

SIMULATION

Comment faire des économies d'énergie avec une régulation optimisée de CTA

P.27

SCIENCES & TECH

Validation globale d'une technologie minérale pour maintenir l'hygiène des surfaces

P.37

FAITS & GESTES

→ Conformat dans le giron du groupe Dastex

→ Un nouveau bâtiment XL pour Sanofi

P.8

AVRIL-MAI 2025 NUMÉRO 149

BIMESTRIEL ISSN 1291-6978

SALLES PROPRES

N°149 LE MAGAZINE DE LA MAÎTRISE DE LA CONTAMINATION



DOSSIER

Les nouveaux enjeux de la régulation



APPLICATION
DATA
CENTERS

P.45

DISPOSITIFS ÉLECTRONIQUES

Microsystèmes : comment garantir une qualité de l'air et une propreté aux échelles micro et nanométriques ?

Par ALEXANDRE BONGRAIN, GAELLE LISSORGUES, LIONEL ROUSSEAU, ESIEE PARIS, Université Gustave Eiffel

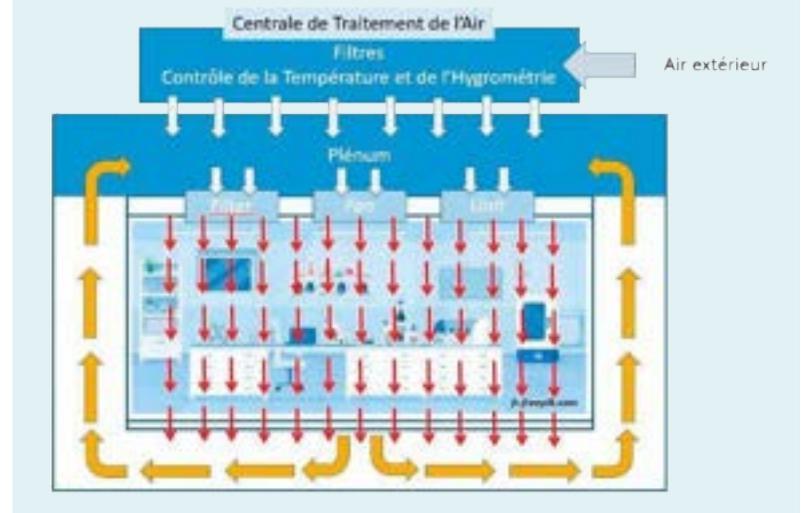
La fabrication et la conception de microdispositifs électroniques, appelés aussi *Micro electro mechanical systems* (MEMS), comme le réalise **ESIEE Paris** dans ses 640 m² de salles propres, nécessitent des conditions de qualité d'air particulières reposant sur plusieurs systèmes de traitement d'air et filtration.

Une salle propre ou *clean-room* est un environnement ultrapropre dans lequel on peut fabriquer ou étudier des dispositifs plus petits que le diamètre d'un cheveu (compris entre 50 et 100 µm). Il est donc nécessaire de fournir un environnement maîtrisé (qualité de l'air, température, hygrométrie) pour protéger les opérateurs et assurer la répétabilité de la production qui y est réalisée. On distingue deux types d'environnement maîtrisé : ceux qui sont dédiés à la biologie (notamment les laboratoires de bioconfinement) et ceux qui sont dédiés au domaine de la micro et nanotechnologie.

C'est cette dernière catégorie que nous utilisons à **ESIEE Paris** pour la fabrication et la conception de microdispositifs, également dénommés MEMS pour *Micro Electro Mechanical Systems*.

Le bâtiment **ESIEE Paris** a une superficie totale de 2 500 m², dont 640 m² de salle propre sur 3 niveaux. Au sous-sol, se trouve la production d'eau de-ionisée, le traitement des effluents liquides, la production d'air comprimé et de vide centralisé, ainsi que les pompes permettant la circulation d'eau dans les réseaux d'eau de refroidissement. Au dernier étage, se situent le traitement de l'air et l'extraction des effluents gazeux. Cet article présente le cas

1 Schéma de principe de la centrale de traitement de l'air (CTA)



concret de la salle propre **ESIEE Paris**. L'activité y est répartie en 3 secteurs : 70 % sont consacrés à l'industrie, 20 % à la recherche et 10 % à la formation. Cette mixité d'activités requiert une adaptabilité importante pour les procédés de fabrication et la maintenance. Il est important de noter que les salles propres industrielles de production (par exemple ST Microelectronics en Europe, TSMC à Taiwan) sont fortement automatisées et robotisées de façon à limiter la présence

humaine au strict minimum, réduisant ainsi drastiquement les risques de contaminations particulières. Des structures plus modestes dédiées à la R & D ou à la production de mini-séries sont plus représentatives des éléments exposés ici.

On peut voir la salle comme une boîte dans une boîte où la partie interne représente la salle blanche et la boîte externe le bâtiment complet, avec toute l'infrastructure nécessaire à son bon fonctionnement.

Génération d'un environnement propre et contrôlé

Dans une salle propre, nous disposons en général de 2 systèmes pour contrôler la qualité de l'air. Le premier est la centrale de traitement d'air (CTA) qui assure le renouvellement de l'air neuf issu de l'extérieur. La CTA est munie de 4 étages de filtration pour piéger les microparticules et éviter qu'elles se retrouvent en zone contrôlée. Elle dispose aussi d'un réseau d'humidificateurs qui, couplés à des réseaux de circulation d'eau chaude et d'eau glacée, assurent la régulation en hygrométrie et en température. Une turbine assure la circulation de l'air neuf injecté dans un plenum, qui est un niveau intermédiaire juste au-dessus de la zone à environnement maîtrisé. Cet air est finalement injecté par un réseau d'unités de filtration ou FFU (Filtration fan unit) sous forme de flux « laminaire » ou unidirectionnel. Chaque FFU est équipé d'un filtre absolu qui contribue à filtrer d'éventuelles particules résiduelles, qui seraient présentes dans le plenum (normalement en très faible quantité). Une partie de l'air présent en salle propre passe par un faux plancher pour ensuite remonter dans le plenum et être à nouveau filtré et réinjecté par les FFUs. Ainsi, le flux d'air injecté est un mélange d'air neuf et d'air recyclé et filtré. Le principe de renouvellement et de circulation d'air est résumé sur la **figure 1**. Le second système de contrôle de la qualité de l'air est composé des réseaux d'extraction et d'un module de neutralisation des vapeurs acides (laveur gaz). Le rôle du système d'extraction est d'évacuer hors de la salle propre les composés volatiles non respirables (vapeurs acides, solvants, composés gazeux utilisés par certaines machines). Il y a au total 4 réseaux d'extraction.

A Les classes ISO 14644-1 de propreté

Classe ISO	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm	Classe US F5209
ISO 1	10	2	0	0	0	0	
ISO 2	100	24	10	4	0	0	
ISO 3	1 000	237	102	35	8	0	1
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	0	10
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29	100
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293	1 000
ISO 7	∞	∞	∞	352 000	83 200	2 930	10 000
ISO 8	∞	∞	∞	3 520 000	832 000	29 300	100 000
ISO 9	∞	∞	∞	35 200 000	8 320 000	293 000	

Concentration maximale autorisée de particules (en particules/m³) de taille égale ou supérieure à la valeur indiquée (en µm) – encadré en rouge les classes de la salle blanche **ESIEE Paris** servant d'exemple.

Un réseau d'extraction de chaleur dont le rôle est d'assurer l'évacuation de la chaleur générée par des machines fonctionnant à haute température telles les fours d'oxydation thermique de substrats de silicium. Un deuxième réseau d'extraction est connecté en sortie de chaque équipement rejetant des composés fluorés et dispose d'un système d'abattement pour le piégeage de vapeurs de fluorure d'hydrogène (HF) qui peuvent potentiellement être générées en sortie de tels équipements. Le but est d'éviter le rejet dans l'atmosphère de ce fluorure d'hydrogène, qui devient

par exemple corrosif en présence d'humidité. Le troisième réseau d'extraction est dédié à l'évacuation des vapeurs de solvants. Il est connecté aux paillasses et sorbonnes de chimie utilisant des composés à base de solvants. Enfin, le quatrième et dernier réseau d'extraction est réservé à l'extraction des vapeurs acides.

Le module de lavage des vapeurs acides arrive en extrémité du réseau d'extraction acide, juste avant le rejet vers l'extérieur. Il est constitué d'une piscine, dont le pH est maintenu entre 9 et 10, par l'ajout de KOH *via* un système de pompes qui mettent

le contenu de cette piscine en circulation pour alimenter des douchettes. Ces dernières nébulisent des gouttelettes à pH basique qui neutralisent progressivement et en continu les vapeurs acides, évitant ainsi leur rejet dans l'atmosphère. Entre la CTA qui souffle de l'air neuf et les réseaux d'extraction qui extraient de l'air, se crée un différentiel de pression entre la salle propre et l'extérieur. Dans le cas d'un laboratoire de bioconfinement utilisé pour la biologie, les réglages des flux d'air neuf et d'extraction sont réalisés de manière que le différentiel de pression soit négatif pour ne pas avoir de vecteurs biologiques pouvant sortir. Inversement, dans le cas d'une salle propre dédiée à l'électronique et aux microsystèmes, comme c'est le cas de celles de l'ESIEE Paris, le différentiel de pression doit être positif entre la salle et l'extérieur afin d'éviter l'entrée de particules. En général, un minimum de 15 Pa de surpression est appliqué entre l'intérieur et l'extérieur. Mais d'autres facteurs sont également contrôlés, comme la température et l'hygrométrie. La régulation de la température est importante, dans un premier temps pour le confort ➔

B Type de filtres

Classification des filtres de moyenne et haute efficacité (EN 779:2012)

Groupe	Classe	Perte de charge finale (Pa)	Rendement gravimétrique moyen (Am) de poussière synthétique (%)	Efficacité moyenne (Em) pour des particules de 0,4 µm (%)	Efficacité minimale pour des particules de 0,4 µm (%)
Grossier	G1	250	50 ± A _m ± 65	-	-
	G2	250	65 ± A _m ± 80	-	-
	G3	250	80 ± A _m ± 90	-	-
	G4	250	90 ± A _m	-	-
Moyen	M5	450	-	40 ± E _m ± 60	-
	M6	450	-	60 ± E _m ± 80	-
Fin	F7	450	-	80 ± E _m ± 90	35
	F8	450	-	90 ± E _m ± 95	55
	F9	450	-	95 ± E _m	70

Source : <http://www.ventilation-industrie.fr/la-classification-des-filtres>

→ des opérateurs mais pas seulement. Les procédés de fabrication utilisés sont sensibles à la température et peuvent varier fortement. La contrôler permet de garantir des procédés stables et reproductibles. La température est régulée autour de 20 °C. Le contrôle de l'hygrométrie apporte également un confort aux opérateurs en salle blanche, mais permet surtout d'éviter les décharges électrostatiques qui endommageraient les dispositifs produits (cas d'hygrométrie trop faible) ou d'avoir de la condensation

qui pourrait endommager les équipements et l'infrastructure (cas d'hygrométrie trop élevée). Ce contrôle permet également à la poussière de ne pas adhérer aux surfaces et ainsi être projetée au sol grâce au circuit de flux d'air. En général, l'hygrométrie est régulée en permanence de manière à être comprise entre 45 et 55 %.

Principe de filtration

La propreté de l'air est encadrée et respecte des normes en classe ou ISO (voir **tableau A** page précédente).

Comme évoqué plus haut, la filtration de l'air se situe au niveau de la CTA pour le traitement d'air neuf et au niveau des FFUs pour l'injection de l'air en salle blanche (**figures 3 et 4**).

Au niveau de la CTA, un premier étage de filtration média situé au niveau de la prise d'air permet d'éviter l'entrée de grosses particules, comme des feuilles d'arbres. Ensuite, viennent deux autres étages de filtration (voir **tableau B** page précédente), composés de filtres de type

G4 puis F9. Les filtres G4 vont stopper les particules micrométriques pour protéger l'étage de filtration F9. Ce dernier apporte une capacité de filtration plus importante car ils sont capables de filtrer des particules supérieures à 0,4 µm avec une efficacité de 95 % en moyenne (70 % au minimum).

Le dernier étage de filtration de la CTA est situé en dernière position. Il est constitué de filtres absolus H13 qui permettent la filtration de particules supérieures à 0,3 µm avec une

2 Répartition des classes ISO par types d'activité

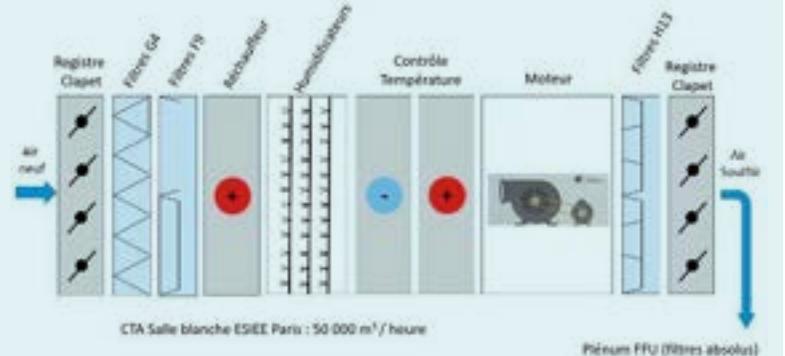


■ ISO 5 photolithographie ; ■ ISO 7 zones de travail ; ■ ISO 8 zones de maintenance dites doigts gris.

C Exemples de taux de brassage typiques selon la classe ISO

Classement ISO 14644-1	Taux de brassage (Vol/H)
ISO 8	15 à 30
ISO 7	30 à 50
ISO 6	50 à 100
ISO 5 et moins	250 à 600

3 Exemple de système de filtration (ESIEE Paris)



4 Vue globale de la centrale de traitement de l'air



efficacité de 99,95 %. Cette combinaison de filtrations successives garantit un air renouvelé injecté dans le plenum quasiment dénué de particules supérieures à 0,3 µm. En complément, le filtre qui équipe chaque FFU a pour objectif de rajouter une étape de filtration supplémentaire encore plus restrictive sur tout flux « laminaire » injecté en salle blanche en provenance du plenum. Il s'agit en effet ici de filtres absolus H14 qui filtrent les particules supérieures à 0,4 µm avec une efficacité de 99,995 %.

Ces systèmes produisent un flux « laminaire » en balayant l'air du plafond vers le faux plancher, ils permettent de plaquer au sol les aérosols et les particules qui pourraient encore être présents. Par exemple, 72 FFUs sont répartis dans notre salle blanche. Ils garantissent une qualité d'air ISO 7 sur la plus grande partie de la salle et ISO 5 dans une salle de photolithographie (figure 2). La zone dédiée ISO 5 est équipée de 22 FFUs pour une surface d'environ 40 m². Enfin, pour garantir la sécurité des utilisateurs, l'air propre poussé à l'intérieur doit aussi être aspiré. Une seconde CTA a donc pour rôle d'extraire de la salle blanche l'air visé à extraire (exemple : celui d'une salle de chimie). Elle extrait 38 000 m³/h contre 47 000 m³/h dans le sens opposé, ce qui va permettre d'avoir un delta de pression positif entre l'intérieur de la salle blanche et l'extérieur. Un équilibrage des pressions est alors nécessaire au démarrage d'une salle propre.

Un paramètre important est ce qu'on appelle le taux de brassage, qui correspond au rapport entre le débit d'air soufflé et le volume de la zone considérée. Il contribue à la cinétique de décontamination de celle-ci (tableau C). Il doit être d'autant plus élevé que la classe est faible (moins de poussières).

Ces paramètres sont tous liés : la filtration, le taux de brassage, la diffusion de l'air, qui permet d'assurer l'évacuation correcte de la contamination, et les mises en cascade de pression qui évitent l'introduction d'air non filtré issu de l'extérieur dans la salle propre.

Principe de la régulation d'hygrométrie et de température

La régulation d'hygrométrie et de température est effectuée en grande partie dans la CTA à la suite des étages de filtration G4 et F9. L'air est tout d'abord préchauffé à 13 °C par une batterie de circulation d'eau chaude à 60 °C qui assure l'échange thermique avec le flux d'air. Une vanne de circulation à commande analogique permet d'ajuster son ouverture pour la régulation de la température de préchauffage. Le rôle du préchauffage est d'abord d'éviter le gel de la CTA en hiver et de faciliter la régulation globale d'hygrométrie. À la suite de l'étage de préchauffage de l'air, une matrice de rampes permet l'injection de vapeur d'eau générée par un réseau d'humidificateurs. Ces derniers génèrent de la vapeur lorsque l'hygrométrie est inférieure à la consigne (50 %). À la suite de cet étage d'humidification, une batterie d'eau glacée (eau à 8-9 °C) condense l'excédent d'humidité dans le flux d'air et réduit ainsi son hygrométrie. En parallèle, cette batterie froide réduit la température du flux d'air neuf et participe ainsi à la fois à la régulation d'hygrométrie et de température. Enfin, une dernière batterie chaude (60 °C) permet si besoin de réchauffer l'air qui a été refroidi par l'étage précédant et d'affiner la régulation de température. Le point de consigne de cette dernière en sortie de CTA est fixé à 19 °C. Ce point est inférieur aux températures d'ambiance qu'il y a

en réalité dans les différentes zones de la salle blanche, car les machines contribuent à réchauffer l'atmosphère. Afin d'éviter un réchauffement plus important, des batteries d'eau glacée sont situées à différents endroits du plenum pour refroidir si nécessaire l'air ramené de la salle propre vers le plenum.

Démarrage d'une salle propre et entretien régulier

Le démarrage est une opération qui doit être décomposée en plusieurs étapes. Une fois l'installation terminée, un équilibrage de pression des différentes pièces est réalisé. Une équipe spécialisée prend le relais pour effectuer une mise à blanc, qui vise à nettoyer toutes les surfaces de la salle, mais également sous le faux plancher. Cette étape initiale sert en quelque sorte de précalibration. Puis l'entrée de la salle propre est condamnée plusieurs jours. Sont alors réalisées les premières mesures par un compteur de particules pour connaître le niveau de propreté de chacune des zones. Une fois cette première phase réalisée, les équipements liés aux procédés technologiques sont alors nettoyés puis entrés. Une fois tous les équipements installés, un second équilibrage des pressions est réalisé, puis de nouveau l'entrée de la salle blanche n'est plus autorisée quelques jours pour une stabilisation. Enfin un contrôle final de la qualité de l'air est réalisé dans tous les secteurs de la salle de façon à vérifier le respect de la norme ISO en fonction des zones d'activité.

Maintenance de l'infrastructure

Pour garantir la qualité de l'air tout au long de son exploitation, il est nécessaire de prendre certaines précautions. La salle doit être nettoyée

tous les jours (nettoyage du sol) par un mélange alcool et eau déionisée. Puis dans le cas de notre exemple à ESIEE Paris, deux mises à blanc sont réalisées par an. Une première consiste à nettoyer complètement les parois, le plafond et le sol de la salle, ainsi que la surface des équipements. La deuxième mise à blanc est axée sur le nettoyage du faux plancher et l'inspection du plenum.

Au niveau de la CTA, il y a deux phases de remplacement des filtres par an. Au cours d'une première phase, les premiers étages de filtration qui se colmatent le plus rapidement (media, G4 et F9) sont remplacés. Lors de la deuxième phase, c'est l'intégralité des filtres (media, G4, F9 et H13) qui est changée. Durant cette maintenance, les organes de sécurité de la CTA sont vérifiés et testés (dispositif antigel, hygromètre de sécurité, seuils des capteurs de pression différentiel pour la détection de l'encrassement des filtres). L'objectif de ces changements est de préserver au maximum le plenum de la salle propre des contaminations particulières. Et ainsi éviter que les filtres H14 des FFUs se colmatent trop rapidement. En effectuant ces maintenances de manière assidue, la durée de vie des filtres FFUs est de l'ordre de 20 ans. →

RÉFÉRENCES

- www.aspec.fr/Data/DO/tgBloc/7403/fr/params/file/01-Intro-PO01-009-.pdf?ts=1590501985
- <https://blog.sofise-filtration.com/bonnes-pratiques/filtrer-air-dans-les-salles-blanches>
- www.laminairecourtois.com/quels-sont-les-elements-cles-de-la-conception-dune-salle-blanche/
- www.euroflux.fr/principes-salles-blanches/
- <https://cleanroomtechnology.com/>

➔ En parallèle, une maintenance est effectuée sur le réseau d'extraction acide/base chaque année. Elle concerne le nettoyage du laveur gaz, l'inspection des turbines et le décapage des registres.

Afin de contrôler l'intégrité de la salle blanche, une certification est effectuée par un organisme de contrôle tous les 2 ans. Au cours de cette intervention, des comptages de particules sont effectués à divers endroits de la zone et des mesures de différentiels de pression sont réalisées afin de vérifier que l'équilibre des pressions est respecté. Ce contrôle permet de s'assurer que les différentiels

de pressions entre les différentes classes de salles sont corrects, en particulier lorsque des évolutions ont eu lieu (installation de nouveaux équipements, modification des cloisons). Par exemple entre une salle de classe ISO5 et une de classe ISO7, la pression doit être toujours supérieure dans la salle de classe ISO5 c'est-à-dire là où l'environnement doit être le plus dénué de particules.

Un système complet de supervision à distance suit en temps réel l'état des différents organes de l'infrastructure et permet de modifier les consignes d'hygrométrie et de température au niveau de la CTA,

d'affiner les températures et l'hygrométrie localement dans différentes zones d'activité, d'ajuster les températures des réseaux d'eau glacée, de suivre les consommations électriques et d'avoir des remontées de défauts sur des organes de l'infrastructure. Une interface web permet l'affichage en salle propre, mais aussi à l'extérieur de l'ensemble des états de l'infrastructure. Objectif : détecter au plus vite des problèmes sur l'infrastructure afin de pouvoir les résoudre le plus rapidement possible.

La conception du système de ventilation repose sur une analyse de risques propre à chaque activité, et sera donc différente selon le type de salle propre (industrielle ou plus petite structure de R & D). Il est absolument nécessaire d'avoir recours à des systèmes automatisés de pilotage, dans un contexte de contraintes énergétiques et économiques, de maîtrise des contaminations, en mettant en œuvre une maintenance préventive, comme le changement des filtres grâce à des logiciels capables de suivre leur perte de charge.

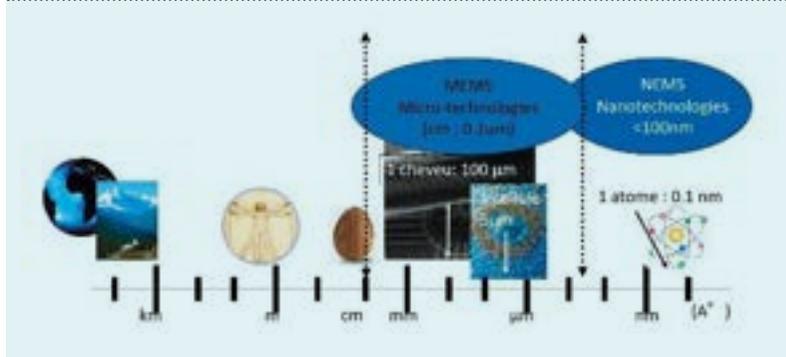
Le but de la filtration en salle blanche est donc, à la fois, de contenir la pollution extérieure et d'éliminer ce qui est produit au sein de la salle blanche, tout en garantissant la qualité de fabrication aux petites échelles (figure 5). À titre d'exemple, le rapport entre un atome (0,1 nm) et une noix de Grenoble (2 cm) est le même que celui entre un œuf (5 cm) et la planète Terre (10 km)

Compte tenu des dimensions micrométriques des dispositifs fabriqués (*Micro Electro Mechanical Systems* ou MEMS, Figure 6), toute poussière de diamètre de l'ordre du micron sera forcément une source de défaut.

Conclusion

Une salle propre correspond à un environnement ultrapropre dans lequel on peut travailler à la fabrication ou l'étude de dispositifs micro et nanométriques (MEMS, circuits intégrés électroniques...). La gestion de cet environnement propre s'appuie en premier lieu sur une centrale de traitement d'air, véritable système centralisé qui pilote la qualité de l'air dans le bâtiment, en assurant la circulation, la filtration, et le chauffage ou le refroidissement de l'air à l'intérieur des différentes salles. Il faut donc contrôler la ventilation, gérer les taux de renouvellement d'air, et traiter cet air pour qu'il réponde aux exigences normatives définies selon les usages. Selon le type de particules contaminantes, de diverses origines, il faut également tenir compte du gradient de pression dans la salle. Enfin, il est nécessaire de contrôler d'autres paramètres environnementaux tels que la température, l'hygrométrie, les risques d'explosivité, de façon à garantir la reproductibilité des procédés de microfabrication. ■

5 Illustration des échelles et dimensions relatives des objets



6 Les dispositifs MEMS

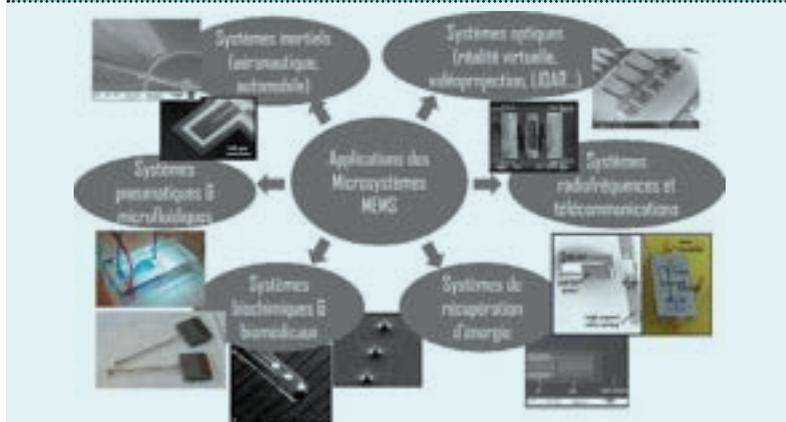


Illustration de MEMS (que l'on retrouve dans l'industrie, les systèmes électroniques et automatiques...)

Origine de la pollution de l'air

La première source de contamination provient de l'air extérieur. La seconde est due aux installations car elle provient des équipements en place. La troisième source, souvent la plus importante, est celle liée à la présence humaine, et la propagation des contaminations est limitée par l'usage d'accessoires de propreté (combinaison, sur-chaussures, masques, charlottes...). Pour un individu moyen, on compte environ 1,8 m² de peaux (squames de taille 30 µm) renouvelées tous les 4 jours, soit 2 milliards de particules, aboutissant à 3 kg de matière par an.