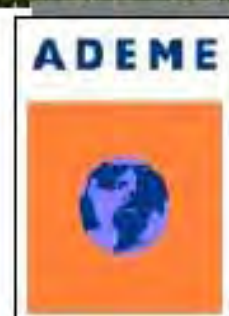


Evaluation environnementale et sanitaire de l'utilisation de granulats d'élastomères (vierges et issus de pneumatiques usagés) comme remplissage des gazons synthétiques de troisième génération



FieldTurf Tarkett
UNITED IN SPORT™



**EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE DE L'UTILISATION DE GRANULATS
D'ELASTOMERES (VIERGES ET ISSUS DE PNEUMATIQUES USAGES) COMME
REPLISSAGE DES GAZONS SYNTHETIQUES DE TROISIEME GENERATION**

Contexte

La réalisation de sols sportifs en gazon synthétique est un marché en pleine expansion. La société FIELDTURF TARKETT, leader mondial du gazon synthétique de troisième génération¹ pour la pratique du football, rugby, réalise dans le monde près de 650 terrains de grands-jeux par an (environ une centaine en France pour l'année 2006).

Dans le cadre de la construction de telles surfaces sportives (la première réalisation à l'échelon mondial date de 1995), des granulats élastiques et amortissants sont utilisés comme matériaux de remplissage des fibres des gazons synthétiques. Certains de ces granulats sont issus de la granulation de pneumatiques usagés (en France, PUNR² valorisés : collectés et triés dans le cadre du Décret français n°2002-1563 du 24 décembre 2002 relatif à l'élimination des pneumatiques usagés), d'autres sont fabriqués spécialement à cet effet (EPDM³ ou ETP⁴), dans une moindre mesure certains sont issus du recyclage d'EPDM (joints de machine à laver, de portières de véhicules, ...).

Dès la mise au point de ses premières applications de gazon synthétique de troisième génération, la société FIELDTURF TARKETT a choisi de privilégier l'utilisation de granulats de matériaux recyclés pour leur remplissage, permettant ainsi en 2006 la valorisation d'environ 11 000 tonnes de granulats de pneumatiques usagés en France sur des terrains de grande dimension.

Ces aires de jeux en gazon synthétique de troisième génération présentent de nombreux avantages pour les clubs sportifs et les collectivités. Leur durée d'utilisation est quasiment illimitée et elles présentent des niveaux de performances stables dans le temps et ne requièrent qu'une maintenance limitée en comparaison d'une pelouse naturelle. Les qualités des systèmes développés par FIELDTURF TARKETT sont reconnues par la FIFA⁵, l'UEFA⁶ et les fédérations nationales. Depuis le 1^{er} février 2004, la FIFA et l'UEFA autorisent le déroulement de matchs de compétition sur ce type de surfaces.

Ces dernières années et particulièrement durant l'année 2006, des articles de presse, relayés parfois par certaines fédérations sportives, mettent en cause, de par la présence de certains composés classés dangereux dans la fabrication initiale d'un pneumatique, l'innocuité vis à vis de la santé humaine de l'utilisation de granulats de pneumatiques recyclés par rapport à des granulats vierges. Plusieurs études scientifiques ont ainsi été réalisées d'un point de vue environnemental et sanitaire dans plusieurs Etats européens dans le but de caractériser les émissions de polluants par voie gazeuse et/ou aqueuse.

Conscients de l'importance de s'assurer de ces aspects et afin de disposer d'éléments objectifs face à ce type de publications, les principaux manufacturiers de pneumatiques par l'intermédiaire de leur société ALIAPUR⁷ en partenariat avec la société Fieldturf Tarkett et l'ADEME⁸, ont engagé dès 2005 un programme d'études scientifiques évaluant les impacts environnementaux et sanitaires des différents matériaux de remplissage des gazons synthétiques. Ces études ont été confiées au Groupement d'Intérêt Scientifique français, EEDEMS, qui regroupe les compétences d'organismes publics et privés référents dans ces domaines, notamment dans le cas des matériaux et produits de construction.

¹ Les gazons synthétiques de 3^{ème} génération sont apparus sur le marché mondial en 1995. Dotés de fibres plus longues (en moyenne 60 mm), ils se caractérisent notamment par un remplissage de sable et de granulats élastomères de différents types. Les performances sportives de ces revêtements avoisinent celles d'un gazon naturel régulièrement entretenu.

² Pneumatiques Usagés Non Réutilisables

³ Ethylene Propylene Diene Monomer

⁴ Elastomère ThermoPlastique ou Thermoplastic Elastomer (TPE)

⁵ Fédération Internationale de Football Association

⁶ Union of European Football Associations

⁷ Société en charge de la valorisation de 85 % des pneumatiques mis sur le marché français en 2005; soit 31 550 000 pneumatiques correspondants à 283 000 tonnes

⁸ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France)

Cette synthèse technique contient les faits marquants des études et les conclusions générales des différentes évaluations. Le plan du document est le suivant :

I. INTERET ET OBJECTIFS DES ETUDES	3
II. EVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL SUR LES EAUX	3
II.1. - Les matériaux testés	3
II.2. - Deux approches complémentaires nécessaires à l'élaboration de protocoles analytiques	4
II.3. - Méthodologies mises en œuvre	4
II.3.1. - Expérimentation <i>in situ</i>	4
II.3.2. - Expérimentation en scénarios pilote	5
II.4. - Approches analytiques pour une évaluation de l'impact environnemental	7
II.4.1. - Modes d'échantillonnage	7
II.4.2. - Types d'analyses réalisées et référentiels	7
II.5. - Résultats et commentaires	8
II.5.1. - Résultats sur les volumes recueillis	8
II.5.2. - Résultats et synthèse sur la physico-chimie des percolats recueillis	8
II.5.3. - Conclusions	11
II.5.4. - Résultats et synthèse de l'étude écotoxicologique	12
II.5.5. - Conclusions	13
III. EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES LIES AUX EMISSIONS GAZEUSES ..	13
III.1. - Caractérisation des émissions en COV et formaldéhyde par les sols sportifs en gazon synthétique	13
III.1.1. - Matériaux utilisés	13
III.1.2. - Méthodologie	13
III.1.3. - Conditions analytiques	14
III.1.4. - Résultats	14
III.1.5. - Conclusions	15
III.2. - Etude de l'Evaluation des Risques Sanitaires (ERS)	15
III.2.1. - Scénarii d'exposition	16
III.2.2. - Résultats et recommandations	20
IV. CONCLUSIONS GENERALES.....	21
V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET NORMATIVES	25

I. Intérêt et objectifs des études

L'intérêt des études réside dans la recherche et l'évaluation d'éventuels impacts environnementaux et sanitaires liés d'une part aux transferts des eaux météoriques dans le milieu naturel suite à leur percolation au travers des composants du sol sportif et, d'autre part, aux émissions gazeuses susceptibles d'être générées par les matériaux entrant dans la composition du sol sportif.

Au travers de la démarche adoptée, trois approches analytiques ont été menées :

1. l'analyse chimique pour la détermination des concentrations en éléments et substances potentiellement polluants présents dans les percolats recueillis après leur transfert au travers des différents matériaux constitutifs du sol sportif,
2. la mesure de l'écotoxicité des percolats recueillis après leur transfert au travers des différents matériaux constitutifs du sol sportif,
3. l'analyse des composés organiques volatils (COV) et formaldéhydes émis et leurs concentrations respectives dans un scénario « indoor » d'utilisation des sols sportifs.

Les valeurs de concentrations obtenues par l'analyse physico-chimique des percolats ont ensuite été confrontées à des valeurs guides de référence (décret, valeurs d'acceptabilité, ...). Celles obtenues par analyse des COV et formaldéhydes émis ont été utilisées pour la conduite d'une étude d'Evaluation des Risques Sanitaires (ERS).

Les expérimentations mises en œuvre, en l'occurrence un suivi sur un terrain de football instrumenté et des pilotes à échelle réduite sur plate-forme expérimentale, sont en adéquation avec les conditions d'usages des terrains et à l'image de l'évolution de normes concernant d'autres applications⁹.

A terme, les objectifs de cette étude consistent à :

1. disposer d'informations fiables et précises sur les impacts environnementaux et sanitaires de ces applications,
2. apporter des réponses aux principales questions soulevées par les professionnels, les fédérations sportives, les institutionnels et les collectivités locales concernant certains éléments et substances classés à risque,
3. apporter, en ce qui concerne les impacts environnementaux et sanitaires, des éléments de comparaison relatifs aux différents types de granulats utilisés en remplissage de gazon synthétique,
4. obtenir des éléments permettant la définition de protocoles expérimentaux normalisés adaptés aux conditions réelles d'usage.

II. Evaluation de l'impact environnemental sur les eaux

II.1. - Les matériaux testés

Les matériaux testés correspondent à un gazon en fibres synthétiques de 3^{ème} génération de la gamme FIELDTURF TARKETT associé à des granulats de remplissage de 3 natures différentes :

- granulats issus de pneus usagés de la filière française (PUNR),
- granulats vierges d'EPDM,
- granulats d'ETP.

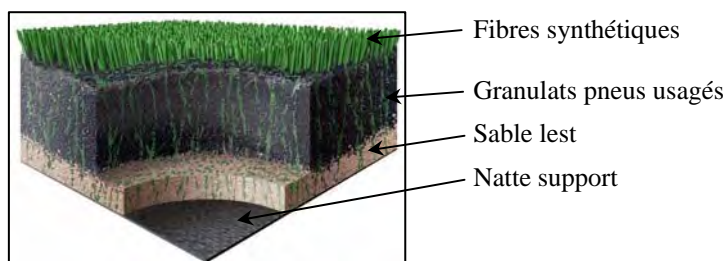


Figure 1 : Coupe schématique verticale d'un sol sportif de 3^{ème} génération (document FIELDTURF TARKETT).

⁹ Par exemple la norme européenne sur les essais de lixiviation EN 12-920 – Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans les conditions spécifiées

Les matériaux et produits tels que le sable lest, la bande synthétique d'assemblage et la colle polyuréthane, utilisés lors de l'installation d'un terrain de sport en vraie grandeur, ont également été pris en considération lors du montage des expérimentations. La Figure 1 donne la disposition des différents éléments constitutifs du sol sportif en gazon synthétique.

Les masses de matériaux mis en œuvre au mètre carré dans les différentes expérimentations présentées ci-après sont de 17,5 kg pour le sable constituant la couche lest et de 15 kg pour chaque type de granulats considéré.

II.2. - Deux approches complémentaires nécessaires à l'élaboration de protocoles analytiques

Dans le but d'élaborer au sortir de cette étude des protocoles analytiques en adéquation avec les conditions d'usage permettant une caractérisation des impacts environnementaux et sanitaires des sols sportifs en gazon synthétique, deux approches analytiques complémentaires ont été conduites en parallèle.

La première approche, conduite sur la plate-forme expérimentale EEDEMS, consiste en une expérimentation contrôlée en scénario pilote (à une échelle intermédiaire entre le laboratoire et la vraie grandeur) destinée à comparer le comportement, du point de vue de l'impact environnemental et sanitaire, de 3 types de sols sportifs élaborés à partir de 3 types de granulats distincts. Un gazon synthétique seul, sans ajout de granulats, est pris comme pilote témoin.

La seconde approche consiste en une expérimentation menée *in situ* sur un terrain de football. Le terrain, instrumenté au moyen d'un casier lysimétrique¹⁰ implanté sous le gazon synthétique, comporte des granulats de pneumatiques usagés. Cette approche est menée dans le but d'apporter des informations complémentaires quant au comportement des matériaux dans le milieu naturel (soumis aux aléas météorologiques) et de s'assurer de la représentativité des expérimentations conduites en scénarios pilote.

II.3. - Méthodologies mises en œuvre

II.3.1. - Expérimentation *in situ*

Une instrumentation *in situ* (Figure 2) a été mise en place lors du chantier de réalisation d'un terrain d'entraînement en région lyonnaise (69-France) à l'arrière d'une zone de but et en périphérie du terrain (Figure 3).

Cette instrumentation consiste en un système lysimétrique en tôle d'acier inoxydable de 2 m² de surface et de 10 cm de hauteur recouvert d'un caillebotis, enterré dans le sol support et disposé sous le gazon synthétique de manière à récupérer l'eau de pluie qui percole à travers celui-ci (Figure 2).

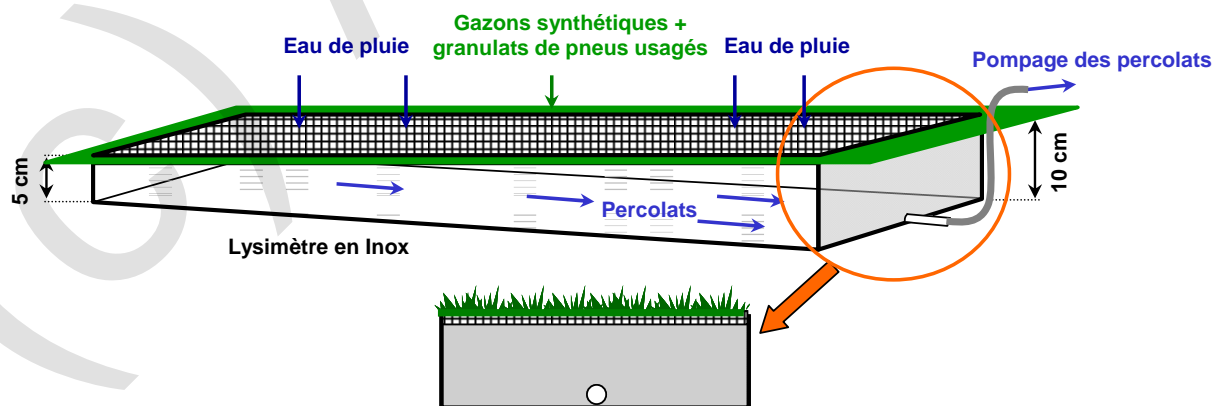


Figure 2 : Schéma du système lysimétrique mis en place sur le terrain de football.

¹⁰ Le lysimètre simple se présente généralement comme un cylindre ou un bac, en métal, béton ou plastique étanche par ses côtés dont le fond laisse percoler l'eau afin qu'on puisse la récolter en mesurant le débit et différents paramètres. Il peut être placé *in situ* (sur le terrain à étudier) ou *ex situ* (en laboratoire).

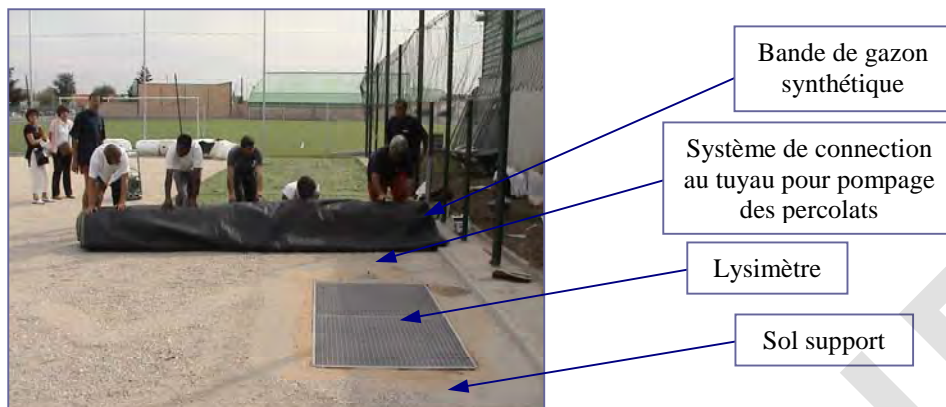
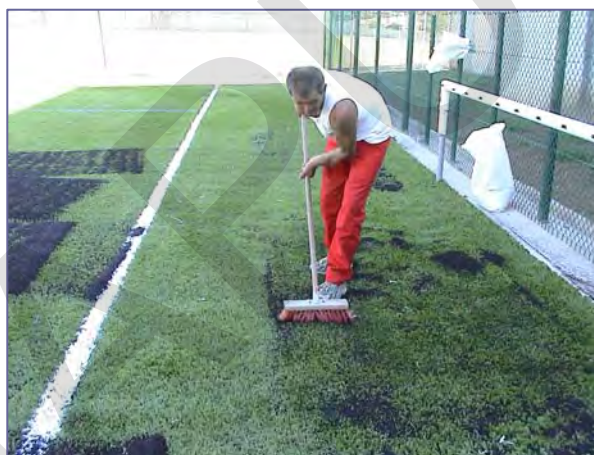


Figure 3 : Mise en place d'une bande de gazon en fibres synthétiques en recouvrement du système lysimétrique.

Après installation complète du gazon synthétique et des matériaux de remplissage (sable et granulats de pneus usagés), le lysimètre est à peine décelable sous le sol sportif (Figure 4).

Figure 4 : Remplissage manuel du gazon synthétique situé au-dessus du lysimètre avec des granulats de pneus usagés.



La récupération des eaux s'effectue au moyen d'un tuyau, fixé à un raccord d'orifice situé en position basse du lysimètre, qui traverse le gazon synthétique et qui est ensuite raccordé à une pompe. Pour effectuer le prélèvement, le tuyau est tiré vers l'extérieur puis après récupération des eaux, il est obturé par un bouchon et refoulé sous le gazon jusqu'à ce que le bouchon soit dissimulé à l'intérieur des granulats (Figure 5).

Figure 5 : Système de récupération des percolats collectés dans le lysimètre situé sous le gazon synthétique au moyen d'un tuyau traversant le gazon synthétique et raccordé à une pompe de prélèvement.



La période de suivi est de **11 mois**.

II.3.2. - Expérimentation en scénarios pilote

Les pilotes expérimentaux confectionnés sont constitués de bacs rectangulaires en aluminium de 2,5 m de longueur et de 1 m de largeur. Le fond et les parois sont étanchés à l'aide d'une géomembrane. Les bacs sont surélevés pour faciliter la récolte des percolats et leur fond présente une légère inclinaison vers un point bas où se situe l'orifice d'évacuation et de récupération des percolats (Figure 6). Le sol support du gazon synthétique est constitué par un lit de sable de quelques centimètres d'épaisseur qui remplit la fonction de drain pour les percolats, conformément à ce qui se passe sur les terrains « outdoor ».

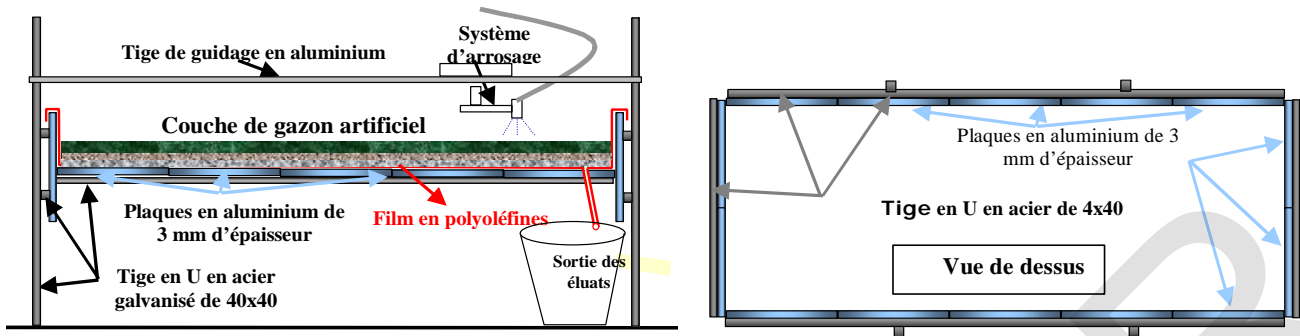


Figure 6 : Vues en coupe et de dessus du schéma de montage des pilotes sur la plate-forme expérimentale EEDEMS

Le mini terrain en gazon synthétique est réalisé avec 2 bandes de fibres de couleur verte séparées par une bande de fibres de couleur blanche (lignes de traçage du terrain), le tout collé à l'aide d'une colle polyuréthane sur la bande de jonction dévolue à cet effet. Tous les matériaux correspondent à ceux utilisés sur le terrain de football (fibres, granulats de diverses natures, colle) et nous ont été fournis par la société FIELDTURF TARKETT.

La mise en place du système d'arrosage destiné à reproduire la pluviométrie consiste en une double rampe comportant 8 buses de dispersion. La rampe d'arrosage alimentée en eau potable effectue un mouvement de va et vient toutes les heures, 4 buses arrosent lors de l'aller et les 4 autres arrosent lors du retour, le but étant bien sûr de répartir au mieux l'eau d'arrosage. Les temps de cycle et les durées d'injection sont gérés par un automate programmable. La quantité d'eau d'arrosage sur l'ensemble de la durée d'expérimentation a été calée par rapport à la pluviométrie annuelle moyenne en région lyonnaise, soit 800 mm par an (pour ex. Paris : 641 mm ; Vienne : 684 mm, Bruxelles : 833 mm, Budapest 596 mm, Rome : 828 mm, Londres : 599 mm, Berlin : 583 mm¹¹).

Quatre pilotes (avec des granulats d'ETP, d'EPDM vierge et issus de PUNR et sans matériaux de remplissage) ont été réalisés (Figure 7) dans une configuration comparable à celle que l'on rencontre sur le site expérimental du terrain de football.

Comme pour le stade de football, la période de suivi analytique est de **11 mois**.

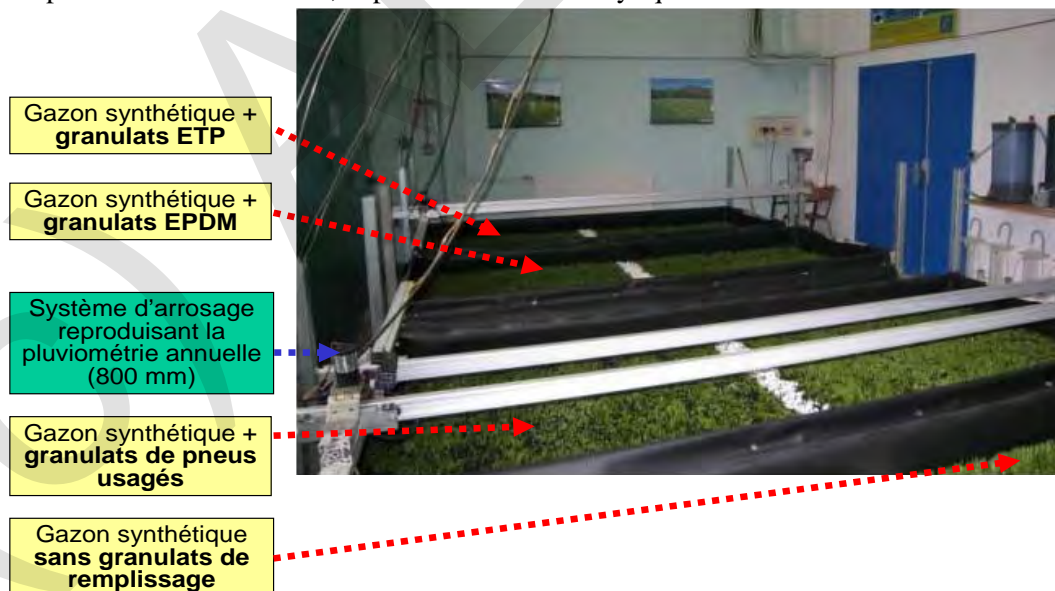


Figure 7 : Vue des 4 pilotes expérimentaux implantés sur la plate-forme EEDEMS

¹¹ <http://www.meteo.fr/temps/monde/climats/3-2.htm>

II.4. - Approches analytiques pour une évaluation de l'impact environnemental

II.4.1. - Modes d'échantillonnage

Sur les quatre pilotes, les percolats sont récoltés toutes les semaines, stabilisés et stockés en chambre froide. Les solutions analysées sont reconstituées au *pro rata* des volumes hebdomadaires récoltés en fonction du volume nécessaire aux analyses et de la période visée. Le planning analytique est le suivant : 7 solutions analysées après 15 jours, 1, 2, 3, 6, 9 et 11 mois d'arrosage.

Sur le terrain de football, le même nombre d'échantillons a été analysé sur la période de 11 mois mais, tributaire des conditions météorologiques, le planning analytique a été établi de manière à disposer d'un volume représentatif de périodes intégrant des épisodes pluvieux de plus grande intensité d'octobre 2005 à octobre 2006.

II.4.2. - Types d'analyses réalisées et référentiels

L'évaluation de l'impact environnemental de la qualité des eaux de percolation est abordée au travers d'analyses physico-chimiques et écotoxicologiques.

Les éléments et substances chimiques recherchés sont ceux entrant dans la composition des matériaux de remplissage, et plus particulièrement ceux des pneumatiques usagés. Cette orientation de l'étude a été donnée au regard de la polémique de ces dernières années, elle aurait pu aussi être orientée sur les substances à risque entrant dans la composition des autres types de granulats. La liste exhaustive comporte 42 paramètres physico-chimiques : cyanures totaux, indice phénol, hydrocarbures totaux (HCT), 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), carbone organique total (COT), Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn, fluorures, nitrates, ammonium, chlorures et sulfates, pH et conductivité.

Afin d'évaluer les enrichissements éventuels des percolats, l'eau de pluie et l'eau du réseau d'alimentation en eau potable des pilotes ont été également caractérisées d'un point de vue physico-chimique.

L'évaluation de l'impact est déterminée en confrontant les concentrations obtenues dans les percolats à différentes valeurs guides françaises et européennes actuellement en vigueur (normes de rejets ICPE¹², critères d'acceptabilité en Décharges de Déchets Inertes¹³, normes relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine¹⁴). Ces 3 référentiels ont été retenus car les exutoires des percolats sont le milieu naturel via les infiltrations dans le sol et les rejets dans l'environnement via les réseaux urbains. Ils ont également été choisis pour disposer *a minima* d'au moins une valeur guide de référence pour chacun des paramètres physico-chimiques. Précisons que le choix du Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 est néanmoins pénalisant pour notre étude dans la mesure où les percolats seraient considérés comme une réserve d'eau potabilisable et ce sans tenir compte des phénomènes d'atténuation naturelle des polluants dans le sol ou de dilution dans les réseaux de collecte des eaux (usées et pluviales).

La caractérisation écotoxicologique des percolats est abordée au moyen d'un essai normalisé de détermination de la toxicité aiguë (essai d'inhibition de la mobilité de *Daphnia magna*¹⁵) et d'un essai normalisé d'évaluation de la toxicité chronique (essai d'inhibition de la croissance des algues d'eau douce avec *Pseudokirchneriella subcapitata*¹⁶).

Les essais écotoxicologiques sont des compléments indispensables aux analyses physico-chimiques et à leur interprétation. En mettant des êtres vivants en contact, soit avec des matériaux testés, soit avec des eaux en contact avec les matériaux (lixiviats, percolats, ...), et en observant les effets produits, il devient possible de donner un avis argumenté sur l'impact potentiel du matériau sur l'environnement.

¹² Arrêté Rejets ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) du 02/02/98 (art. 32)

¹³ Décision du conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE

¹⁴ Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 et Annexe 13-1 du Code de la Santé Publique (valeurs guides et valeurs impératives pour le classement des eaux superficielles destinées à la production d'eau d'alimentation).

¹⁵ Référence normative : NF EN ISO 6341, mai 1996 (T90-301)

¹⁶ Référence normative : NF EN ISO 28692, mai 1993

En effet, l'évaluation écotoxicologique permet de mettre en évidence d'éventuels impacts dus à des éléments ou des substances non recherchés dans les analyses chimiques, ou à l'état de traces à des concentrations inférieures aux seuils de détection mais pouvant présenter des impacts par synergie (supérieurs aux simples effets cumulatifs).

A *contrario*, ces essais normalisés sont des moyens d'apprécier les conditions dans lesquelles il n'y a pas de risque écotoxique encouru, à court comme à plus long terme.

II.5. - Résultats et commentaires

II.5.1. - Résultats sur les volumes recueillis

Au cours des 11 mois d'expérimentation, le volume moyen de percolats recueillis sur chacun des 4 pilotes expérimentaux est d'environ 580 litres d'eau par m². Le volume d'eau d'arrosage pour chacun des 4 pilotes étant de l'ordre de 800 l/m²/15kg de granulats, il s'avère qu'environ 27 à 30% de ce volume s'évapore naturellement dans l'atmosphère.

Sur le terrain de football, les volumes de percolats recueillis pendant la durée de l'expérimentation sont faibles en comparaison des données pluviométriques locales. En effet, le volume total recueilli dans le lysimètre est de 86 litres de précipitations au m² alors que le cumul des précipitations enregistrées en 2006 par la station météorologique située à proximité est de 750 mm soit 750 litres d'eau par m². Au cours des 11 mois d'expérimentation *in situ*, en considérant un taux d'évaporation équivalent à celui des 4 pilotes, le volume d'eau de pluie ayant percolé au travers de 15 kg de granulats de pneumatiques usagés est estimé entre 525 et 550 litres d'eau par m².

Le volume total de percolats recueillis *in situ* ne représente donc qu'environ 12% du volume des précipitations. Ce constat peut s'expliquer par :

- L'évaporation dans l'atmosphère d'une partie de l'eau de pluie lors des épisodes pluvieux de faible intensité, la charge hydraulique étant trop faible pour permettre une infiltration ;
- L'écoulement préférentiel des eaux vers les exutoires périphériques du fait d'un taux de perforation calculé de la natte support des fibres synthétiques et des pentes de 1% mises en oeuvre pour la réalisation du sol support, paramètres assurant un bon drainage du terrain.

A partir de ces résultats, il est possible d'estimer les volumes de percolats d'une part infiltrés dans le sol sous un terrain de grande dimension en gazon synthétique et d'autre part orientés vers le système drainant périphérique. L'estimation montre que pour une superficie de 8 000 m², le volume de percolats qui s'infiltrent dans le sol support se révèle inférieur à 2 m³ par jour et le volume de percolats orientés vers le système drainant périphérique est inférieur à 11 m³ par jour (cf. Tableau 1).

		Flux en m ³ /m ² /an				
		Précipitations ou arrosage (1)	Evaporation (2)	Percolats traversant le gazon synthétique (3) = (1)-(2)	Percolats orientés vers le système drainant (4)	Percolats infiltrés dans le sol support (5)=(3)-(4)
Résultats des expérimentations pour 1 m ²	Pilotes instrumentés	0,800	0,225	0,575	0	0,575
	Lysimètre in-situ	0,750	0,225	0,525	0,050	0,085
Estimations pour un stade de 8 000 m ²	Stade	6 000	1 800	4 200	400	680

Tableau 1 : Estimation des flux de percolats s'infiltrant dans le sol ou orientés vers le réseau drainant périphérique et le plus souvent dirigés vers les réseaux de collecte d'eaux usées

II.5.2. - Résultats et synthèse sur la physico-chimie des percolats recueillis

Les valeurs de pH et de conductivité enregistrées sur les percolats des 4 pilotes (7,3 et 8,5 ; 323 et 637 µS/cm) sont généralement supérieures à celles enregistrées sur le terrain de football (7,1 et 7,85 ; 72 et 384 µS/cm) mais restent sans conséquences environnementales. Ce constat s'explique par la légère différence de composition chimique entre les eaux de pluie d'une part et celle des eaux d'alimentation en eau potable pour les pilotes d'autre part.

Au cours du temps et quel que soit le type de matériau de remplissage, les concentrations en cyanures, phénols et hydrocarbures totaux sont très faibles, le plus souvent inférieures aux limites de détection analytique (concentrations en cyanures inférieures à 60 µg/l, concentrations en phénols inférieures à 20 µg/l et concentrations en hydrocarbures totaux inférieures à 50 µg/l).

De même, la somme des concentrations des 6 HAP¹⁷ (Figure 8) se révèle très inférieure à la valeur guide du Décret n° 2001-1220 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine (1 µg/l).

Légende des graphiques :

P1 à P7 = N° des échantillons analysés sur 11 mois

Témoïn : pilote gazon synthétique sans granulats

PUNR : pilote gazon synthétique + granulats pneus usagés

EPDM : pilote gazon synthétique + granulats EPDM

ETP : pilote gazon synthétique + granulats ETP

In situ : lysimètre implanté sur le terrain de football (gazon synthétique + granulats pneus usagés)

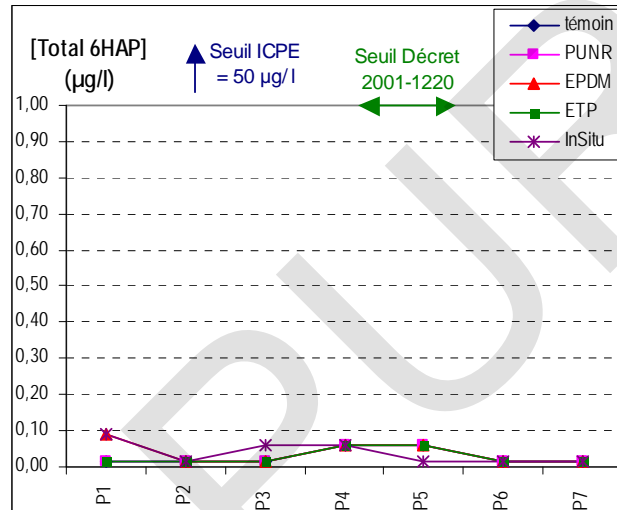


Figure 8 : Evolution des concentrations des 6 HAP au cours du temps dans les 5 expérimentations par rapport aux valeurs guides de référence

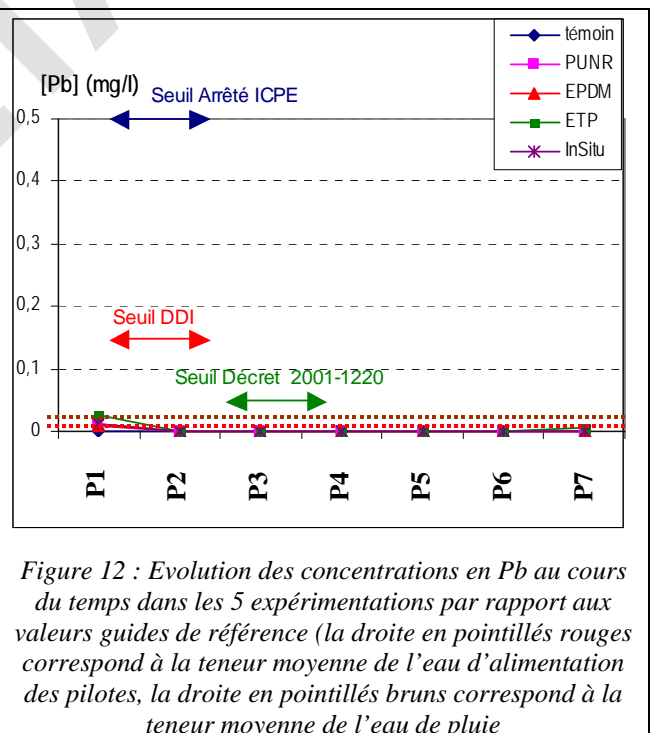
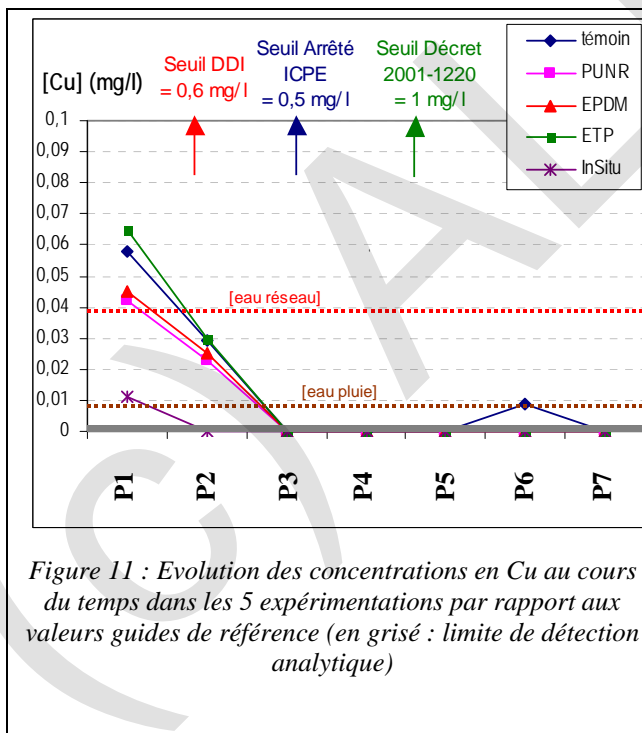
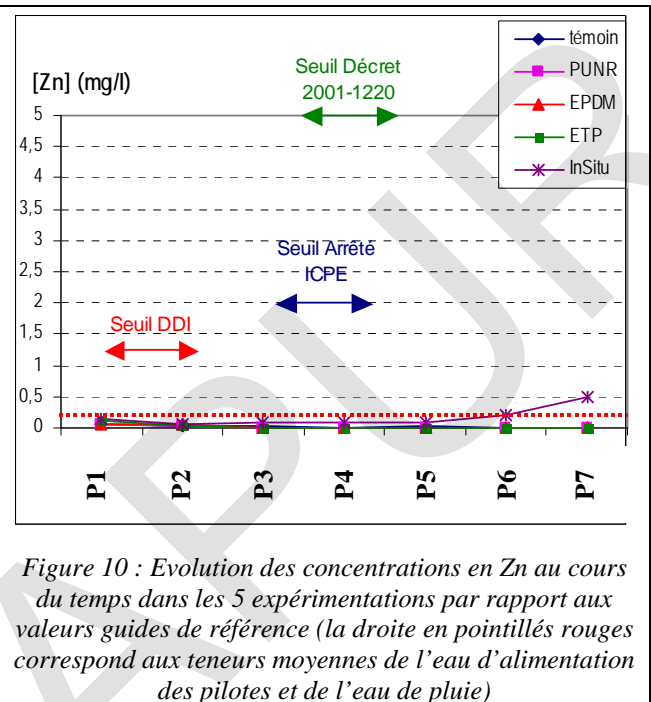
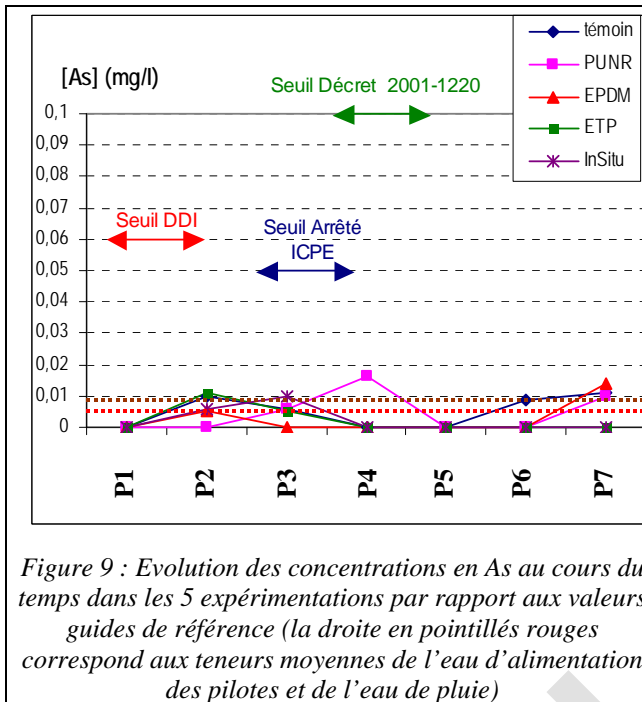
Dans leur ensemble, les composés organiques présentent des cinétiques de relargage qui évoluent globalement de façon comparable au cours du temps sur l'ensemble des 5 expérimentations et dans des gammes de concentrations très voisines et inférieures aux valeurs guides prises en référence.

Les métaux Sn, As, Mo et Sb présentent de légères fluctuations de concentrations au cours du temps mais toujours à des concentrations faibles et en dessous des valeurs guides de référence (ex. Figure 9).

Les métaux Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn et Zn montrent dans toutes les expérimentations une baisse des concentrations au cours du temps, avec un maximum au niveau des deux premiers échantillons c'est à dire sur le premier mois (ex. : Figure 10, Figure 11, Figure 12). Les concentrations, déjà très faibles à l'origine, continuent à chuter pour atteindre des valeurs proches de celles des eaux naturelles (eau de pluie et eau d'arrosage des pilotes), en dessous des valeurs guides de référence et parfois même en dessous des limites de détection analytique, montrant ainsi que l'essentiel du relargage en substances potentiellement polluantes s'effectue dans le 1er mois après la mise en œuvre des granulats dans le gazon synthétique.

Si le Sélénium peut pour sa part présenter, au cours du temps, des concentrations supérieures à celles des valeurs guides du décret n°2001-1220 du 20/12/2001, pour le pilote témoin de référence et quel que soit le type de granulats de remplissage, ces concentrations sont toujours inférieures à la valeur limite de la Directive Décharge Déchets Inertes qui permet d'évaluer les impacts d'un terme source sur les eaux souterraines. De ce fait, les taux de relargage en Sélénium sont considérés comme étant sans impact sur la ressource en eau.

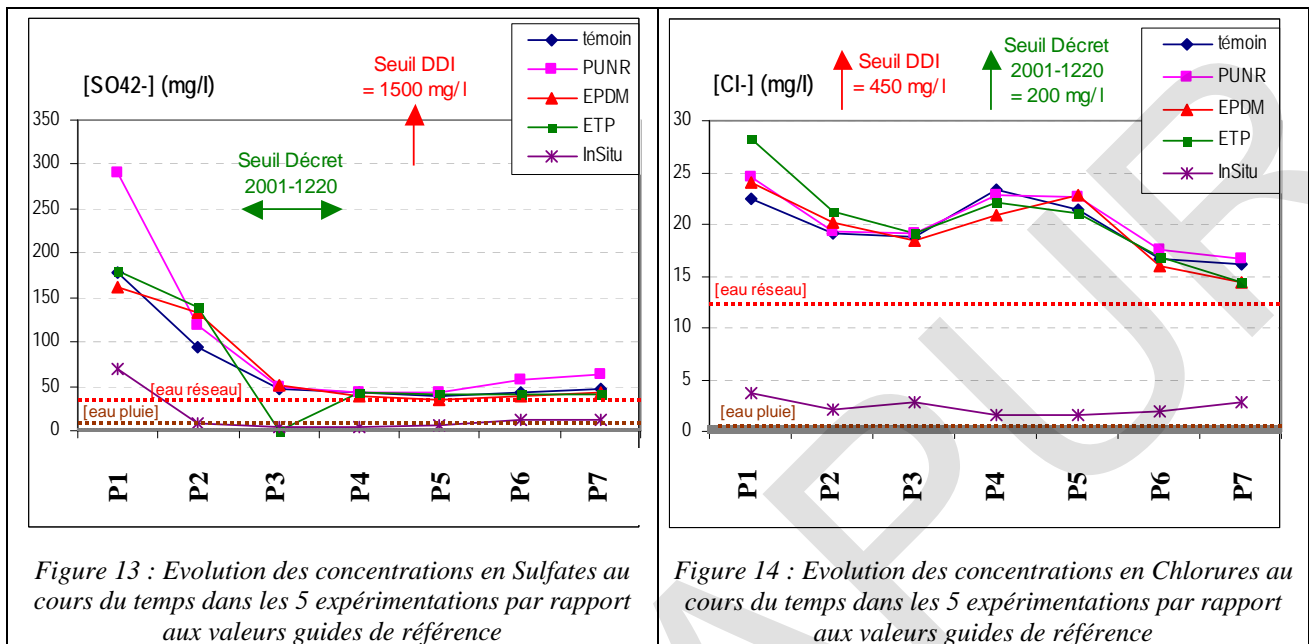
¹⁷ Les 6 HAP visés par le Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 : Benzo(k)fluoranthène, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Indeno(1,2,3-cd) pyrène, Benzo(g,h,i)pérylène.



Concernant les anions, malgré une valeur pour les sulfates très légèrement supérieure à la valeur guide de référence (Décret n° 2001-1220 du 20/12/2001) en début d'expérimentation sur le pilote contenant

les granulats de pneus usagés (1^{er} prélèvement), les résultats acquis montrent de faibles concentrations dans les percolats sur les 4 pilotes mais surtout *in situ* (ex. Figure 13 et Figure 14).

Il en est de même pour NH_4^+ sur le premier mois d'expérimentation en pilotes.



II.5.3. - Conclusions

L'ensemble des résultats obtenus sur les percolats des 3 pilotes renfermant les granulats conduit à observer une cinétique de relargage comparable au cours du temps, aucun des 3 granulats ne se distinguant des autres, le pilote n°1 en gazon synthétique seul pris comme témoin affichant lui-même des taux de relargage assez proches de ceux des 3 pilotes renfermant les différents granulats. Les concentrations enregistrées sont faibles pour la plupart des composés et éléments recherchés. Certains éléments présentent des concentrations un peu plus fortes en début d'expérimentation, celles-ci chutent très rapidement, témoignant ainsi d'un effet d'atténuation très rapide des taux de relargage.

In situ sur le terrain de football, on observe des concentrations et une cinétique de relargage assez comparables. Il est intéressant de noter que des éléments tels les chlorures, les fluorures et les sulfates sont en concentrations plus faibles que dans les percolats recueillis sur les pilotes, ce constat étant mis en relation avec une différence de composition chimique des eaux qui percolent au travers du sol sportif (eau de pluie sur le site et eau du réseau d'alimentation en eau potable pour les 4 pilotes).

Cette approche analytique en scénarios pilote comme *in situ*, basée sur un comparatif avec des valeurs guides françaises et européennes, actuellement en vigueur, montre que les concentrations en composés organiques, métaux et anions des percolats sont compatibles avec les exigences de qualité de la ressource en eau.

II.5.4. - Résultats et synthèse de l'étude écotoxicologique

Pour le terrain de football (Tableau 2), les essais réalisés sur les prélèvements (après 3 ; 3,5 ; 6 et 7,5 mois) n'ont pas montré de toxicité pour les daphnies comme pour les algues, excepté pour ces dernières dans le dernier prélèvement à 7,5 mois. La CE50¹⁸ est dans ce cas tout juste atteinte (impact faible), ce qui au regard des résultats des analyses chimiques et des résultats de ces mêmes tests sur les percolats des pilotes semble être un artefact lié à l'environnement immédiat du terrain (pollutions extérieures).

Lysimètre sur le terrain de football		To+3 mois	T+3,5 mois	T+6 mois	T+7,5mois
Date de prélèvement		2-janv.-06	19-janv.-06	4-avr.-06	30-mai-06
<i>Daphnia magna</i>	CE50 24h (UT)	< 1	< 1	<1	<1
<i>P. subcapitata</i>	CE50 72h (UT)	non réalisé vol.	<1,2	<1,2	1,4
	inhibition à 80%	insuffisant	7,5%	1,6%	57,5%

Tableau 2 : Résultats des essais écotoxicologiques sur les percolats recueillis dans le lysimètre implanté sur le terrain de football (Note : UT = 100 / CE50)

En effet, les résultats des analyses physico-chimiques des percolats, issus des 4 pilotes sur la plateforme EEDEMS et recueillis 15 jours après leur mise en route, montrent que ces percolats sont les plus chargés. Cependant, les essais écotoxicologiques réalisés sur ces mêmes percolats montrent une très faible toxicité tant vis-à-vis des daphnies que des algues. Pour ces deux organismes, la CE50 n'est jamais atteinte. Par la suite, aucun des prélèvements (après 3 et 8 mois) n'a montré de toxicité pour ces deux organismes (Tableau 3).

		Pilotes			
Prélèvement du 15-nov-05		Témoin T+15j	Pneus usagés T+15j	EPDM T+15j	ETP T+15j
<i>Daphnia magna</i>	CE50 24h (UT)	<1	<1	<1	<1
	inhibition à 90%	25%	15%	30%	0%
<i>P. subcapitata</i>	CE50 72h (UT)	< 1,2	<1,2	<1,2	<1,2
	inhibition à 80%	10,3%	15,0%	33,3%	14,9%
Prélèvement du 30-janv-06		Témoin T+3 mois	Pneus usagés T+3 mois	EPDM T+3 mois	ETP T+3 mois
<i>Daphnia magna</i>	CE50 24h (UT)	<1	<1	<1	<1
	inhibition à 90%	0%	0%	0%	0%
<i>P. subcapitata</i>	CE50 72h (UT)	< 1,2	<1,2	<1,2	<1,2
	inhibition à 80%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Prélèvement du 15-05-06		Témoin T+ 8 mois	Pneus usagés T+ 8 mois	EPDM T+ 8 mois	ETP T+ 8 mois
<i>Daphnia magna</i>	CE50 24h (UT)	<1	<1	<1	<1
	inhibition à 90%	0%	5%	0%	0%
<i>P. subcapitata</i>	CE50 72h (UT)	< 1,2	<1,2	<1,2	<1,2
	inhibition à 80%	0,4%	0,0%	1,0%	0,0%

Tableau 3 : Résultats des essais écotoxicologiques sur les percolats recueillis sur les 4 pilotes implantés sur la plate-forme EEDEMS (Note : UT = 100 / CE50)

¹⁸ La CE50 est la concentration efficace en percolats qui provoque l'immobilisation de 50 % d'un lot de daphnies soumis au test pendant une période d'exposition de 24 heures.

La CE50 est la concentration efficace en percolats qui provoque 50 % d'inhibition de la croissance d'une population d'algues par rapport à un témoin sans percolats après une période d'exposition de 72 heures.

La mise en scénarios pilote dans une salle à l'atmosphère contrôlée et aux interventions humaines maîtrisées permet donc de s'affranchir des aléas extérieurs inhérents à un terrain de football en extérieur (pollution d'origines diverses : désherbage dans le voisinage, urine, ...) susceptibles d'avoir une répercussion même très faible sur la qualité des percolats vis à vis de certains organismes.

II.5.5. - Conclusions

D'un point de vue écotoxicologique, la nature des percolats ayant traversé un gazon synthétique de 3^{ème} génération se révèle sans impact sur l'environnement quelque soit le type de granulats de remplissage.

III. Evaluation des risques sanitaires liés aux émissions gazeuses

III.1. - **Caractérisation des émissions en COV et formaldéhyde par les sols sportifs en gazon synthétique**

La caractérisation et la mesure des émissions en composés organiques volatils (COV) et aldéhydes (dont formaldéhyde) par les sols sportifs considérés lors de l'étude de l'évaluation de l'impact environnemental (§ précédents) a été réalisée par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB¹⁹), à l'aide des méthodes de chambres d'essai d'émission utilisées pour la caractérisation des émissions chimiques dans l'air intérieur des produits de construction.

III.1.1. - Matériaux utilisés

Comme pour les expérimentations relatives à l'évaluation environnementale, les différents matériaux testés sont : un gazon synthétique à fibres synthétiques vertes incluant une bande à fibres synthétiques blanches ; de la colle polyuréthane ; du sable ; les granulats d'élastomères de 3 natures différentes.

Les proportions des différents constituants (conservés en sacs étanches jusqu'à l'expérimentation) sont toujours de 17,5 kg de sable lest et 15 kg de granulats par m², soit pour des éprouvettes de 0,15 m² : 2,625 kg de sable et 2,25 kg de granulats.

III.1.2. - Méthodologie

Chaque éprouvette d'essai est préparée en installant le gazon synthétique dans une boîte en inox (Figure 15), en rajoutant une épaisseur d'environ 1 cm de sable (Figure 2) puis environ 4-5 cm de granulats d'élastomères. L'éprouvette d'essai ainsi préparée est alors introduite dans la chambre d'essai d'émission.

Pour les 4 essais, réalisés à $23 \pm 2^\circ\text{C}$, les éprouvettes ont été préparées dans des bacs en acier inox d'une dimension de 0,78 m x 0,19 m. La surface d'émission effective de ces éprouvettes d'essai est de 0,15 m².

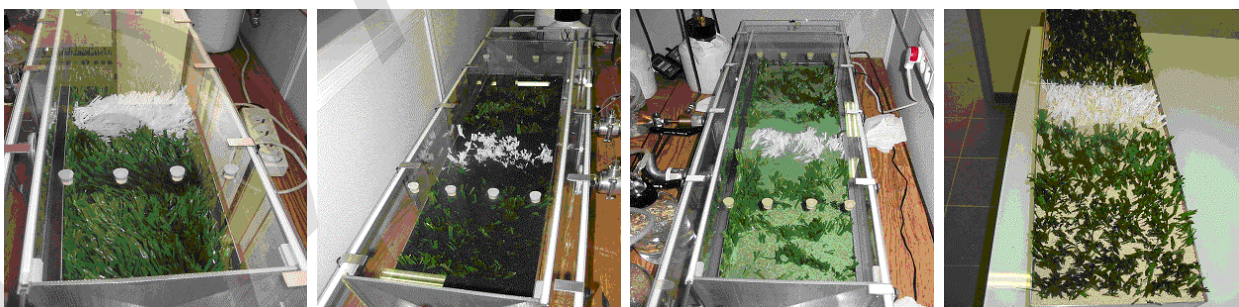


Figure 15 : Eprouvettes d'essais. De gauche à droite : gazon synthétique seul ; gazon synthétique avec sable lest et granulats de pneus usagés ; gazon synthétique avec sable lest et granulats d'EPDM ; gazon synthétique avec sable lest et granulats d'ETP

¹⁹Centre scientifique et technique du bâtiment : Etablissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministre du Logement, Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction

III.1.3. - Conditions analytiques

Chacune des éprouvettes d'essai préparées a été introduite en chambre d'essai d'émission dans des conditions maîtrisées de température (23 ± 2 °C) et d'humidité relative (50 ± 5 %), selon les recommandations du projet de norme pris en référence : prEN ISO 16000-9 : *Indoor air – Part 9 : Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – Emission test chamber method* (ISO, 2005).

Les 5 essais ont été réalisés selon un scénario d'émission dit « sol » (taux de ventilation spécifique : $q = 1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). Les prélèvements des COV et aldéhydes par pompage sur support adsorbant spécifiques ont été réalisés en duplicat avant le début de l'essai (J0) puis après 24 ± 2 heures (J1), 72 ± 2 heures (J3) et 28 ± 2 jours (J28) de conditionnement de l'éprouvette en chambre d'émission.

Les prélèvements et analyses des COV ont été réalisés selon les recommandations de la norme NF ISO 16000-6 : *Air intérieur – Partie 6 : Dosage des composés organiques volatils dans l'air intérieur des locaux et enceintes d'essai par échantillonnage actif sur le sorbant Tenax TA, désorption thermique et chromatographie en phase gazeuse utilisant MS/FID* (AFNOR, 2005).

Les prélèvements et analyses des aldéhydes ont été réalisés selon les recommandations de la norme NF ISO 16000-3 : *Air intérieur – Partie 3 : Dosage du formaldéhyde et d'autres composés carbonyles – Méthode par échantillonnage actif* (AFNOR, 2002).

III.1.4. - Résultats

Les expérimentations menées à l'aide de chambres d'émission utilisées pour la caractérisation des émissions chimiques dans l'air intérieur des produits de construction ont permis d'identifier 112 substances (cf. tableau 4 en annexe).

La cinétique d'émission représentée par la Figure 16 montre que la concentration en COV Totaux (TVOC) décroît très rapidement dans les 4 échantillons. La chute est importante entre J1 et J3. Entre J3 et J28, la courbe présente une pente plus faible et en fin d'essai à J28, les éprouvettes contenant les granulats de pneus usagés et d'ETP présentent des concentrations comparables, légèrement supérieures à celle du gazon seul, alors que celles de l'éprouvette avec les granulats d'EPDM sont encore relativement élevées.

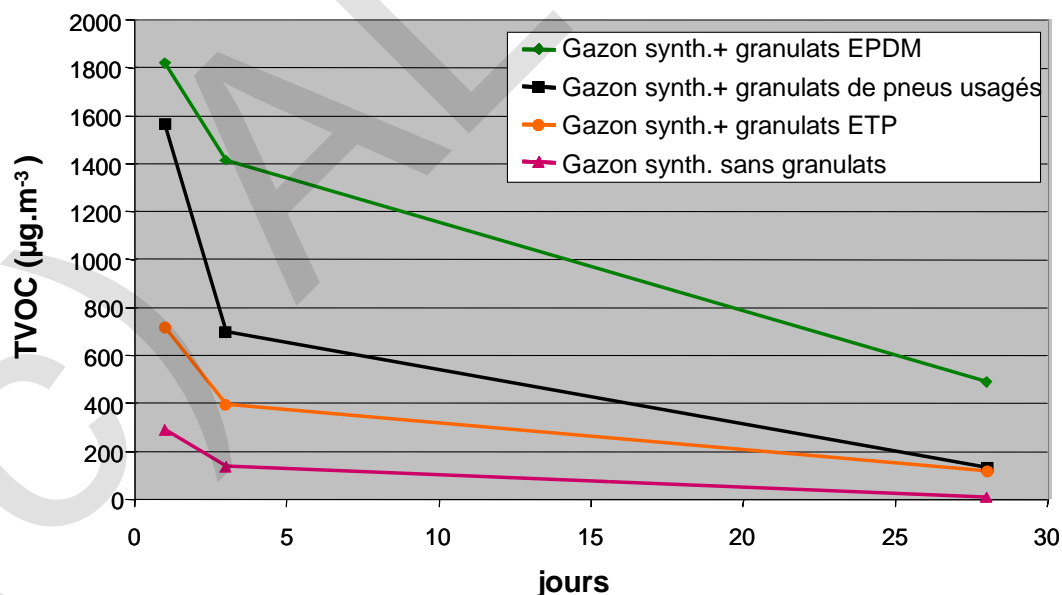


Figure 16 : Comparaison des concentrations en COV Totaux émis entre J1 et J28 par les 4 éprouvettes

Les concentrations en COV et aldéhydes obtenues correspondent à la moyenne arithmétique des 2 échantillons prélevés et analysés, corrigées de la valeur du blanc de chambre mesurée à J0. Ces concentrations sont les concentrations d'exposition pour le produit testé dans son scénario d'émission.

L'approche adoptée permet une comparaison directe des émissions de COV et de formaldéhydes des différents revêtements de sol sportifs à base de granulats d'élastomères, dans des conditions maîtrisées de température, d'humidité relative et de renouvellement d'air.

Les résultats des essais ont été également exprimés sous la forme de facteur d'émission spécifiques (SER_a en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), calculés selon la formule suivante (d'après prEN ISO 16000-9) : $SER_a = C \cdot q$

Où C représente la concentration individuelle en COV (ou en TVOC) au temps t (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) et q le taux de ventilation spécifique de l'essai ($q = 1,25 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ pour le scénario « sol »).

III.1.5. - Conclusions

Les émissions de COV et de formaldéhydes par des revêtements de sol sportifs à base de granulats d'élastomères ont été caractérisées à l'aide des normes en vigueur pour la caractérisation des émissions dans l'air intérieur des produits de construction (prEN ISO 16000-9, NF ISO 16000-6 et NF ISO 16000-3) et ont permis de mettre en évidence l'émission de 112 substances. Il en ressort que :

- 1 - Les émissions du gazon synthétique seul sont très faibles (TVOC = $8,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à 28 jours) par rapport à celle d'autres produits de construction (ex : parquet);
- 2 - Les émissions du gazon synthétique comportant les granulats de pneus usagés sont relativement faibles (TVOC = $134 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à 28 jours).
- 3 - Les émissions du gazon synthétique comportant les granulats d'ETP sont également relativement faibles (TVOC = $118 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à 28 jours). Les composés identifiés à l'émission sont globalement comparables à ceux identifiés dans les émissions des granulats de pneus usagés.
- 4 - Les émissions du gazon synthétique comportant les granulats d'EPDM sont plus importantes (TVOC = $490 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à 28 jours).

III.2. - **Etude de l'Evaluation des Risques Sanitaires (ERS)**

Une ERS a été réalisée par l'INERIS²⁰, afin d'évaluer plus précisément en situation « indoor » les risques sanitaires liés à l'inhalation des substances identifiées (112 substances) selon le protocole de référence mis en œuvre par le CSTB (cf. § précédent).

Cette évaluation et ses conclusions ne concernent que l'inhalation des COV et aldéhydes dont les émissions ont été quantifiées par le CSTB. Les éventuels risques sanitaires associés aux émissions d'autres substances en situation normale ou en raison du vieillissement ou de la dégradation accidentelle des sols n'ont pas été évalués.

Ce type d'étude répond à une forte demande actuelle d'amélioration de la connaissance des émissions de substances chimiques par les matériaux de construction et de caractérisation des impacts sanitaires et environnementaux associés. A l'échelle européenne, dans le cadre de la Directive européenne « Produits de construction » (89/106/EEC), l'exigence essentielle N°3 « Hygiène, santé et environnement » appelle à la caractérisation des émissions de substances gazeuses, particulaires ou radioactives des produits mis sur le marché communautaire. Du fait du manque de méthodes harmonisées au niveau européen permettant l'évaluation de ces caractéristiques, cette exigence est actuellement peu prise en compte. Des travaux en vue de l'harmonisation de ces méthodes ont démarré en 2003 sous l'égide de la Commission européenne. Un inventaire des dispositifs nationaux pour la détermination des émissions des matériaux dans l'air intérieur a été réalisé et publié en décembre 2005 [UE, 2005]. Le protocole mis en œuvre pour la caractérisation des émissions gazeuses (§ précédent) et sur les résultats duquel cette évaluation des risques sanitaires s'appuie, appartient à la liste des protocoles de référence.

En France, le Plan National Santé Environnement (PNSE) promulgué en juin 2004 par les ministères de la santé, de l'écologie, du travail et de la recherche, fixe 45 actions, dont 12 prioritaires. Parmi ces dernières, l'action 15 vise à « mettre en place un étiquetage des caractéristiques sanitaires et environnementales des matériaux de construction ». L'objectif fixé par le PNSE est un taux

²⁰ Institut National de l'environnement industriel et des risques : Établissement Public à caractère Industriel et Commercial placé sous la tutelle du ministère de l'Ecologie et du Développement durable

d'étiquetage de 50 % à atteindre d'ici 2010. La présente évaluation des risques sanitaires et l'étude de caractérisation des émissions sur laquelle elle s'appuie, s'inscrivent donc dans un cadre répondant pleinement aux enjeux sanitaires actuels.

L'évaluation des risques sanitaires correspond à une démarche scientifique rigoureuse proposée dans les années 80 par le National Research Council américain. En Europe, elle constitue l'outil de référence pour les évaluations de risques sanitaires et environnementaux des substances chimiques. Formalisée dans des guides méthodologiques (*Technical Guidance Document* de la Commission européenne, guide INERIS pour les installations classées [INERIS, 2003-a], par ex.), elle se déroule selon les étapes suivantes : 1) inventaire des substances ; 2) identification du danger et recherche des relations dose-réponse ; 3) évaluation des expositions puis quantification des risques sanitaires.

III.2.1. - Scénarii d'exposition

Les sols sportifs en gazon synthétique étudiés sont quasi exclusivement utilisés en extérieur. Néanmoins, quelques utilisations peuvent être rencontrées dans des gymnases fermés, plutôt de grande taille. Les niveaux d'exposition des personnes (sportifs et spectateurs) sont alors plus élevés en l'absence de dispersion atmosphérique permise par le vent et de dégradation photochimique des composés émis, phénomènes se produisant *a contrario* en extérieur.

Les résultats du « Recensement des Équipements Sportifs » français (RES), construits avant le 31 décembre 2005, sont disponibles depuis juillet 2006. Il confirme le caractère très hétérogène des dimensions de ces infrastructures. En conséquence, dans la présente étude, il est impossible de se baser sur des types de gymnases représentatifs de la réalité française.

En vertu du principe de prudence (ces situations d'exposition étant rares, mais tout de même susceptibles d'avoir lieu), la présente évaluation des risques sanitaires est limitée à une situation défavorable en terme d'exposition, à savoir une **utilisation en intérieur**, dans des gymnases fermés. Elle s'inscrit bien dans un contexte de premier niveau d'approche de l'ERS où les situations les plus extrêmes sont envisagées (scénario « *worst case* »).

L'évaluation des expositions en extérieur apparaît par ailleurs plus complexe. Des modèles d'étude de la dispersion atmosphérique de composés gazeux ou particuliers émis par une surface existent, mais ils permettent seulement la modélisation des concentrations dans l'air dans un rayon de 100 m à 10 km autour de la surface émettrice. Leur mise en œuvre dans le présent contexte ne permettrait pas d'évaluer l'exposition des personnes qui s'entraînent sur la surface sportive. Ceci constitue un élément supplémentaire ayant motivé la conduite d'une étude en scénario « *indoor* ». Les conclusions de l'étude, propres à cette utilisation en scénario « *indoor* », seront mises en perspective d'une utilisation courante sur des surfaces sportives extérieures (« *outdoor* »).

Pour des raisons de faisabilité et en vertu du principe de prudence en premier niveau d'approche de l'ERS, une situation défavorable d'exposition dans un gymnase a été retenue, plutôt qu'une exposition sur une surface sportive en plein air. Le choix a donc été fait de se placer en situation majorante en considérant un gymnase de la plus petite taille possible (les substances émises seront ainsi moins diluées dans le volume d'air). Parmi les différentes catégories de l'inventaire INSEE de 1988, les plus petits gymnases (catégorie A) ont une surface de 230 m². Par ailleurs, le Ministère de la jeunesse et des sports français a fixé des hauteurs libres minimales au-dessus du sol : la plus petite hauteur est de 7 m. Par ailleurs, deux structures « *indoor* », construites en 2006 (source : FIELDTURF TARKETT) avec des gazons synthétiques de 3^{ème} génération, ont une superficie de 2 500 m², dont 1 800 m² recouverts de sols synthétiques avec une hauteur moyenne sous plafond de 8 m. Dans la mesure où une étude conduite dans 13 gymnases parisiens fait apparaître une salle d'une hauteur de 6 m (le plus petit gymnase ayant un volume de 3 600 m³), on retient cette valeur comme la plus petite hauteur possible.

Le gymnase type retenu dans la présente étude a donc une surface de 230 m² et une hauteur de 6 m, soit un volume de 1 380 m³. Le taux de renouvellement d'air retenu est de 0,5 vol.h¹.

Le choix a aussi été fait de considérer l'ensemble des substances pour lesquelles des données d'émission sont disponibles et de n'en exclure aucune *a priori*. Seuls les risques sanitaires chimiques

sont pris en considération, les risques biologiques, physiques ou radiologiques sont non concernés dans le présent contexte.

Les facteurs d'émission, déterminés par l'étude de caractérisation au § III.1.4, ont permis la modélisation des concentrations intérieures dans le gymnase pour chacun des types de granulats associés au gazon synthétique et pour le gazon synthétique seul. Parallèlement, les dangers par inhalation et les valeurs toxicologiques de référence (VTR) de l'ensemble des COV et des aldéhydes mesurés, soit 112 substances (cf. Tableau 5 en annexe), ont été recherchés dans les bases de données toxicologiques internationales de référence. Pour 16 composés disposant de VTR (en caractères gras dans le tableau 5 donné en annexe), l'évaluation quantitative des expositions et des risques sanitaires associés a été menée.

Des incertitudes relatives aux dangers des substances étudiées existent : incertitudes dans les données toxicologiques et les VTR proposées (exacerbation ou inhibition éventuelle de toxicité dans le cas du mélange de polluants émis par les sols synthétiques, éventuels produits de transformation des polluants émis, réactions en phase hétérogène par adsorption sur les matériaux présents dans le bâtiment). Elles sont inhérentes à toute évaluation des risques sanitaires en l'état actuel des connaissances scientifiques et des pratiques et ne peuvent être quantifiées.

Des scénarios d'exposition aiguë et chronique ont été élaborés pour 4 groupes de populations :

- les travailleurs en charge de la pose des sols. Dans un gymnase, l'installation d'un sol synthétique nécessite 10 jours, consacrés au profilage du terrain, à la pose de la moquette et à la pose du sol sportif avec les granulats, qui dure 3 jours (source : FIELDTURF TARKETT),
- les sportifs professionnels et entraîneurs présents toute la journée dans le gymnase,
- les sportifs amateurs s'entraînant régulièrement dans le gymnase. On envisage un scénario plutôt pénalisant où le sportif assidu s'entraîne 2 fois par semaine et 1 fois dans le courant du week-end (entraînement d'une durée de 2 heures). En outre, on considère qu'il participe à une compétition amateurs le week-end (4 heures de présence dans le gymnase),
- les spectateurs des compétitions sportives, venant régulièrement, à savoir chaque week-end, dans le gymnase (2 heures de présence dans le gymnase à chaque fois).

Chacun de ces groupes de population peut être exposé (Tableau 4) :

- de façon aiguë alors qu'un nouveau sol vient d'être posé. Pour les travailleurs, on utilise les résultats des mesures à J1, tandis que pour la population générale, qui n'est vraisemblablement pas autorisée à entrer dans le gymnase le jour même de la pose du nouveau sol, on utilise les mesures à J3 ;
- de façon chronique, puisque l'on considère que l'exposition est répétée toute l'année. Les travailleurs sont exposés en permanence aux concentrations émises lors de la pose ; on utilise dès lors les concentrations mesurées à J1. Pour la population générale, l'exposition chronique (la plus fréquente par ailleurs) est calculée à partir des émissions des sols mesurées à J28. En l'absence de mesure des émissions quelques mois après la pose du sol, on considère que la mesure à 28 jours (J28) est représentative des émissions résiduelles pour tout le reste de la durée de vie du sol.

	Exposition aiguë	Exposition chronique
Travailleurs posant les sols synthétiques	Au moment de la pose du sol synthétique → émissions à J1	8h par jour, 71 jours par an ⁽¹⁾ $f_{\text{travailleurs}} = 0,07$ → émissions à J1
Sportifs professionnels et entraîneurs	A l'ouverture du gymnase après la pose d'un nouveau sol → émissions à J3	8h par jour, 365 jours par an ⁽²⁾ $f_{\text{sportifs}} = 0,33$ → émissions à J28
Sportifs amateurs		10 h par semaine, 44 semaines par an ⁽³⁾ $f_{\text{amateurs}} = 0,05$ → émissions à J28
Spectateurs		Spectateur assidu présent à toutes les compétitions ⁽⁴⁾ $f_{\text{spectateurs}} = 0,009$ → émissions à J28

Tableau 4 : Synthèse des scénarios d'exposition étudiés pour les groupes de population retenus

Légende : f = fraction de temps annuel passé dans le gymnase

Notes : (1) On considère que 236 jours sont travaillés annuellement, correspondant à 365 jours auxquels on retranche les 29 jours des 52 week-ends et les 5 x 5 jours de congés payés. Sachant que pour la pose d'un sol qui dure 10 jours, 3 jours sont consacrés à la pose du sol sportif contenant les granulats, la durée d'exposition annuelle est de 71 jours ($71 = 236 \times 3/10$).

(2) On considère un sportif de haut niveau s'entraînant chaque jour.

(3) On considère que l'entraînement et les compétitions ont lieu toute l'année sauf durant les 8 semaines des mois de juillet et août.

(4) On envisage 40 compétitions par an.

Le calcul de la concentration inhalée ne faisant pas intervenir de paramètres physiologiques, les résultats obtenus s'appliquent aussi bien à l'exposition par inhalation d'un adulte qu'à celle d'un enfant.

Les concentrations inhalées ont été calculées pour permettre *in fine* le calcul des indices de risque (pour les effets sanitaires à seuil) et des excès de risque individuel (pour les effets sans seuil, effets cancérigènes).

Les effets non cancérigènes sont ceux pour lesquels il existe un seuil d'effet (phénomène déterministe). L'US-EPA exprime ce mécanisme par une dose (RfD) ou une concentration (RfC) de référence (respectivement pour l'ingestion ou l'inhalation). Ces doses de référence sont déterminées à partir des Doses Sans Effet Nocif Observé (DSENO ou NOAEL) ou des Doses Minimales induisant un Effet Nocif Observé (DMENO ou LOAEL), divisées par des facteurs de sécurité (facteur 10 tenant compte de la variabilité inter-espèce, facteur 10 tenant compte de la variabilité intra-espèce, facteur tenant compte de l'existence de personnes sensibles...).

Les effets cancérigènes sont ceux pour lesquels la relation entre l'exposition et l'apparition de l'effet est sans seuil (phénomène probabiliste). L'US-EPA exprime ce mécanisme par un excès de risque unitaire (ERU) correspondant à l'excès de risque pour un individu exposé durant toute sa vie à une unité de dose (inhalation de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou ingestion de $1 \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$). Par exemple, un ERU_i de $6.10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ (cas du benzène) signifie qu'une exposition de 1 million de personnes, pendant 70 ans, à une concentration de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de benzène est susceptible d'induire 6 cas supplémentaires de leucémie pendant la même période (par rapport à une population non exposée de même taille).

L'évaluation des risques sanitaires a été réalisée pour une utilisation normale des sols sportifs en gazon synthétique, à savoir en l'absence de prise en compte du vieillissement des sols ou de leur dégradation accidentelle et des éventuelles émissions associées.

Le gymnase type retenu ayant une surface de 230m^2 , notée S, et une hauteur de 6 m, soit un volume de 1380m^3 , noté V, les paramètres retenus pour la modélisation de la concentration dans le gymnase ont été les suivants :

- tout le sol du gymnase est recouvert de sol synthétique élaboré ou non à partir des granulats. La surface émettrice est donc égale à la surface du gymnase, soit dans le cas présent 230m^2 ;
- les émissions du sol synthétique se répartissent uniformément dans tout le volume d'air du gymnase, autrement dit les concentrations intérieures dans le gymnase sont homogènes ;
- le taux de renouvellement d'air dans le gymnase est moyen, voire médiocre. On fixe ce taux à 0,5 volume/heure, la littérature ne fournissant pas de données relatives à la ventilation dans les gymnases. Ce taux (noté τ) est considéré constant toute la journée, que le gymnase soit vide ou occupé.

Le calcul des concentrations dans le gymnase se fait selon l'équation (1) :

$$C_{\text{gymnase}} = (\text{SER}_{\text{JX}} \times S) / (\tau \times V)$$

Avec :

- SER_{JX} , le facteur d'émission spécifique déterminé lors de la caractérisation des émissions (en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). Selon les scénarios retenus, ce facteur est celui mesuré à J1, J3 ou J28. Les SER_{JX} au seuil de détection sont pris égaux à ce seuil.
- τ , le taux de renouvellement d'air du gymnase (h^{-1})
- S et V, respectivement la surface de sol synthétique, prise égale à la surface du gymnase (m^2) et le volume du gymnase (m^3)

Le calcul des concentrations inhalées a été effectué :

- Dans un contexte d'exposition aiguë, la concentration inhalée est directement prise égale à la concentration intérieure dans le gymnase, calculée selon l'équation (1) avec les émissions mesurées à J1 (travailleurs poseurs du sol) ou J3 (autres groupes de populations).
- Pour l'exposition chronique, la concentration inhalée (CI) est calculée selon l'équation (2) :

$$CI = C_{\text{gymnase}} \times f$$

Avec :

- C gymnase, la concentration intérieure dans le gymnase calculée selon l'équation (1) avec les émissions mesurées à J1 (travailleurs poseurs du sol) ou J28 (autres groupes de populations).
- f = fraction de temps annuel passé dans le gymnase

- La quantification des risques sanitaires est évaluée pour les effets à seuils et pour les effets sans seuil.

La caractérisation du risque pour les toxiques ayant des effets à seuil par inhalation (exposition aiguë ou chronique) s'exprime par un indice de risque (IR) selon l'équation (3) : $IR = \frac{CI}{VTR}$

Avec :

- CI, la Concentration Inhalée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- VTR, la Valeur Toxicologique de Référence ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

L'IR est calculé pour chacun des traceurs des risques sanitaires. La valeur repère pour l'appréciation du risque sanitaire est fixée à 1. Lorsque l'IR est inférieur à la valeur de 1, le risque est considéré comme non préoccupant en l'état actuel des connaissances.

En première approche de l'ERS [INERIS, 2003-a], la somme des IR est également calculée. Cependant, en toute rigueur, elle peut fournir une indication sur les effets cumulés des risques uniquement si les effets respectifs de chacune des substances qui contribuent au risque concernent le même organe cible.

- La caractérisation du risque lié à une exposition à des cancérigènes (effets sans seuil) s'exprime par un excès de risque individuel (ERI).

Cet ERI représente la probabilité que l'individu a de développer l'effet associé à la substance pendant sa vie du fait de l'exposition considérée.

$$ER_{\text{linh}} = CI \times ER_{\text{Ui}} \times T / T_{\text{m}} \quad \text{équation (4)}$$

Avec :

- ER_{linh}, l'Excès de Risque Individuel par inhalation
- CI, la Concentration Inhalée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- ER_{Ui} : Excès de Risque Unitaire par inhalation ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$)
- T : durée d'exposition (années)
- T_m : période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (70 ans par convention)

La valeur repère pour l'appréciation du risque sanitaire est fixée à 10^{-5} . Lorsque l'ERI est inférieur à la valeur de 10^{-5} , le risque cancérigène est généralement considéré comme acceptable en l'état actuel des connaissances.

L'excès de risque global de cancer (tous types de cancer) peut être estimé en additionnant les ERI associés à chaque substance cancérigène.

Les résultats décrits dans le chapitre suivant correspondent à une modélisation qui s'inscrit bien dans un contexte de premier niveau d'approche de l'ERS où les situations les plus extrêmes sont envisagées (scénario « *worst case* »), c'est-à-dire un gymnase de petite dimension mal ventilé et sans prise en compte du taux de ventilation des individus.

Afin de se placer au plus près des conditions réelles d'utilisation sur la base des résultats acquis, l'INERIS a par ailleurs réalisé des tests de sensibilité sur :

- La dimension du gymnase : en considérant une situation réaliste (surface émissive de $1\,800\text{ m}^2$ et volume du gymnase de $20\,000\text{ m}^3$; le taux de renouvellement d'air restant inchangé),

- Le taux de renouvellement d'air moyen retenu pour l'ERS a été fixé à $0,5 \text{ vol.h}^{-1}$. Une étude conduite dans un gymnase français [Air Normand, 2000] a montré un taux de renouvellement d'air moyen entre $0,54 \text{ vol.h}^{-1}$ l'été et $1,2 \text{ vol.h}^{-1}$ en période hivernale. Ceci confirme que le contexte de calcul des concentrations intérieures dans le gymnase et des concentrations inhalées qui en découlent est *a priori* plutôt majorant. La ventilation est un paramètre ayant une influence significative sur les résultats.
- Les taux de ventilation des individus (homme et femme) n'ont pas été pris en compte. Un test de sensibilité a été mené sur le groupe des sportifs professionnels. Ce test montre que si l'on choisit une approche tenant compte des débits respiratoires les indices de risque s'avèrent plus élevés mais les conclusions de l'étude ne sont néanmoins pas modifiées.

III.2.2. - Résultats et recommandations

Les concentrations intérieures modélisées dans le gymnase type retenu (volume de $1\,380 \text{ m}^3$) ont été comparées aux concentrations ubiquitaires moyennes dans l'air ambiant extérieur et intérieur en France. Cette mise en perspective indique que pour les 9 COV et aldéhydes concernés et sur la base des résultats acquis lors de la caractérisation des émissions, les concentrations maximales dans le gymnase, modélisées à J28, sont du même ordre de grandeur que les concentrations ubiquitaires dans l'air ambiant (extérieur et intérieur), voire même inférieures pour certains.

Les résultats de l'ERS de l'INERIS basée sur la concentration des substances identifiées et sur les hypothèses précédentes (scénario « *worst case* ») indiquent, qu'en l'état actuel des connaissances et sur la base des informations transmises par les fabricants (relatives aux expositions des travailleurs en charge de la pose notamment), les émissions de COV et d'aldéhydes des trois types de sols synthétiques étudiés *en situation « indoor »* (gymnases de petite taille et médiocrement ventilés) sont non préoccupantes pour la santé humaine, pour les travailleurs en charge de la pose des sols, ainsi que pour la population générale, sportifs professionnels ou amateurs, adultes et enfants, à l'exception du cas des travailleurs poseurs des sols synthétiques dans des gymnases de petite taille et médiocrement ventilés exposés plus de 5 ans. Dans ce cas, il est recommandé, lors de la pose de ces sols, de garantir un taux de renouvellement d'air de 2 vol.h^{-1} *a minima*.

Ce type de recommandation est en adéquation avec celle de l'Observatoire français de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) qui préconise aux particuliers une aération pendant plusieurs jours des pièces d'un bâtiment qui vient d'être construit ou rénové ou après l'installation de nouveaux mobiliers ou décorations (page 5 du guide « Les bons gestes pour un bon air »).

Par ailleurs concernant la ventilation, il convient de faire référence aux débits minimaux d'apport d'air neuf imposés en France par le règlement sanitaire départemental (RSD) exigibles quel que soit le système de ventilation (ce sont les seules dispositions réglementaires en vigueur à ce jour en terme de ventilation des bâtiments). L'INERIS recommande que soit maintenu ce taux de renouvellement d'air en dehors des compétitions, dès lors que des sportifs professionnels ou amateurs s'entraînent sur ce type de surface en « *indoor* ».

En conclusion de son étude l'INERIS précise que les risques sanitaires associés à l'inhalation des COV et aldéhydes émis par les sols synthétiques sur des terrains en *situation « outdoor »* sont de fait non préoccupants pour la santé humaine.

IV. Conclusions générales

Evaluation de l'impact environnemental sur les eaux :

Les approches analytiques relatives à l'évaluation environnementale des eaux traversant un gazon synthétique ont été menées sur une période d'un an : d'une part en instrumentant des pilotes représentatifs sur la plate-forme technologique environnementale EEDEMS (trois types de granulats de remplissage testés : TPE, EPDM, granulats recyclés issus de pneus usagés) et d'autre part *in situ* sur un terrain de football (granulats recyclés issus de PUNR). A l'issue de l'expérimentation, les résultats montrent que :

1 - L'ensemble des résultats physico-chimiques (42 paramètres analysés) obtenus sur les percolats des 3 pilotes de 2,5 m² conduit à observer une cinétique de relargage de substances potentiellement polluantes comparable au cours du temps quelque soit le type de granulat de remplissage utilisé (7 échantillons de percolats analysés sur une année). Le pilote en gazon synthétique sans granulats de remplissage pris comme témoin de référence affiche également des taux de relargage assez proches de ceux des 3 pilotes. Les concentrations enregistrées sont faibles pour la plupart des composés et éléments recherchés. Si certains éléments présentent des concentrations un peu plus fortes en début d'expérimentation, celles-ci chutent très rapidement, témoignant ainsi d'un effet d'atténuation très rapide au niveau des taux de relargage.

2 - *In situ* sur le terrain de football instrumenté en région lyonnaise (France), les concentrations et les cinétiques de relargage sont assez comparables à celles observées sur les pilotes. Les chlorures, les fluorures et les sulfates sont mêmes en concentrations plus faibles que dans les percolats recueillis sur les pilotes, un constat à mettre en relation avec la différence de composition chimique des eaux ayant percolé à travers les sols sportifs (eau de pluie *in situ* et eau potable sur les pilotes).

3 - Sur la base d'un comparatif avec des valeurs limites françaises et européennes actuellement en vigueur, les concentrations en composés organiques, métaux et anions des percolats sont sans impact sur la ressource en eau.

4 - D'un point de vue écotoxicologique les résultats obtenus montrent que la nature des percolats susceptibles de s'infiltrer dans le sol sous-jacent au sol sportif en gazon synthétique se révèle sans impact sur l'environnement aquatique à court et moyen terme (tests normalisés réalisés sur les premiers percolats et à plusieurs reprises au cours de l'année).

En l'état actuel des recherches, après une année d'expérimentation, les résultats sur les 42 paramètres physico-chimiques identifiés et sur les tests écotoxicologiques montrent que les eaux traversant des gazons synthétiques, utilisant en remplissage soit des granulats TPE, EPDM vierges ou des granulats issus du recyclage de PUNR, ne sont pas susceptibles d'affecter les ressources en eau à court et moyen terme.

Evaluation des risques sanitaires liés aux émissions gazeuses

La caractérisation des émissions de Composés Organiques Volatiles et d'aldéhydes par des revêtements de sol sportifs à base de granulats d'élastomères, a été menée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - France) à l'aide des normes en vigueur pour la caractérisation des émissions dans l'air intérieur des produits de construction (chambre d'émissions). Les résultats montrent que :

1 - Les émissions du gazon synthétique seul (témoin sans remplissage de granulats) sont très faibles par rapport à celles d'autres produits de construction ;

2 - Les émissions du gazon synthétique comportant les granulats de pneus usagés sont relativement faibles ;

3 - Les émissions du gazon synthétique comportant les granulats d'ETP sont également relativement faibles. Les composés identifiés à l'émission sont globalement comparables à ceux identifiés dans les émissions des granulats de pneus usagés ;

4 - Les émissions du gazon synthétique comportant les granulats d'EPDM sont les plus importantes.

Une Evaluation des Risques Sanitaires (ERS) a été menée par l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (France). Cette ERS s'appuie sur les valeurs des concentrations des 112 substances identifiées dans les chambres d'émissions et leur comparaison à des valeurs toxicologiques de référence (VTR) internationales. Suivant la méthodologie des ERS, un scénario majorant dit « *worst case* » a été modélisé (petit gymnase de 1 380 m³ (6 m x 230 m²) et peu ventilé (0,5 vol.h⁻¹) en prenant en compte quatre types de populations (publics, sportifs amateurs, sportifs professionnels et entraîneurs, installateurs de gazons synthétiques).

En l'état actuel des connaissances, les résultats de l'ERS montre que les émissions de COV et d'aldéhydes identifiées pour les trois types de sols synthétiques et pour le témoin de référence sont non préoccupantes pour la santé humaine en situation « *indoor* », pour les travailleurs en charge de la pose des sols, ainsi que pour la population générale, sportifs professionnels ou amateurs, adultes et enfants, à l'exception du cas des travailleurs poseurs des sols synthétiques dans des gymnases de petite taille et médiocrement ventilés exposés plus de 5 ans (scénario « *worst case* »). Dans ce cas, il est recommandé, lors de la pose de ces sols, de garantir un taux de renouvellement d'air de 2 vol.h⁻¹ a minima.

Ce type de recommandation est en adéquation avec celle de l'Observatoire français de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) qui préconise aux particuliers une aération pendant plusieurs jours des pièces d'un bâtiment qui vient d'être construit ou rénové ou après l'installation de nouveaux mobiliers ou décorations (page 5 du guide « Les bons gestes pour un bon air »).

En conclusion de son étude, l'INERIS précise que les risques sanitaires associés à l'inhalation des COV et aldéhydes émis par les sols synthétiques sur des terrains en situation « *outdoor* » sont de fait non préoccupants pour la santé humaine.

Cette étude, initiée en 2005, a été menée dans un souci scientifique pour s'approcher le mieux possible des conditions d'usage des terrains (représentativité des pilotes instrumentés, quantités de matière testée, choix des seuils limites, évaluation des impacts sur un an) et en s'appuyant sur des approches et des protocoles expérimentaux reconnus à l'échelle européenne. Les résultats de l'évaluation de l'impact environnemental sur les eaux et de l'évaluation des risques sanitaires (émissions gazeuses) sur les populations montrent :

- un comportement comparable quelque soit le type de granulats de remplissage (TPE et EPDM vierges, granulats issus de pneus usagés),
- une absence d'impact de ce type d'ouvrage sur les ressources en eau,
- aucun effet préoccupant sur la santé associé à l'inhalation des COV et aldéhydes émis par les sols synthétiques.

Ces données permettent donc de disposer d'informations précieuses sur les impacts environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation de granulats d'élastomères (vierges et issus de pneumatiques usagés) comme remplissage des gazons synthétiques de 3^{ème} génération. Ces résultats offrent des éléments de réponses aux principales interrogations soulevées par les professionnels et les fédérations sportives.

A l'échelle française comme européenne, les résultats de ces études pourront être utilisés afin de valider ou d'élaborer des protocoles d'échantillonnage et des tests de laboratoire adaptés, permettant de vérifier l'innocuité environnementale et sanitaire de gazons synthétiques de 3^{ème} génération en conditions d'utilisation.

ANNEXE

Composé	N°CAS
COV	
acétophénone	98-86-2
alpha-méthylstyrène	98-83-9
aniline	62-53-3
benzène	71-43-2
benzothiazole	95-16-9
butan-1-ol	71-36-3
butylcyclohexane	1678-93-9
1,5,9-cyclododécatriène	4904-61-4
cyclohexane	110-82-7
cyclohexanone	108-94-1
cymène	99-87-6
décahydro-2-méthylnaphtalène	?
décane	124-18-5
1,4-diacétylbenzène	1009-61-6
1,2-dichlorobenzène	95-50-1
diéthylbenzène	135-01-3
1,2-dihydro-2,2,4-triméthylquinoline	147-47-7
diisopropénylbenzène	3748-13-8
diisopropylbenzène	99-62-7
2,4-diisopropyl-1,1-diméthylcyclohexane	?
diméthylcyclohexane	2207-01-4
diméthylcyclopentane	?
diméthyléthylbenzène	98-06-6
diméthyléthylcyclohexane	3178-22-1
diméthylhexène	?
diméthylpentanol	?
diméthylphénylméthanol	617-94-7
2,4-diméthylquinoline	1463-17-8
diméthyltrisulfide	3658-80-8
2,6-ditertbutyl-p-benzoquinone	?
2,6-ditertbutyl-4-méthylphénol	?
dodécane	112-40-3
dodécène	25378-22-7
1,2-éthanediol	107-21-1
éthanone, 1-[4-(1-hydroxy-1-méthyléthylphényl)]	?
éthylbenzène	100-41-4
éthylcyclohexane	1678-91-7
5-éthyl-2,2,3-triméthylheptane	?
2-éthylhexanol	104-76-7
5-éthyl-2,2,3-triméthylheptane	?
éthyltoluène	622-96-8
2,2,3,5,5,6,6-heptaméthyl-3-heptène	?
heptane	142-82-5
heptène	592-76-7
2,5-hexanedione	110-13-4
1-hydroxycumène	617-94-7
hydroxydiisopropylbenzène	4779-94-6
isobutène tetramère	115-11-7
1-isopropoxy-2-méthyl-2-propanol	?
isopropénylacétophénone	?
isopropylacétophénone	?
Isopropylbenzène (ou cumène)	98-82-6
isothiocyanato-cyclohexane	1122-82-3
1-méthoxy-2-propanol	107-92-8
(1-méthoxy-1-méthyléthyl)-benzène	?
méthyl-décane	6975-98-0

Composé	N°CAS
3-méthylheptane	589-81-1
méthyl-2-hexanone	?
méthylcycloheptane	4126-78-7
méthylcyclohexane	108-87-2
3-méthylcyclohexèn-1-one	?
méthylcyclopentanol	1462-03-9
méthyléthylcyclohexane	1678-82-6
méthyléthylcyclopentane	?
méthylisobutylcétone (MIBK)	108-10-1
2-méthyl-2-(1-méthyléthoxy)-propane	?
méthylpropylbenzène	99-87-6
4-méthyl-pyridine	1333-41-1
naphtalène	91-20-3
octahydro naphtalène méthanol	?
octane	111-65-9
octénone	4312-99-6
pentadécane	629-62-9
2,2,4,6,6-pentaméthylheptane	13475-82-6
2,2,4,6,6-pentaméthyl-3-heptène	123-48-8
phénol	108-95-2
4-phénylcyclohexène	4994-16-5
1,2-propanediol	57-55-6
propylbenzène	103-65-1
propylcyclohexane	1678-92-8
styrène	100-42-5
4-tert-butylacétophénone	?
4-tert-butylcyclohexanone	98-53-3
tert-butylformamide	2425-74-3
tetradécane	629-59-4
tetraisobutylène	15220-85-6
tetraméthylcyclopentane	<i>isomères</i>
3,3,6,6-tetraméthyl-1,4-cyclohexadiène	?
2,2,6,6-tetraméthylèneheptane	?
trichloroéthylène	79-01-6
tridécane	629-50-5
1,2,3-triméthylbenzène	526-73-8
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6
1,3,5-triméthylbenzène	108-67-8
triméthylcyclohexane	<i>isomères</i>
3,5,5-triméthyl-2-cyclohexèn-1-one	78-59-1
triméthylcyclopentane	<i>isomères</i>
1,3,3-triméthyl-2-méthylène-indoline	118-12-7
toluène	108-88-3
undécane	1120-21-4
xylènes	1330-20-7
acétaldéhyde	75-07-0
benzaldéhyde	100-52-7
butyraldéhyde	123-72-8
crotonaldéhyde	123-73-9
décanal	112-31-2
formaldéhyde	50-00-0
hexaldéhyde	66-25-1
nonanal	124-19-6
propionaldéhyde	123-38-6
m/p-tolualdéhyde	620-23-5
valéraldéhyde (pentanal)	110-62-3

Tableau 5 : Liste des substances étudiées (en gras : les 16 substances disposant de VTR)

V. Références bibliographiques et normatives

FIFA : FIFA quality concept for artificial turf guide,

<http://www.fifa.com/documents/static/development/FIFA-guideM.pdf>

BYGGFORSK Norwegian Building Research Institute (2004) : Potential health and environmental effects linked to artificial turf systems - final report.

Danish EPA (2005) : Emissions and evaluation of health effects of PAH's and aromatic amines from tyres, Nilsson N.H., Feilberg A. and Pommer K., Danish Technical Institute, Survey of Chemical Substances in Consumer Products no. 54. <http://www.mst.dk>

Detlef A. Birkholz, Kathy L. Belton, Tee L. Guidotti (2003) : Toxicological Evaluation for the Hazard Assessment of Tire Crumb for Use in Public Playgrounds, Journal of the Air & Waste Management Association.

Norwegian Institute of Public Health and the Radium Hospital, Oslo (Janvier 2006) : Artificial turf pitches – an assessment of the health risks for football players.

Norwegian Institute for Water Research (2005) : Environmental risk assessment of artificial turf systems.

NF ENV 12 920 : Caractérisation des déchets - Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées

NF EN ISO 6341, mai 1996 (T90-301) : Détermination de la toxicité aiguë (inhibition de la mobilité de *Daphnia magna*)

NF EN ISO 28692, mai 1993 : Evaluation de la toxicité chronique des percolats [inhibition de la croissance algale avec *Pseudokirchneriella subcapitata* (anciennement *Selenastrum capricornutum*)

Directive 98/83/CE : adoptée par la Communauté le 03/11/1998 (JOCE n° L.330/32 du 05/12/1998) et relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine à l'exception des eaux minérales.

Code la Santé Publique : Livre III, Titre II, section 1. Articles R1321-1 à R1321-66.

Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 : relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales

Directive Décharge 1999/31/CE : Conditions d'acceptation des déchets inertes, prévues dans l'annexe 2 de la Directive 1999/31/CE, concernant la mise en décharge des déchets, dite la « Directive Décharge », Document réalisé pour la Commission Européenne par plusieurs pays : France (BRGM, INSA de Lyon, Ministère de l'Environnement) ; Pays Bas (ECN, Ministère de l'Environnement) ; Angleterre (WRC, Ministère de l'Environnement) ; Allemagne (Ministère de l'Environnement - BMU) ; Danemark (DHI, Ministère de l'Environnement) ; Autriche (Ministère de l'Environnement) ; Suède (SGI).

Arrêté Rejets ICPE du 02/02/98 (art. 32) : relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation

Protocole européen (ECA/IAQ, 1997) : European Collaborative Action Indoor Air Quality & its Impact on Man. Report 18: Evaluation of VOC emissions from building products – Solid flooring materials (1997)

NF ISO 16000-3 : Air intérieur – Partie 3 : Dosage du formaldéhyde et d'autres composés carbonylés – Méthode par échantillonnage actif (AFNOR, 2002).

NF ISO 16000-6 : Air intérieur – Partie 6 : Dosage des composés organiques volatils dans l'air intérieur des locaux et enceintes d'essai par échantillonnage actif sur le sorbant Tenax TA, désorption thermique et chromatographie en phase gazeuse utilisant MS/FID (AFNOR, 2005).

prEN ISO 16000-9 : Indoor air – Part 9 : Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – Emission test chamber method (ISO, 2005).

Directive européenne « Produits de construction » (89/106/EEC - 21/12/1988)

Air Normand (Mars 2000) : Qualité de l'air intérieur, Gymnase de Notre Dame de Gravenchon, Rapport d'étude n°E 00_9, Campagne du 04/02 au 17/03/1999 et du 27/05 au 30/05/1999..

Foster P., Laffond M., Baussand P. et al. (1991) : VOC measurements in the Grenoble area and study of benzaldehyde behaviour in a simulation chamber, Pollution atmosphérique, 175-191

ADEME (2003) : Base de données de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué, ADEME/IRSN, Version 0.

INERIS (2003-a) : Substances chimiques, Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des installations classées. <http://www.ineris.fr/>

INERIS (2003-b) : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs), Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérogènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique – FET) et approche par mélanges, Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérogènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). <http://www.ineris.fr/>

INERIS (2006) : Pratique INERIS de choix des valeurs toxicologiques de référence dans les évaluations de risques sanitaires : <http://www.ineris.fr/>

INERIS (2006) : Rapport d'étude : Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, l'air et les denrées alimentaires en France au 1^{er} mars 2006.

Kirchner S. et al. (1995) Habitat à moindre risque allergénique : mesures des conditions d'ambiance et de polluants chimiques. EAE/QAE- DAC n° 95067.012.

Le Moullec Y., Dusséaux M., Thibault G. (2004) : Connaissance de l'exposition des citoyens à la pollution atmosphérique dans les établissements de loisir : gymnases. Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris, Mairie de Paris.

Nisbet I.C.T. et Lagoy P.K. (1992) : Toxic equivalent factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), Reg. Toxicology and Pharmacology, 16, 290-300

Norwegian Pollution Control Authority/Norwegian Institute for Air Research (2006) : Measurement of air pollution in indoor artificial turf halls.

OQAI (2006) : État des connaissances sur la qualité de l'air intérieur des lieux de vie fréquentés par les enfants, OQAI, rapport référencé DDD/DE/VAI-06-061R

Rohr A.C., Weschler C.J., Koutrakis P., Spengler J.D. (2003) Generation and quantification of ultrafine particles through terpene/ozone reaction in a chamber setting, Aerosol Science and Technology, 37(1), 65 – 78

UE (2005) : Harmonisation of indoor material emissions labelling systems in the EU, Inventory of existing schemes, Report N°24, European Collaborative Action, Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure, European Commission, EUR 21891. http://www.inive.org/medias/ECA/ECA_Report24.pdf

Van den Hazel P., van Hooren V., van de Weerd R. (2006) : Study of the health hazards SBR granulates in an artificial turf at the sports centre at Rijkerswoerd, Sportbedrijf Arnhem

Weschler C.J. (2004) : Chemical reactions among indoor pollutants: what we've learned in the new millennium, Indoor Air, 14 (S7), 184 – 194.

Wolkoff P., Wilkins C.K., Clausen P.A., Nielsen G.D. (2006) : Organic compounds in office environments - sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry, Indoor Air, 16(1), 7 – 19.

<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>

<http://chimie.ineris.fr>

<http://www.epa.gov/iris/>

<http://www-cie.iarc.fr/monoeval/grlistfr.htm>

<http://www.meteo.fr/temps/monde/climats/3-2.htm>