organiques volatils [38]. La présence de la plupart de ces contaminants peut être identifiée par différents moyens, le but étant d'empêcher et de prévenir une éventuelle contamination de la conduite :

- le goût et l'odeur de l'eau, même si ces paramètres organoleptiques restent subjectifs et imprécis. Dans la plupart des cas, le risque sanitaire apparaît bien avant que les paramètres organoleptiques aient permis d'identifier la pollution (Tableau 10) ;

- Contaminant	- VTR (µg/L)	- Seuil gout (µg/L)	- Seuil odorat <sup>2</sup> (µg/L)	- Détection avant risque ?
- Benzène	- 5	- 500-4500	- 2000	- Non
- Ethylbenzène	- 700	- 29	- 29	- Oui
- Xylènes	- 10	- ?	- 2,2	- Oui
- Naphtalène	- 300	- ?	- 300	- Non
- Dichloroéthane	- 5	- 29000	- ?	- Non
- Tétrachloroéthylène	- 5	- 300	- ?	- Non

Tableau 10 : Paramètres organoleptiques et risque sanitaire [38].

<sup>2</sup> Contrairement au Tableau 1 de la partie 4.1.2 présentant les concentrations dans l'air à partir desquelles la présence d'un composé peut être détectée à l'odeur, le Tableau 10 présente les concentrations dans l'eau à partir desquelles la présence d'un composé est décelable à l'odeur.

- l'échantillonnage des gaz du sol (à noter qu'une méthode passive permet de disposer d'un temps d'intégration plus important) ;
- des analyses de la qualité des eaux circulant dans les canalisations pouvant faire l'objet de perméation et ayant traversé des zones contaminées ou potentiellement contaminées par des polluants volatils.

**D'après la bibliographie [44], afin d'appréhender le phénomène de perméation, les analyses préconisées sont les suivantes :**

- **9 composants devraient être recherchés préférentiellement** : tétrachlorure de carbone, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, chlorobenzènes, benzène, toluène et (o, p et m-) xylènes ;
- **9 autres paramètres sont conseillés** : dichlorométhane, 1,2-dichloréthane, 1,1,1-trichloréthane, 1,2-dichloropropane, chlorure de vinyle (notamment pour les conduites en PVC d'avant 1977 [38]), bromure de méthyle, éthylbenzène, et di- et tri-chlorobenzènes ;
- Certaines sources recommandent aussi de rechercher les phénols (phénols et mono/di et trichlorophénols). Ils peuvent provenir du relargage de produits bitumineux utilisés pendant longtemps pour protéger les conduites.

Dans les cas où le phénomène de perméation a été constaté, la mesure de gestion qui consiste à distribuer des bouteilles d'eau potable à la population affectée n'est évidemment ni suffisante ni durable dans le temps. Certaines personnes peuvent tout de même être exposées au polluant par le biais d'autres modes d'exposition : inhalation des vapeurs et ingestion lors de la douche notamment.

### **5.3.2. Diminuer les risques de perméation**

#### **a) Choisir l'emplacement d'une nouvelle canalisation**

D'une manière générale, il convient d'éviter tout contact entre des canalisations d'eau potable et des sols pollués par des substances hautement sensibles à la perméation. Ainsi, lors de l'installation d'une nouvelle canalisation, on évitera, en tout état de cause, de l'implanter dans une zone contaminée ou susceptible de l'être (à proximité d'un bac de stockage d'hydrocarbures ou de solvants par exemple). Par ailleurs, le remblaiement de la tranchée avec des matériaux sains « non polluants » doit être prévu. Ce point est notamment rappelé dans la norme NF P98-331, « Chaussées et dépendances : Tranchées : ouverture, remblayage, réfection ». En cas de doute sur la qualité des sols, ou dans le cas où le passage d'une canalisation d'eau ne pourrait éviter une zone potentiellement polluée, la mise en place de conduites métalliques ou multicouches doit être prévue pour prévenir le risque de perméation.

#### Remarque :

*Afin de faciliter les interventions futures, d'améliorer la connaissance des réseaux et de conserver la mémoire des travaux réalisés sur site, il est fortement recommandé d'actualiser ou de créer des plans de récolement des réseaux, suite à l'intervention sur la canalisation (remplacement ou déplacement).*

## b) Remplacer les canalisations contaminées

Une solution de remédiation consiste à retirer les canalisations contaminées pour les remplacer par une canalisation appropriée imperméable [36]. En effet, une conduite ayant subi une perméation aura tendance à être plus sensible à une nouvelle perméation. Ce remplacement peut toutefois induire un coût important.

Il convient de noter qu'un simple lavage à grande eau ne suffit pas à résoudre les problèmes de contamination liés à la perméation comme l'illustre le Tableau 11. Cette pratique peut même accentuer considérablement le phénomène de perméation, notamment en altérant la couche protectrice formée au fil du temps sur la surface interne de la conduite, surtout si celle-ci est ancienne. Dans le Tableau 11, le cas n° 1 correspond à une canalisation neuve, et le cas n° 2 à une canalisation contaminée ayant subi un lavage à grandes eaux.

Contaminant	Cas 1 (canalisation neuve)	Cas 2 (canalisation contaminée lavée à grandes eaux)
Toluène	36 jours	54 min
Dichlorobenzène	53 jours	20 min
Tétrachloroéthylène	13 jours	2,5 min

Tableau 11 : Temps de pénétration à travers une canalisation en PB de différents polluants [41].

Les joints doivent être résistants face au phénomène de perméation.

Le Tableau 12 présente, pour information, les seuils d'imperméabilité déterminés par l'institut hollandais KIWA, spécialisé dans le contrôle qualité et la certification, lors du contrôle de l'imperméabilité d'un tuyau PE-Al-PE vendu dans le commerce pour différents composés chimiques selon le tuyau utilisé [45].

Bien que ces seuils ne soient valables que pour le tuyau étudié, la grande différence entre les tuyaux en plastiques classiques et les tuyaux avec barrière en aluminium illustre parfaitement l'efficacité de ces derniers.

Comme indiqué précédemment, ces éléments sont valables en considérant chaque paramètre de manière individuelle. Les seuils peuvent être plus faibles pour un mélange de composés.

### Remarque :

*Il peut également être envisagé de rechemiser une canalisation, c'est-à-dire de faire passer une nouvelle canalisation plus étroite à l'intérieur de la canalisation contaminée. L'utilisation d'une canalisation métallique sera privilégiée afin d'éviter tout risque de nouvelle perméation à travers la nouvelle canalisation. L'étude de la problématique (notamment des pertes de charges) liée au passage d'une même quantité de fluide dans une canalisation de diamètre plus petit devra être préalablement réalisée.*

Composés organiques	Seuil d'imperméabilité (µg/L)			
	Polyéthylène (PE)		PolyVinyl Chloride (PVC)	
	Homogène	Avec barrière en Aluminium (PE-AL-PE)	Homogène	Avec joint d'étanchéité en caoutchouc
<b>Hydrocarbures aromatiques monocycliques</b>	9			5
<b>Benzène</b>		1 780 000	178 000	
<b>Toluène</b>		515 000	51 500	
<b>Xylènes</b>		190 000	19 000	
<b>1,3,5-Triméthylbenzène</b>		20 000	2 000	
<b>Ethylbenzène</b>		152 000	15 000	
<b>Propylbenzène</b>		60 000	6 000	
<b>Composés organiques chlorés</b>	10			10
<b>Trichlorométhane</b>		6 800 000	800 000	
<b>Tétrachlorométhane</b>		680 000	80 000	
<b>Trichloroéthylène</b>		935 000	110 000	
<b>Tétrachloroéthylène</b>		130 000	15 000	
<b>1,2-dichloroéthane</b>		7 395 000	87 000	
<b>1,2-dichloropropane</b>		2 295 000	270 000	
<b>Chlorobenzène</b>		425 000	50 000	
<b>Hydrocarbures aliphatiques</b>	100			100
<b>Hexane</b>		9 500	2 375	
<b>Heptane</b>		3 000	760	
<b>Octane</b>		700	175	
<b>Nonane</b>		450	110	
<b>Hydrocarbures aromatiques polycycliques</b>	5			5
<b>Naphtalène</b>		30 000	15 000	
<b>Anthracène</b>		1 300	650	
<b>Phénanthrène</b>		1 600	800	
<b>Phénol</b>	23 000	8 500 000	1 000 000	23 000

Tableau 12 : Seuil d'imperméabilité pour différents composés chimiques selon le tuyau utilisé [45].

Ce tableau confirme la grande étanchéité du tuyau PE-AI-PE et l'importance d'un joint d'étanchéité adapté à la problématique rencontrée.

**c) Protéger et améliorer l'étanchéité d'une canalisation**

Des barrières en bentonite peuvent être installées autour des canalisations. La bentonite, connue pour son grand pouvoir de gonflement, permet d'obtenir une étanchéité parfaite et pérenne, sous réserve qu'elle soit correctement mise en œuvre. Pour cela, on utilise une membrane mixte, à base de polypropylène (un géotextile) et de bentonite sodique. En plus d'être imperméable, sa souplesse permet de la poser sans l'utilisation d'outils spécifiques telle que des agrafes par exemple. La bentonite a aussi la particularité de se réparer toute seule (pouvoir d'auto cicatrisation) en présence d'eau. Cependant, il est nécessaire de la recouvrir d'une couche de remblais d'environ 30 cm afin de la protéger.

Ces barrières peu perméables limitent ainsi la migration des polluants et protègent les canalisations. Néanmoins, comme les autres techniques développées dans ce chapitre, cette solution s'applique préférentiellement lors de la mise en place de nouvelles conduites afin de compléter leur protection plutôt que sur des canalisations existantes compte tenu des problèmes d'accessibilité et de pose de cette barrière toute autour de la canalisation (nécessite le décaissement complet des matériaux autour de la conduite pour appliquer la membrane).

## 6. Assurer une couverture des sols de surface

### 6.1. PRINCIPES ET OBJECTIFS

À l'exception du cas des spots de pollution d'extension limitée et aux contours bien circonscrits, à l'issue d'une dépollution, il reste généralement une pollution résiduelle dans les sols et/ou les eaux, avec des teneurs dépassant sensiblement le fond géochimique (naturel ou anthropique). Bien souvent ces sols seront alors recouverts par une couche plus ou moins épaisse de matériaux d'apport sains (dont la qualité aura également été contrôlée et est compatible avec les usages).

La mise en place d'une couverture de surface sur des sols pollués peut permettre de supprimer différentes voies d'exposition [10] :

- l'ingestion de sol par les enfants (généralement de moins de 6 ans) ;
- l'envol de poussières pouvant conduire après leur retombée à leur ingestion ;
- la consommation d'eau polluée par la population, notamment par certaines catégories plus sensibles (enfants, femmes enceintes, personnes âgées, etc.) ;
- la consommation de fruits et légumes autoproduits dans des jardins potagers.

Généralement, les principaux polluants rencontrés dans ces cas de figure sont les métaux et les composés organiques lourds : HAP, PCB,...

Le recouvrement de sols pollués peut ainsi éviter un transfert de la pollution vers d'autres milieux distincts, comme l'atmosphère ou les eaux souterraines. Cette solution peut même assurer une double fonction, en évitant l'envol de poussières et de particules et, de manière simultanée et sous certaines conditions, la protection des eaux souterraines. Ce second aspect est important puisque la limitation de l'infiltration va permettre de réduire aussi la percolation de cette eau au travers des sols pollués et le transfert de substances polluantes, vers les eaux souterraines.

#### Remarque :

*Les épaisseurs indiquées dans les paragraphes suivants sont les épaisseurs minimales qu'il conviendra de respecter de façon pérenne. L'attention du lecteur est attirée sur le tassement naturel des sols au cours du temps, afin de déterminer l'épaisseur qu'il conviendra de mettre en place initialement afin de tenir compte de ce phénomène.*

### 6.2. MESURES CONSTRUCTIVES EXISTANTES

#### 6.2.1. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux sanitaires par ingestion et le ré-envol de poussières

L'ingestion de terre contaminée s'adresse plus particulièrement aux enfants jusqu'à 6 ans qu'aux adultes (hors comportement PICA, trouble du comportement alimentaire, caractérisé par l'ingestion de substances non nutritives). Le rapport de l'InVS et de l'INERIS [46] fournit, par exemple, des informations relatives à la quantité de sol ingéré à retenir dans le cadre de calculs de risques sanitaires. Les mesures constructives consistent essentiellement à mettre en place une barrière physique, plus ou moins complexe selon les contextes, afin d'empêcher l'accès aux sols pollués.

Les Figures 22 et 23 illustrent deux exemples de mesures constructives de ce type.

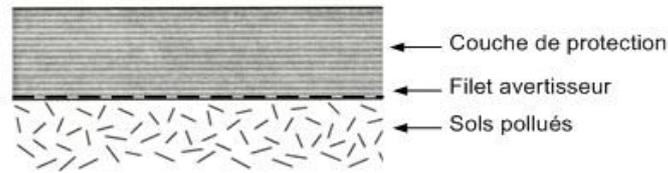


Figure 22 : Exemple de couverture de surface afin de prévenir l'ingestion des terres, le réenvol de poussières [47].

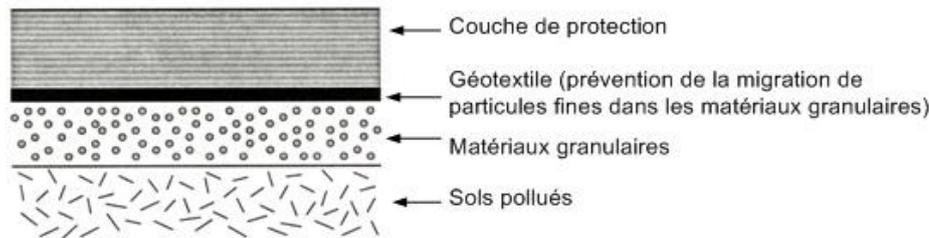


Figure 23 : Exemple de couverture de surface afin de prévenir la remontée de pollution, l'ingestion des terres, le réenvol de poussières [47].

La couche de protection est constituée de matériaux locaux (sols, remblais et déblais sains) ou de matériaux granulaires afin d'éviter les intrusions animales [10].

**Dans les cas de gestion de SSP les plus fréquents (exemple au droit d'un espace vert sans végétation arborée), il est recommandé que l'épaisseur du recouvrement soit d'au minimum 30 cm et qu'un grillage avertisseur permette d'identifier la séparation entre les sols pollués d'une part et les matériaux d'apport sains et la couche de protection (terre végétale par exemple) d'autre part.**

#### 6.2.2. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux sanitaires par ingestion de légumes/fruits autoproduits

Variante de la précédente technique, cette mesure consiste soit à disposer une couverture de terre saine d'au moins 50 cm en recouvrement sur un sol pollué, soit à substituer au sol pollué une couche de matériau d'apport sain sur une même épaisseur minimale de 50 cm. L'ajout d'un dispositif de drainage des eaux météoriques permettant d'éviter la percolation de la pollution en profondeur pourra être étudié.

##### Remarque :

*Dans le cas où la pollution serait concentrée dans la partie superficielle du sol (premiers centimètres, par exemple dans le cas de retombées atmosphériques), la mise en place d'une couverture plus fine (< 50 cm) devra être justifiée par le prestataire au regard du contexte.*

##### a) **Décapage et substitution des sols pollués**

En cas de décapage des terres polluées sur 50 cm de profondeur et de leur remplacement par des terres saines d'apport extérieur, une séparation physique (de type géotextile par exemple) devra être mise en place à l'interface entre les matériaux restant en place et les matériaux d'apport. Un contrôle de la qualité de ces terres d'apport sera préalablement réalisé. L'aménagement d'un jardin potager et/ou la culture de végétaux susceptibles de

produire des fruits ou légumes consommables sera possible sous certaines conditions permettant de garantir l'absence de transfert de la pollution entre le sol pollué sous-jacent et les végétaux (notamment via les racines). A défaut des servitudes visant à restreindre voire interdire la culture de végétaux susceptibles de produire des fruits ou légumes consommables et dont les racines pourraient traverser toute l'épaisseur de terre saine (par exemple, les arbres à racines profondes ou pivotantes) seront à instaurer. Au besoin, la mise en place d'un matériau d'apport sur une plus grande épaisseur peut être envisagée pour la plantation d'arbres.

Dans le cadre de projets d'aménagement concernant de grandes superficies de sols faiblement pollués, une purge locale de terres peut être pratiquée pour planter des arbres d'ornement. Il s'agira ensuite d'assurer leur pérennité et d'éviter leur dépérissement.

### **b) Cas du recouvrement de sols pollués**

Cette couverture empêchera un éventuel contact entre les racines et le sol pollué de manière à prévenir la contamination des légumes.

La mise en place d'un géotextile seul entre le sol contaminé et la terre saine ne permet pas de s'assurer l'efficacité de la mesure, notamment dans le cas où il est prévu un usage de culture. Le géotextile vise à isoler les couches et à les identifier. Afin d'empêcher le passage de l'eau ou des racines, le recouvrement est complété par d'autres dispositifs. A noter que le système racinaire des arbres pouvant se développer sur plusieurs mètres, voire plus de 10 mètres, la culture d'arbres fruitiers reste alors problématique. La culture hors sol est à privilégier ou alors la mise en place de systèmes de confinement limitant l'extension du système racinaire.

### **c) Culture hors sol**

Cette dernière solution se rapproche du recouvrement et consiste à surélever les cultures. Les racines des plantes reposent sur un milieu reconstitué détaché du sol. Ce substrat, minéral ou organique, est neutre et inerte. Il peut contenir du sable, de l'argile, de la laine de roche ou des matériaux inertes d'origine industrielle [48].

Dans le même esprit, le potager en carrés a été développé dans les années 1980 et s'adresse plus particulièrement au cas des petites productions individuelles. Le principe repose sur la culture de légumes dans 4 carrés de terre, eux même subdivisés en plus petits carrés. Il peut être surélevé et contenu dans des bacs remplis de terres saines. A titre d'information, un potager de 6 carrés est censé procurer suffisamment d'apport de légumes pour 2 personnes sur toute l'année [49].



### 6.2.3. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux sanitaires par ingestion d'eau potable polluée

Il s'agit principalement lors de projet d'aménagement de prévoir des conditions de pose qui permettent de protéger des canalisations des contaminants présents dans les sols (cf. chapitre 5 pour le détail des solutions techniques applicables).

La solution la plus couramment utilisée consiste à installer les canalisations d'eau potable dans des matériaux de remblais sains (pose de sablon de 30 cm autour des canalisations) ou « d'emballer » les canalisations une couverture mixte à base de polypropylène et de bentonite sodique.

Lors de l'intervention sur des canalisations au droit de zones polluées, ou en cas de pose de canalisations à proximité ou au droit de zones polluées (ce dernier cas devant être évité le plus possible, notamment en cas de pollution par des composés volatils), ces travaux seront réalisés et/ou contrôlés par un prestataire SSP afin de garantir la bonne exécution des travaux. Des études environnementales préalables pourront être réalisées afin de déterminer le type de pollution en présence et d'en déduire les risques et les moyens de protection associés pour le personnel réalisant les travaux (EPI, tenue de travail, masque anti-poussière,...).

### 6.2.4. Mesures constructives vis-à-vis des enjeux environnementaux (protection de la ressource en eau)

Dans le cas d'une source de pollution située en zone non saturée et susceptible de générer un impact sur les eaux souterraines, une couverture de surface peut être mise en place afin d'assurer la protection de la ressource, au moins localement, notamment dans les secteurs où les teneurs sont les plus importantes (par exemple : présence de produit pur). Si le recouvrement intégral de la zone polluée est possible (extension limitée de la pollution dans les sols et dans les eaux souterraines), cette mesure est alors à privilégier plutôt qu'un recouvrement partiel.

L'objectif de ce recouvrement est de limiter fortement l'infiltration des eaux de pluies et par là même la remobilisation et le relargage des polluants dans les eaux souterraines. La Figure 24 illustre cette mesure. Cette solution peut être temporaire, le temps de mettre en œuvre une solution curative plus durable de la pollution. Elle est très souvent utilisée en mesure d'urgence, en cas de pollution accidentelle (déversement, accident de circulation, fuite en surface,...).

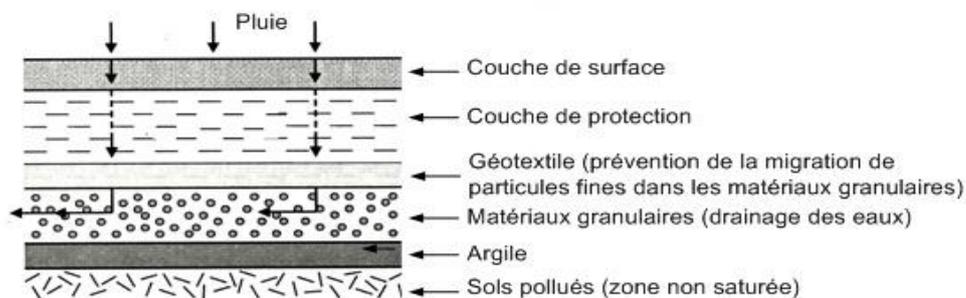


Figure 24 : Exemple de couverture de surface destinée à protéger les eaux souterraines [47].

La couche de surface peut être plus ou moins complexe et constituée de différents matériaux : terre végétale, terre végétale combinée à un géosynthétique de drainage, de graviers et galets, matériaux de pavage, béton bitumineux, pavage. Une couche de protection à base de matériaux locaux ou de matériaux granulaires sera déposée dessus.

Le recouvrement concourt à la pérennité de la mesure (il s'agit donc de prévenir tout risque d'érosion, voire de détérioration par des animaux fouisseurs, grâce à la mise en place de matériaux grossiers et d'une couche de protection), mais doit aussi permettre que l'eau ne s'accumule pas sur la couche peu perméable (la couche drainante, en assurant l'évacuation de l'eau, permet d'éviter l'apparition d'une charge hydraulique, qui pourrait être néfaste pour la stabilité de la couverture mais aussi favoriser l'infiltration en cas de défaut).

Suivant les contextes de pollution, les techniques à étudier correspondent à celles utilisées dans le cadre de confinement strict. De même, un travail sur les pentes du recouvrement peut permettre « d'alléger » la structure du recouvrement.

Dans certains cas, lors du démantèlement de bâtiments, il peut être recommandé le maintien en place des dalles, dallages béton ou revêtements de surface (voire leur réfection). Cette disposition relève en général de mesures temporaires ou transitoires, dans l'attente du traitement / suppression d'une source de pollution (rendue accessible par exemple) ou de la mise en œuvre de mesures de gestion définitives (confinement adapté par exemple). Ces revêtements n'ont en effet pas été conçus pour cela, et une fois exposés aux intempéries, ils risquent de se dégrader rapidement.



## 7. Limiter la corrosion des biens matériels

### 7.1. PRESENTATION DU PHÉNOMÈNE DE CORROSION

#### 7.1.1. Définition

La corrosion désigne le phénomène de dégradation de l'état d'un matériau, notamment par une pollution environnementale chimique et/ou biologique. Elle touche principalement les métaux, mais peut également toucher les bétons et d'autres matériaux non métalliques (ex. : PVC, PEHD constituant les réseaux enterrés, etc.) [50].

Dans le cas des métaux, la norme ISO 8044 définit la corrosion comme l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications des propriétés du métal, voire une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par le métal et son environnement. Dans la plupart des cas, il s'agit d'une réaction de nature électrochimique, mais elle peut aussi être de nature purement chimique.

Dans le cas des bétons, la corrosion désigne la dégradation du béton mais elle peut aussi désigner celle des armatures présentes dans le béton lorsqu'il est armé.

#### 7.1.2. Différents types de corrosion

L'origine des phénomènes de corrosion peut être variée selon les milieux en contact avec les matériaux, à savoir :

- les sols ;
- l'air ambiant, du fait de rejets atmosphériques ou d'émanations gazeuses de décharges ou de sols contaminés par des substances volatiles ;
- les eaux, qu'il s'agisse d'eaux superficielles, d'eaux souterraines ou de lixiviats émanant de tas de déchets par exemple.

##### a) *Cas des matériaux métalliques*

Différents types de corrosion peuvent atteindre des infrastructures métalliques (poutres, canalisations, armatures,...), qu'elles soient enterrées ou aériennes [51, 52] :

- la corrosion généralisée ou uniforme. Cette corrosion progresse approximativement à la même vitesse sur l'ensemble de la surface ;
- la corrosion galvanique, due à un couplage électrique entre deux métaux ou alliages différents, dans un environnement corrosif conducteur entraînant la formation de piles électriques ;
- la corrosion par piqûres, très localisée et généralement rencontrée dans l'eau de mer. Elle est le résultat de l'actions d'ions de chlore, de brome ou d'iode ;
- la corrosion cavernueuse, plus fréquemment rencontrée dans des fentes ou des crevasses favorisant les dépôts ou/et la présence de petits volumes de solution stagnante ;
- la corrosion intergranulaire, localisée et sélective, qui se traduit par une dissolution préférentielle aux joints des grains (précipitation de carbures au cours du chauffage lors du soudage) ;

- la corrosion sous contrainte mécanique. Elle résulte d'un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce, sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif ;
- la corrosion sélective, qui se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage (la dézincification du laiton est l'exemple le plus connu).

### b) Cas des bétons

La corrosion des bétons est la conséquence de nombreux mécanismes parmi lesquels notamment [53]:

- l'hydrolyse du liant du ciment durci ;
- la corrosion chimique, résultat de réaction entre le calcium de la chaux et des ions dans des solutions agressives ;
- des réactions d'expansions, résultats de réactions chimiques ou de cristallisation de sels.

Elle peut être divisée entre trois catégories :

- les attaques externes sur le béton seul ;
- les attaques internes sur le béton seul ;
- les attaques externes sur les armatures.

Ces différents types de corrosion sont résumés dans la Figure 25 :

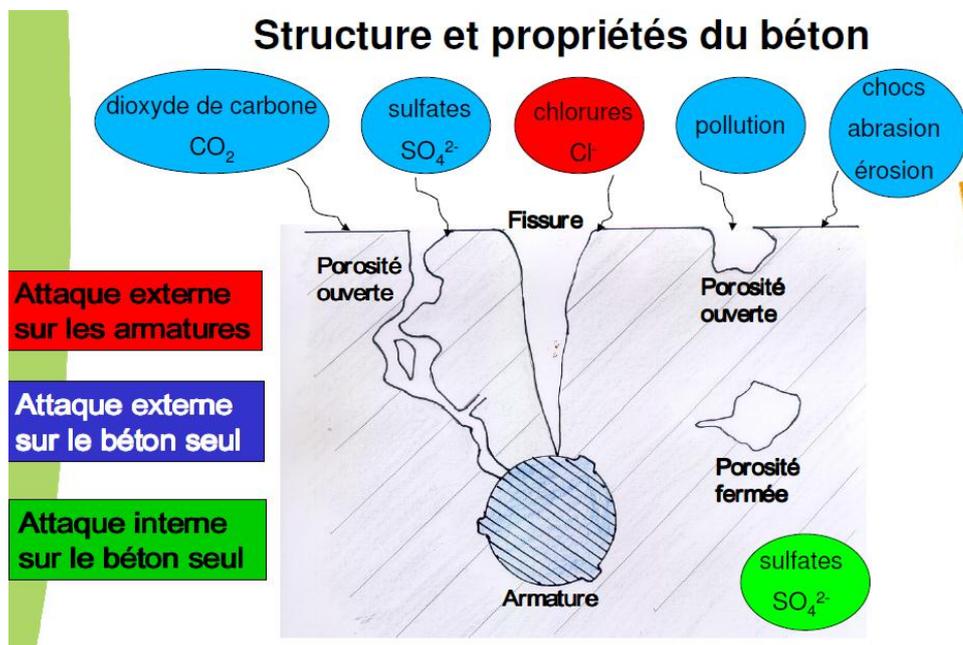


Figure 25 : Les différentes corrosions du béton [54].

Remarque :

*La construction d'un ouvrage sur des mâchefers ou des remblais contenant des bétons peut présenter des risques géotechniques en raison du gonflement potentiel associé. A cet effet, la norme NF P 18-545 définit les différentes classes de granulats vis-à-vis de leur teneur en sulfates solubles dans l'eau.*

**c) Cas des matériaux non métalliques [50]**

La partie de ce chapitre traitant des matériaux non métalliques s'intéressera uniquement aux matériaux de type polymère (notamment PE et PVC). Les altérations que peuvent subir ces matériaux sont principalement de deux types :

- chimique en milieu liquide ;
- biochimique (détérioration par des micro-organismes ou des champignons).

## **7.2. LES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA CORROSION**

### **7.2.1. La corrosion des matériaux métalliques**

Dans l'état actuel des connaissances, la bibliographie ne mentionne pas de retour d'expérience de corrosion majeure de matériaux métalliques par des composés organiques dans des conditions « normales » (de température, pression,...).

Ainsi, la fiche ED 4226 de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) mentionne que les hydrocarbures aromatiques ne corrodent pas les métaux usuels.

Néanmoins, la fiche ED 4223 mentionne que les hydrocarbures halogénés non stabilisés (généralement non commercialisés) « peuvent avoir une certaine action sur les métaux usuels et provoquer une corrosion des surfaces métalliques ».

Par ailleurs, « sous l'action combinée de températures élevées (120 °C à 400 °C selon les substances), de l'air et de rayonnements UV, les produits halogénés tendent à se décomposer en formant le plus souvent des halogénures d'hydrogène corrosifs [...] » [55].

#### **a) Dans les sols**

L'évaluation des risques de corrosion des matériaux métalliques dans les sols se fait en suivant les recommandations des normes NFA 05-250, 05-251 et 05-252 [50].

Les sept paramètres, retenus pour définir le risque de corrosion des matériaux métalliques dans les sols, sont les suivants :

- la nature du sol ;
- la résistivité ;
- la teneur en eau ;
- la présence d'une nappe phréatique ;
- le pH ;
- la présence de certains sels ;
- les hétérogénéités.

Le Tableau 13 synthétise quelques valeurs limites dans les sols, au-delà desquelles l'usage de tuyaux en métal dans un réseau d'alimentation en eau potable peut être remis en question, la réalisation d'études complémentaires est alors recommandée [43].

Polluant	Valeurs limites dans les sols (mg/kg MS)
Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	2 000
Soufre	5 000
Sulfure ( $\text{S}^{2-}$ )	250
pH	< pH 5 ou > pH 8

Tableau 13 : Valeurs limites dans les sols au-delà desquelles l'usage d'un tuyau en métal peut être remis en question.

Ce tableau et le retour d'expérience tendent à montrer que l'agressivité des sols est souvent due à des pollutions du sol par des sels (de déverglaçage par exemple), à la présence de composés soufrés (et par extension de bactéries susceptibles de produire des produits soufrés), et au pH environnant.

#### b) Dans les eaux

Les principaux paramètres chimiques et biologiques considérés pour l'évaluation des risques de corrosion des matériaux métalliques par une eau potentiellement polluée sont les suivants [50] :

- l'acidité du milieu ;
- la salinité du milieu (présence de sels de métaux alcalins, sels acides, sels d'ammonium, sels alcalins, sels oxydants) ;
- l'effet du  $\text{CO}_2$  en présence et en absence d'oxygène ;
- la présence de sels réducteurs (sulfures, ammonium) ;
- la présence de particules solides en suspension ;
- la présence de micro-organismes (Thiobacilles, Gallionella, Leptothrix en milieu aérobie et bactéries sulfurogènes en milieu anaérobie).

L'impact de ces divers paramètres sur les formes et la vitesse de corrosion des matériaux métalliques dépend de leur nature et des conditions environnantes (température, stagnation ou non de l'eau, vitesse de circulation de l'eau, etc.). Il n'existe à l'heure actuelle pas de norme, définissant des classes d'agressivité d'environnement aqueux vis-à-vis des matériaux métalliques dans des conditions données d'utilisation.

L'évaluation du risque d'agressivité d'une eau vis-à-vis d'un matériau métallique doit par conséquent être menée au cas par cas (pour un matériau donné et dans des conditions d'utilisation spécifiques - température, pression, vitesse de circulation du fluide) en considérant les paramètres chimiques et biologiques définis ci-dessus.

#### c) Dans l'air

L'évaluation des risques de corrosion des métaux dans l'air se fait en suivant la norme NF EN 12500 [50].

Les principaux paramètres considérés pour l'évaluation des risques de corrosion des métaux en environnement atmosphérique sont :

- la teneur en vapeur d'eau ;
- la présence de gaz acides, tels que :  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  et de  $NH_3$  ;
  - la pollution acide est générée par les retombées de polluants sous l'effet des vents et des précipitations ;
  - le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ) est émis principalement par la combustion énergétique et industrielle ainsi que par le transport routier ;
  - les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) sont issus du transport routier et dans une moindre mesure de la production électrique et industrielle ;
  - l'ammoniac ( $NH_3$ ) a pour origine principale l'agriculture et la sylviculture ;
- la contamination atmosphérique par des sels (particulièrement les chlorures et sulfates).

### 7.2.2. La corrosion des bétons armés

La norme NF EN 206-1 définit des classes d'agressivité de solutions et de sols vis-à-vis des bétons classiques. Selon le type d'exposition, les classes d'exposition diffèrent selon qu'il s'agisse :

- d'expositions courantes :
  - X0 : Pas d'agression ;
  - XC : Agression par Carbonatation ;
  - XF : Agression par le Froid ;
- d'expositions particulières :
  - XS : Agression par des Sels marins ;
  - XD : Agression par des sels Divers ;
  - XA : Agression par des Attaques chimiques (celle qui nous intéresse plus particulièrement dans le domaine SSP).

Les principales causes des dégradations affectant les bétons et les armatures métalliques sous l'action de composés chimiques et/ou biologiques sont [50] :

- la concentration en  $CO_2$  ;
- la concentration en  $SO_4^{2-}$  ;
- la concentration en  $Cl^-$  ;
- la concentration en  $Mg^{2+}$  ;
- la concentration en  $NH_4^+$  ;
- le pH.

Dans l'état actuel des connaissances, la bibliographie ne mentionne pas de retour d'expérience de corrosion majeure des bétons armés par des composés organiques ou des hydrocarbures à eux seuls. Le risque de corrosion des bétons par ces composés, qui sont les problématiques usuelles rencontrées dans le domaine SSP, apparaît donc faible.

**a) Dans les sols**

- **La norme NF EN 206-1**

Le Tableau 14 est issu de la norme classant l'agressivité des sols (agressivité chimique) en contact avec le béton selon les concentrations des différents paramètres

Degré d'agressivité	XA1	A2	A3
Environnement	Faiblement agressif	Moyennement agressif	Fortement agressif
Agents agressifs	Concentrations		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg / L)	Entre 2000 et 3000	Entre 3000 et 12 000	Entre 12 000 et 24 000
Acidité (ml/kg)	>200 (Baumann Gully)	Non rencontré dans la pratique*	

\* selon la norme

Tableau 14 : Valeurs limites pour les classes d'exposition aux attaques chimiques pour les sols (norme NF EN 206-1).

- **L'action des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**

Certains sols contenant du gypse ou de la pyrite sont susceptibles de relarguer des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> par dissolution dans l'eau les traversant [54]. L'action des ions sulfates contenus dans l'eau est présentée dans le paragraphe 7.2.2.b).

- **L'action des bactéries**

La dégradation des bétons par les microorganismes se produit essentiellement en milieu anaérobie riche en matière organique. Les bactéries qui prédominent dans ces milieux sont de type sulfato-réducteur. La réduction des composés oxydés du soufre (sulfates, thiosulfates) par les bactéries sulfurogènes conduit à la formation de sulfures qui dégazent dans l'atmosphère sous forme d'H<sub>2</sub>S gazeux.

Dans les ouvrages comportant une partie émergée, tels que les ouvrages d'assainissement, les sulfures gazeux peuvent se recondenser sur les parois en béton et s'oxyder en acide sulfurique et sulfates sous l'action de bactéries aérobies de type Thiobacillus, Thiooxydans, etc... L'acide ainsi produit conduit à une dégradation du béton par une succession de réactions chimiques qui aboutissent essentiellement à la formation de gypse. Ce dernier peut ensuite réagir avec l'aluminate tricalcique contenu dans le ciment et former de l'ettringite, entraînant le gonflement, puis la fissuration et l'éclatement superficiel du béton. Les fissures facilitent alors la pénétration des agents agressifs, qui accélèrent le processus de dégradation [50, 54]. Dans les ouvrages enterrés, le béton peut aussi être attaqué par des micro-organismes tels que des bactéries, des mousses ou des lichens. Lors d'un changement de conditions dans les sols (passage d'un milieu anaérobie à aérobie ou inversement), les souches dormantes se réveillent, ce qui peut conduire aussi à la formation d'acide sulfurique, très corrosif pour le béton [53].

- **L'action du pH**

Compte tenu de son caractère basique, la solution interstitielle du béton peut réagir en présence de sols acides. Cette réaction peut être facilitée et accélérée par le lessivage des sols par les eaux de ruissellement ou les eaux souterraines (voir plus bas).

**b) Dans les eaux**

- **La norme NF EN 206-1**

Le Tableau 15 est issu de la norme classant l'agressivité des sols (agressivité chimique) en contact avec le béton selon les concentrations des différents paramètres.

Degré d'agressivité	XA1	A2	A3
Environnement	Faiblement agressif	Moyennement agressif	Fortement agressif
Agents agressifs	Valeurs limites		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Entre 200 et 600	Entre 600 et 3 000	Entre 3 000 et 6 000
pH	Entre 5,5 et 6,5	Entre 4,5 et 5,5	Entre 4 et 4,5
Ammoniac (mg/L)	Entre 15 et 30	Entre 30 et 60	Entre 60 et 100
Gaz carbonique (mg/L)	Entre 15 et 40	Entre 40 et 100	Supérieure à 100
Magnésium (mg/L)	Entre 300 et 1 000	Entre 1 000 et 3 000	Supérieure à 3 000

Tableau 15 : Valeurs limites pour les classes d'exposition aux attaques chimique dans les eaux (norme NF EN 206-1).

- **L'action des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**

Les ions sulfates contenus dans l'eau de mer ou les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton. En effet, les ions sulfates réagissent avec le ciment (portlandite) pour former un gypse secondaire qui, par réaction avec l'aluminat de calcium présent dans le béton, va former de l'ettringite, dont l'action a été présentée ci-avant.

- **L'action des ions Cl<sup>-</sup>**

Les ions chlorures contenus dans l'eau de mer et dans les sels de déverglaçage pénètrent à partir de la surface du béton jusqu'à l'armature. Les ions Cl<sup>-</sup> vont réagir avec la chaux (Ca(OH)<sub>2</sub>) présente dans le béton, pour former un sel de CaCl<sub>2</sub> soluble dans l'eau. La perméabilité du béton va augmenter, ce qui aggrave le phénomène. Les ions chlorures peuvent également réagir avec les aluminates de calcium contenus dans certains bétons, pour former des aluminates de chlore, semblables à l'ettringite gonflante. Enfin, en cas de succession de cycles de mouillage et séchage du béton, une cristallisation de sels peut se produire dans les pores du béton. La pression produite par les cristaux est plus importante que la force de tension du béton, engendrant des fissures dans le béton [53].

Lorsque la concentration en ions chlorures dans le béton devient supérieure à une concentration dite critique (généralement 0,4 % en masse [56]), la corrosion s'initie.

Certains constituants présents dans le béton peuvent participer à l'augmentation de la concentration en chlorures dans le béton (sable, gravillons, adjuvants, etc.) [54].

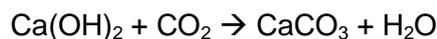
- **L'action de solutions acides**

Étant donné sa basicité, la solution interstitielle du béton va réagir avec des solutions acides. Cela sera le cas des pluies acides et des eaux de process acides.

**c) Dans l'air**

- **L'action du CO<sub>2</sub> ; la carbonatation du béton et l'attaque des armatures**

Le dioxyde de carbone pénètre dans le béton et réagit avec la chaux contenue dans le béton pour donner des carbonates de calcium.



Le pH de la solution interstitielle du béton diminue en passant de pH=11/13 à pH<9. Le front de carbonatation avance progressivement jusqu'aux armatures où leur dépassement intervient. La corrosion du métal peut alors commencer, notamment à cause de l'oxygène de l'air [50] et des ions chlorures (voir ci-avant).

- **L'action du H<sub>2</sub>S et SO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère**

Des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> peuvent provenir de l'hydratation de SO<sub>2</sub>, issu de la combustion des énergies fossiles et de l'oxydation du H<sub>2</sub>S, tous deux présents dans l'atmosphère.

Cette eau chargée en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> peut ensuite s'écouler sur le béton (voir ci-dessus). Il convient également de noter que cette eau est généralement acide, ce qui accentue la réaction avec la solution interstitielle basique.

### **7.2.3. La corrosion des matériaux non métalliques**

**a) Altérations chimiques**

- **Généralités**

Les altérations d'origine chimique susceptibles d'affecter les matériaux plastiques sont spécifiques à chaque catégorie de polymères [50] et à chaque catégorie de matériaux (une membrane ou un tuyau ne réagiront pas forcément de la même façon à un même composé, notamment en raison de la différence d'épaisseur ou de leur densité). L'ensemble de ces altérations ne sera pas énuméré dans ce paragraphe. Seuls les cas du PE et du PVC, couramment rencontrés, seront présentés.

Deux causes principales en lien avec la problématique SSP peuvent être mises en avant dans ce guide [53] :

- la solvatation. Il s'agit de la diffusion de molécules de solvants dans le polymère, ce qui entraîne son gonflement ;
- la craquelure sous l'effet de contraintes (Environmental Stress Cracking – ESC). Il s'agit de l'apparition de craquelures à la surface d'un plastique suite à l'action d'agents de nettoyage de surface (alcool, solvant, etc.) et de stress mécanique (frottement, etc.).

Les données existantes ne sont pas facilement exploitables en raison des larges plages de conditions d'essai qu'octroient certains essais normalisés. Néanmoins, une norme internationale (NF EN ISO 11403-3) a été élaborée en vue de définir les méthodes et conditions d'essai spécifiques qui doivent être utilisées en vue de l'acquisition et de la présentation des données permettant d'effectuer des comparaisons valables entre les divers matériaux plastiques [50].

- **Cas du PE**

Les membranes ou géotextiles en PE présentent une résistance faible à l'acide sulfurique et à l'acide nitrique à haute concentration. Les solutions basiques, les sels basiques et les composés organiques les attaquent par ESC ou solvatation. Elles sont, en revanche, résistantes aux solutions salines non oxydantes [53].

Les tuyaux en PE sont très imperméables grâce à la masse moléculaire très importante de ce matériau. Ils ont une bonne résistance aux solvants, acides et bases. Néanmoins, ce type de canalisations reste sensible au phénomène de perméation, dont l'importance dépend de l'épaisseur et de la densité du PE, ainsi que du diamètre de la canalisation (cf. § 5.2.1).

- **Cas du PVC**

Les membranes ou géotextiles en PVC sont dégradés par les acides oxydants, notamment l'acide nitrique. L'acide chlorhydrique n'attaque pas réellement le PVC, mais il peut diffuser facilement dans le PVC et modifier ses performances mécaniques. Le PVC n'est pas dégradé sous l'action de solutions basiques, neutres ou de sels [57].

En ce qui concerne les solvants organiques, le caractère polaire du PVC lui confère une faible résistance aux substances légèrement polaires comme l'acétone ou le tétrahydrofurane. La résistance aux substances fortement polaires est généralement bonne [57]. Néanmoins, le principal effet de la plupart des liquides organiques sur une membrane PVC est d'extraire le plastifiant contenu dans cette membrane. Ce plastifiant, qui représente en sortie d'usine environ 30 à 50 % d'une membrane PVC, a été ajouté lors de sa fabrication pour rendre la membrane flexible (sinon le PVC est rigide). Lorsque la membrane PVC n'est plus en contact avec ce liquide organique, elle devient rigide et cassante.

Néanmoins, dans le cas des hydrocarbures aromatiques et chlorés, des composés nitriques aliphatiques et aromatiques, des cétones et des éthers aliphatiques et cycliques, l'extraction du plastifiant s'accompagne également d'un assouplissement du PVC, rendant l'effet global difficile à anticiper.

Lorsque certains solvants sont en contact avec une membrane PVC, le plastifiant extrait est remplacé par le solvant, ce qui permet à la membrane de conserver sa flexibilité tant que le solvant ne s'évapore pas. Après évaporation, la membrane durcit et ne retrouve plus sa flexibilité, même si le solvant est de nouveau en contact avec la membrane [57].

Les tuyaux PVC sont relativement peu onéreux mais présentent de bonnes propriétés physiques et une bonne résistance à la corrosion et aux attaques chimiques. Ils seront néanmoins attaqués par les solvants tels que les cétones, les hydrocarbures chlorés ou aromatiques. Comme indiqué au § 5.2.1, ce type de canalisation est également moins sensible au phénomène de perméation que les tuyaux en PE.

- **De l'utilisation de membranes PE ou PVC dans le cas de confinement ou de protection de bien matériels contre des liquides organiques**

Compte tenu des informations présentées ci-avant, le recours à des membranes PE ou PVC pour le confinement ou la protection de bien matériels contre **des liquides organiques** est à éviter sauf étude démontrant leur durabilité dans le temps vis-à-vis de la pollution en présence. Le recours à d'autres types de protections (par exemple métalliques ou résineuses) pourra être étudié, notamment dans la zone de battement de nappe, lorsqu'une phase flottante peut être présente à sa surface.

Remarque :

*Pour mémoire, dans le cas des mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP, les risques sont plutôt liés à des panaches gazeux qu'à des risques de contact avec des phases organiques. En conséquence, le recours à une membrane PE ou PVC pour réaliser l'étanchéité vis-à-vis de ces panaches gazeux n'est pas contre-indiqué.*

### **b) Altérations biochimiques**

Dans certaines conditions climatiques et environnementales, les micro-organismes peuvent se fixer et coloniser la surface des plastiques ou des produits en matériaux plastiques. Non seulement leur présence et/ou les produits de leur métabolisme peuvent endommager le plastique lui-même, mais il arrive qu'ils altèrent également l'aptitude à l'emploi des matériaux de construction et des systèmes qui comprennent des parties en matériaux plastiques.

L'action des micro-organismes sur les plastiques est influencée par deux types de processus :

- action directe : détérioration du plastique qui sert de substance nutritive pour la croissance des micro-organismes ;
- action indirecte : influence des produits du métabolisme des micro-organismes.

Une norme européenne (NF EN ISO 846) traite de ces deux processus et décrit des méthodes de détermination de la détérioration des plastiques exposés à l'action de champignons, de bactéries et de micro-organismes vivants dans les sols.

## **7.3. LES SOLUTIONS POSSIBLES VIS-À-VIS DE LA CORROSION**

Ce chapitre ne concerne que les matériaux métalliques et les bétons pour lesquels des solutions de traitement pour lutter contre la corrosion sont envisageables, alors qu'elles sont plus limitées pour les matériaux plastiques, dont la tenue doit être appréhendée avant la mise en service [50].

### **7.3.1. Mise en évidence d'une corrosion**

Dans le cadre d'une problématique SSP, les facteurs de déclenchement d'une étude des risques vis-à-vis des biens matériels sont multiples. Parmi ceux-ci peuvent être cités [50] :

- la protection de biens existants, sur ou au voisinage du site étudié :
  - l'existence de signes d'impacts sur les infrastructures ou superstructures existantes,
  - l'existence de biens à protéger de par leur valeur patrimoniale (monuments historiques, etc.), économique ou environnementale ;

- l'élaboration d'un projet d'aménagement comportant des biens à construire puis à protéger durablement.

L'étude des risques sur les biens matériels va essentiellement comporter deux étapes :

- les impacts potentiels ou avérés sur les matériaux constituant les biens ;
- la recherche des solutions de traitement adaptées aux risques identifiés.

Dans tous les cas, l'existence d'une voie de transfert des polluants vers ces cibles doit être préalablement vérifiée. Dans l'éventualité où la dégradation de l'ouvrage peut conduire à une exposition de l'homme aux polluants (i.e. migration le long des parois et dégradation du revêtement), le risque résultant sera intégré dans l'étude des risques liés à la santé des populations cibles.

Dans le cadre d'un usage futur, l'étude doit porter sur les biens censés être construits, en prenant en considération les caractéristiques de l'aménagement prévu (tel que défini au moment de l'étude), la proximité aux zones polluées et les éventuels moyens de protection susceptibles d'être mis en œuvre. Si des marges de manœuvre existent, et si des risques de corrosion sont mis en évidence lors des études préalables, le projet pourra être adapté afin de sélectionner la zone la moins sensible du point de vue des risques de corrosion. Si aucun déplacement n'est envisageable, le programme devra être modifié afin de prendre en compte ce risque de corrosion et d'apporter des solutions visant à supprimer ou limiter de façon importante ces risques de corrosion. Qu'il s'agisse des études préliminaires ou de la détermination des solutions envisageables, elles devront être établies par des sociétés spécialisées dans cette thématique.

Enfin, comme dans le cas des mesures constructives liées aux intrusions de vapeurs présentées dans le paragraphe 4, les solutions présentées ci-après sont généralement plus faciles à mettre en place, plus efficaces et moins coûteuses sur de nouveaux bâtiments que sur des ouvrages déjà en place.

### **7.3.2. Lutter contre la corrosion des métaux**

#### **a) Principe**

Les méthodes de protection des métaux sont de trois types [50] :

- l'action sur l'électrolyte ;
- l'application de revêtements ;
- la protection cathodique.

#### **b) Action sur l'électrolyte**

D'après le retour d'expérience et la bibliographie consultée dans le cadre de l'élaboration de ce guide, l'action sur l'électrolyte est principalement utilisée dans le domaine industriel. Elle n'est pas applicable au domaine des SSP et est citée uniquement pour information et par souci d'exhaustivité.

- **L'action chimique**

Ce type de traitement est issu des méthodes appliquées pour les circuits de distribution d'eau potable ou industrielle. Lorsque cela est possible, un des modes de traitement anticorrosion des métaux consiste à agir sur la composition chimique du milieu aqueux environnant. Les principaux modes d'action sont :

- augmentation du pH (addition de NaOH,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ;
- diminution de la teneur en oxygène (sulfites, hydrazine) ;
- augmentation de la résistivité : par déminéralisation partielle ou totale, sur résines échangeuses d'ions par exemple.

- **Les inhibiteurs**

L'emploi des inhibiteurs de corrosion est également issu du traitement des circuits d'eau industrielle. Les inhibiteurs de corrosion sont en général liquides (plus rarement gazeux). Ils agissent sur les processus anodiques et cathodiques de la corrosion. Consommés en très faible quantité, ils agissent suivant deux modes possibles :

- par formation d'un mince film protecteur à la surface du métal ;
- par adsorption.

Les couches protectrices ne sont jamais insolubles. Après leur formation, un dosage d'entretien est toujours nécessaire si l'on veut éviter leur dissolution.

### **c) Revêtements**

On distingue les traitements de surface, exécutés préalablement en atelier (revêtements métalliques), de ceux qui peuvent être réalisés sur site lorsque l'accès à la surface métallique à traiter est possible (revêtements organiques type peinture, vernis, bitume, revêtement plastique).

- **Les revêtements métalliques**

On distingue deux types de revêtements :

- anodiques. Le revêtement est choisi parmi les métaux les moins nobles par rapport au métal de base. Il se corrodera préférentiellement à celui-ci dans le cas d'une discontinuité. Le principal revêtement utilisé est le zinc (parfois le cadmium) sous divers procédés ;
- cathodiques. Le revêtement est plus noble que le métal de base, et doit assurer une protection parfaite. Son recouvrement doit également être parfait, car la moindre discontinuité entraîne une corrosion locale accélérée du métal de base (ex. : or sur acier).

Ces deux types de revêtements sont efficaces et très utilisés dans l'industrie métallurgique. Leur utilisation dans le domaine des SSP semble moins évidente compte tenu des précautions à prendre lors de leur mise en place.

- **Les revêtements organiques**

Les revêtements organiques constituent des écrans ou « protections passives » contre la corrosion, en empêchant le liquide de toucher le solide métallique. Ainsi, aucune des réactions électrochimiques liées à la corrosion métallique ne peut se produire.

Il s'agit essentiellement de mettre en place des peintures, vernis, bitumes, graisses, cires et des huiles. Des revêtements polymères peuvent également être utilisés pour la protection de la surface interne de canalisations. Ces protections sont efficaces tant qu'elles restent étanches et adhérentes.

**d) Protection cathodique**

La protection cathodique est une technique réduisant la vitesse de corrosion d'un matériau métallique en présence d'un milieu aqueux, par diminution de son potentiel de corrosion. L'ouvrage métallique à protéger est alors placé à un potentiel tel que la vitesse de corrosion devient acceptable sur toute la surface de métal en contact avec le milieu aqueux. Cette protection est généralement complémentaire d'une protection par revêtement.

Pour modifier le potentiel du métal à protéger (qui est alors la cathode, d'où le nom de cette technique), une anode installée dans le même électrolyte est reliée au métal à protéger. Les anodes peuvent être de deux types :

- soit des anodes ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger (anode sacrificielle : dans ce cas, le métal de l'anode est moins noble que le métal à protéger, du zinc par exemple) ;
- soit des anodes couplées à un générateur de tension continue imposant une différence de potentiel entre les deux métaux (méthode à courant imposé).

Contrairement aux traitements de surface exécutés en atelier (galvanisation à chaud, anodisation), et aux systèmes de revêtement, la protection cathodique est un procédé qui doit être toujours actif. Ainsi, une électrode sacrificielle devra être changée avant d'avoir été complètement dissoute ou l'alimentation en courant continu devra toujours être en marche, au risque de permettre à la corrosion de commencer en cas de défaut du revêtement protégeant le matériau métallique. Son efficacité contre la corrosion peut être totale si cette protection est bien conçue.

La protection cathodique est donc définie comme une protection active, par opposition aux protections dites passives (système de peinture). En application de ce principe, il est évident que la protection cathodique doit respecter certains critères, ce qui nécessite d'une part, la mise en œuvre d'une technologie adéquate et d'autre part, une maintenance suivie.

À titre d'exemple, la protection cathodique est notamment utilisée pour protéger les pipelines [58].

### 7.3.3. Lutter contre la corrosion des bétons

#### a) *Empêcher ou ralentir la pénétration des fluides (eau ou air) [50]*

Afin de limiter le contact entre le béton et les matrices pouvant transporter les différents polluants (voir paragraphe 7.2.2.), une première stratégie consisterait à appliquer un traitement superficiel.

Ainsi, des produits d'imprégnation peuvent être utilisés. Il s'agit :

- soit de produits hydrophobes. Cela consiste à introduire dans les pores du béton, un produit qui empêche l'adsorption et la pénétration de l'eau par capillarité ;
- soit de minéralisateurs obturateurs de capillaires. Ils sont mélangés au béton à l'état liquide et vont diminuer la taille des pores du ciment durci ;
- soit d'inhibiteurs de corrosion. Introduits par imprégnation du béton durci, les inhibiteurs de corrosion ralentissent la vitesse de corrosion des armatures ;
- soit d'adjuvants limitant le craquage du béton.

Un revêtement est également une solution envisageable. Il peut être de trois catégories différentes :

- soit un film mince de type peinture ;
- soit un revêtement semi-épais à comportement élastoplastique ;
- soit un revêtement ou équipement (par exemple pieux tubés) épais (plastique ou métallique). Dans ce dernier cas, l'épaisseur pourra être calculée en fonction de la durée de vie recherchée et de la vitesse de corrosion du métal).

#### b) *Lutter contre une corrosion par des ions $SO_4^{2-}$ [53]*

Il est rarement possible de supprimer la source d'ions sulfates (naturellement présents dans les sols, les eaux ou l'atmosphère). En complément des solutions présentées dans le paragraphe précédent, il peut être envisagé les solutions suivantes :

- **Modifier le béton**

Des ciments spéciaux, plus résistants aux sulfates, peuvent être utilisés en remplaçant une partie du ciment par des cendres ou des poudres de résidus de combustion.

- **Augmenter l'épaisseur de béton**

Il peut également être envisagé de créer une couche de béton sacrificielle à l'extérieur de la paroi. L'épaisseur de cette couche devra être suffisante pour assurer une protection tout au long de la vie du bâtiment.

#### c) *Lutter contre une corrosion par des ions $Cl^-$ [53]*

Il est rarement possible de supprimer la source d'ions chlorures (naturellement présents dans les eaux ou dans les régions où une grande quantité de sel de déverglaçage est utilisée). En complément des solutions présentées dans le paragraphe 7.3.3.a) 7.3.3.a), il peut être envisagé les solutions suivantes :

- **Modifier le béton**

Dans ce cas, des adjuvants chlorés sont généralement ajoutés au ciment pour augmenter sa résistance à l'attaque des chlorures.

- **Augmenter l'épaisseur de béton**

Il peut également être envisagé de créer une couche de béton sacrificielle à l'extérieur de la paroi. L'épaisseur de cette couche devra être suffisante pour assurer une protection tout au long de la vie du bâtiment.

**d) *Lutter contre une corrosion par des solutions acides [53]***

Dans le cas de milieux acides, il est rarement possible de retirer la source acide.

Dans ce cas, un enduit complémentaire, ou la réalisation d'une couche sacrificielle, pourra être envisagée. L'épaisseur de cette couche et la résistance de l'enduit devront être suffisantes pour assurer une protection tout au long de la vie du bâtiment.

Si le pH est très bas (<2,5), un traitement chimique de la problématique est obligatoire si du béton doit être utilisé dans ces conditions.

**e) *Lutter contre une corrosion par des micro-organismes [59]***

Deux actions peuvent être envisagées pour lutter contre la dégradation de béton par des micro-organismes.

- **Modifier la conception du bâti ou des effluents**

La dégradation des bétons induite par des micro-organismes est généralement constatée dans les réseaux d'assainissements (notamment les postes de refoulements et les conduites gravitaires au débouché de certains refoulements). Le retour d'expérience doit inciter à une meilleure prise en compte de cette problématique avant la construction de ces réseaux, afin de réduire les zones à risques. Dans le cas d'une installation déjà existante, une nouvelle ventilation des réseaux peut réduire les zones à risques. Si ce n'est pas suffisant, il sera nécessaire de modifier l'installation afin de réduire les zones à risques.

- **Modifier la nature des matériaux**

Certains ciments résistent mieux à ce type de corrosion. Ainsi, les ciments alumineux ne libérant pas de chaux lors de leur hydratation sont davantage résistants dans ces milieux.

Des revêtements à base de liants hydrauliques modifiés ou de résines synthétiques (époxy) peuvent également être employés.

#### **f) Lutter contre la corrosion par des composés organiques [53]**

La majorité des substances organiques n'attaquent pas le béton durci mais peuvent altérer le séchage d'un béton frais. Les hydrocarbures et huiles d'origine minérales n'attaquent pas le béton une fois que celui-ci est en place. En revanche, les lubrifiants contenant des huiles végétales peuvent détériorer graduellement sa surface, en s'oxydant en acides qui attaquent les bétons.

Si la majorité des hydrocarbures n'attaquent pas le béton, leur faible viscosité et leur faible tension de surface leur permettent de rentrer par perméation dans un béton même durci. Si ces hydrocarbures contiennent des composés agressifs pour le béton, la résistance du béton peut être altérée (selon le type et la concentration des composés agressifs, ainsi que la vitesse de perméation des hydrocarbures dans le béton). À titre d'exemple, la photo-oxydation des hydrocarbures (exemple d'un déversement en surface) peut entraîner la formation d'acides organiques qui peuvent affecter la durabilité du béton sur le long terme [53].

Les hydrocarbures en tant que tels ne constituent pas un problème majeur pour l'intégrité du béton. C'est davantage la perméation des polluants (notamment les hydrocarbures) qui peut poser problème, notamment en termes d'intrusion de vapeurs ou de gestion des déblais contaminés lors du démantèlement du béton. La problématique ne sera d'ailleurs pas la même si les hydrocarbures sont présents en phase pure ou en phase aqueuse dissoute.

Le retrait de la source de pollution (excavation des sols, traitement d'une nappe) n'est pas un impératif en vue de préserver l'intégrité physique du béton. Conformément aux textes de 2007, le retrait de la source de pollution est néanmoins recommandé afin de limiter les risques pour la santé humaine, limiter la propagation d'une pollution ou pour diminuer les coûts de gestion des bétons impactés (notamment en cas de démantèlement).

#### **g) Réparer un béton endommagé [50]**

- **Le traitement superficiel du béton**

Lorsqu'un béton armé est endommagé par la corrosion, il ne s'agit pas uniquement de restaurer la partie superficielle du béton en appliquant les méthodes décrites au paragraphe 7.3.2.a). En effet, les armatures du béton armé peuvent être également corrodées. Cette corrosion peut être la conséquence de l'attaque par des ions Cl<sup>-</sup>, qui augmentent la perméabilité du béton (voir partie 7.2.2.b)), et de l'oxygène, qui diffuse dans les pores et les fissures remplis d'eau.

- **Le traitement mécanique des armatures corrodées**

Le traitement des armatures corrodées a lieu en quatre phases :

- le dégagement des armatures par burinage, jusqu'à l'apparition d'une partie saine. Toute la périphérie de l'armature devra être dégagée sur environ 1 cm ;
- l'élimination de la corrosion. Il est impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface, par décapage et brossage soigné, ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage, etc.). Les surfaces seront ensuite nettoyées afin de faire disparaître toute poussière ou toute souillure subsistant après élimination des bétons dégradés. Le nettoyage peut être réalisé par voie humide ou voie sèche (brossage et soufflage) mais dans le cas du lavage à l'eau, les excédents d'eau doivent être éliminés par soufflage ou aspiration ;

- la protection des armatures. Cette phase consiste à appliquer sur toute la surface des armatures dégagées (périphérie complète) un produit assurant sa protection vis-à-vis de la corrosion. Cette application doit suivre immédiatement le décapage. La compatibilité entre le mortier de réparation et le produit de protection devra être respectée.

Les produits de réparation et de protection des ouvrages en béton sont définis dans un guide technique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) paru en 1996 « Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton » ;

- la réparation des bétons à l'aide de mortier : cette phase consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier hydraulique. Ces mortiers doivent respecter les critères suivants :
  - tenue horizontale sans coffrage ;
  - montée en résistance rapide et forte résistance mécanique finale ;
  - bonne adhérence sur support béton ;
  - bonne protection des aciers ;
  - imperméabilité à l'eau ;
- le choix des produits se fera dans la famille des produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés (Guide technique LCPC cité précédemment).

- **Le traitement électrique des armatures par procédés**

Trois procédés électriques principaux existent :

- la protection cathodique. Elle peut se faire de manière préventive, mais c'est en mode curatif que la protection cathodique trouve le plus de débouchés. Dans ce dernier cas, la protection cathodique est appliquée de préférence à des armatures corrodées, dont l'enrobage est souvent défectueux. Elle consiste à appliquer aux armatures métalliques une polarisation qui abaisse le potentiel de l'acier jusqu'à une valeur dite potentiel de protection. La norme NF A 05-612 définit la conception, la réalisation et l'exploitation des installations de protection cathodique ;
- la réalcalinisation. Elle a pour objectif de réintroduire une certaine alcalinité au sein du béton à l'aide d'un courant électrique. Celui-ci est introduit au travers du réseau d'armatures (cathode) par l'intermédiaire d'un treillis extérieur (anode) appliqué sur le parement, et d'une solution de carbonate de soude (molaire soit environ 100 g/L) imprégnant une pâte à base de fibres de cellulose. Le courant est appliqué grâce à un générateur. Les densités de courants sont de l'ordre de 0,5 à 2 A/m<sup>2</sup> de béton, pendant une durée de quelques semaines. Sur les armatures, il y a production d'ions hydroxyles assurant progressivement une alcalinité. Ce procédé est particulièrement adapté aux structures fortement carbonatées mais peu dégradées ;
- la déchloruration. Elle a pour objectif d'extraire les ions chlorures du béton. A la cathode et à l'anode, les réactions sont identiques à celles de la réalcalinisation (à l'anode, il y a en plus dégagement de chlore). Au sein du béton, il y a migration d'ions : Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>. Les ions chlorures sont récupérés dans la couche externe, puis éliminés. Toutefois, si la pénétration est trop élevée et dépasse les armatures de peau, la migration des chlorures ne se fera pas correctement.



## 8. Mesures constructives : comment choisir ?

Plusieurs éléments peuvent motiver le choix de la mesure constructive à mettre en place :

- le contexte du projet (y compris : configuration du bâtiment, accessibilité, population en présence, etc.) ;
- le polluant à l'origine de la problématique ;
- l'efficacité de chaque technique envisagée vis-à-vis de la pollution rencontrée.

Comme toute solution envisagée dans le cadre de la méthodologie des sites et sols pollués, la réalisation d'un bilan coût/avantage est nécessaire afin de choisir la méthode présentant la meilleure solution au prix le plus acceptable compte tenu des objectifs à atteindre, notamment du point de vue sanitaire.

L'aspect économique devra être pris en compte dans sa globalité, puisque le coût de ces dispositions constructives ne se limite pas toujours à leur seule installation. La comparaison avec d'autres mesures de gestion devra notamment tenir compte des coûts associés à différentes étapes :

- définition, conception, dimensionnement, installation de la mesure constructive (études, essai pilote et travaux) ;
- contrôle et supervision de cette installation par une tierce personne compétente dans le domaine (cf Norme NFX 31-620-2, offre globale de prestation CONT) ;
- fonctionnement et maintenance éventuelle (usure du matériel, dépense énergétique, etc.) ;
- surveillance de la mesure.

Pour effectuer un choix le plus pertinent possible, l'**Annexe 1** liste un certain nombre d'avantages et d'inconvénients classiquement rencontrés dans ce type de problématique. Compte tenu de la spécificité de chaque dossier, ce tableau n'a pas pour objectif d'être exhaustif. Une étude spécifique à chaque cas est recommandée.

Afin d'aider l'ensemble des acteurs du domaine SSP à choisir la (ou les) mesure(s) constructive(s) susceptible(s) d'être mise(s) en place selon la problématique rencontrée, un outil d'aide à la décision est proposée en **Annexe 2**.



## 9. Définir les contrôles et les principes du plan de surveillance

La mise en place de mesures constructives s'inscrit davantage dans des actions permanentes que ponctuelles. Certains équipements peuvent toutefois être retirés à plus ou moins long terme selon les résultats de la surveillance qui aura été prévue et mise en place suite à la mise en œuvre des mesures constructives.

Préalablement à la présentation de ces opérations de contrôle puis de surveillance, il convient de rappeler que la méthode de prélèvement et d'analyse devra être la même pour tous les points et pour toute la durée du projet, afin de permettre la comparaison dans le temps des données. De même, en l'absence de pratiques et méthodes analytiques communes à tous les laboratoires d'analyse à l'heure actuelle, il est recommandé d'assurer la continuité des méthodes analytiques pendant toute la durée du projet, y compris lors de la surveillance.

### 9.1. PRISE EN COMPTE DE LA PROBLÉMATIQUE AU STADE DU DIAGNOSTIC

Lorsque la mise en place des mesures constructives semble nécessaire, il est primordial d'accumuler un certain nombre d'informations et de données analytiques de différentes natures avant d'étudier et *a fortiori* d'installer ces mesures constructives.

L'obtention de ces informations requiert généralement la réalisation de différents prélèvements et analyses en laboratoire. Il est important de densifier le contrôle au départ, avec un panel analytique suffisamment complet, en lien avec la pollution visée et les durées de fréquentations des lieux par les usagers (habitants, travailleurs, public,...).

Enfin, une description la plus précise possible des lieux étudiés est capitale : elle sera particulièrement utile à toutes les étapes du projet : du positionnement des points de mesures jusqu'à l'interprétation des résultats voire, le cas échéant, jusqu'à la définition des mesures de gestion à mettre en place.

Afin que l'ensemble du projet soit mené à terme avec la plus grande rigueur scientifique, il est recommandé de mettre en place une méthodologie de travail dès le début du projet.

#### 9.1.1. Définir une méthodologie de travail

Quel que soit le cas de figure (intrusions de vapeur, perméation ou recouvrement de sols de surface), une méthodologie de travail (échantillonnage, analyse, laboratoire,...) devra être définie au démarrage du projet et conservée tout au long de celui-ci. Toute modification de cette méthodologie devra être argumentée et les conséquences de ce changement devront être estimées afin de pouvoir comparer, dans le temps, les données.

Préalablement à la mise en œuvre de mesures constructives, il est important de réaliser un état initial à l'aide d'une première campagne de prélèvements qui servira de référence.

##### a) **Éléments communs quel que soit la problématique :**

- choix des paramètres à analyser, en fonction des informations issues des études environnementales réalisées, en matière de polluants potentiels attendus ;

- laboratoire d'analyses utilisé ;
- support de prélèvement / verrerie ;
- protocole de prélèvement (durée, débit de prélèvement, nombre d'échantillon minimum, fréquence, limite de quantification à atteindre,...) ;
- nombre de prélèvements témoin ;
- nombre de blancs de terrain et de transport ;
- protocole et délais de communication / explication avec les occupants du bâtiment (afin d'expliquer les choses à faire et à ne pas faire avant et pendant les prélèvements : aération des pièces, ménage, utilisation du réseau d'eau,...).

### **b) Cas de l'intrusion de vapeurs**

**Dans un contexte de SSP, il est fortement recommandé de réaliser, de manière synchrone, des prélèvements de gaz du sol (piézair, air sous dalle, air dans un vide sanitaire,...) et d'air intérieur, afin d'estimer la contribution des gaz de sols présents dans les sols à la contamination éventuellement mesurée dans l'air intérieur (estimation de la présence ou non de sources parasites anthropiques dans le bâtiment), mais aussi de témoins extérieurs (bruit de fond local).**

#### Remarque :

*Dans le cas où les prélèvements de gaz du sol et d'air intérieur ne pourraient pas être réalisés en concomitance, il convient que le prestataire justifie des contraintes rencontrées ou de son choix, et surtout de la méthodologie mise en place (cf guide BRGM à paraître relatif aux prélèvements de gaz du sol en lien avec une pollution des sols ou/et des eaux souterraines).*

Afin de constituer une aide pour le prestataire SSP, l'**Annexe 3** présente les informations principales à recueillir lors de la visite d'un bâtiment susceptible de faire l'objet de l'installation d'une mesure constructive. Cet outil est à utiliser en première approche et le plus en amont possible dans le projet, par exemple lors de la première visite préalablement à la réalisation de contrôle de la qualité de l'air dans le bâtiment.

La fiche présentée dans l'Annexe 1 du rapport DRD-10-109454-02386B établi par l'INERIS en juin 2010 [60], pourra également être utilisée pour compléter cette première analyse lors de la réalisation du prélèvement.

Rappelons également que le prestataire SSP pourra se rapprocher du CSTB, qui peut également réaliser des diagnostics techniques de bâtiments et le dimensionnement de mesures constructives [61].

### **c) Cas de la perméation**

- réalisation de prélèvements de sols ou/et de gaz de sol autour de canalisations et/ou d'eau du robinet dans des bâtiments ;
- nombre de campagnes ;
- protocole de prélèvement (lieux de prélèvement, avec ou sans purge,...) ;
- etc.

**d) Cas du recouvrement des sols**

- profondeur et type de prélèvement en fonction de la problématique (ingestion de sol, culture de fruits et légumes, usage, population fréquentant les lieux,...) ;
- nombre de prélèvements en fonction de la superficie de la zone concernée ;
- etc.

**9.1.2. Cas de l'intrusion de vapeurs**

**a) Prélèvement des gaz de sol et de l'air (air intérieur et air ambiant)**

- **Les techniques de prélèvements existantes**

Sans rentrer dans le détail des nombreuses techniques susceptibles d'être utilisées dans le cadre de la mesure des gaz du sol et de l'air, il faut néanmoins signaler que plusieurs techniques d'échantillonnage sont plus particulièrement utilisées : l'échantillonnage sur adsorbant (passif ou actif), l'échantillonnage dans une enceinte en acier sous vide se remplissant progressivement d'air (exemple Canister) et l'échantillonnage automatique à l'entrée d'un système analytique [60].

Pour mémoire, l'échantillonnage passif repose sur le principe de la diffusion des espèces gazeuses sur un adsorbant (sans pompage). L'échantillonnage actif nécessite le pompage d'un volume connu d'air sur un adsorbant.

Certains systèmes permettent d'ailleurs d'obtenir des échantillons de gaz en continu, et ainsi de pouvoir effectuer des mesures de pollution à n'importe quel moment. Ces dispositifs sont généralement coûteux à mettre en place. Ils peuvent également être restrictifs par rapport aux limites de quantification atteintes ou limités par l'appréciation d'un mélange de composés volatils (indice global sans identification du ou des composés en présence).

**Remarque :**

*Il faut signaler que le prestataire pourra se reporter au guide de l'INERIS relatif aux prélèvements d'air intérieur (en cours de révision) [60] et celui du BRGM qui détaille les techniques de prélèvements de gaz du sol (en cours d'élaboration).*

- **Les différents milieux investigables**

Différents milieux peuvent être échantillonnés en fonction des objectifs visés :

- les vapeurs de sol de sub-surface, à une certaine distance d'un bâtiment : ces échantillons sont collectés pour caractériser la nature du polluant (et ses métabolites), et permettre d'identifier les bâtiments plus particulièrement exposés vis-à-vis de la problématique de pollution ;
- les vapeurs de sol de sub-surface prélevées directement sous une dalle : ces échantillons permettent de déterminer les expositions potentielles actuelles, voire futures, des usagers d'un bâtiment ;
- l'air d'un vide sanitaire ou d'un sous-sol : pour connaître la qualité de l'air du milieu précédent le milieu d'exposition ;
- l'air intérieur : ces échantillons de vapeurs de sol sont collectés pour évaluer le niveau d'exposition actuel des usagers d'un bâtiment au regard d'une pollution y compris en tenant

compte du bruit de fond propre au bâtiment (peinture, mobilier, stockage de produits divers,...) ;

- l'air extérieur (dénommé également air ambiant) : considéré comme la référence de comparaison à l'extérieur du bâtiment. L'air intérieur ne pourra normalement pas être moins pollué que l'air extérieur.

**Afin d'évaluer le transfert de gaz de sol vers l'air intérieur, il est recommandé de réaliser *a minima* deux campagnes de mesures par an, une en hiver (avec chauffage) et une en été (sans ventilation) [60].**

Comme lors de la visite préliminaire d'un bâtiment, il est important de décrire le plus exhaustivement possible le lieu et les conditions de prélèvement. À cet effet, le lecteur pourra se reporter au rapport de l'INERIS [60], dans lequel les opérations de prélèvements d'air intérieur et les informations à noter lors du prélèvement sont détaillées.

### **b) Qualité des gaz de sol**

Les gaz de sols seront prélevés prioritairement au droit des bâtiments étudiés. Lorsque cela n'est pas possible (encombrement des réseaux, présence d'un plancher chauffant ou de dalles amiantées, fréquentation des pièces,...), des ouvrages (piézogaz notamment) pourront être installés à proximité directe des bâtiments.

Le GMPPP (Greater Manchester Public Protection Partnership – groupe régional de protection de l'environnement représentant 12 autorités locales du Nord-Ouest de l'Angleterre) base ses recommandations [62] sur celles concordantes de deux groupes reconnus : la CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) [63] et le CIEH (Chartered Institute of Environmental Health – groupe composé de professionnels à l'avant-garde en matière de santé et de sécurité publiques et environnementales). En particulier, le GMPPP recommande de réaliser un minimum de 3 prélèvements de gaz de sols pour chaque site étudié [62].

En termes de durée et de nombre de visites de contrôle au stade de l'étude, ces recommandations, **données à titre indicatif**, sont synthétisées dans les deux tableaux suivants. Il convient de noter que certains sites pourraient nécessiter davantage d'investigations, ou au contraire que le contexte du site pourrait rendre impossible le respect de ces recommandations (opposition des occupants, risque d'inquiétude en cas de visites et de mesures rapprochées, délai trop court en cas de réaménagement du site, incompatibilité avec les activités sur site, etc.). De même, certains sites présentant des risques faibles ou suivant leur configuration (une pièce unique, taille réduite de la pièce,...) pourront nécessiter moins d'investigations.

**Dans tous les cas, le prestataire doit apporter dans son rapport de diagnostic une justification argumentée par rapport aux choix réalisés lors du programme d'investigations.**

		Potentiel d'émission de la source				
		Très faible	Faible	Modéré	Elevé	Très élevé
Sensibilité	Faible (commerce)	4	6	6	12	12
	Modéré (immeuble)	6	6	9	12	24
	Elevé (résidentiel avec jardins)	6	9	12	24	24

Tableau 16 : Nombre de visites typique ou idéalisé de contrôle au stade de l'étude [63].

		Potentiel d'émission de la source				
		Très faible	Faible	Modéré	Elevé	Très élevé
Sensibilité	Faible (commerce)	1 mois	2 mois	3 mois	6 mois	12 mois
	Modéré (immeuble)	2 mois	3 mois	6 mois	12 mois	24 mois
	Elevé (résidentiel avec jardins)	3 mois	6 mois	6 mois	12 mois	24 mois

Tableau 17 : Durée typique ou idéalisée de contrôle au stade de l'étude [63].

Le rapport, rédigé par le CIRIA et dont les Tableaux 16 et 17 sont issus, préconise par ailleurs qu'au moins 2 mesures par an soient réalisées à des périodes de pressions atmosphériques différentes (basses et en chute, conditions atmosphériques connues pour être les plus mauvaises).

Enfin, avant l'installation et la mise en service des mesures constructives, il est important de s'assurer qu'une campagne minimum ait été réalisée avant la mise en place de la mesure constructive, afin de disposer d'un « état zéro ». Cela permettra d'avoir un point de comparaison, qui pourra donner des indications quant à l'efficacité de la mesure mise en place. **Des blancs de transport et/ou de terrain sont également à réaliser afin d'identifier toute contamination n'ayant pas de lien avec le site.**

### c) Qualité de l'air ambiant

Lorsqu'un impact significatif est mis en évidence dans les gaz de sol au droit d'un bâtiment, il est fortement recommandé de s'assurer de la qualité de l'air intérieur dans ce bâtiment. La qualité de l'air intérieur par mesure directe dans les pièces doit être privilégiée par rapport à une valeur prédite à partir d'un modèle de transfert.

**Pour cela, des prélèvements concomitants de gaz du sol et d'air intérieur seront systématiquement réalisés.** Pour l'air intérieur, la technique utilisée devra permettre l'obtention de limites de quantification suffisamment basses pour raisonner en termes de concentrations mesurées (et non estimées) et permettre une comparaison directe aux référentiels existants. La méthode de prélèvement sera adaptée à la fréquentation réelle du bâtiment (un prélèvement passif réalise une intégration sur au moins une semaine complète, y compris le weekend, alors qu'un prélèvement actif sera plus représentatif de l'exposition d'un

travailleur sur 8h). Suivant les contextes, un couplage de ces 2 méthodes peut permettre de mieux appréhender la variabilité des concentrations.

Remarque :

*A l'heure actuelle, le retour d'expérience montre que les prélèvements actifs sont généralement privilégiés dans le domaine des SSP. Cette pratique est propre au domaine des SSP et n'a pas de lien avec la réglementation sur l'air intérieur qui privilégie le prélèvement passif (voir l'article 5, paragraphe IV du Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public).*

Ces analyses de la qualité des gaz du sol et de l'air intérieur permettront à la fois :

- de juger de l'existence ou non d'un transfert de gaz du sol dans le bâtiment ;
- de juger de l'importance et de l'urgence de la situation compte tenu des concentrations mesurées et des usages (résidentiel/commercial/industriel). Si le risque sanitaire est trop important, la restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment peut être décidée par les autorités ;
- d'estimer l'éventuelle contribution de la pollution des sols à la pollution de l'air intérieur mesurée et ainsi de déterminer, in fine, le niveau de responsabilité du pollueur.

L'estimation de cette contribution peut être, par exemple, faite en comparant la proportion existante entre les différents composés mesurés dans les gaz de sol et la répartition de ces mêmes composés dans l'air intérieur, ou en vérifiant la présence ou non dans l'air intérieur d'un composé rare, spécifique à la pollution.

Des sources anthropiques présentes dans les bâtiments (aérosols, carburants, vêtements revenant d'un pressing à sec, tabagisme, etc.) peuvent, en effet, contribuer sensiblement aux concentrations mesurées dans l'air intérieur. Il est donc capital, lors des prélèvements d'air intérieur, qu'une inspection la plus exhaustive possible de ces sources anthropiques et que les pratiques des occupants soient appréhendées et prises en compte.

Pour information, le Tableau 18 présente les principaux polluants susceptibles d'être émis par des produits de consommation courante. Une liste plus exhaustive est accessible dans le rapport de l'INERIS.

<b>Polluant susceptible d'être émis</b>	<b>Produit de consommation courante</b>
PCE	Vêtement revenant d'un nettoyage à sec
TCE	Peintures, vernis, colles, dégraissant métaux
BTEX	Carburants, fumées de cigarettes, peintures, vernis, colles
Hg	Fumées de cigarettes, piles, lampes, thermomètres
Décane	White spirit, cire, vernis à bois
CO	Combustion incomplète (chaudière, etc.)

Tableau 18 : Emission de polluants volatils par différents produits de consommation courante [60].

Enfin, dans le cadre de prélèvements d'air intérieur, l'un des aspects à bien prendre en compte est l'information préalable des occupants / usagers du bâtiment, notamment sur les pratiques possibles et celles qui doivent être proscrites avant ou/et pendant les prélèvements. Cela a pour objectifs d'apprécier et éviter les risques d'interférences (exemple obtention de résultats sans lien avec la problématique SSP) et garantir la représentativité des prélèvements effectués.

Cette phase peut nécessiter un important travail de communication pour assurer une bonne sensibilisation des occupants.

Si des activités susceptibles d'interférer avec les mesures d'air intérieur sont malgré tout pratiquées pendant le prélèvement, cette information devra être intégrée à l'interprétation des résultats [60]. Le Tableau 19 présente quelques recommandations aux occupants des bâtiments étudiés à adapter à chaque situation.

<b>Quelques pratiques susceptibles d'interférer avec des prélèvements d'air intérieur</b>
Ne pas surchauffer ou surventiler la maison
Eviter l'utilisation de produits ménagers notamment le nettoyage des locaux (au moins 2 jours avant le prélèvement)
Limiter au maximum les ouvertures de portes et fenêtres
Ne pas fumer dans la maison
Ne pas utiliser d'aérosols (laque à cheveux, désodorisant, etc.), parfums, encens,...
Ne pas utiliser de solvants, peintures, vernis, dissolvants
Ne pas rapporter de vêtement d'un pressing à sec
Ne pas stocker ou utiliser de carburants ni d'engins thermique (voiture, tondeuse, souffleur, etc.) dans le bâtiment, dans un bâtiment mitoyen ou à proximité du bâtiment

*Tableau 19 : Liste non exhaustive des différentes pratiques susceptibles d'interférer avec des prélèvements d'air intérieur.*

Les prélèvements doivent être réalisés dans les conditions usuelles d'utilisation du bâtiment pour se rapprocher (ou reproduire) le plus possible les conditions « normales » d'exposition des occupants / usagers. A défaut, les prélèvements seront réalisés dans des conditions majorantes [60].

**Le programme d'investigations sera défini en fonction de l'usage du bâtiment et la présence ou non de populations sensibles (femmes enceintes, enfants,...). Il portera sur les gaz sous le bâtiment (ou/et gaz du sol à proximité du bâtiment), l'air intérieur et l'air ambiant.**

En particulier, il comportera différents prélèvements d'air intérieur dans les niveaux les plus bas du bâtiment (cave, sous-sol et rez-de-chaussée) en positionnant préférentiellement les points de mesure, d'une part, dans les pièces présentant des voies de transferts importantes (sol de terre battue, dalle ou murs endommagés) afin de juger du relargage de gaz dans ces pièces et, d'autre part, dans les pièces les plus utilisées (principalement salons, chambres, bureaux, salle de classe,...). La fréquentation des pièces par des populations sensibles (enfants notamment) sera un critère de choix pour l'installation de points de prélèvement. .

Le programme d'investigations sera complété par des prélèvements dans les étages (témoins ou points de mesure si exposition potentielle) notamment si des chambres ou des populations sensibles s'y trouvent ainsi que par, au moins, un prélèvement d'air extérieur (ambiant) qui servira de référence en dehors du bâtiment.

Les résultats d'analyse seront étudiés d'un point de vue spatial et temporel et au regard des référentiels en vigueur. Rappelons néanmoins qu'il faudra, dans tous les cas, privilégier une

analyse globale de la situation pour bien comprendre le contexte et la manière dont les concentrations se distribuent dans le bâtiment.

### **9.1.3. Cas de la perméation**

Dans le cas d'une canalisation traversant une zone polluée ou potentiellement polluée, il convient de réaliser des études environnementales préalables visant à confirmer le cas échéant la nature des polluants en présence et estimer le risque de perméation à travers cette canalisation.

Il est recommandé que, si des doutes persistaient quant à la qualité de l'eau transportée dans la canalisation, des analyses de cette eau soient réalisées ainsi que des prélèvements de gaz de sols ou/et des prélèvements de sol le long de la canalisation au droit de la zone polluée.

Ces investigations seront réalisées conformément à la norme NFX 31-620-2 – offre globale de prestation CPIS.

#### **a) Prélèvement de l'eau du robinet**

Ces prélèvements d'eau du robinet seront réalisées conformément au Guide de prélèvements dans le cadre de contrôle sanitaire des eaux, rédigé en 2006 par les Directions Régionale et Départementales des affaires sanitaires et sociales de Rhône-Alpes [64] ainsi que le Guide de prélèvement pour le suivi sanitaire des eaux en application du code de la santé publique, rédigé en 2003 par l'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE) [65].

#### **b) Qualité de l'eau du robinet**

La qualité de l'eau du robinet sera estimée par comparaison des résultats d'analyses avec les valeurs définies dans la réglementation en vigueur, notamment l'Arrêté du 11 janvier 2007, relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique [66], ainsi qu'aux valeurs guide de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les composés non listés dans l'arrêté [67].

### **9.1.4. Cas du recouvrement des sols de surface**

#### **a) Prélèvement des sols**

Les prélèvements de sols de surface seront réalisés conformément à la norme NFX 31-620-2.

#### **b) Qualité des sols**

La qualité des sols sera estimée par comparaison des résultats d'analyses avec des valeurs adaptées au contexte et à la problématique rencontrée au droit du site étudié : fond géochimique naturel ou urbain, prélèvements témoins, répartition entre les points de prélèvements, etc.

### **9.1.5. Cas de la corrosion de biens matériels**

Au stade du diagnostic, il convient en premier lieu d'essayer de collecter et d'exploiter les éventuels plans de construction disponibles.

Selon les cas, la réalisation et l'analyse de prélèvements sur des biens matériels ainsi que l'étude de l'avancée de la corrosion et des travaux éventuellement nécessaires seront confiés à une société spécialisée en corrosion, en l'absence de compétence interne du prestataire SSP.

## **9.2. ÉTAT DES LIEUX CONTRADICTOIRE ET RÉCEPTION DES MESURES CONSTRUCTIVES**

### **9.2.1. État des lieux avant travaux**

Préalablement à l'installation de mesures constructives, voire à la réalisation des études préliminaires (notamment en cas de travaux intrusifs), un état des lieux contradictoire est généralement établi. Il permet de protéger aussi bien les prestataires SSP en charge de la réalisation des travaux que les propriétaires et/ou occupants des lieux.

Compte tenu de la sensibilité du contexte, il est recommandé que les modalités de remise en état des lieux à la fin de l'intervention soient être définies avant la réalisation des travaux.

### **9.2.2. État des lieux après travaux et réception des mesures constructives**

Une fois l'ensemble des travaux et la remise en état des lieux réalisés selon les modalités initialement définies, un état des lieux contradictoire après travaux est généralement établi. La réception des travaux est ensuite sanctionnée par un PV de réception signé par l'ensemble des parties.

## **9.3. CONTRÔLE ET SURVEILLANCE APRÈS MISE EN PLACE DES MESURES CONSTRUCTIVES**

Les objectifs généraux du plan de surveillance sont multiples :

- vérifier que la situation est correctement gérée et maîtrisée, en s'assurant que les travaux réalisés permettent d'atteindre les objectifs fixés. Plus précisément, il s'agit de contrôler l'efficacité à court et long terme de la mesure constructive ;
- contrôler l'absence d'altérations de la qualité des installations dans le temps, en complément des mesures générales de prévention. Cet aspect est particulièrement important, par exemple, pour l'air dans le cas des mesures passives ;
- établir la qualité des milieux et son évolution, dans le temps et dans l'espace. Ce point concerne, plus spécifiquement, les milieux air et eau du robinet plutôt que le sol ;
- communiquer afin d'expliquer et de restituer les résultats des contrôles mais aussi afin d'ajuster, si nécessaire, les modalités de contrôle ou de surveillance.

Plus concrètement, plusieurs types de contrôles sont à mettre en place, en fonction de la problématique du site (inhalation de vapeurs, perméation, couverture des sols ou corrosion).

**Dans tous les cas, cette surveillance est à inclure dans le cadre du bilan quadriennal tel que prévu et détaillé dans les textes de 2007.**

### 9.3.1. Cas de l'intrusion de vapeurs

Tout d'abord, il faut immédiatement signaler qu'avec ce type de problématique la réalisation d'**une seule campagne de surveillance est insuffisante** pour juger du bon fonctionnement ou de l'efficacité d'une mesure constructive. Il convient de réaliser plusieurs campagnes, à des périodes et dans des conditions météorologiques différentes, notamment de pression et de température, comme par exemple en hiver avec du chauffage et en été sans ventilation. Le lecteur obtiendra de plus amples détails dans le rapport rédigé en novembre 2013, dans le cadre du projet FLUXOBAT [68].

**Plus exactement, il est recommandé dans le cadre de ce guide, de réaliser un suivi rapproché et densifié durant la première année après l'installation de la mesure constructive (1 campagne de mesures tous les 3 mois la première année).** Suite à ce premier suivi, qui doit permettre d'acquérir les éléments de connaissance suffisants pour juger de la situation et de la variabilité des concentrations, et suivant les résultats (stabilisation ou baisse des concentrations), les contrôles pourront progressivement être espacés. Dans le cas de l'utilisation d'un sous-sol correctement ventilé pour des activités non sensibles (local technique, parking,...), ou dans le cas d'un vide sanitaire suffisamment ventilé, un contrôle tous les 6 mois la première année peut être envisagé.

#### Remarque :

*Par rapport aux principes de suivi énoncés ci-dessus, à l'issue de la mise en place d'une mesure constructive dans un nouveau bâtiment construit au droit d'un site relevant de la méthodologie SSP (cas d'expositions résiduelles), il est fortement recommandé, de réaliser la première campagne de mesure (notamment de la qualité de l'air intérieur), préalablement à son exploitation ou à sa mise à disposition afin de constituer un état initial fiable.*

*Cette remarque est, plus particulièrement, valable dans le cas d'un nouvel établissement, recevant du public ou accueillant des populations sensibles, construit sur un site pollué. Ces mesures viendraient alors compléter le panel analytique défini dans le cadre de l'article 4 du décret n°2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.*

Comme lors de la phase préalable de diagnostic, le nombre et la localisation des prélèvements devront être adaptés à l'usage du site. *A minima*, un prélèvement par niveau et par pièce à usage sensible semblent nécessaires, associés à des prélèvements d'air extérieur et de blancs de transport ou de terrain.

L'arrêt de la surveillance et de la mesure constructive (active) sera étudié au regard de l'évolution de l'ensemble des données existantes (qualité de la nappe, des sols, des gaz de sols et de l'air intérieur voire aussi d'autres milieux : sols et eaux souterraines notamment suivant les risques de dégazage de vapeurs). S'agissant de l'exposition de personnes à des produits polluants, il est recommandé d'associer les autorités compétentes à cette décision. Cet aspect est, plus particulièrement, abordé dans la partie 9.4.2 de ce guide.

En plus, des campagnes d'analyses précédemment discutées, le prestataire en charge du suivi (voire suivant les cas un prestataire spécialisé) doit vérifier et assurer, à chaque intervention, différents types de contrôles complémentaires (contrôles du bon fonctionnement et de l'état général des installations). À titre d'exemple, le taux et la durée de fonctionnement des installations, les dépressions mesurées sous la membrane ou sous la dalle seront relevés et comparés aux valeurs préalablement définies. En cas de dérive ou de détériorations, les mesures adéquates seront prises afin d'y remédier au plus tôt. Dans le cas de la mise en

surpression ou dépression d'un vide sanitaire, les mesures et les contrôles de débits et de pressions seront très difficiles voire impossibles. En effet, un vide sanitaire ne peut être considéré comme étanche à 100 % et une mesure au niveau d'une grille ne sera pas forcément représentative, compte tenu des infiltrations probables à d'autres endroits du vide sanitaire. Un contrôle et une mesure de débit sur le caisson de ventilation peuvent toutefois être réalisés avec précision. Dans le cas d'une VMC, la mesure des débits pourra être réalisée directement sur les grilles et bouches de ventilation à l'aide d'un anémomètre muni d'un cône de mesure.

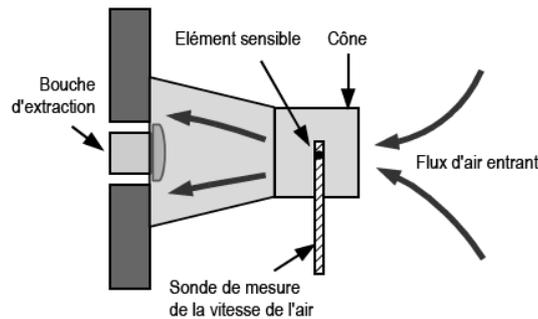


Figure 26 : Contrôle des débits d'une VMC.

Enfin, le programme de surveillance intégrera également le suivi des points de rejet (par la réalisation d'un bilan masse par exemple) avec leur conformité avec les objectifs visés. Cet élément sera particulièrement important lorsqu'un traitement des rejets sera effectué. Ce suivi permettra d'anticiper une éventuelle saturation des unités de traitement (par exemple : container de charbon actif) et surtout, de vérifier l'efficacité du traitement. Le lecteur pourra se reporter à la norme NF X31-620-4 pour de plus amples informations concernant les exigences dans le domaine des prestations d'exécution des travaux de réhabilitation.

### 9.3.2. Cas de la perméation (alimentation en eau potable)

Au niveau des canalisations, lorsqu'une mesure constructive a été mise en place, la surveillance de la qualité de l'eau y transitant, en amont comme en aval est préconisée après avoir défini de manière précise le protocole de prélèvement (influence des purges par exemple).

**Compte tenu des éléments détaillés au chapitre 5, 9 composés sont à rechercher en priorité : le tétrachlorure de carbone, le trichloréthylène, le tétrachloroéthylène, le chlorobenzène, le benzène, le toluène et les xylènes. D'autres composés pourraient être analysés en fonction de la problématique propre au site étudié.**

Concernant la fréquence de prélèvements d'eau de consommation, s'agissant d'un milieu faisant l'objet d'un suivi sanitaire par l'ARS, celle-ci pourra être définie en concertation avec les autorités sanitaires. Le retour d'expérience montre que différentes pratiques sont possibles (prélèvements rapprochés avec un suivi sur quelques semaines ou quelques mois ou prélèvement annuel pendant toute la durée d'un bilan quadriennal).

### 9.3.3. Cas du recouvrement des sols de surface

Bien que la couverture des sols pollués soit couramment inscrite dans le cadre d'une problématique de pollution, suite aux travaux (projet d'aménagement notamment), la vérification effective sur le terrain des prescriptions préalablement définies est rarement réalisée.

Il convient néanmoins de contrôler, outre la qualité des terres mises en place, que leur épaisseur est conforme à celle prévue et qu'un grillage avertisseur est bien présent sur l'ensemble de l'emprise de la zone recouverte.

Si une barrière étanche ou un horizon de drainage est intégré au dispositif, il est également recommandé de réaliser les contrôles appropriés à ce type de dispositifs.

Suite à ce contrôle ponctuel qui permet de réceptionner les travaux, le suivi porte, en général, davantage sur des aspects comme l'entretien du terrain (notamment suivi de la végétation), ses conditions d'accès (état de clôture par exemple), l'efficacité du dispositif de drainage (écoulement), la stabilité des pentes et la résistance à l'érosion. L'épaisseur de la couche de terre saine pourra également être vérifiée régulièrement afin de s'assurer que l'influence du tassement naturel de la terre reste limitée dans le temps. Pour ce type de mesures, un contrôle annuel peut être suffisant si ce suivi n'est pas couplé avec d'autres interventions sur le terrain (prélèvements et analyses des eaux souterraines ou mesures liées aux remontées de vapeurs).

#### **9.3.4. Cas de la corrosion des biens matériels**

Pour cet aspect aussi, la mise en place d'un suivi peut être nécessaire pour s'assurer de la pérennité et de l'intégrité des superstructures ou/et infrastructures.

Certaines vérifications sont simples, comme par exemple les couleurs, les formes, la rugosité etc. D'autres demandent des analyses beaucoup plus fines qui nécessitent de faire appel à des laboratoires spécialisés [56].

Concernant les revêtements, la vérification se limite généralement à des contrôles de leur adhérence au support, de leur aspect et de leur épaisseur.

Concernant la fréquence de vérification, cela dépend plus particulièrement de la mesure constructive mise en œuvre. En ce sens, les recommandations du fabricant ou de l'entreprise ayant assurée la pose sont à respecter.

### **9.4. QUELQUES ÉLÉMENTS DE RETOUR D'EXPÉRIENCE**

#### **Préambule :**

**Le présent guide se concentre sur les aspects techniques. Le volet juridique (contexte, cadrage, jurisprudence,...) associé à la mise en place et au contrôle des mesures constructives ne sont pas traités dans ce document. Seuls des éléments informatifs ou associés au retour d'expérience sont présentés dans ce chapitre.**

#### **9.4.1. Cadre général**

Dans tous les cas de figure (réglementation ICPE ou hors champ des ICPE), il faut d'ores et déjà signaler que la politique nationale de gestion des sites et sols pollués entrée en vigueur en 2007 (annexe 1 de la circulaire du 08/02/2007, § 3.6) intègre les mesures constructives parmi les mesures de gestion (cf § 3.2).

La circulaire relative à l'implantation sur des sols pollués d'établissements accueillant des populations sensibles, définit aussi une méthodologie spécifique et impose la mise en place de particularités constructives comme des vides sanitaires lorsque des pollutions résiduelles sont susceptibles de dégager des vapeurs toxiques.

Dans ce cadre, il est également proposé que les mesures du plan de gestion soient contrôlées au fur et à mesure du déroulement des opérations par une entité indépendante des prestataires en charge des opérations de dépollution (prestation CONT détaillée dans la norme NF X 31-620-2).

Suivant les contextes, le cadrage des interventions ou / et administratif relatif à la mise en place des mesures constructives, de contrôles et de surveillance, peut être assuré par (liste non exhaustive de cas de figure) :

- des arrêtés préfectoraux lorsque l'origine de la pollution est une installation relevant de la législation sur les installations classées. Les mesures constructives rendues nécessaires du fait des pollutions résiduelles seront détaillées (tant en termes de spécificités techniques que d'objectifs de qualité du milieu à atteindre) dès le stade du plan de gestion. Les éléments relatifs à la maintenance et aux contrôles à réaliser sur ces dispositions, notamment les débits de ventilations seront également intégrés dans le dossier de servitudes ;
- hors du champ des ICPE, il est constaté que la mise en place de mesures constructives et encore moins leur contrôle *a posteriori*, ne sont, à leur heure actuelle, pratiquées couramment. Seules des initiatives encore isolées sont identifiées lorsque les aménageurs/collectivités concernés sont conscients des enjeux de la pollution des sols.

Dans le cadre de projets d'aménagement, il appartient à l'aménageur (collectivités, établissements publics fonciers,...) de s'attacher les services de prestataires compétents et d'intégrer dans son projet (budget, planning,...) les différentes prestations relatives à la mise en place et aux contrôles associés des dispositions constructives (mise en œuvre effective sur le terrain versus contrôles de leurs principes : contrôle de la présence d'un vide sanitaire ventilé avec ou sans contrôle réel du débit de ventilation,...).

Remarque :

*Dans le cas d'une pollution domestique (par exemple une fuite de fioul d'un particulier qui a pollué une habitation riveraine), les compagnies d'assurances sous le contrôle de leurs experts peuvent intervenir.*

Le retour d'expérience montre ainsi que les aspects relatifs aux mesures constructives sont traités à des moments et à des niveaux variables d'un projet d'aménagement :

- **par exemple, certains aménageurs et leur prestataire SSP ont élaboré une fiche spécifique (dénommée par exemple Fiche de lot opérationnelle).** Ce document a vocation à résumer, de manière synthétique, l'ensemble des connaissances historiques et environnementales, ainsi que les mesures de gestion et les dispositions constructives à mettre en place pour une entité géographique du projet d'aménagement (échelle de la parcelle, du lot, d'un secteur,...). Cette fiche de synthèse permet une bonne conservation de la mémoire en étant notamment jointe au permis de construire et en facilitant la transmission de l'information avec le promoteur et les acquéreurs potentiels futurs ;
- **par l'intégration d'articles traitant des mesures constructives, voire de clauses environnementales, dans les documents, contrats et/ou actes de vente afin de fixer les obligations et les responsabilités de chacune des parties.** Le recours à des notaires et avocats spécialisés dans l'environnement est, dans ce cas, fortement recommandé. Cette intégration améliore également les modalités et principes de conservation de la mémoire [61] ;

- **directement dans le cahier des charges que les promoteurs immobiliers établissent.** Le contrôle peut également être réalisé par le prestataire SSP de l'aménageur suivant le montage juridique du dossier.

Par le biais du cahier des charges, il peut également être demandé aux promoteurs d'intégrer un volet concernant la gestion de la problématique pollution et la mise en œuvre des mesures constructives afférentes. Ces aspects sont, en général, préalablement validés par l'aménageur et son prestataire SSP dans le cadre du permis de Construire ;

- **lors de l'instruction des demandes d'autorisation d'occupation du sol (permis de construire, permis d'aménager,...),** la rédaction de notices environnementales par les maîtres d'ouvrage (ou leur représentant) est de plus en plus souvent constatée, notamment dans le cadre des marchés publics. Ce document rappelle notamment les contraintes environnementales en présence (zone sensible, contexte hydrogéologique, pollution en présence), les solutions techniques retenues, ainsi que les engagements de maître d'ouvrage pour les mettre en œuvre et les contrôler ;

Tout ou partie des dispositions constructives peuvent ainsi être indiquées dans les permis de construire.

En matière de contrôles, les quelques exemples détaillés précédemment montrent qu'ils peuvent être prévus et réalisés tout au long des travaux d'aménagement et avoir une portée très spécifique ou très large suivant le contexte. De même, il peut s'agir de vérifier les éléments détaillés dans le permis de construire (constat état initial / état final des éléments du permis de construire) [61]. Comme d'autres aspects plus classiques dans le domaine des SSP (par exemple sur les eaux souterraines), prévoir puis réaliser des contrôles relatifs aux mesures constructives (lors de la mise en place, sur leur efficacité réelle,...) est ainsi fortement recommandé.

#### **9.4.2. Recommandations relatives à la surveillance et à la maintenance de la mesure constructive et décision de son arrêt éventuel**

Compte tenu des objectifs attendus aussi bien en matière de protection des biens matériels que de la santé et de la sécurité des occupants d'un bâtiment, **le suivi, l'entretien et la maintenance de la mesure constructive mise en place sont cruciaux pour garantir son efficacité dans le temps.** Pour cela, il est recommandé de suivre les recommandations du fabricant, de l'installateur ou de toute société spécialiste du domaine en question. En cas de cas complexes ou peu fréquents, l'expérience et la connaissance de ces derniers seront d'autant plus importantes.

##### Remarque :

*Il convient de préciser que l'arrêt éventuel d'une mesure constructive porte principalement sur les mesures actives, notamment sur l'équipement mis en place (exemple : arrêter et retirer un extracteur d'air). Néanmoins, il peut s'agir dans le cas de dispositifs passifs, de retirer un évent sur une façade ou de boucher une ventilation.*

Le suivi, l'interprétation des résultats obtenus lors de la surveillance et la proposition d'arrêt éventuel de la mesure constructive (dans ce cas, lorsqu'elle est active) relevant du domaine des SSP, il est recommandé que ces prestations soient réalisées par un prestataire certifié SSP avec, si nécessaire, le concours d'une société spécialisée reconnue dans son domaine de compétence (contrôle / vérification d'une VMC ou d'un système de dépressurisation).

Les cas nécessitant la mise en place de mesures constructives étant généralement complexes et à fort enjeu (notamment dans le cas d'intrusions de vapeurs dans des bâtiments résidentiels), le suivi, l'interprétation des résultats et la méthodologie d'arrêt des mesures constructives doivent être précis et rigoureux. Dans le cas où le site à l'origine de la pollution est une installation classée, ces éléments sont soumis à l'approbation des services de l'État.

#### **9.4.3. Conservation de la mémoire et transmission des informations**

La conservation de la mémoire et la transmission des informations sont généralement les éléments les plus délicats à assurer et à mettre en place. Les aspects relatifs aux dispositions constructives (nature, localisation, modalités de surveillance, accessibilité,...) peuvent faire partie intégrante d'un dossier de servitudes (cf. guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués, MEDDTL, janvier 2011). Le retour d'expérience montre que ces outils restent néanmoins encore peu utilisés en raison d'une part, des risques de diminution de la valeur foncière des terrains [61] (donc compensation à prendre en compte potentiellement) et, d'autre part, des contraintes réelles ou supposées pour lever ces servitudes.

Malgré des difficultés liées à l'obtention de listes à jour des propriétaires, l'instauration de servitudes est aussi un bon moyen pour identifier et contacter les propriétaires des bâtiments. Ces derniers ne sont pas toujours connus, n'habitent pas sur place ou ne sont pas au courant des problèmes rencontrés. Par exemple, les personnes assistant aux réunions publiques ou en contact direct avec les acteurs du dossier ne sont parfois que les occupants du bâtiment (locataires) et non les propriétaires.

À l'inverse, l'assurance de la transmission de l'information, notamment dans le cas des locataires, est un élément important mais parfois complexe à mettre en œuvre : qui les informe ? selon quelles modalités ? à quel moment ?....

Cette sensibilité dépasse le cadre de l'information du locataire mais tient surtout par la garantie d'efficacité dans le temps de la disposition constructive. En effet, celle-ci peut, très facilement, être remise en question par méconnaissance de la situation (arrêt des installations, obstructions des grilles d'aération, ...).

En première approche, il convient que le propriétaire du bâtiment soit pleinement associé au processus de décision et de communication (cf § 9.4.4 pour les moyens susceptibles d'être utilisés). Cependant, dans certains cas, la limite du droit privé peut être atteinte, notamment lorsqu'un propriétaire loue une partie de son propre logement.

#### **9.4.4. Gestion de la communication**

Dans le cas des dossiers d'intrusions de vapeurs hors-site, les acteurs entrant en jeu peuvent être très nombreux :

- L'État (généralement le préfet) ;
- L'administration (généralement la DREAL) ;
- Le Maire ;
- L'exploitant et son prestataire SSP ;
- L'ARS ;
- Les riverains ;

Le cas échéant :

- des associations de riverains ;
- la Sécurité Sociale ;
- des médecins ou experts en pathologie environnementale ;
- etc.

Dans ces dossiers, généralement très complexes, aussi bien en termes techniques qu'en termes de communication, un comité de pilotage pourra être organisé afin de présenter l'avancée des travaux (phase de pré-construction, construction, suivi...). Il peut, par exemple, être pertinent de réaliser des réunions publiques annuelles de présentation des résultats et de l'avancée des travaux. Le retour d'expérience montre qu'une communication adéquate (nécessitant un travail important sur la sémantique) et transparente est capitale pour la réussite du projet.

Comme présenté au § 9.4.3, le retour d'expérience montre qu'il est parfois difficile d'informer l'ensemble des occupants et/ou des propriétaires d'un bâtiment. Afin d'assurer une bonne transmission de l'information (notamment lors de changement de locataire ou de propriétaire) et le maintien des mesures constructives dans un état compatible avec l'efficacité attendue, il pourra être pertinent de réaliser des plaquettes d'information (ou tout autre support adéquat) à joindre au bail de location ou à l'acte de vente. Le retour d'expérience montre aussi que la transmission de l'information peut s'appuyer sur un courrier au propriétaire l'incitant à informer son locataire.

Dans le cas de projet d'aménagement, la communication au sujet des mesures constructives n'est généralement pas réalisée par l'aménageur mais plutôt par le promoteur immobilier (notamment via le règlement intérieur du site ou des notices d'information par exemple). Cette communication doit être adaptée au contexte et ne saurait être pré-conçue pour n'importe quel site. Néanmoins, en dépit du règlement intérieur, il n'est pas rare que l'efficacité d'une mesure constructive soit remise en cause par le comportement de certains occupants du site, parfois en toute connaissance de cause (bouchage des entrées d'air, etc.). La communication et la pédagogie sont donc des éléments essentiels à la réussite et à l'efficacité d'une mesure constructive.

Dans le cas d'une surveillance, le retour d'expérience montre qu'il faut privilégier la continuité du personnel intervenant, notamment lors d'intervention chez des riverains. Elle permet de créer un climat de confiance entre l'ensemble des parties facilitant les interventions et le dialogue, de ne pas perdre d'informations au cours du projet et de maîtriser la communication avec les riverains.

## 10. Les écueils à éviter / les bonnes pratiques

La mise en place de mesures constructives doit se faire dans le cadre d'études approfondies concernant le bâti, les sols au droit du site, les polluants en présence, etc. afin de choisir la (ou les) mesure(s) qui sera (seront) la (les) plus adaptée(s) au contexte et qui remplira (rempliront) effectivement son (leur) rôle de protection des populations vis-à-vis de la problématique mise en jeu (ingestion de sol, émanations de gaz pollué, perméation dans les réseaux,...). Différents moments clefs peuvent être identifiés pendant lesquels il conviendra d'être plus particulièrement vigilant.

### 10.1. LE DIAGNOSTIC INITIAL, UNE ÉTAPE CRUCIALE À NE PAS NÉGLIGER

Préalablement à la mise en place de mesures constructives et en complément des éléments présentés dans le paragraphe 9.1, il est primordial d'avoir soigneusement étudié la problématique et le contexte général dans lequel elle se situe.

#### 10.1.1. Cas de l'intrusion de vapeurs – Les caractéristiques du bâti et de ses usages

Afin de diagnostiquer au mieux la problématique et d'estimer les difficultés qui pourront être rencontrées au stade des études préliminaires, de l'installation des mesures constructives ou de leur suivi, de nombreux aspects devront être étudiés, parmi lesquels :

- la nature des sols (en bois, dalle de béton, terre battue, ...) et des murs (épaisseur, nature de l'isolant), le type de fondations ;
- la nature du sous-bassement (dalle portée, indépendante), du sous-sol ainsi que la présence éventuelle et la configuration du vide sanitaire (continuité, compartimentage) ;
- la présence et la communication entre les différents niveaux (escaliers, ascenseurs,...) ;
- l'état de la construction : fissures visibles, indices de désordres géotechniques ;
- La ventilation du bâtiment (présence et état d'une VMC, pièces humides, odeurs, etc.) ;
- le rôle des réseaux : assainissement et alimentation en eau, mais aussi des réseaux de gaines électriques ;
- la présence d'humidité importante en sous-sol à comparer avec la profondeur de la première nappe rencontrée voire avec le Niveau des Plus Hautes Eaux (NPHE) (problématique de remontée de nappe) ;
- le nombre et l'âge des occupants du bâtiment ;
- la fréquentation et l'usage du bâtiment (bureaux, atelier, logement collectif ou individuel, habitation principale ou secondaire,...), présence permanente ou non d'une personne dans le bâtiment ;
- le type d'occupant (propriétaire ou/et locataire, usagers,...) et ses pratiques (bricolage, jardinage, fumer à l'intérieur,...) ;
- le type de chauffage (électrique, fioul, gaz, géothermie,...) ;
- la présence éventuelle de chauffage au sol ou de dalles de sol amiantées (notamment si un SDS venait à être proposé) ;
- la présence de stockages de produits pouvant être à l'origine d'émissions gazeuses, etc.

Dans le cadre d'une problématique SSP, il est rappelé qu'il ne faut pas raisonner uniquement sur la qualité de l'air intérieur, en négligeant la contribution liée à l'air du sol.

Dans la plupart des cas, la connaissance, même pointue, de la problématique ne suffit pas à justifier un raisonnement basé uniquement sur des facteurs d'atténuation théoriques. Il reste indispensable de réaliser des mesures et des constats de terrain et d'adopter, in fine, une approche globale pour comprendre le contexte et la manière dont les concentrations en polluants se distribuent.

### **10.1.2. Cas de la perméation**

Afin d'apprécier au mieux cette problématique et d'estimer les difficultés qui pourront être rencontrées au stade des études préliminaires, de l'installation des mesures constructives ou de leur suivi, de nombreux aspects sont à prendre en compte, parmi lesquels :

- la nature des sols sous-jacents (perméable, imperméable, fracturé,...) ;
- la zone d'extension de la pollution ;
- le cheminement de la canalisation (traversée de chaussée, passage au droit de zone impactée,...) (voir les DICT notamment) et la localisation des raccordements ;
- À noter que le tracé des canalisations pourra être appréhendé suite à l'élaboration des DICT et à partir de plans du site pour la partie privative ;
- le type de canalisations (fonte, cuivre, PE, PVC, multicouche,...) ;
- le type de polluant(s) et son aptitude à la perméation ;
- les usages de l'eau transportée (industriel, agricole, consommation humaine, etc.)
- les voies de transfert et d'exposition si aucune mesure n'était mise en œuvre ;
- les populations cibles, etc ;
- les risques sanitaires pour les employés réalisant l'intervention, en cas de travaux au droit de zones polluées.

### **10.1.3. Cas du recouvrement des sols de surface**

Afin de bien appréhender cette problématique et d'estimer les difficultés qui pourront être rencontrées au stade des études préliminaires, de l'installation des mesures constructives ou de leur suivi, différents aspects doivent être pris en compte, parmi lesquels :

- l'usage futur de la zone en question ;
- la nature de la pollution résiduelle ;
- les voies de transfert et d'exposition à considérer si aucune mesure n'était mise en œuvre ;
- les populations-cibles utilisant la zone en question ;
- la présence d'un jardin, cultivé ou non, d'un puits privé, utilisé ou non en appréciant les aspects liés à la consommation des végétaux produits, etc.

#### **10.1.4. Cas de la corrosion des biens matériels**

Pour gérer cette problématique et apprécier les difficultés qui pourront être rencontrées au stade des études préliminaires, de l'installation des mesures constructives ou de leur suivi, de nombreux aspects devront être étudiés, parmi lesquels :

- le type de matériau susceptible d'être corrodé ;
- les polluants susceptibles d'être à l'origine d'une corrosion ;
- la présence d'eau (météorique, nappe souterraine,...) ;
- la présence de sels (notamment de déverglaçage) ;
- la succession d'épisodes de gel et de dégel ;
- la présence de polluants dans l'air atmosphérique ;
- la présence de conditions de température et de pression non courantes ;
- l'usage du bien matériel en question (risque technologique et/ou environnemental en cas de rupture, monument classé, etc.).

### **10.2. ÉVITER CERTAINS EFFETS INDÉSIRABLES**

Il faut garder à l'esprit que certaines mesures constructives sélectionnées peuvent paradoxalement entraîner des effets indésirables, voire se révéler complètement contre-productives, si certaines aspects sont négligés.

#### **10.2.1. Cas de l'intrusion de vapeurs**

Certaines actions peuvent en effet favoriser la migration des polluants dans les bâtiments, comme par exemple :

- créer une dépression trop importante dans un vide sanitaire (risque d'attirer le panache gazeux) ;
- sur-ventiler un local, ce qui peut revenir à « pomper » des composés volatils présents sous ce local ;
- créer une surpression dans un bâtiment comportant une mitoyenneté, au risque d'obtenir un transfert des polluants vers le bâtiment voisin.

De même, l'utilisation de produits chimiques lors de la mise en place d'une mesure constructive doit conduire à s'assurer que les produits ou revêtements ne présenteront pas de toxicité pour les usagers ou de risques d'interférences pendant les contrôles (exemple risque de relargage de vapeurs après travaux, risque de relargage dans l'eau du réseau, problème de compatibilité à plus long terme avec le polluant,...).

Enfin, il faut garder à l'esprit que, dans le cadre du réaménagement futur d'un bâtiment, la transposition de mesures constructives nécessaires avant le réaménagement à celles nécessaires après le réaménagement est délicate. En effet, les travaux de réaménagement (amélioration de l'étanchéité, amélioration de la ventilation, modification des ouvrants ou du positionnement des murs,...) peuvent sensiblement influencer sur les concentrations [8].

### 10.2.2. Cas de la perméation

Comme indiqué au § 5.3.2.b, le lavage à grandes eaux d'une canalisation contaminée ne permet pas de régler le problème mais il peut l'accroître sensiblement.

### 10.2.3. Cas du recouvrement des sols de surface

La gestion d'une problématique de pollution des sols ne doit pas faire oublier des éléments essentiels comme la stabilité des terrains :

- respecter les règles de talutage ;
- tenir compte des conséquences en terme de géotechnique en cas de terrassements à proximité d'un bâtiment ;
- ne pas négliger le phénomène de compactage des sols ;
- ne pas retirer l'ensemble des arbres et arbustes au risque d'engendrer davantage de glissements de terrain en cas de pluie. Si des arbres fruitiers sont présents et doivent être retirés, il s'agit de prévoir de les remplacer par des arbres d'ornement si nécessaire ;
- ne pas négliger la végétalisation d'un sol pour assurer une bonne tenue du sol et éviter l'envol de poussières, etc.

## 10.3. CONCEPTION ET RÉCEPTION DE LA MESURE CONSTRUCTIVE : QUELQUES RECOMMANDATIONS DE BASE

Compte tenu des différentes raisons développées dans ce chapitre, et plus généralement tout au long de ce guide, il est évident que la mise en place de mesures constructives est le fruit d'un processus réfléchi et anticipé ne pouvant être basé uniquement sur le retour d'expérience, notamment du seul prestataire SSP.

Plus encore que les techniques de dépollution classiques, ces mesures, de par leur spécificité, doivent faire l'objet, **dès le stade du dimensionnement**, d'une approche pluridisciplinaire avec le recours de spécialistes du domaine (BTP, ventilation, thermique, etc.). Cette intervention sera effectuée dans le cadre d'un cahier des charges précis et en fonction d'un objectif clairement exprimé.

Ce cahier des charges couvrira plusieurs aspects qui sont essentiels pour la suite du projet :

- le dimensionnement de la mesure constructive et des contrôles d'exécution ;
- la définition des modalités de réception des travaux et de l'adéquation des matériels ;
- **pour l'intrusion de vapeurs, la réception peut porter sur :**
  - les fiches techniques des matériaux et matériels ;
  - l'épaisseur et la qualité d'un massif drainant, le raccordement des drains, les soudures des lés de membrane ;
  - la dépression générée par un système d'aspiration, la pression différentielle générée entre les locaux et le vide sanitaire ;
  - le fonctionnement des alarmes, des documents relatifs à l'exploitation, la présence de plans... ;
- **pour les réseaux, la réception peut porter sur :**
  - les métrés, les fiches produits, les soudures ;
  - la qualité des matériaux de remblai utilisés pour les tranchées ;

- le passage de caméras, ou encore la réalisation de mesures de débits pour vérifier l'étanchéité ou la bonne exécution ;
- **pour les sols, la réception peut porter sur :**
  - la qualité et l'épaisseur des terres mises en place ;
  - la présence d'un filet avertisseur ou d'un géotextile ;
  - la perméabilité, la granulométrie, la fréquence de l'entretien, etc. ;
- **pour la corrosion, la réception peut porter sur :**
  - des vérifications simples, comme par exemple les couleurs, les formes, la rugosité etc. ;
  - la vérification des revêtements (se limite généralement à des contrôles de leur adhérence au support, de leur aspect et de leur épaisseur) ;
- la définition du contenu du Dossier d'Intervention Ulérieure sur l'Ouvrage (DIUO) à rédiger après la mise en place de la mesure constructive, incluant *a minima* :
  - un dossier de récolement des travaux (aussi appelé le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE)),
  - l'ensemble des éléments de base et pièces justificatives des travaux réalisés (plans, notices, photos, bilan des cubatures ou métrés, difficultés rencontrées et solutions apportées, conditions d'intervention ultérieures etc.).

Ce rapport pourra être transmis selon les cas à l'administration, à un vendeur voire des tiers (occupants d'un bâtiment par exemple).

**Le volet « coût » doit être détaillé et décomposé par phases comprenant notamment :**

- les travaux de conception et d'exécution ;
- les dépenses d'entretien, de maintenance, de fonctionnement (consommation d'énergie, usure, consommables comme le charbon actif...), notamment pour les mesures actives ;
- les dépenses liées à la surveillance à long terme.



## 11. Quelques notions de coûts

Sans revenir sur les modalités de répartition des coûts entre les différentes parties impliquées, il est reconnu et admis que les coûts varient beaucoup d'une technique à une autre mais également selon le contexte propre à chaque site. L'intégration de mesures constructives lors de la réalisation d'un projet sera, dans la majorité des cas, moins onéreuse que leur mise en place sur des bâtiments déjà existants, pour lesquels aucune réservation ou précaution n'auront été prise lors de la construction. Il peut également être signalé que selon le retour d'expérience les coûts engendrés par la mise en place de mesures constructives pour des bâtiments (problématique d'intrusion de vapeurs) ne sont pas forcément prohibitifs en comparaison des coûts engendrés par tous les aménagements intérieurs.

L'**Annexe 4** présente ainsi un tableau précisant uniquement des ordres de grandeurs des coûts engendrés par les différentes mesures constructives détaillées dans ce guide.

L'**Annexe 5** propose une estimation des coûts associés à la mise en place de différentes mesures constructives pour une maison standard de 100 m<sup>2</sup>.

### 11.1. CAS DE L'INTRUSION DE VAPEURS

Les coûts vont principalement dépendre des éléments suivants :

- le type de système mis en place (passif ou actif). Quand les premiers ne sont coûteux qu'au moment de leur mise en place, les seconds sont énergivores et sous-entendent des coûts énergétiques ainsi que des coûts d'entretien et de suivi pouvant être importants. A cet effet, on s'attachera à prévoir un budget suffisant pour prendre en charge la consommation énergétique des systèmes actifs (électricité par exemple) ;
- la taille du bâtiment et son usage (résidentiel, industriel, etc.). Cela peut influencer sensiblement les coûts, notamment dans le cas des systèmes actifs en raison des volumes d'air à prendre en compte ;
- la géologie des sols sous-jacents, l'hydrogéologie au droit du site et le type de bâtiment (avec notamment la présence ou non de sous-sol, de vide sanitaire, d'escalier ou d'ascenseur, la mise en place éventuelle d'un cuvelage,...) ;
- les demandes éventuelles des occupants des bâtiments (exigences au regard du bruit, de l'esthétique,...). Il est recommandé d'intégrer au projet un budget d'accompagnement pour améliorer l'esthétique de certaines pièces ou rembourser certains dégâts. Il s'agit de compenser les préjudices subis ou ressentis, afin de faciliter l'acceptation des travaux pour les occupants, tout en fixant certaines limites ;
- la nécessité ou non de mettre en place des solutions de relogement plus ou moins temporaires pour les occupants du bâtiment.

La perte de valeur patrimoniale suite à la pollution de l'air d'un bâtiment et à la mise en place des mesures constructives n'est pas à négliger comme les effets induits (perte de production pour un bâtiment industriel, conséquences en terme de communication sur les habitants d'un quartier et non d'une zone bien délimitée,...).

Dans le cas de l'intrusion de vapeurs, le manque de retour d'expérience à grande échelle en France a rendu difficile la réalisation d'un tableau des coûts induits. Une grande partie des valeurs proviennent de documents anglo-saxons. Les références utilisées pour obtenir ces ordres de grandeur sont indiquées dans l'**Annexe 4**.

## **11.2. CAS DE LA PERMÉATION**

Le coût de remplacement d'une canalisation en France va dépendre du lieu d'intervention ou plutôt des contraintes d'accès à la canalisation. Par exemple, le changement d'une canalisation en milieu rural, avec peu de réseaux, sera moins coûteux qu'en milieu urbain où des dalles ou de l'enrobé doivent être retirés et où le nombre important de réseaux présents dans le sol peut rendre délicat l'intervention sur l'un d'entre eux.

Le type de canalisation (plastique, fonte, multicouche) et le nombre de points de contrôle interviendront également dans le prix.

## **11.3. CAS DU RECOUVREMENT DES SOLS DE SURFACE**

Dans le cas du recouvrement de sols de surface, les coûts vont dépendre principalement :

- de la disponibilité des matériaux de couverture à proximité (existence d'un stock en local, d'une carrière,...) ;
- de la présence d'engins de travaux publics sur place (par exemple à la suite de travaux de dépollution ou liés à l'aménagement du site) ou s'il faut faire venir spécialement des engins sur place ;
- des quantités de matériaux mises en jeu (tarifs dégressifs avec le volume) ;
- de l'accessibilité au site (trafic, embouteillage fréquent, restriction de tonnage,...) ;
- de l'évacuation éventuellement nécessaire de tout ou partie de sols pollués. Selon les teneurs et les polluants, les prix de traitement ou d'élimination sont très variés. A cela s'ajoutent le prix du transport qui peut également être élevé selon la distance entre le site et la filière ainsi que la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP).

## **11.4. CAS DE LA CORROSION**

Compte tenu de la spécificité du domaine, du manque de bibliographie et des nombreuses solutions possibles, aucun ordre de grandeur n'a pu être déterminé, notamment en lien avec une problématique SSP.

## **11.5. COÛT DE LA SURVEILLANCE**

Le coût de la surveillance dépendra :

- du contexte (typologie des polluants, nombre de milieux considérés, nombre de points de prélèvements,...) ;
- des usages ;
- de sa fréquence ;
- de sa durée (minimum 4 ans pour un bilan classique jusqu'à plusieurs dizaines d'années pour certaines problématiques ou pollutions historiques) ;
- de la (ou les) mesure(s) constructive(s) mise(s) en place ;
- du type de surveillance et/ou de prélèvement ;
- du panel analytique retenu.

## 11.6. COÛT DES SERVITUDES

Les coûts associés à la mise en place de servitudes ont principalement deux origines :

- le coût d'élaboration du dossier de servitudes en lui-même. Dans les cas simples, le coût d'un dossier de servitudes sera de l'ordre de quelques milliers d'euros. Dans les cas complexes (dépendant notamment de la taille du site, de l'allotissement lors d'une reconversion) le coût pourra s'élever à plusieurs dizaines de milliers d'euros.

Le lecteur se reportera au Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués, rédigé en 2011 par la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) ;

- les coûts des servitudes sont eux-mêmes très spécifiques et difficilement quantifiables. Seuls quelques aspects à prendre en compte sont présentés ci-après :
  - les visites d'inspection (dans ce cas, l'établissement d'une convention d'accès avec l'occupant est fortement recommandé) ;
  - la prise en charge de la consommation d'eau d'un riverain ;
  - le maintien de l'accès à des piézos, etc ;
  - le gel d'un terrain (perte de sa valeur intrinsèque, pas d'usage engendrant une perte de production liée aux revenus et taxes non perçues, etc.) ;
  - les modalités de conservation aux hypothèques. Ces coûts peuvent être élevés notamment lorsque le nombre de parcelles ou la superficie impactée par les servitudes sont importants.



## 12. Conclusions et perspectives

À l'heure actuelle, le recours aux mesures constructives s'avère être de plus en plus fréquent dans le domaine des sites et sols pollués. Cette évolution s'explique par la nécessité de gérer des pollutions résiduelles dans le cadre de la reconquête de friches industrielles, par une meilleure compréhension de leur rôle et de leur intérêt par les aménageurs, mais aussi, par la protection qu'elles permettent d'assurer à court terme pour les personnes, suite à la découverte d'une pollution chronique ou accidentelle au droit d'un site en activité et dans son environnement (exemple : riverains).

Pour des raisons technico-économiques, il convient très souvent de combiner des mesures constructives aux mesures de dépollution classiques afin d'assurer un risque sanitaire acceptable, notamment à long terme en s'affranchissant autant que possible des évolutions réglementaires ou des valeurs de référence (VTR en particulier).

Ces besoins récents permettent donc d'enrichir au fur et à mesure un retour d'expérience important sur ces problématiques de mise en œuvre de mesures constructives, pour l'ensemble des acteurs du domaine des sites et sols pollués : bureaux d'études, entreprises de travaux, donneurs d'ordres et administration. L'élaboration de ce guide est donc l'occasion de combler un « vide » méthodologique sur ces mesures et de recueillir un certain nombre d'éléments complémentaires propre à chaque mesure et chaque vision d'intervenants du domaine pour regrouper un savoir-faire jusqu'alors très ponctuel et dispersé.

Plus particulièrement, l'élaboration de ce guide a permis de décliner plus finement 4 aspects :

- assurer un recensement et une description les plus précis possibles des techniques et solutions permettant d'empêcher l'exposition des personnes vis-à-vis de polluants selon 3 cas de figure : l'ingestion de sol, la perméation dans les réseaux d'eau potable et l'inhalation de vapeurs. S'agissant d'une problématique connexe à la présence de polluants dans un terrain, le volet relatif à la corrosion des biens matériels est également abordé ;
- proposer des éléments de choix et de hiérarchisation des différentes solutions identifiées en fonction du contexte (avantages / inconvénients / coûts). A cet effet, un outil d'aide à la décision visant à intégrer, dès la conception du projet, la mise en place de mesures constructives tout en facilitant l'acceptation sociale du projet, a été élaboré dans le cadre de ce guide ;
- poser les bases et définir les principaux éléments permettant d'assurer, à chaque étape d'un projet incluant des mesures constructives, sa bonne réalisation : points clefs d'un rapport de diagnostic, contrôles à prévoir en phase chantier ou en phase de réception, modalités d'élaboration d'un plan de surveillance à l'issue des travaux ;
- préciser et apporter des éléments propres au cadre administratif dans lequel la mise en place des mesures constructives peut-être effectué, notamment lors du réaménagement d'un terrain ou de sa vente.

De ce travail conséquent en termes de recherches bibliographiques, d'examen de cas réels et d'échanges avec les acteurs du domaine, il ressort différents points clefs et propositions visant à améliorer et homogénéiser les pratiques existantes, tout en renforçant une nouvelle fois le principe de spécificité d'un site.

La complexité des sujets justifie bien souvent le recours à des acteurs spécialisés et ayant des compétences reconnues en dehors du champ des sites et sols pollués (architecte, paysagiste, thermicien, entreprise du BTP,...).

De même, notamment dans le cadre de problématiques de remontées de vapeurs dans des bâtiments existants, la mise en œuvre d'essais pilote sur le terrain s'avère indispensable afin d'assurer un dimensionnement complet de la mesure constructive en tenant compte des préoccupations des usagers sur ce sujet (bruit, esthétique, consommation d'énergie,...).

Pour la majorité des problématiques posées, l'analyse globale de la situation aboutit à une combinaison de différentes mesures pour optimiser leur efficacité (mesures passives d'étanchéité au préalable, puis technique active ; décapage et recouvrement d'un sol en intégrant le remplacement d'une canalisation d'eau,...).

Différentes limites, voire lacunes, ont également été identifiées dans le cadre de ce travail et font l'objet de recommandations de la part du BRGM :

- assurer un retour d'expérience à grande échelle pour définir une réelle stratégie d'anticipation et de protection vis-à-vis des risques à maîtriser. La constitution d'un groupe de travail associant différents acteurs du domaine (donneurs d'ordre, prestataires, administration,...) et des intervenants spécialisés (thermiciens, professionnels du BTP,...) présenterait une réelle valeur ajoutée à ce travail et permettrait d'affiner différents aspects (partage d'expérience par l'examen de cas concrets connus sans portée de jugement vis-à-vis des décisions prises, meilleure appréciation des éléments de coûts : directs et indirects,...) ;
- distinguer la réglementation applicable à l'air intérieur et les modalités d'intervention dans le domaine des sites et sols pollués, en particulier, du point de vue des méthodes de prélèvements à appliquer (méthodes actives versus badges passifs) et des référentiels à utiliser (valeurs du HCSP, VGAI, percentiles de l'OQAI,...) ;
- intégrer, par exemple à l'occasion de la révision des textes de 2007 et de la norme NFX 31 620, un volet spécifique relatif à la mise en place des mesures constructives et à leur prise en compte d'un point de vue administratif (permis de construire, actes de vente, servitudes, documents d'urbanisme,...). Cela permettrait ainsi de développer les initiatives, homogénéiser les pratiques existantes et faciliter la vérification effective de ces mesures (traçabilité sur les contrôles a posteriori notamment).

En conclusion, malgré les réserves usuelles relatives à l'exhaustivité des techniques recensées au regard des évolutions constantes des matériaux et techniques de construction, ce guide se veut ainsi être un véritable outil d'aide à la décision pour l'ensemble des acteurs du domaine des sites et sols pollués et en leur apportant des éléments de réponse :

- aide pour les prestataires : bureaux d'études et entreprises de travaux : pourquoi des mesures constructives, quand les prendre en compte et lesquelles ?
- aide pour les donneurs d'ordres : pourquoi les mesures constructives sont importantes ; quelles prescriptions élaborer dans un cahier des charges, quels contrôles ?
- aide pour l'administration (document d'appui pour vérifier et contrôler les mesures constructives et les modalités de surveillance qui leur seront proposées).

## 13. Bibliographie

- [1] **MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie)** (2007) – « Note ministérielle du 8 février 2007, Sites et sols pollués – Modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués » et notamment l'annexe 2 : « Comment identifier un site (potentiellement) pollué / Comment gérer un problème de site pollué / Modalité de gestion et de réaménagement des sites pollués. »
- [2] **KIRCHNER S., ARENES J., COCHET C. et al.** (2007) - Campagne nationale Logements : Etat de la qualité de l'air dans les logements français - Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur. (DDD/SB - 2006-57).
- [3] **BENSON S., HEPPLER R.** (2005) - Chapter 28 - Prospects for Early Detection and Options for Remediation of Leakage from CO2 Storage Projects. In : Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations, p.1189-1203. Ed. by David C. Thomas. Amsterdam : Elsevier Science
- [4] **COLLIGNAN B.** (2004) - Le radon dans les bâtiments: Principes des solutions et intégration dans les bâtiments neufs et existants (Présentation Powerpoint).
- [5] **ROBE M.** - Étude et traitement des situations impliquant du radon
- [6] **JOHNSON R.** (2001) - Protective measures for housing on gas-contaminated land.
- [7] **Interstate Technology & Regulatory Council** (2007) - Vapor Intrusion Pathway: A Practical Guideline.
- [8] **QUAD-BBC** (2012) - Qualité d'air intérieur et systèmes de ventilation dans les bâtiments à basse consommation d'énergie
- [9] **WILSON S., CORBAN M.** (2012) - Integrity testing of gas resistant membranes with tracer gases; a trial, <http://www.epg-ltd.co.uk/news/2012/integrity-testing-gas-resistant/>
- [10] **COLOMBANO S.** (2010) - Le Plan de Gestion. Editions Techniques de l'Ingénieur
- [11] **LEOVIC K. W., CRAIG A. B.** (1994) - Radon Prevention in the Design and Construction of Schools and Other Large Buildings. US EPA. (EPA/625/R-92/016).
- [12] **NICOLAS E.** (2010) - Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants. Thèse, Université Henri Poincaré.
- [13] **OTIS N.** (2000) - Influence de divers super plastifiants sur le ressuage et l'interface pâte/granulats dans les matériaux cimentaires. Mémoire, Université de Sherbrooke.
- [14] **BURDEN D.** (2006) - The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash. Thèse, PCA (Portland Cement Association).
- [15] **Partners In Technology** (1997) - Passive Venting of Soil Gases Beneath Buildings.
- [16] <http://www.vide-sanitaire.fr/CB/PT/images/stories/pdf/ventilation-vide-sanitaire.pdf>

- [17] **INERIS (2005)**, - Etude des modèles d'évaluation de l'exposition et des risques liés aux sols pollués Modélisation du transfert de vapeurs du sous-sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur
- [18] **ACS Lining LTD.** - [http://www.acslining.co.uk/sub-slab\\_venting\\_soil\\_gas\\_ventilation.html](http://www.acslining.co.uk/sub-slab_venting_soil_gas_ventilation.html)
- [19] **Office fédéral de la santé publique** (2000) - Manuel Suisse du radon.
- [20] **CETIAT** (2001) - Ventilation performante dans les écoles - Guide de conception.
- [21] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/Ref-Inond-Fiche18.pdf>
- [22] **WILSON S. A., SHUTTLEWORTH A.** (2001) - Design and performance of a passive dilution gas migration barrier.
- [23] **New Jersey Department Of Environmental Protection** (2013) - Vapor Intrusion Technical Guidance (version 3.1)
- [24] **Böhm C., Johner H.** (2005) - Radon in Bodenluft – Radonentstehung und –ausbreitung, Permeabilitätsbestimmung in Bodenluft
- [25] **California Department of Toxic Substances Control** (2011) - Vapor Intrusion Mitigation Advisory.
- [26] **D. J. Folkes et coll.** (2002), Design, effectiveness, and reliability of sub-slab depressurization systems for mitigation of chlorinated solvent vapor intrusion
- [27] **New York State Department of Environmental Conservation** (2007) - DER-15: Presumptive /Proven Remedial Technologies
- [28] **US EPA** (1993) - Radon Reduction Techniques for Existing Detached Houses - Technical Guidance (Third Edition) for Active Soil Depressurization Systems
- [29] **HATTON T. E.** Designing efficient sub slab venting and vapor barrier systems for schools and large building.
- [30] **MCCAFFREY B.** (2009) - Vapor Barriers under Concrete Slabs - How to Select and Locate.
- [31] **CFG** (1991) – Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes
- [32] **AFSSET** (2009) - VIP Ventilation.
- [33] **SOLIPAC** - <http://www.solipac.fr/produits/vmc-double-flux>
- [34] **ICEB** – Guide « Ventilation naturelle et mécanique »
- [35] **GARVIN S., HARTLESS R., SMITH M. et al.** (2000) - Risks of Contaminated Land to Buildings, Building Materials and Services. Environment Agency. (P331)
- [36] **BROMHEAD J.** (1997) - Permeation of Benzene, Trichloroethene an Tetrachloroethene through plastic pipes.

- [37] **Montana Department of Environmental Quality Remediation Division** (2010) - DEQ Technical Guidance Document #16 - Permeation of Waterlines by Petroleum Constituents.
- [38] **US EPA** (2002) - Permeation and Leaching.
- [39] **Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies (2005)** - Code national de la plomberie
- [40] **DIETRICH A. M., WHELTON A. J., GALLAGHER D. L.** (2010) – Chemical Permeation/Desorption in New and Chlorine Aged Polyethylene Pipes.
- [41] **Plastics Pipe Institute** (1984 Reaffirmed May 2002) - Permeation in Plastic Pipe Used for Potable Water.
- [42] **CHU-LIN C.** (2009) – Permeation of organic compounds through ductile iron pipe gaskets
- [43] **Water Regulations Advisory Scheme (WRAS)** (2002) - Information and Guidance Note., No. 9-04-03,
- [44] **Department of the Environment** (1992) - Effects of organic chemicals in contaminated land on buried services, (DoE 2982/1).
- [45] **KIWA** – Contrôle qualité d'un tuyau (<http://www.egeplast.ie/wp-content/uploads/2012/06/Section-7-SLA-Barrier-Pipe.pdf>)
- [46] **DEREUMEAUX C, KAIRO C, ZEGHNOUN A** (2012) - Synthèse des travaux du Département santé environnement de l'Institut de veille sanitaire sur les variables humaines d'exposition. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire
- [47] **NATHANAIL J., BARDOS P., NATHANAIL P.** (2002) - Contaminated Land Management: Ready Reference
- [48] [http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_1337\\_culture\\_hors\\_sol.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1337_culture_hors_sol.php)
- [49] <http://mag.plantes-et-jardins.com/conseils-de-jardinage/fiches-conseils/potager-en-carres>
- [50] **BRGM (2000) - Gestion des sites pollués - Version 0**
- [51] [http://www.witzenmann.fr/download/Manuel%20des%20soufflet%20m%C3%A9talliques\\_0441f%20S%20200-236\\_2\\_04\\_10\\_5\\_web.pdf](http://www.witzenmann.fr/download/Manuel%20des%20soufflet%20m%C3%A9talliques_0441f%20S%20200-236_2_04_10_5_web.pdf)
- [52] [http://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_erosion.htm](http://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_erosion.htm)
- [53] **Environment Agency** (2000) – Risks of Contaminated Land to Buildings, Building Materials and Services, Rapport P331.
- [54] **DIERKENS M. (MEDTL)** - Principales agressions et attaques du béton – Présentation du 15 novembre 2011
- [55] **Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)** (juin 2011) - Fiche solvants ED 4223 et 4226

- [56] **AFGC et CEFRACOR** (2003) - Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion
- [57] **R. Veldhuijzen van Zanten** (1994) - Geotextiles and geomembranes in civil engineering (Revised Edition)
- [58] <http://www.trapil.fr/fr/comcamarche2.asp>
- [59] **LEMAITRE C. PEBERE N. et FESTY D. (1998)** – Biodétérioration des matériaux
- [60] **INERIS** (2010) - Caractérisation de la qualité de l'air ambiant intérieur en relation avec une éventuelle pollution des sols par des substances volatiles et semi-volatiles, DRD-10-109454-02386B
- [61] **Projet Européen CityChlor** (2011) – Solvants chlorés en milieu urbain – Quelle situation en France (document rédigé par l'INERIS et l'ADEME)
- [62] **Greater Manchester Public Protection Partnership (GMPPP)** (2008) – Development on land potentially affected by hazardous ground gas, Briefing Note BN01/2008
- [63] **CIRIA** (2007) – Assessing risks posed by hazardous ground gases to buildings, C665.
- [64] **Directions Régionale et Départementales des affaires sanitaires et sociales de Rhône-Alpes** (2006) – Contrôle Sanitaire des eaux : Guide de prélèvement
- [65] **ASTEE** (2003) - Guide de prélèvement pour le suivi sanitaire des eaux en application du code de la santé publique
- [66] **Ministère de la Santé et des Solidarité** (2007) - Arrêté du 11 janvier 2007, relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique
- [67] **OMS** (2011) - Guidelines for Drinking-water Quality (Fourth Edition)
- [68] **Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., Gay G., Quintard M., Pepin L. (2013). Projet FLUXOBAT** (2013) - Evaluation des transferts de COV du sol vers l'air intérieur et extérieur. Guide méthodologique
- [69] **MEDDE** (2011) - [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/V\\_consolidee\\_projet\\_decret\\_article\\_188.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/V_consolidee_projet_decret_article_188.pdf)
- [70] **MEDDTL** (2011) - Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués
- [71] **ADEME** (2013) – AGIR-QAI : Amélioration des outils de Gestion de l'Impact des polluants gazeux des sols en Relation avec la Qualité de l'Air Intérieur des bâtiments. (Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par le CSTB par Bernard COLLIGNAN, Thierno M.O. DIALLO et Emilie POWAGA.

## **Annexes**



## **Annexe 1**

### **Avantages et inconvénients des différentes mesures constructives découlant d'une problématique d'intrusion de vapeurs**



Type de mesure	Renvoi au guide	Mesure	Avantages	Inconvénients			
Mesures passives	§4.4.2.a)	Etanchéification (préalable indispensable à la mise en place de toute autre mesure)	Colmater la maçonnerie - Peu coûteux	Mesures dont le coût de fonctionnement est limité (pas de consommation énergétique mais coûts de changement des systèmes de traitement des rejets, si existants)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La nature même des matériaux de construction rend difficile l'obtention d'une étanchéité parfaite</li> <li>- Nécessite d'avoir repéré toutes les fissures (et microfissures), autrement ces mesures utilisées seules sont rendues pratiquement inefficaces</li> <li>- Nécessite un contrôle voire un entretien sur le long terme (surveiller l'apparition de nouvelles fissures, inéluctables avec le vieillissement du bâti)</li> <li>- Selon les cas, les pièces pourront être vidées préalablement</li> <li>- Efficacité variable d'un revêtement à un autre</li> <li>- Peut s'avérer coûteux à la mise en œuvre</li> <li>- Peut être délicat à mettre en place, selon le revêtement</li> <li>- Travaux considérables, dus au terrassement (dans le cas d'un bâtiment existant) et aux réseaux enterrés existants</li> <li>- Peut engendrer des risques géotechniques (dans le cas d'un bâtiment existant)</li> <li>- Coût important</li> <li>- Efficacité non garantie sur le long terme</li> </ul>		
		Appliquer un revêtement de surface	- L'efficacité de certains revêtements (par exemple, les feuilles synthétiques) est généralement meilleure qu'un simple colmatage				
		Etanchéfier l'extérieur du bâti (sous-bassement)	- Intéressant à mettre en place dans le cas de problématiques particulières (infiltration d'eau de nappe polluée, etc.) (notamment dans le cas d'un bâtiment existant)				
		Améliorer la qualité du béton (adjuvants)	- Permet d'obtenir des matériaux très performants : forte compacité, faible porosité, meilleure résistance à la corrosion, faible perméabilité, etc. - Gains en termes de coût				
	§4.3.2	Actions sur la construction - Pas de construction en sous-sol et privilégier des constructions verticales - Limiter l'usage des sous-sol à des activités non sensibles	- Permet de réduire l'interface d'échange entre la surface du sol et du bâti - Permet de surveiller l'étanchéité de l'interface plus facilement (car sa taille est réduite)			- Nécessite de travailler l'isolation du bâti pour limiter les déperditions énergétiques (chauffage...)	
	§4.4.2.b)	Mise en place d'un vide sanitaire ou de massifs drainants	Volume vide sans obstacles			- Permet de créer une première isolation entre le sol et les pièces à vivre - Facile à mettre en œuvre lors de la construction de nouveaux bâtiments	- Peut nécessiter la mise en place d'une ventilation active pour améliorer l'efficacité du système
			Ajout d'une couche de polystyrène dans le vide sanitaire			- Permet une meilleure isolation thermique	- Nécessite de travailler l'isolation du bâti pour limiter les déperditions énergétiques (chauffage...)
Membrane de drainage en géocomposite			- Permet d'étanchéfier le sol du sous-bassement - Permet de concentrer les gaz avant de les évacuer en-dehors du bâti	- Peut nécessiter la mise en place d'une ventilation active pour améliorer l'efficacité du système			
Massif drainant dans le vide sanitaire équipé d'un réseau de drains crépinés				- Peu adapté pour de grandes surfaces, pour lesquelles une ventilation active peut se révéler indispensable			
§4.4.3.a) et b)	Elimination des facteurs créant une dépression dans le bâti et aération naturelle : - ajout de grilles de ventilation - positionnement pertinent des entrées et sorties d'air	- Mesure simple à mettre en place - Peu coûteux	- Nécessite de travailler l'isolation du bâti pour limiter les déperditions énergétiques (chauffage...)				
§4.4.3.c)	Mise en place d'une barrière de dilution passive	- Rapidité d'installation - Coûts réduits - Indépendance vis-à-vis de la qualité du sous-sol - Très efficace pour lutter contre les intrusions de méthane et de dioxyde de carbone	- La problématique de pollution doit être modérée (zone bien délimitée, pas de fortes concentrations, etc.) - L'apport d'air frais dans les pièces à vivre peut générer de l'inconfort pour les occupants, surtout en hiver - Difficultés à appréhender la part de chaque facteur, notamment si le bâtiment est occupé - Nécessité de contrôler régulièrement l'installation, pour éviter l'encrassement ou l'endommagement du système - Valable uniquement dans le cas d'une diffusion horizontale de gaz				
Mesures actives	§4.5.2.b)	Mise en surpression de la cellule occupée	- Relativement peu onéreux à mettre en place - Consommation électrique relativement faible pour de petits volumes - La surpression limite l'intrusion de vapeurs - Surpression de l'ordre de 2 à 15 Pa.	- L'ouverture des fenêtres perturbe le bon fonctionnement de cette mesure - Nécessite un bâtiment bien étanche - Peut engendrer un risque d'augmentation de la condensation dans les parois par pénétration d'air chaud et humide - Conduit à des pertes énergétiques en hiver			
	§4.5.2.c)	Prévenir l'intrusion de substances volatiles dans le bâti	Ventilation des vides sanitaires sous le bâtiment	- Facile à mettre en place dans des bâtiments présentant un vide-sanitaire (existant ou à construire) - Dépression ou surpression de l'ordre de 2 à 15 Pa.	- Les entrées d'air doivent être suffisantes - Une sur-ventilation peut conduire au gel des conduites - Une sur-ventilation conduit aussi au refroidissement du plancher, et donc à des sur-consommations énergétiques		
	§4.5.2.d)	Mise en place d'un drainage des gaz du sol	- Très utilisée - Bonne efficacité si correctement dimensionnée (à titre indicatif, taux d'abattement compris entre 10 et 100) - Dépression homogène de 4 à 10 Pa sous l'ensemble du bâtiment.	- Conduit à des pertes énergétiques en hiver - L'interface entre le sol et le bâtiment doit être étanche - L'efficacité de la mesure dépend de la nature du sous-sol - Selon le type de méthode choisi, la mesure peut être coûteuse			
	§4.5.3.	Limiter l'accumulation des concentrations	Ventilation des pièces à vivre dans le bâtiment	VMC simple flux par extraction : - Peu coûteux - Efficacité correcte mais généralement moindre qu'un drainage des gaz du sol (à titre indicatif, taux d'abattement compris entre 2 et 10)  VMC double flux : - Avec une résistance thermique, peut faire office de chauffage ou de climatisation - Possibilité de mise en surpression d'un bâtiment - Efficacité correcte mais généralement moindre qu'un drainage des gaz du sol (à titre indicatif, taux d'abattement compris entre 2 et 10)	- La ventilation forcée peut permettre un renouvellement de l'air jusqu'à 5 volumes/heure - Ces mesures sont plus efficaces que les mesures passives, dont elles sont pourtant parfois indissociables - L'installation et leur fonctionnement permanent peut être gênant pour les occupants - Nécessité d'intégrer des protections complémentaires (bruit, esthétique,...)		



## **Annexe 2**

### **Outil d'aide à la décision**



Type de projet		Type de pollution éventuelle ou avérée	Contexte	Mesures constructives	
Bâtiment existant	Métaux		Présence d'un jardin	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
			Absence d'un jardin	Pas de mesure constructive nécessaire	
	Composés volatils	Composés volatils	Présence d'un jardin		<a href="#">Cliquer pour consulter</a>
				Présence d'un sous-sol	Présence de terre battue
		Présence d'une dalle béton	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>		
		Présence de murs enterrés	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>		
		Traversée de murs ou dalles par des réseaux	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>		
		Bâtiment de plain-pied	Présence d'un vide sanitaire	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
			Présence de terre battue	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
			Présence d'une dalle béton	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
Traversée de dalles par des réseaux	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>				
Bâtiment à construire	Métaux		Présence d'un jardin	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
			Absence de jardin	Pas de mesure constructive nécessaire	
	Composés volatils		Présence d'un jardin	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
			Tout type de bâtiment	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
Passage de canalisations d'eau potable au travers de zones polluées ou potentiellement polluées	Canalisation existante	Composés volatils	Sans objet	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
	Canalisation à installer			<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
Couverture des sols de surface		Tout type de pollution limitée* en zone non saturée	Présence d'un terrain nu	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
Limiter la corrosion de biens matériels	Acides	Biens métalliques		<a href="#">Cliquer pour consulter</a>	
	Sels				
	Sulfates				
	Chlorures				
	Particules solides en suspension				
	Micro-organismes				
	H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub>				
	NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub>				
	Fluides : eau et air (CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S et SO <sub>2</sub> )	Bétons armés			
	Acides				
	Sulfates				
	Chlorures				
	Micro-organismes				

Les mesures constructives proposées dans cet outil sont classées de la mesure à privilégier, vers la mesure à étudier dans un deuxième temps si la précédente n'est pas envisageable ou n'est pas suffisante. Cet ordre tient compte à la fois de leur performance (par exemple : on préférera empêcher l'intrusion de vapeurs dans un bâtiment plutôt que d'améliorer le taux de renouvellement de l'air intérieur afin de limiter leur accumulation) que de l'aspect économique (coûts) et de leur impact en terme de développement durable (modifications engendrées sur les bâtiments notamment). Néanmoins, le choix final de la solution retenue devra être effectué en fonction de la problématique rencontrée et ne sera donc pas forcément en adéquation avec l'ordre retenu dans cet outil et le guide méthodologique associé.

Conformément au guide, il est recommandé de faire appel à des prestataires SSP certifiés lors de la réalisation de prestations du domaine des sites et sols pollués. Néanmoins, certaines prestations (comme par exemple le contrôle d'une VMC) pourront nécessiter de faire appel à des prestataires extérieurs si le prestataire SSP ne possède pas les compétences nécessaires en interne.

Dans les tableaux suivants, il est rappelé que les composés volatils, dont il est question, sont considérés comme étant en lien avec la pollution étudiée (et non pas avec une interférence liée à des activités réalisées dans le bâtiment). Ce lien peut notamment être mis en évidence par une analyse concomitante de l'air intérieur et des gaz de sols.

\* : au sens de dépassement du fond géochimique local (naturel ou anthropique)



[Retour à la liste](#)

## Bâtiment existant - Présence d'un jardin - Pollution par des métaux ou des composés volatils

Contexte	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Présence d'un jardin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Culture de légumes, présence d'arbres fruitiers (avec consommation)</li> <li>et/ou</li> <li>- Espace de loisirs sans culture</li> </ul>	Analyse de la qualité des fruits, des légumes et du sol	Présence de polluants dans des teneurs supérieures aux valeurs applicables pour les fruits, les légumes ou/et supérieures au fond géochimique pour les sols	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants avec, dans un premier temps, recommandation de suspendre la consommation des fruits et des légumes</li> <li>- Recherche et mise en place de mesures visant à rétablir l'usage, comme (liste non exhaustive) : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place d'une couverture (au minimum une couche de 30 à 50 cm de terre saine) sur grillage avertisseur ou géotextile</li> <li>- Décapage des terres sur 50 cm minimum avec apport de terres saines.</li> <li>- Aménagement d'un jardin potager ou cultures de fruits et légumes, sous réserve de garantir l'absence de transfert de pollution des sols vers les végétaux. A défaut, privilégier la culture hors-sol ou mettre en place des systèmes de confinement limitant l'extension du système racinaire.</li> <li>- Remplacement des arbres fruitiers par des arbres d'ornement.</li> <li>- Ajout d'un dispositif de drainage des eaux météoriques afin de limiter la percolation de la pollution en profondeur.</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrôle de l'état (érosion, entretien,...) et de l'épaisseur de la couche de protection y compris en tenant compte des éventuelles restrictions d'usage. Contrôle de la qualité des sols lors d'une vente du terrain.</li> <li>Vérification de l'absence de culture d'arbres fruitiers (si recommandé au préalable). Dans le cadre d'un bilan quadriennal, contrôle de la qualité des légumes pendant la période de maturité a minima deux fois (post installation du jardin et avant la fin du bilan).</li> </ul>
			Présence de polluants dans des teneurs inférieures aux valeurs applicables pour les fruits, les légumes ou/et supérieures au fond géochimique pour les sols	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposition de mesures visant à assurer la pérennité de l'usage dans le temps (voir ligne ci-dessus)</li> <li>- A défaut, intégrer le site dans un programme de surveillance dans le temps (bilan quadriennal)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dans le cadre d'un bilan quadriennal, contrôle de la qualité des légumes pendant la période de maturité a minima deux fois (post installation du jardin et avant la fin du bilan).</li> </ul>
			Absence de polluants dans les fruits, les légumes ou les sols	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de contrôle complémentaire recommandé.</li> </ul>
	Présence d'un ouvrage privé (puits, forage, source,...)	Analyse de la qualité des eaux souterraines dans l'ouvrage	Présence de polluants dans des concentrations supérieures aux valeurs disponibles pour les eaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants et recommandation d'arrêter l'utilisation des eaux souterraines à des fins de consommation, d'irrigation ou d'activités de loisirs</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire</li> <li>- Suppression ou/et remplacement de l'ouvrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant un contrôle densifié de la qualité des eaux (a minima tous les 3 mois la première année) avec ajustement éventuel suite à l'évolution des concentrations après un cycle hydrogéologique (hautes eaux / basses eaux).</li> </ul>
Présence de polluants dans des concentrations inférieures aux valeurs disponibles pour les eaux			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants et surveillance régulière de la qualité de l'eau</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire</li> <li>- Suppression ou/et remplacement de l'ouvrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant le contrôle de la qualité des eaux tous les 6 mois, puis ajustement en fonction de l'évolution de la qualité de l'eau.</li> </ul>	
Absence de polluant dans les eaux			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de contrôle complémentaire recommandé.</li> </ul>	

### Bâtiment existant - Présence d'un sous-sol avec terre battue - Pollution par des composés volatils

Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives	
Présence d'un sous-sol	Présence de sol en terre battue ou de plancher perméable sur terre battue	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du sous-sol (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le sous sol)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment. - Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système passif sans extracteur) - Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression générée sous la dalle - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système actif avec extracteur) - Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression générée sous la dalle	- Contrôle de l'étanchéité des entrées et sorties de canalisations et autres réseaux, traversant des dalles ou des murs enterrés Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté. Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce. Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre au travers du massif drainant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce. Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant. Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre sous la membrane (dépression suffisante sans être trop importante).	Cf mesures constructives sélectionnées	
				Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système passif sans extracteur) - Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression générée sous la dalle - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système actif avec extracteur) - Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression générée sous la dalle - Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système passif) - Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système actif)		- Contrôle de l'étanchéité des entrées et sorties de canalisations et autres réseaux, traversant des dalles ou des murs enterrés Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté. Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce. Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre au travers du massif drainant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce. Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant. Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre sous la membrane (dépression suffisante sans être trop importante).	Cf mesures constructives sélectionnées
				Absence de composés volatils dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment		Sans objet	Sans objet

SDSD : Système de Dépressurisation Sous Dalle

SDSM : Système de Dépressurisation Sous Membrane

(uniquement si la pièce n'est pas utilisée (par exemple un vide sanitaire), sinon utilisation d'un SDSD pour éviter d'endommager la membrane)



[Retour à la liste](#)

## Bâtiment existant - Présence de murs enterrés - Pollution par des composés volatils

Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives	
Présence d'un sous-sol	Présence de murs (fissurés ou non)	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du sous-sol (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le sous sol)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment. - Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées	
					- Contrôle et amélioration de l'étanchéité du mur (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux.	Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place.		Élément intégré au bilan quadriennal relatif à la mesure sélectionnée : Contrôle de l'étanchéité du mur et passage de réseaux à chaque visite ou inspection et renfort éventuel.
					- Réfection complète du mur (selon son état)	Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir le dimensionnement de la double-cloison, de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au travers du mur (notamment nombre de points d'aspiration en fonction de la surface du mur et de la pièce)		
					- Aspiration dans le mur (création d'ouvertures spécifiques)			
					- Mise en place d'une double cloison (système passif sans ventilateur)			
				- Mise en place d'une double cloison (système actif avec ventilateur)		Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'étanchéité de l'ensemble des passages de dalle ou de murs (points d'aspiration, points de contrôle ou passages de tuyauterie) à chaque visite ou intervention. - Si système actif, contrôle de l'ensemble de l'installation d'extraction à chaque visite ou intervention (par exemple, extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression à chaque puits d'aspiration et du débit total d'aspiration,...). - Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).		
				Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées	
					- Contrôle et amélioration de l'étanchéité du mur (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux.	Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place.		Élément intégré au bilan quadriennal relatif à la mesure sélectionnée : Contrôle de l'étanchéité du mur et passage de réseaux à chaque visite ou inspection et renfort éventuel.
					- Réfection complète du mur (selon son état)	Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir le dimensionnement de la double-cloison, de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au travers du mur (notamment nombre de points d'aspiration en fonction de la surface du mur et de la pièce)		
					- Aspiration dans le mur (création d'ouvertures spécifiques)			
- Mise en place d'une double cloison (système passif sans ventilateur)								
- Mise en place d'une double cloison (système actif avec ventilateur)		Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'étanchéité de l'ensemble des passages de dalle ou de murs (points d'aspiration, points de contrôle ou passages de tuyauterie) à chaque visite ou intervention. - Si système actif, contrôle de l'ensemble de l'installation d'extraction à chaque visite ou intervention (par exemple, extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression à chaque puits d'aspiration et du débit total d'aspiration,...). - Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).						
Absence de composé volatil dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Sans objet	Sans objet					

[Retour à la liste](#)

## Bâtiment existant - Traversées de murs enterrés ou des dalles par des réseaux - Pollution par des composés volatils

Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Présence d'un sous-sol	Entrée de canalisations et réseaux à travers la dalle ou les murs	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du sous-sol (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le sous-sol)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment. - Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées
					- Contrôle et amélioration de l'étanchéité de la dalle, du mur (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux. - Mise en place de mesures constructives complémentaires si nécessaire (ventilation, imperméabilisation de surface, etc.)	Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place	Elément intégré au bilan quadriennal relatif à la mesure sélectionnée : - Contrôle de l'étanchéité du passage de réseau à chaque visite ou inspection et renfort éventuel. - Contrôle de la qualité de l'air (pièce et, le cas échéant, le rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
				Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées
					- Contrôle et amélioration de l'étanchéité de la dalle, du mur (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux. - Mise en place de mesures constructives complémentaires si nécessaire (ventilation, imperméabilisation de surface, etc.)	Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place	Elément intégré au bilan quadriennal relatif à la mesure sélectionnée : - Contrôle de l'étanchéité du passage de réseau à chaque visite ou inspection et renfort éventuel. - Contrôle de la qualité de l'air (pièce et, le cas échéant, le rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
			Absence de composé volatil dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Sans objet	Sans objet	

[Retour à la liste](#)

Bâtiment existant de plain-pied - Présence d'un vide sanitaire - Pollution par des composés volatils								
Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives	
Bâtiment de plain-pied	Présence d'un vide-sanitaire	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du bâtiment (si possible ou à défaut à proximité), dans le vide-sanitaire et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le rez-de-chaussée)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment. - Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées	
					SDSM	- Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système passif)	Vérification du mode de ventilation du vide sanitaire (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant.	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>
						- Mise en place d'une membrane d'étanchéité couplé à un extracteur (système actif)	Vérification du mode de ventilation du vide sanitaire (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre sous la membrane (dépression suffisante sans être trop importante)	
					Ventilation	- Augmenter la ventilation naturelle par création d'entrées d'air	Vérification du mode de ventilation du vide sanitaire (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant.	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>
						- Augmenter mécaniquement la ventilation par insufflation ou extraction d'air	Etude du nombre minimum d'entrées d'air nécessaires par une société spécialisée	
				Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées	
					SDSM	- Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système passif)	Vérification du mode de ventilation du vide sanitaire (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant.	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>
						- Mise en place d'une membrane d'étanchéité couplé à un extracteur (système actif)	Vérification du mode de ventilation du vide sanitaire (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre sous la membrane (dépression suffisante sans être trop importante)	
					Ventilation	- Augmenter la ventilation naturelle par création d'entrées d'air	Vérification du mode de ventilation du vide sanitaire (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant.	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>
						- Augmenter mécaniquement la ventilation par insufflation ou extraction d'air	Etude du nombre minimum d'entrées d'air nécessaires par une société spécialisée	
Absence de composé volatil dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Sans objet	Sans objet					

SDSM : Système de Dépressurisation Sous Membrane

## Bâtiment existant de plain-pied - Présence d'un sol avec terre battue - Pollution par des composés volatils

Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Bâtiment de plain-pied	Présence de sol en terre battue ou de plancher perméable sur terre battue	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du bâtiment (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le rez-de-chaussée)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment. - Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités	- Contrôle de l'étanchéité des entrées et sorties de canalisations et autres réseaux, traversant des dalles ou des murs enterrés	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.
				SDSD - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système passif sans ventilateur) - Installation de tubes crépinés dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle	Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce.		Cf mesures constructives sélectionnées
					SDSM - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système actif avec ventilateur) - Installation de tubes crépinés dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle		
SDSM - Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système passif)  - Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système actif)	Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant.	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>					
	Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre sous la membrane (dépression suffisante sans être trop importante).						
Bâtiment de plain-pied	Présence de sol en terre battue ou de plancher perméable sur terre battue	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du bâtiment (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le rez-de-chaussée)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	- Contrôle de l'étanchéité des entrées et sorties de canalisations et autres réseaux, traversant des dalles ou des murs enterrés	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.
				SDSD - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système passif sans ventilateur) - Installation de tubes crépinés dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle	Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce.		Cf mesures constructives sélectionnées
					SDSM - Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système actif avec ventilateur) - Installation de tubes crépinés dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle		
SDSM - Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système passif)  - Mise en place d'une membrane d'étanchéité (système actif)	Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin d'augmenter le taux de ventilation au cas où le système actuel ne serait pas suffisant.	<a href="#">Cliquer pour consulter</a>					
	Vérification du mode de ventilation de la pièce (type de ventilation, nombre de points d'entrée / sortie, débit de ventilation). Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre sous la membrane (dépression suffisante sans être trop importante).						
				Absence de composé volatil dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment		Sans objet

SDSD : Système de Dépressurisation Sous Dalle

SDSM : Système de Dépressurisation Sous Membrane

(uniquement si la pièce n'est pas utilisée (par exemple un vide sanitaire), sinon utilisation d'un SDSD pour éviter d'endommager la membrane)

**Bâtiment existant de plain-pied - Présence d'un sol avec une dalle béton - Pollution par des composés volatils**

Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Bâtiment de plain-pied	Présence d'une dalle de béton (fissurée ou non)	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du bâtiment (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le rez-de-chaussée)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants du bâtiment.</li> <li>- Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités</li> <li>- Contrôle et amélioration de l'étanchéité de la dalle (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse.</li> <li>- Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.</li> <li>- Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place.</li> <li>- Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant.</li> <li>- Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce</li> <li>- Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre au travers du massif drainant</li> <li>- Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce</li> <li>- Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction (notamment rayon d'action attendu) afin de déterminer le nombre et la localisation des puits d'aspiration. S'assurer de l'absence de plancher chauffant avant réalisation du test.</li> <li>- Etude du type de ventilateur, du nombre minimum d'entrées et de sortie d'air nécessaires et du cheminement des gaines par une société spécialisée</li> <li>- Etude du nombre minimum d'entrées d'air nécessaires par une société spécialisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cf mesures constructives sélectionnées</li> <li>- Élément intégré au bilan quadriennal relatif à la mesure sélectionnée.</li> <li>- Contrôle de l'étanchéité de la dalle à chaque visite ou inspection et renfort éventuel.</li> <li>- <a href="#">Cliquer pour consulter</a></li> <li>- <a href="#">Cliquer pour consulter</a></li> </ul>
				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réfection complète de la dalle (selon son état). Etudier la mise en place d'un massif drainant sous cette dalle (système passif sans extracteur)</li> <li>- Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant</li> <li>- Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle</li> <li>- Réfection complète de la dalle (selon son état). Etudier la mise en place d'un massif drainant sous cette dalle (système actif avec extracteur)</li> <li>- Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant</li> <li>- Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle</li> <li>- Mise en place de puits d'aspiration (verticaux ou horizontaux) à travers la dalle existante (après étanchéification)</li> </ul>			
				Absence de composé volatil dans l'air intérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants du bâtiment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sans objet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sans objet</li> </ul>

SDSD : Système de Dépressurisation Sous Dalle VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

[Retour à la liste](#)

**Bâtiment existant de plain-pied - Traversées des dalles par des réseaux - Pollution par des composés volatils**

Contexte	Caractéristique du bâti	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Bâtiment de plain-pied	Entrée de canalisations et réseaux à travers la dalle	Quelque soit l'utilisation	Analyse de la qualité des gaz du sol au droit du bâtiment (si possible ou à défaut à proximité) et de l'air intérieur du bâtiment (a minima dans le rez-de-chaussée)	Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment. - Selon l'usage, les concentrations mesurées et la sensibilité des occupants, restriction plus ou moins complète de l'accès au bâtiment décidée par les autorités	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées
					- Contrôle et amélioration de l'étanchéité de la dalle (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux - Mise en place de mesures constructives complémentaires si nécessaire (ventilation, imperméabilisation de surface, etc.)	Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'étanchéité de la dalle à chaque visite ou inspection et renfort éventuel. - Contrôle de la qualité de l'air (pièce et, le cas échéant, le rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
				Présence de composés volatils dans les gaz de sols et présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et d'analyse. Vérification de l'évolution des concentrations et comparaison au référentiel adapté.	Cf mesures constructives sélectionnées
					- Contrôle et amélioration de l'étanchéité de la dalle (dans le cas d'un endommagement limité) et des passages de réseaux - Mise en place de mesures constructives complémentaires si nécessaire (ventilation, imperméabilisation de surface, etc.)	Vérification de la compatibilité des matériaux envisagés avec la problématique et les matériaux en place	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'étanchéité de la dalle à chaque visite ou inspection et renfort éventuel. - Contrôle de la qualité de l'air (pièce et, le cas échéant, le rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
			Absence de composé volatil dans l'air intérieur	- Information des occupants du bâtiment	Sans objet	Sans objet	

## Système de Dépressurisation du Sol - Contrôles post-installation

	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
SDSD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation d'une <b>dalle béton sur massif drainant</b> (système <b>passif</b> sans extracteur)</li> <li>- Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant</li> <li>- Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression générée sous la dalle</li> </ul>	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de l'intégrité de la dalle à chaque visite ou intervention.</li> <li>- Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet éventuel) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation d'une <b>dalle béton sur massif drainant</b> (système <b>actif</b> avec extracteur)</li> <li>- Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant</li> <li>- Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression générée sous la dalle</li> </ul>	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de l'intégrité de la dalle à chaque visite ou intervention.</li> <li>- Contrôle de l'ensemble de l'installation à chaque visite ou intervention (extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression sous-dalle et du débit total d'aspiration,...).</li> <li>- Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place de <b>puits d'aspiration</b> (verticaux ou horizontaux) à travers la dalle existante (après étanchéification)</li> </ul>	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de l'étanchéité de l'ensemble des passages de dalle ou de murs (points d'aspiration, points de contrôle ou passages de tuyauterie) à chaque visite ou intervention.</li> <li>- Contrôle de l'ensemble de l'installation d'extraction à chaque visite ou intervention (extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression à chaque puits d'aspiration et du débit total d'aspiration,...).</li> <li>- Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).</li> </ul>
SDSM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place d'une <b>membrane d'étanchéité</b> (système <b>passif</b>)</li> </ul>	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de l'intégrité de la membrane (ou revêtement de surface si membrane non visible) à chaque visite ou intervention.</li> <li>- Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place d'une <b>membrane d'étanchéité</b> (système <b>actif</b>)</li> </ul>	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de l'intégrité de la membrane (ou revêtement de surface si membrane non visible) à chaque visite ou intervention.</li> <li>- Contrôle de l'ensemble de l'installation d'extraction à chaque visite ou intervention (extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression sous la membrane et du débit total d'aspiration,...).</li> <li>- Contrôle de la qualité de l'air (pièce et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).</li> </ul>
Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- VMC <b>Double Flux</b> (si SDSD impossible)</li> </ul>	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle du fonctionnement et entretien du système de ventilation à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- VMC <b>Simple Flux</b> par Extraction ou Insufflation (si SDSD et VMC Double Flux impossibles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de la qualité de l'air (pièce) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmenter la <b>ventilation naturelle</b> par création d'entrées d'air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dans le cas d'utilisation d'un sous-sol correctement ventilé pour des activités non sensibles (local technique, parking,...) ou dans le cas d'un vide-sanitaire suffisamment ventilé, un contrôle tous les 6 mois la première année peut être envisagé.</li> </ul>

**SDSD** : Système de Dépressurisation Sous Dalle

**SDSM** : Système de Dépressurisation Sous Membrane (uniquement si la pièce n'est pas utilisée (par exemple un vide sanitaire), sinon utilisation d'un SDSD pour éviter d'endommager la membrane)

**VMC** : Ventilation Mécanique Contrôlée

## Bâtiment à construire - Aménagement d'un jardin - Pollution résiduelle au droit du site

En ce qui concerne la culture d'arbres fruitiers et légumes auto-produits, les préconisations suivantes sont à prendre en compte :

- pollution uniquement superficielle (pas d'extension en profondeur) et facilement gérable par l'apport de terres saines : application des mesures constructives présentées ci-dessous, la culture des arbres fruitiers restent envisageable, ainsi que celle des légumes.
- pollution s'étendant en profondeur (sous le géotextile et la couche de terre saine proposés dans les mesures constructives) : culture des légumes et d'arbres fruitiers possible sous certaines conditions permettant de garantir l'absence de transfert de la pollution entre le sol pollué sous-jacent et les végétaux (notamment via les racines). A défaut, si des risques de transfert de la pollution entre le sol pollué et les végétaux subsistent, instauration de servitudes spécifiques visant à restreindre voire interdire la culture de végétaux susceptibles de produire des fruits ou légumes consommables et remplacement des arbres fruitiers par des arbres d'ornement par exemple.

Contexte	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Aménagement d'un jardin	-Culture de légumes, d'arbres fruitiers et/ou -Espace de loisirs sans culture	Sans objet (compte tenu de la mesure constructive préconisée, de la problématique et sous réserve que des contrôles analytiques réalisés préalablement à l'aménagement démontrent le caractère résiduel de la pollution)	Sans objet (compte tenu de la mesure constructive préconisée, de la problématique et sous réserve que des contrôles analytiques réalisés préalablement à l'aménagement démontrent le caractère résiduel de la pollution)	- Information des occupants et préconisation en fonction de la remarque préliminaire ci-dessus.	Dans le cas d'apport de terres, contrôle de leur qualité.  Contrôle de l'état (érosion, entretien,...) et de l'épaisseur de la couche de protection y compris en tenant compte des éventuelles restrictions d'usage. Contrôle de la qualité des sols lors d'une vente du terrain.  Vérification de l'absence de culture d'arbres fruitiers (si recommandé au préalable). Dans le cadre d'un bilan quadriennal, contrôle de la qualité des légumes pendant la période de maturité a minima deux fois (post installation du jardin et avant la fin du bilan).
				- Recherche et mise en place de mesures visant à rendre compatible l'usage, comme (liste non exhaustive) : - Mise en place d'une couverture (au minimum une couche de 30 à 50 cm de terre saine) sur grillage avertisseur ou géotextile - Décapage des terres sur 50 cm minimum avec apport de terres saines. - Aménagement d'un jardin potager ou cultures de fruits et légumes, sous réserve de garantir l'absence de transfert de pollution des sols vers les végétaux. A défaut, privilégier la culture hors-sol ou mettre en place des systèmes de confinement limitant l'extension du système racinaire. - Remplacement des arbres fruitiers par des arbres d'ornement. - Ajout d'un dispositif de drainage des eaux météoriques afin de limiter la percolation de la pollution en profondeur. - Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire	
Création d'un puits privé	Analyse de la qualité des eaux souterraines dans le puits		Présence de polluants dans des concentrations supérieures aux valeurs recommandées dans les eaux	- Information des occupants et recommandation de ne pas utiliser les eaux souterraines à des fins de consommation, d'irrigation ou d'activités de loisirs - Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant un contrôle densifié de la qualité des eaux (a minima tous les 3 mois la première année) avec ajustement éventuel suite à l'évolution des concentrations après un cycle hydrogéologique (hautes eaux / basses eaux).
			Présence de polluants dans des concentrations inférieures aux valeurs recommandées dans les eaux	- Information des futurs occupants et préconisation de ne pas utiliser les eaux souterraines à des fins de consommation, d'irrigation ou d'activités de loisirs. - Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant le contrôle de la qualité des eaux tous les 6 mois, puis ajustement en fonction de l'évolution de la qualité de l'eau.
			Absence de polluants dans les eaux	- Information des occupants	Pas de contrôle complémentaire recommandé.

## Bâtiment à construire - Pollution par des composés volatils au droit du bâtiment ou en amont hydraulique proche du bâtiment

Avant de décider la mise en place d'une ou plusieurs mesures constructives dans le cadre d'un nouveau projet, il conviendra de préciser les contextes géologique, hydrogéologique et environnemental de la façon la plus exhaustive possible en tenant compte des éventuelles spécificités locales. Ainsi les points suivants semblent être un minimum :

- Géologie sous-jacente au bâtiment ;
- Profondeur et sens d'écoulement de la nappe ;
- Type de polluant ;
- Teneurs dans les sols et concentrations dans les eaux souterraines et les gaz du sol au droit de l'emprise du bâtiment ;
- Usage futur du bâtiment.

Dans le cadre de la construction d'un bâtiment au droit d'une pollution par des composés volatils, certaines préconisations générales sont à prendre en compte :

- Limiter au maximum les traversées de dalles et de murs enterrés par des réseaux ou des canalisations ;
- Limiter le nombre de voies de transfert préférentiel entre les niveaux (ascenseur, escalier,...) et assurer l'étanchéité des ouvertures dans le bâtiment (trappes, portes,...) ;
- Améliorer la qualité du béton utilisé en le mélangeant à des adjuvants pour diminuer sa perméabilité et le risque de fissures

Contexte	Utilisation	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Tout type de bâtiment	Quelque soit l'utilisation	- Eviter de construire en sous-sol	Sans objet	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - le contrôle de la qualité de l'air dans les gaz du sol et dans les parties inférieures du bâtiment (sous-sol / RDC) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Réduire l'emprise au sol du bâtiment et compenser par une augmentation de sa hauteur (réduction de la surface d'échange)	Etude de l'accessibilité des personnes à mobilité réduite nécessaire	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle du fonctionnement et entretien du système de ventilation à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (sous-sol et rejet) tous les 6 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Si un sous-sol est impératif, limiter l'utilisation de ce sous-sol à des activités non sensibles (locaux techniques, parkings,...). Prévoir une ventilation adéquate	Etude et dimensionnement de la ventilation à prévoir	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle du fonctionnement et entretien du système de ventilation à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (vide-sanitaire, niveau sus-jacent et rejet) tous les 6 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Mise en place d'une membrane d'étanchéité, sur un massif drainant, sous les fondations du bâtiment et sur l'extérieur des murs enterrés	Etude géotechnique si nécessaire	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de la qualité de l'air dans la partie inférieure du bâtiment (1 <sup>er</sup> niveau au-dessus géomembrane et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Mise en place d'un vide sanitaire accessible et suffisamment ventilé		Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle du fonctionnement et entretien du système de ventilation à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (vide-sanitaire, niveau sus-jacent et rejet) tous les 6 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Mise en place d'une membrane d'étanchéité dans le vide sanitaire (revêtement, membrane en spray,...) (système passif)	Etude et dimensionnement de la ventilation à prévoir	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'intégrité de la géomembrane à chaque visite ou inspection. - Contrôle de la qualité de l'air dans la partie inférieure du bâtiment (vide-sanitaire, niveau sus-jacent et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Mise en place d'une membrane d'étanchéité dans le vide sanitaire (revêtement, membrane en spray,...) couplé à un extracteur (système actif)		Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'intégrité de la géomembrane à chaque visite ou inspection (test de fumée par exemple). - Contrôle du fonctionnement et entretien du système d'extraction (extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression sous-membrane et du débit total d'aspiration, rejet,...) à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (vide-sanitaire, niveau sus-jacent et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système passif sans extracteur) - Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle	Etude de faisabilité afin de définir les caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant. Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce.	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'intégrité de la dalle à chaque visite ou inspection. - Contrôle de la qualité de l'air dans la partie inférieure du bâtiment (1 <sup>er</sup> niveau au-dessus de la dalle et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Réalisation d'une dalle béton sur massif drainant (système actif avec extracteur) - Installation de tubes crépinés / drains dans le massif drainant - Installation de points de contrôle permettant de vérifier la dépression sous la dalle	Contrôle de la dépression créée par l'extracteur envisagé à travers un massif drainant comparable à celui installé Etude de faisabilité / essai pilote afin de définir les caractéristiques du système d'extraction à mettre en œuvre au travers du massif drainant Etude du nombre de tubes crépinés / drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'intégrité de la dalle béton à chaque visite ou inspection. - Contrôle du fonctionnement et entretien du système d'extraction (extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression sous-membrane et du débit total d'aspiration, rejet,...) à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (1 <sup>er</sup> niveau au-dessus de la dalle et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
		- Mise en dépression des murs enterrés	Etude et dimensionnement à réaliser par une entreprise spécialisée + étanchéification des entrées / sorties des réseaux.	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle de l'étanchéité des murs (présence fissures, entrées / sorties réseaux,...) à chaque visite ou inspection. - Contrôle du fonctionnement et entretien du système d'extraction (extracteur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la dépression derrière les parois et du débit total d'aspiration, rejet,...) à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (pièce dans laquelle s'effectue la dépression, niveau supérieur et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).
- Construire le bâtiment sur pilotis	Aucun contrôle préalable mais connaissance de la qualité des gaz du sol sous l'emprise du bâtiment.	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - le contrôle de la qualité de l'air dans les gaz du sol et dans les parties inférieures du bâtiment (1 <sup>er</sup> niveau du bâtiment) tous les 6 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).		
- Mise en surpression du bâtiment	Etude et dimensionnement à réaliser par une entreprise spécialisée	Mise en place d'un bilan quadriennal intégrant : - Contrôle du fonctionnement et entretien du système de surpression ou de ventilation (surpresseur / ventilateur, relevé du temps de fonctionnement, vérification de la pression dans la pièce et du débit total insufflé, rejet,...) à faire par une société spécialisée selon les préconisations du fabricant ou/et de l'installateur. - Contrôle de la qualité de l'air (pièce dans laquelle s'effectue la surpression / ventilation, niveau supérieur et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).		
- Installer un système de ventilation suffisant (VMC Simple Flux, Double Flux, ...)				

Le nombre et la localisation des prélèvements recommandés en terme de contrôle sont donnés à titre indicatif et doivent être considérés comme un minimum applicable dans un cas général. Il revient au prestataire en charge de leur mise en œuvre d'adapter le nombre et la localisation des prélèvements à la problématique rencontrée.

Ne sont pas précisés ici les échantillons témoins d'air intérieur et extérieur nécessaires à une bonne interprétation des résultats obtenus.

[Retour à la liste](#)

## Passage de canalisations d'eau potable au travers de zones polluées ou potentiellement polluées - canalisation existante

Type de pollution éventuelle ou avérée	Utilisation	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives	
Métaux (cas d'une canalisation non étanche et sans problématique liée à la perméation)	Transport d'eau potable	Analyse de la qualité de l'eau potable acheminée en amont et en aval de la zone polluée	Présence de métaux dans des concentrations supérieures aux valeurs réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coupure de l'alimentation en eau potable sur le secteur problématique et substitution de l'alimentation en eau (interconnexion voire fourniture de bouteilles d'eau).</li> <li>- Recherche et identification de l'origine de la pollution, y compris en intégrant les risques pour le personnel qui pourrait réaliser des travaux au droit de la zone polluée.</li> <li>- Mise en oeuvre de travaux nécessaires (par exemple: neutralisation de la source, changement de la canalisation, remblaiement de la tranchée avec des matériaux sains,...), en assurant la santé et la sécurité du personnel les réalisant, vis-à-vis des risques sanitaires éventuellement mis en évidence lors de l'étape précédente.</li> <li>- Suivant les cas, déplacement de la canalisation dans une zone non polluée</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.</li> </ul>	Vérification de la résistance des matériaux envisagés (y compris joints) à la pollution mise en jeu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de la qualité de l'eau à l'issue des travaux</li> <li>- Surveillance ultérieure selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires</li> </ul>	
			Présence de métaux dans des concentrations inférieures aux valeurs réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recherche et identification de l'origine de la pollution, y compris en intégrant les risques sanitaires pour le personnel qui pourrait réaliser des travaux au droit de cette zone polluée.</li> <li>- Mise en oeuvre de travaux nécessaires (par exemple: neutralisation de la source, changement de la canalisation, remblaiement de la tranchée avec des matériaux sains,...), en assurant la santé et la sécurité du personnel les réalisant, vis-à-vis des risques sanitaires éventuellement mis en évidence lors de l'étape précédente.</li> <li>- Suivant les cas, déplacement de la canalisation dans une zone non polluée</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de la qualité de l'eau à l'issue des travaux</li> <li>- Surveillance ultérieure selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires</li> </ul>
			Absence de métaux dans l'eau transportée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.</li> </ul>			Sans objet
Composés volatils	Transport d'eau potable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse de la qualité de l'eau potable acheminée en amont et en aval de la zone polluée</li> <li>- Analyse de la qualité des gaz du sol au droit de la zone polluée et à proximité de la canalisation</li> <li>- Les composés recherchés seront adaptés à la pollution attendue</li> </ul>	Présence de composés volatils dans des concentrations supérieures aux valeurs réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coupure de l'alimentation en eau potable sur le secteur problématique et substitution de l'alimentation en eau (interconnexion voire fourniture de bouteilles d'eau).</li> <li>- Recherche et identification de l'origine de la pollution, y compris en intégrant les risques pour le personnel qui pourrait réaliser des travaux au droit de cette zone polluée.</li> <li>- Mise en oeuvre de travaux nécessaires (par exemple: neutralisation de la source, changement de la canalisation, remblaiement de la tranchée avec des matériaux sains,...), en assurant la santé et la sécurité du personnel les réalisant, vis-à-vis des risques sanitaires éventuellement mis en évidence lors de l'étape précédente.</li> <li>- Suivant les cas, déplacement de la canalisation dans une zone non polluée</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.</li> </ul>	Vérification de la résistance des matériaux envisagés (y compris joints) à la pollution mise en jeu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de la qualité de l'eau à l'issue des travaux</li> <li>- Surveillance ultérieure selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires</li> </ul>	
			Présence de composés volatils dans des concentrations inférieures aux valeurs réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recherche et identification de l'origine de la pollution, y compris en intégrant les risques pour le personnel qui pourrait réaliser des travaux au droit de cette zone polluée.</li> <li>- Mise en oeuvre de travaux nécessaires (par exemple: neutralisation de la source, changement de la canalisation, remblaiement de la tranchée avec des matériaux sains,...), en assurant la santé et la sécurité du personnel les réalisant, vis-à-vis des risques sanitaires éventuellement mis en évidence lors de l'étape précédente.</li> <li>- Suivant les cas, déplacement de la canalisation dans une zone non polluée</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de la qualité de l'eau à l'issue des travaux</li> <li>- Surveillance ultérieure selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires</li> </ul>
			Absence de composé volatil dans l'eau transportée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surveillance ultérieure selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires</li> </ul>

Dans tous les cas, l'information des usagers de la canalisation devra être intégrée au processus d'action et adapté au contexte. Ainsi, des actions complémentaires pourront être étudiées et mises en oeuvre par les autorités compétentes. S'agissant d'eau potable, en cas de problème identifié, l'ARS devra être informée.

[Retour à la liste](#)

## Passage de canalisations d'eau potable au travers de zones polluées ou potentiellement polluées - canalisation à installer

Contexte	Contrôles préalables à réaliser	Résultats d'analyses et conclusions	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de tests à réaliser avant le choix de la mesure	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Passage d'une canalisation d'eau potable au travers d'une zone polluée	Diagnostic environnemental adapté au contexte ( <i>si nécessaire, selon l'existence ou non de données environnementales</i> ) au droit de la zone polluée	Présence de polluants dans des concentrations supérieures aux valeurs limites présentées dans le rapport (paragraphe 5.2.3.) au droit ou à proximité de la zone de passage de la canalisation	- Neutralisation de la source de pollution (y compris en intégrant les risques pour le personnel qui réalisera ces travaux) et remblaiement de la tranchée avec des matériaux sains <b>ET/OU</b> - Adaptation du type de canalisation à la pollution rencontrée <b>ET/OU</b> - Eventuellement, si cela est envisageable et nécessaire, déplacement de la canalisation dans une zone non polluée <b>DANS TOUS LES CAS :</b> - Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire.	Vérification de la résistance des matériaux envisagés (y compris joints) à la pollution mise en jeu	- Contrôle de la qualité de l'eau à l'issue des travaux - Surveillance ultérieure selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires
		Présence de polluants dans des concentrations inférieures aux valeurs limites présentées dans le rapport (paragraphe 5.2.3.) au droit ou à proximité de la zone de passage de la canalisation			
		Absence de polluants au droit ou à proximité de la zone de passage de la canalisation	Sans objet	Sans objet	Sans objet

[Retour à la liste](#)

## Couverture des sols de surface

Contexte	Problématique	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives
Terrain nu	Ingestion, réenvol de poussières, contact cutané	Mise en place de barrières physiques afin d'empêcher l'accès aux sols pollués (par exemple, une couche de terre saine sur un grillage avertisseur voire un géotextile ou mise en place d'un bitume ou dalle béton,...) Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire	Dans le cas d'apport de terres, contrôle de leur qualité.
	Ingestion de légumes ou fruits autoproduits	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information des occupants et préconisation en fonction de la remarque préliminaire ci-dessus.</li> <li>- Recherche et mise en place de mesures visant à rendre compatible l'usage, comme (liste non exhaustive) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place d'une couverture (au minimum une couche de 30 à 50 cm de terre saine) sur grillage avertisseur ou géotextile</li> <li>- Décapage des terres sur 50 cm minimum avec apport de terres saines.</li> <li>- Aménagement d'un jardin potager ou cultures de fruits et légumes, sous réserve de garantir l'absence de transfert de pollution des sols vers les végétaux.</li> </ul> </li> <li>A défaut, privilégier la culture hors-sol ou mettre en place des systèmes de confinement limitant l'extension du système racinaire.</li> <li>- Remplacement des arbres fruitiers par des arbres d'ornement.</li> <li>- Ajout d'un dispositif de drainage des eaux météoriques afin de limiter la percolation de la pollution en profondeur.</li> <li>- Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire</li> </ul>	<p>Contrôle de l'état (érosion, entretien,...) et de l'épaisseur de la couche de protection y compris en tenant compte des éventuelles restrictions d'usage.</p> <p>Contrôle de la qualité des sols lors d'une vente du terrain.</p> <p>Vérification de l'absence de culture d'arbres fruitiers (si recommandé au préalable). Dans le cadre d'un bilan quadriennal, contrôle de la qualité des légumes pendant la période de maturité a minima deux fois (post installation du jardin et avant la fin du bilan).</p>
Passage de canalisations dans des terrains pollués	Ingestion d'eau potable polluée	<p>Pose des canalisations dans des remblais sains</p> <p>Utilisation d'une couverture mixte (propylène/ bentonite) autour de la canalisation</p> <p>Utilisation de canalisations dans un matériau résistant à la pollution (exemple canalisation métallique)</p> <p>Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire</p>	<p>Contrôle de la qualité de l'eau en amont et aval de la zone polluée selon décision de l'exploitant du réseau ou/et autorités sanitaires</p> <p>Vérification de la qualité des matériaux mis en place autour de la canalisation</p>
Enjeux environnementaux (ressources en eau)	Pollution des eaux souterraines par une pollution limitée en zone non saturée	<p>Mise en place d'une couverture étanche superficielle au droit de la zone de pollution (couche de protection + couche de drainage des eaux météoriques)*</p> <p>Mise en place de servitudes et conservation de la mémoire</p>	<p>Contrôle de l'état (érosion, entretien,...) et de l'épaisseur de la couche de protection</p> <p>Dans le cas où la couche de protection est constituée par de la terre, contrôle de la qualité des matériaux d'apport.</p>

\* : Cette mesure peut-être à caractère temporaire avant la mise en place de mesures de gestion plus importantes et visant à assurer un retour à une situation normale.

## Limiter la corrosion de biens

Contexte	Origine de la corrosion	Mesures constructives possibles	Recommandations en terme de contrôles à réaliser après l'installation des mesures constructives	
Biens métalliques	Acides	- Action sur le fluide transporté dans le cas de canalisation (action chimique ou inhibiteurs de corrosion)	- Vérification périodique de l'efficacité ou de la teneur en additifs dans l'électrolyte selon les préconisations du fabricant ou d'une société compétente	
	Sels			
	Sulfates			
		Chlorures	- Mise en place de revêtements (métalliques ou organiques)	- Vérification de l'état des revêtements selon les préconisations du fabricant ou d'une société compétente
		Particules solides en suspensions		
		Micro-organismes	- Protection cathodique (anodes solubles dites sacrificielles cde type zinc ou installation électrique reliée au métal à protéger)	- Vérification de l'état et du bon fonctionnement de la protection cathodique selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente
		H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub>		
	NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub>			
Bétons armés	Fluides : eau et air (CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S et SO <sub>2</sub> )	- Ajout de produits d'imprégnation dans le béton (par exemple : produits hydrophobes introduits dans les pores, minéralisateurs obturateurs mélangés au béton liquide, adjuvants limitant le craquage du béton) - Application d'un revêtement sur le béton (par exemple : peinture, résine ou revêtement plastique)	- Contrôler la composition du béton au moment de la fabrication - Contrôler l'état et l'étanchéité du revêtement lors de l'application - Contrôler l'état et l'étanchéité du revêtement si accessible selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente	
	Sulfates	- En plus des mesures applicables présentées ci-dessus (Fluides): - Modification du béton en ajoutant des cendres ou des poudres de résidus de combustion - Augmenter l'épaisseur du béton (couche sacrificielle)	- Contrôler la composition et l'épaisseur du béton au moment de la fabrication et de la mise en place - Contrôler l'état et l'épaisseur de la couche de béton si accessible selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente	
	Micro-organismes	- Modifier la conception du bâti ou des effluents (augmentation de la ventilation, diminution des zones mortes) - Modifier la composition du béton (les ciments alumineux sont plus résistants à ce type de problématiques) - Application de revêtements (liants hydrauliques modifiés ou résines synthétiques (époxy) )	- Contrôler la composition du béton au moment de la fabrication - Contrôler la composition de l'effluent selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente - Contrôler l'état et l'étanchéité du revêtement si accessible selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente	
	Chlorures	- En plus des mesures applicables ci-dessus (Fluides): - Modification du béton en ajoutant des adjuvants chlorés - Augmenter l'épaisseur du béton (couche sacrificielle)	- Contrôler la composition et l'épaisseur du béton au moment de la fabrication et de la mise en place - Contrôler l'état et l'épaisseur de la couche de béton si accessible selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente	
	Acides	- Application d'un revêtement résistant (de type résine époxy) - Augmentation de l'épaisseur du béton (couche sacrificielle) - Si le pH du milieu est inférieur à 2,5, il faut d'abord traiter chimiquement le milieu avant de mettre en place le béton	- Contrôler la composition de l'effluent selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente - Contrôler l'état et l'épaisseur de la couche de béton et/ou l'état et l'étanchéité du revêtement si accessibles selon les préconisations du fabricant, de l'installateur ou d'une société compétente	

## **Annexe 3**

### **Proposition d'un modèle de recueil d'informations pour la visite d'un bâtiment en vue de la mise en place de mesures constructives**



<b>Visite préalable d'un bâtiment avant l'étude de la (des) mesure(s) constructive(s) envisageable(s)</b>
<p><b>1. Environnement extérieur à proximité</b></p> <p>1.1 - Géologie sous-jacente  Zone non saturée :  Zone saturée :</p> <p>1.2 - Nappe souterraine  Existence :  Profondeur :  Contamination connue :  Type (captive, semi-captive, libre) :</p> <p>1.3 - Situation routière  Type :  Proximité :  Trafic :</p> <p>1.4 - Situation du site (résidentielle, industrielle, rurale)</p> <p>1.5 - Présence d'une zone industrielle (rayon d'un km)</p> <p>1.6 - Source potentielle de pollution environnante (industrie, parking, tour de refroidissement,...)</p>
<p><b>2. Description générale du bâtiment</b></p> <p>2.1 - Usage du bâtiment  Industriel :  Commercial :  Résidentiel (Préciser si individuel/collectif):</p> <p>2.2 - Année de construction</p> <p>2.3 - Nombre d'étages</p> <p>2.4 - Surface approximative</p> <p>2.5 - Nombre de pièces</p> <p>2.6 - Type d'occupant permanent ou occasionnel (nouveau-né, enfants, adultes, personnes âgées, employés,...) et durée de présence journalière estimée</p> <p>2.7 - Type de construction (béton, parpaings, briques,...)</p> <p>2.8 - Type de fondations (sur radier, sur pieux, sur semelle, sur parois moulées,...) et type de soubassement (dalle portée, indépendante, vide sanitaire....)</p> <p>2.9 - Existence et type de locaux annexes ou de pièces semi-enterrées (vide sanitaire, cave, sous-sol,...)  -  -  -</p> <p>2.10 - Si vide sanitaire, préciser le type (d'un seul tenant, compartimenté,...) et vérifier l'absence d'activités ou de stockages susceptibles de dégager des substances volatiles</p> <p>2.11 - Rénovation récente du bâti (moins de 6 mois)</p> <p>2.12 - Energie principale de chauffage (fioul, gaz, électrique)</p> <p>2.13 - Présence d'un système de ventilation spécifique (mécanique, naturelle par conduit, climatisation,...) et d'un contrôle périodique de l'installation</p> <p>2.14 - Présence et usage d'un bâtiment mitoyen  Garage :  Habitation :  Autre :</p> <p>2.15 - Présence d'escaliers ou d'ascenseurs</p>

**3. Description des pièces en contact direct avec le sol**

- 3.1 - Type de sol (terre battue, bois, dalle béton, carrelage,...) et épaisseur
- 3.2 - Type de mur en contact avec le sol (béton, parpaings,...)
- 3.3 - Présence de fissures, trous, cavités dans les sols et les murs, y compris arrivée de canalisations, réseaux et gaines électriques
- 3.4 - Isolation thermique éventuelle (laine de verre, double cloison, ...)
- 3.5 - Etanchéification éventuellement réalisée (résine, mousse expansive, enduit, ...)
- 3.6 - Présence d'un chauffage par le sol ou de colle amiantée
- 3.7 - Type de revêtement sur les sols (lino, carrelage,...) et mode de fixation (collé, posé,...)
- 3.8 - Type de revêtements sur les murs (peinture, papier peint, lambris,...) et mode de fixation (collé, cloué,...)
- 3.9 - Rénovation récente (moins de 6 mois)
- 3.10 - Hauteur sous plafond et/ou présence d'un faux plafond
- 3.11 - Surface approximative des pièces en contact avec le sol et surface approximative de murs éventuellement en contact avec le sol
- 3.12 - Facilité à installer éventuellement des gaines de ventilation
- 3.13 - Odeur ou observation particulières ? (solvant, humidité, renfermé, présence de moisissures...)
- 3.14 - Stockage de produits ou de mobilier susceptibles de dégager des composés volatils
- 3.15 - Ventilation de la pièce (naturelle, mécanique), état et dégagement des entrées et sorties d'air
- 3.16 - Type de chauffage
- 3.17 - Type d'ouvrant (fenêtre, hublot,...) et étanchéité
- 3.18 - Type de vitrage
- 3.19 - Présence de pièces à vivre dans ce niveau
- 3.20 - Taux de fréquentation des pièces de ce niveau
- 3.21 - Etanchéité vis-à-vis des pièces des étages supérieurs : nature de la séparation entre les étages (béton, plancher,...), canalisations et réseaux montants,...
- 3.22 - Existence d'éventuelles mesures constructives mises en place lors de la construction de la maison (étanchéité des parois extérieures, drainage, cuvelage,...)
- 3.23 - Localisation potentielle (voire approbation par l'occupant) de futurs prélèvements de gaz de sol (perçement de dalle)
- 3.24 - Disponibilité des plans des bâtiments ou, à défaut, joindre des croquis du bâtiment (vue en plan des différents niveaux du bâtiment et vue en coupe, avec les points cardinaux et en précisant le sens d'écoulement supposé ou connu de la nappe)

## **Annexe 4**

### **Éléments relatifs aux coûts engendrés par la mise en place de mesures constructives**



Problématique	Mesure constructive	Coût d'installation (matériel et main d'œuvre, hors étude préalable et supervision)	Source/ Date	Coût de fonctionnement/ consommation électrique	Coût d'entretien (hors prélèvements et analyses éventuels)	Paramètres influençant principalement le coût	
Intrusions de vapeurs	Passive	Colmatage des fissures	De l'ordre de 10 € HT par mètre linéaire	b) / 2008	Aucun	A renouveler autant de fois que nécessaire	Longueur et grosseur de la fissure
		Ragréage	10 à 40 € HT/m <sup>2</sup>	l) / 2013		Aucun	Surface et état de la surface à ragréer
		Dalle béton armée seule	40 à 70 € HT/m <sup>2</sup>	l) / 2013		Aucun	Surface et usage de la dalle (résidentiel, industriel,...)
		Dalle béton armée + massif drainant 20/40 + drainage	50 à 90 € HT/m <sup>2</sup>	l) / 2013		Aucun	Surface et usage de la dalle (résidentiel, industriel,...) Existence de différents niveaux à raccorder à l'aide du drainage
		Revêtement bitumineux	10 à 60 € HT/m <sup>2</sup>	d) / 2001 l) / 2013		Aucun	Surface, état et type du support
		Membrane plastique	3 à 40 € HT/m <sup>2</sup> (hors préparation préalable du sol)	d) / 2001 e) / 2007 l) / 2013		Aucune (sauf si elle est endommagée)	Surface, nécessité de raccorder plusieurs lés ou non, présence de réseaux à étancher ou non
		Résines époxy ou polyuréthane	10 à 20 € HT/m <sup>2</sup>	d) / 2001		A renouveler lorsqu'elle est endommagée	Surface et usage après application (frottement mécanique ou non par exemple)
		Membranes en spray	10 à 35 € HT/m <sup>2</sup> + 10 à 13 € HT/m linéaire de tuyauterie	d) / 2001 m) / 2003		400 à 1500 €/an	Surface, topographie du terrain, présence de réseaux
		Etanchéité extérieure (membrane)	3 à 50 € HT/m <sup>2</sup>	b) / 2008 m) / 2003		Aucun	Surface, profondeur et existence de réseaux à étancher
		Adjuvants et superplastifiants béton	0,5 à 0,7 € HT/m <sup>2</sup>	j) / 2002		Aucun	-
		Mise en place d'un vide sanitaire	40 à 60 €/m <sup>2</sup>	l) / 2013		Aucun	-
		Membrane de drainage en géocomposite	5 à 50 € HT/m <sup>2</sup>	n) / 2013		Aucun	Topographie du terrain, application horizontale (sol) ou verticale (mur)
		Ventilation passive (installation de la membrane non comprise)	5 à 50 € HT/m <sup>2</sup>	e) / 2003 m) / 2003		Aucun	Topographie du terrain, surface, existence de différents niveaux à raccorder au drain
		Ajout d'une entrée d'air autoréglable ou hygroréglable dans un mur (résidentiel)	200 à 300 € HT/unité	l) 2013		Aucun	-
	Barrière de dilution passive	1000 à 3000 € HT/m linéaire (jusqu'à 10 m de profondeur)	i)	Aucun	Longueur de la barrière, accessibilité		
	Active	Mise en surpression d'un vide sanitaire (installation d'un insufflateur)	1 000 à 3000 € HT	l) / 2013	50 à 300 €/an (pour une maison individuelle, dépend aussi de la puissance du ventilateur)	Taille du bâtiment, débits et pression à garantir	
		SDSD avec nouvelle dalle béton armée + massif drainant 20/40 + drainage	60 à 130 € HT/m <sup>2</sup>	l) / 2013	50 à 300 €/an (pour une maison individuelle, dépend aussi de la puissance de l'extracteur)	Surface et usage de la dalle (résidentiel, industriel,...)	
		SDSD sous dalle existante	10 à 50 € HT/m <sup>2</sup>	e) / 2007 l) / 2013	50 à 1 000 €/an (pour une maison individuelle, dépend aussi de la puissance de l'extracteur)	Géologie sous-jacente, épaisseur de la dalle et des murs à traverser pour installer les tuyaux d'aspiration, du nombre de points d'aspiration, du type d'extracteur nécessaire,	
		SDSM dans vide sanitaire	10 à 50 € HT/m <sup>2</sup>	e) / 2007	50 à 300 €/an (pour une maison individuelle, dépend aussi de la puissance de l'extracteur)	Surface, vide sanitaire d'un seul tenant ou compartimenté	
		Mise en dépression des murs	5 à 15 € HT/m <sup>2</sup>	b) / 2008	50 à 300 €/an (pour une maison individuelle, dépend aussi de la puissance de l'extracteur)	Surface et type de mur	
Construction de doubles cloison		40 à 60 € HT/m <sup>2</sup>	l) / 2013	Aucun	Aucun	Hauteur et surface	
VMC Simple Flux par Insufflation		Environ 2 000 et 4 000 € HT (cas d'une maison individuelle) Entre 10 et 30 € HT / m <sup>2</sup> (pour un bâtiment industriel ou commercial avec un vide sanitaire d'environ 0,40 m de hauteur)	f) g) h) l) / 2013	50 à 150 € HT/an selon le modèle et pour une maison individuelle (hors chauffage électrique complémentaire)	250 € en moyenne par intervention pour une maison individuelle (1 par an)	Taille du bâtiment, présence ou non d'une résistance chauffante	
VMC Simple Flux par Extraction				50 à 150 € HT/an selon le modèle et pour une maison individuelle		Taille du bâtiment, nombre de murs et/ou plafonds à traverser pour installer les gaines	
VMC Double Flux	entre 4 000 et 8 000 € HT (cas d'une maison individuelle - selon qu'il s'agisse d'une construction neuve ou d'une rénovation (plus chère))	f) h) l) / 2013	100 à 200 € HT/an selon le modèle et pour une maison individuelle (hors chauffage électrique complémentaire)		Taille du bâtiment, nombre de murs et/ou plafonds à traverser pour installer les gaines, de la présence ou non d'une résistance chauffante		
Installation du rejet (cheminée)	entre quelques centaines à plusieurs milliers d'euros	l) / 2013	Aucun	Aucun	Hauteur, accessibilité (utilisation d'une échelle, d'une nacelle, d'un échafaudage...)		

Problématique	Mesure constructive	Coût d'installation (matériel et main d'œuvre, hors étude préalable et supervision)	Source/ Date	Coût de fonctionnement/ consommation électrique	Coût d'entretien (hors prélèvements et analyses éventuels)	Paramètres influençant principalement le coût
Perméation	Changement du cheminement de la canalisation	Dépend du type de canalisation, de la longueur de tuyauterie à changer, de la profondeur d'enfouissement, etc.	-	A priori aucun	A priori aucun surcoût supplémentaire par rapport à l'entretien standard d'une canalisation	Dépend du type de canalisation, de la longueur de tuyauterie à changer, de la profondeur d'enfouissement, etc.
	Remplacer une canalisation	130 à 250 €/mètre linéaire selon le lieu (rural, semi-urbain, urbain)	a), k) / 2005 l)			Dépend de l'existence d'une dalle à démolir pour accéder aux réseaux, de la présence de réseaux à proximité, du diamètre de la tuyauterie
	Mettre en place une barrière de bentonite autour d'une canalisation (type géosynthétique bentonitique)	15 €/m <sup>2</sup> fourni et posé (hors remblaiement avec matériaux sains)	l) / 2013			Dépend principalement des dimensions de la tranchée (largeur, longueur, profondeur)
	Utiliser une canalisation en PE-Al-PE	Entre 5 et 60 € HT/m (hors installation)	l) / 2013			Dépend principalement du diamètre du tuyau (ici entre 16 et 63 mm)
Couverture de sol	Mise en place d'une couche de terre végétale	Entre 20 et 30 € HT/t livrée et mise en place soit environ 13 à 20 euros/m <sup>2</sup>	l) / 2013			Aucun, sauf si érosion

Sources:

- a) CAE et Véolia Environnement - Diagnostic des canalisations - [http://www.cae-laboratoires.com/fiche\\_produit/offre\\_renouvellement\\_canalisations.pdf](http://www.cae-laboratoires.com/fiche_produit/offre_renouvellement_canalisations.pdf)
- b) USEPA - Engineering Issue - Indoor Air Vapor Intrusion Mitigation Approaches
- c) NAVFAC - Vapor Intrusion Mitigation in Existing Buildings Fact Sheet
- d) Bureau of Reclamation, PN Regional Office Boise, ID and Bureau of Reclamation, Denver Technical Center Denver, CO - CONSTRUCTION COST TABLES - CANAL LINING DEMONSTRATION PROJECT - JUNE 1, 2001
- e) Interstate Technology & Regulatory Council - Vapor Intrusion Pathway: A Practical Guideline. 2007
- f) <http://vmc.comprendrechoisir.com/comprendre/prix-vmc>
- g) <http://www.maventilation.info/faq.php>
- h) <http://vmc.ideesmaison.com/a-entretien-de-la-vmc>
- i) [http://www.virtual-curtain.com/downloads/CPD%20Presentation%20-%20Copy%20\(NXPowerLite\).ppt](http://www.virtual-curtain.com/downloads/CPD%20Presentation%20-%20Copy%20(NXPowerLite).ppt)
- j) <http://www.francebeton.com/tarifs.htm>
- k) <http://www.quechoisir.org/environnement-energie/eau/eau-potable/etude-profits-de-l-eau-le-modele-de-calcul-de-l-ufc-que-choisir>
- l) retour d'expérience interne
- m) Interstate Technology & Regulatory Council - Vapor Intrusion Issues at Brownfield Sites. 2003
- n) <http://geosynt.files.wordpress.com/2013/04/maccaferri.pdf> 2013

Remarque 1 : Pour certaines techniques, le retour d'expérience est faible ou inexistant en France. Les tarifs en dollar généralement rencontrés aux USA ont été convertis en euros. Il est possible que les tarifs indiqués ne représentent pas fidèlement les tarifs du marché français.

Remarque 2 : En ce qui concerne le coût de contrôle et d'entretien d'une VMC dans un bâtiment neuf, il ne s'agit pas à proprement parler d'un coût supplémentaire. En effet, le contrôle et l'entretien de la VMC dans un bâtiment neuf sont demandés dans le Règlement Thermique 2012, en dehors de toute problématique de Sites et Sols Pollués et de Mesures Constructives.

## **Annexe 5**

### **Études de cas : cas d'une maison standard de 100 m<sup>2</sup>**



**Etude de cas :**  
**Cas d'une maison standard avec vide sanitaire**  
**(Mise en dépression ou surpression du vide sanitaire)**

**Caractéristiques de la maison :**

- Superficie totale de la maison : 100 m<sup>2</sup>
- Hauteur du vide sanitaire: 0,6 m
- Vide sanitaire non compartimenté
- Volume total du vide sanitaire : 60 m<sup>3</sup>
- Dépression ou surpression : de l'ordre de 10 à 15 Pa
- Renouvellement de l'air : 2 à 4 volumes par heure
- Débit total : 250 m<sup>3</sup>/h maximum

**Installation possible :**

- Caisson VMC de type KVK 125 (Puissance absorbée: 0,093 kW)
- Régulation et alimentation électrique
- Grille(s) de prise d'air extérieur
- Grille de rejet d'air avec ou sans volet de surpression

**Budget estimatif**

Caisson VMC & régulation	2 000 € HT
Grille de prise d'air	150 € HT
Grille de rejet	250 € HT
<b>Total (matériel et main d'œuvre):</b>	<b>2 400 € HT</b>

**Coût de fonctionnement (24h/24)**

Durée de fonctionnement : 8760 h/an

Puissance consommée : 800 kWh/an

**Coût de fonctionnement : environ 70 €/an**

**Coût d'entretien**

**1 visite annuelle : 250 € HT (prestation sur place, hors déplacement)**

**Etude de cas :**  
**Cas d'une maison standard sans vide sanitaire**  
**(Mise en place d'une VMC Simple Flux)**

**Caractéristiques de la maison :**

- Superficie totale de la maison : 100 m<sup>2</sup>
- 3 chambres, 1 salle de bain, 1 cuisine, 1 séjour, 1 sanitaire
- Débit nécessaire : 180 m<sup>3</sup>/h minimum (cf arrêté du 24/03/1982)

**Installation possible :**

- Caisson VMC SF de type KVK 125 (Puissance absorbée: 0,093 kW)
- Rejet d'air en toiture ou façade
- Régulation et alimentation électrique
- Grilles autoréglables ou hygroréglables en pièces humides
- Entrées d'air autoréglables ou hygroréglables en menuiserie

**Budget estimatif**

Fourniture et main d'œuvre : 3 000 € HT

**Coût de fonctionnement (24h/24)**

Durée de fonctionnement : 8760 h/an

Puissance consommée : 800 kWh/an

**Coût de fonctionnement : environ 70 €/an**

**Coût d'entretien**

**1 visite annuelle : 250 € HT (prestation sur place, hors déplacement)**

**Etude de cas :**  
**Cas d'une maison standard sans vide sanitaire**  
**(Mise en place d'une VMC Double Flux)**

**Caractéristiques de la maison :**

- Superficie totale de la maison : 100 m<sup>2</sup>
- 3 chambres, 1 salle de bain, 1 cuisine, 1 séjour, 1 sanitaire
- Débit nécessaire : 180 m<sup>3</sup>/h minimum (cf arrêté du 24/03/1982)

**Installation possible :**

- Caisson Double Flux avec récupération de calories (P. absorbée: 0,140 kW)
- Rejet d'air en toiture ou façade
- Prise d'air en façade
- Régulation et alimentation électrique
- Grilles autoréglables ou hygroréglables en pièces humides
- Grilles de soufflage dans les pièces à vivre

**Budget estimatif**

Fourniture et main d'œuvre : 6 000 € HT

**Coût de fonctionnement (24h/24)**

Durée de fonctionnement : 8760 h/an

Puissance consommée : 1 200 kWh/an

**Coût de fonctionnement : environ 110 €/an**

**Coût d'entretien**

**1 visite annuelle : 250 € HT (prestation sur place, hors déplacement)**



**Centre scientifique et technique**  
**Direction Eau, Environnement et Écotechnologies**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)