

Des travaux exploratoires pour améliorer la connaissance des mécanismes en jeu

La recherche tient notamment un rôle déterminant dans l'éclairage des enjeux, dans la compréhension des mécanismes en place, dans l'élaboration de diagnostics sur des sujets complexes et multiformes, ainsi que dans la définition des mesures à prendre pour relever des défis majeurs. L'action du Giec²⁹ dans le domaine du changement climatique et les programmes de recherche en santé-environnement l'illustrent.

Plusieurs programmes de recherche, coordonnés par l'Union européenne³⁰, l'État³¹, l'Agence nationale pour la recherche (ANR), etc., mobilisant services de l'État, chercheurs, Alliances de recherche (Ancre, Allenvi, etc.), agences de financements, etc. explorent les questions de santé/environnement, de changement climatique, de l'amélioration de l'usage des ressources naturelles et de la gouvernance du changement. Ces programmes s'articulent principalement autour de 2 axes :

- **l'amélioration de l'observation** : climat, biodiversité, océans, sols, eaux douces, air, etc. ; le développement des applications satellitaires (programme Copernicus, etc.) entre dans ce domaine ;
- **la consolidation de la connaissance des mécanismes en jeu** : perturbateurs endocriniens, pesticides, effets cocktails, OGM, qualité de l'air, etc.

Les résultats attendus doivent permettre d'éclairer les citoyens dans leur choix, les décideurs dans la définition des orientations du monde de demain.

Si la recherche contribue à aider à la prise de décision, elle participe également à l'information du citoyen.

²⁹ Site internet du Giec : http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml

³⁰ Programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 : <http://www.horizon2020.gouv.fr/>

³¹ Medde-CGDD-DRI, 2013. – *La recherche en appui aux politiques du Medde : les programmes du Service de la Recherche* – 51 p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-recherche-en-appui-aux_32845.html

L'émergence d'aperçus synthétiques des pressions exercées sur l'environnement

L'accroissement de la mondialisation de la production et de la diffusion des biens et services rend de plus en plus difficile l'appréhension globale des impacts environnementaux des activités économiques à l'échelle planétaire. C'est ce que visent à apprécier les indicateurs dits « **d'empreinte environnementale de la consommation** ». Ils ont notamment pour objet de sensibiliser les populations concernées sur les conséquences environnementales, à la fois directes et indirectes de leurs comportements de consommation ou plus généralement, de leurs modes de vie : consommation de biens et services, utilisation d'équipements et d'infrastructures, etc.

La notion d'empreinte, appliquée aux pressions des activités humaines sur l'environnement, s'inspire de l'**empreinte écologique** promue par le *Global Footprint Network* (GFN). Cet indicateur traduit les pressions environnementales associées à la consommation directe et indirecte de biens et de services d'une région ou d'un pays donné, en ramenant cette dernière à la quantité de surfaces biologiquement productives (dites *bio-productives*) nécessaires pour régénérer les ressources mobilisées et assimiler les déchets générés pour produire les composantes de ladite consommation. Ces surfaces sont normalisées sur la base d'une productivité (biologique) moyenne mondiale dont chaque unité est appelée « *hectare global* ». L'empreinte écologique est ensuite comparée à la capacité biologique mobilisable (dite *bio-capacité*) du territoire de la population en question. L'empreinte écologique connaît un certain succès grâce à des messages emblématiques communiquant sur ses principaux résultats : ainsi, selon cette approche, si l'ensemble

ZOOM SUR...

Le programme européen d'observation de la Terre Copernicus

Anciennement GMES et doté d'un budget de 4,3 milliards d'euros sur sept ans, le programme Copernicus comprend une composante spatiale coordonnée par l'Agence spatiale européenne avec des contributions d'EUMETSAT, et une composante dite « *in situ* » (données de terrain) coordonnée par l'Agence européenne pour l'environnement. Copernicus vise à construire des services délivrant des produits élaborés de surveillance des milieux au bénéfice des politiques environnementales et des citoyens, s'appuyant sur les avancées consolidées de la recherche. Il inclut 6 missions satellitaires (les Sentinelles), qui permettront d'observer les territoires, l'océan, l'atmosphère et le changement climatique, mais également de répondre à des situations d'urgence ou des besoins de sécurité. Un

exemple de réalisation est la fourniture régulière de couches d'occupation du sol à grande échelle venant préciser la base Corine Land Cover sur les zones à fort enjeu (urbain, zones rivulaires, Natura 2000). La France est activement impliquée via le plan d'applications satellitaires du Medde et le programme de recherche Copernicus-MDD, afin notamment de promouvoir le développement d'applications et l'émergence de nouveaux usages.

Sites internet utiles

- www.copernicus.eu/ (EN)
- www.developpement-durable.gouv.fr/Le-plan-d-applications.html (FR)

de la population mondiale vivait comme les nord-américains ou les Européens, il faudrait l'équivalent de plusieurs planètes Terre pour fournir les ressources suffisantes, ce qui sous-entend que la consommation de la population mondiale entraîne un dépassement des capacités biologiques annuelles de la Terre. En d'autres termes, il faut désormais plus d'une année à la Terre pour régénérer les ressources renouvelables consommées par les êtres humains en une année et absorber le CO₂ émis dans le même temps.

Cet indicateur a fait l'objet de nombreuses critiques d'ordre méthodologique³², notamment :

- l'assimilation d'hectares fictifs – hectares globaux – aux hectares réels ;
- l'absence de bio-capacité face à la composante carbone ;
- la différence de périmètre entre bio-capacité et empreinte, le territoire national pour l'une, la consommation intérieure quel que soit le lieu de sa production pour l'autre.

Plusieurs catégories d'empreintes portant chacune sur un seul domaine environnemental sont en cours de développement : les **émissions de gaz à effet de serre** (voir chap. « Atmosphère », p. 94), **l'utilisation d'énergie**³³, **l'utilisation d'eau** (voir chap. « Ressources en eau », p. 172), la **mobilisation de matières** : biomasse, métaux, minéraux, combustibles fossiles (voir chap. « Ressources », p. 160). On parle ainsi d'empreinte « carbone », d'empreinte « eau », d'empreinte « matières », etc. L'approche en termes d'empreinte n'exclut *a priori* aucun domaine environnemental ; cependant, son élaboration peut être bloquée par l'indisponibilité des données, ainsi que par l'impossibilité de relier les pressions environnementales concernées à la consommation des biens et services.

Dans chacun des domaines concernés, le calcul de l'empreinte vise à traduire l'ensemble des pressions exercées sur l'environnement en relation avec la consommation de biens et services, que ces pressions soient directement exercées par les ménages, ou bien indirectement, par les établissements industriels, commerciaux et administratifs qui produisent en France ou à l'étranger les biens et services destinés à la demande intérieure (hors exportations). En d'autres termes, **chacune des empreintes environnementales couvre, dans son domaine, les pressions exercées sur le territoire français plus celles qui sont exercées à l'étranger pour la production des biens et services importés en France, desquelles sont déduites les pressions exercées en France pour la production destinée à l'exportation.**

Ces indicateurs constituent par conséquent un complément précieux de l'information statistique traditionnelle dont le périmètre est le territoire sur lequel réside la population étudiée.

³² Boisvert V., « L'empreinte écologique : un indicateur de développement durable ? », in Maréchal J.-P., Quenault B., 2005. – *Le développement durable, Une perspective pour le 21^e siècle* – Rennes : Presses Universitaires de Rennes – pp. 165-183.

Blanc I., Corbière-Nicollier T., Erkan S., Pigué F.-P., 2007. – « L'empreinte écologique : un indicateur ambigu », *Futuribles*, n° 334 – pp. 5-24.
Medde-CGDD-SOEs, 2010. – *Une expertise de l'empreinte écologique* – Paris : SOEs – 74 p. (coll. Études & documents, n°16). <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/142/1332/expertise-lempreinte-ecologique.html>

³³ Pourouchottamin P., Barbier C., Chancel, Colombier M., 2013. – « Nouvelles représentations des consommations d'énergie », *Les cahiers du Club d'Ingénierie Prospective Énergie et Environnement (CLIP)*, n° 22, avril 2013 – 82 p. <http://www.iddri.org/Publications/Nouvelles-representations-des-consommations-d-energie>

Ils permettent notamment de tenir compte de l'approvisionnement de cette population à l'extérieur de son territoire et de ses conséquences en termes environnementaux. En outre, les indicateurs de la famille des empreintes environnementales participent de la recherche d'une juste appréciation de la responsabilité des pressions anthropiques exercées sur l'environnement et les ressources naturelles à l'échelle mondiale. Ils soulignent d'ailleurs, à cet égard, l'interdépendance des différentes populations de la communauté internationale dans la gestion des ressources, notion présente au cœur même de la définition de développement durable.

Vers une meilleure connaissance des inégalités environnementales

L'inégalité environnementale est définie comme une inégalité d'exposition à des risques, pollutions et nuisances, et une inégalité d'accès à des aménités environnementales, en précisant que les aménités et nuisances sont relatives à des cultures et des groupes sociaux (source : Laigle, 2004). Ce concept exprime l'idée que les populations ne sont pas égales face aux pollutions, aux nuisances et aux risques environnementaux. Ces inégalités s'opèrent à différentes échelles (globale, régionale, locale) et ne s'appréhendent pas par l'étude d'un seul milieu.

Pour les substances chimiques par exemple, la caractérisation passe par l'intégration de l'ensemble des voies d'exposition (inhalation, ingestion, voie cutanée) d'une part et de données de nature variée sur l'air, l'eau, les sols et l'alimentation d'autre part. De plus, les facteurs de risques environnementaux sont multiples. Ainsi, à la potentielle surexposition aux substances chimiques sur un territoire, s'ajoutent celles liées au bruit, aux nuisances olfactives, aux facteurs physiques ou microbiologiques, d'origines anthropique ou naturelle.

Le constat des inégalités environnementales et l'intégration de la thématique dans les politiques publiques nécessitent la construction d'outils de diagnostic pour détecter les points noirs environnementaux et orienter les mesures de gestion permettant de contrôler ou de réduire les expositions en vue de garantir un niveau de « dégradation » et de risque non préoccupant.

• L'élaboration d'une plate-forme d'analyse des inégalités environnementales

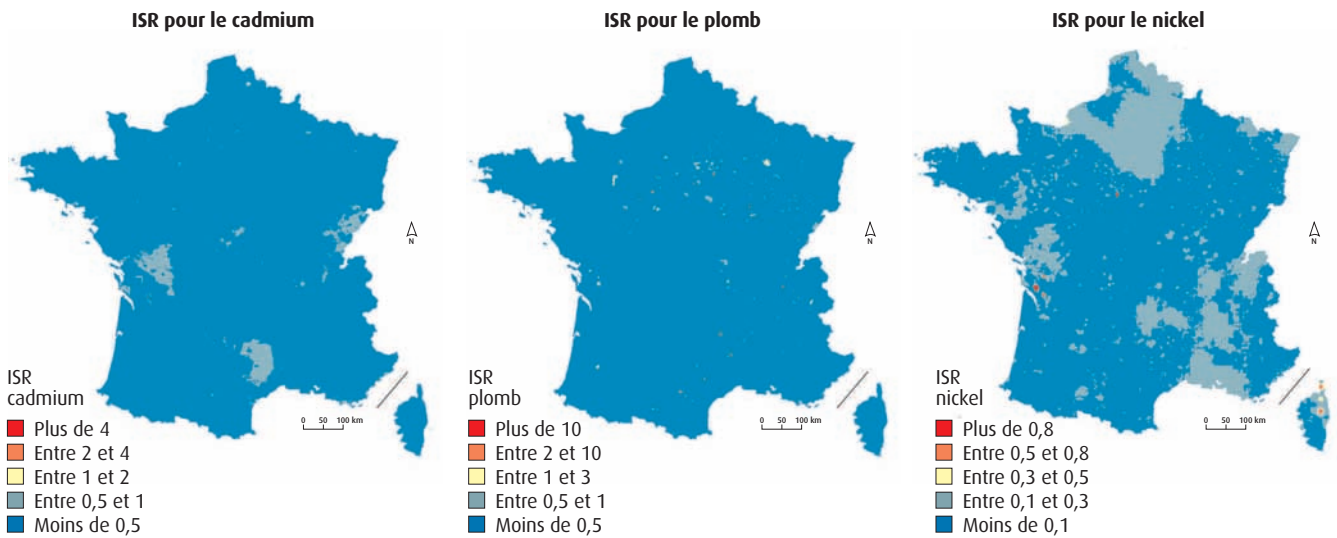
L'Ineris a conduit des travaux de recherche pour construire un outil d'aide à la décision (**Plate-forme intégrée pour l'Analyse des INégalités Environnementales d'exposition - PLAINE**) capable d'évaluer et de représenter les expositions au niveau régional, grâce à l'intégration de données de nature différente (sanitaires, environnementales, socioéconomiques). Au niveau national, cet outil vise à fournir aux pouvoirs publics une méthode robuste et cohérente pour identifier et hiérarchiser les points noirs environnementaux. Au niveau régional, il s'agit de mettre à disposition des éléments de hiérarchisation des éventuelles mesures de gestion à déployer localement.

Les premiers enseignements : le cas de l'exposition aux éléments traces métalliques

Quatre éléments traces métalliques (ETM) ont été étudiés spécifiquement sur l'ensemble de la France : le nickel, le cadmium, le chrome et le plomb. Un atlas a été réalisé par région en intégrant, pour chacun des 4 ETM, des données relatives aux contaminations des milieux (eau, air, sol), aux doses journalières d'exposition, les indicateurs spatialisés du risque (agrégation de l'exposition liée à l'inhalation et l'ingestion). Les résultats permettent d'identifier des zones de potentiellement surexposées et d'analyser les déterminants de l'exposition (Figure 2).

Ils mettent en évidence l'influence d'une série complexe de facteurs démographiques, comportementaux et environnementaux qui varient dans l'espace et interagissent avec les différentes échelles spatiales. **Pour l'ensemble des polluants, la classe d'âge la plus vulnérable est systématiquement celle des 2 à 7 ans.** Les voies d'exposition prépondérantes correspondent, selon les régions, à l'ingestion d'eau de consommation et de sol pour le plomb, de légumes pour le cadmium et à l'inhalation pour le nickel. L'importance des comportements d'autoconsommation, comme facteur d'exposition, à un polluant a été mise en évidence.

Figure 2 : indicateurs spatialisés relatifs (ISR) pour le cadmium, le plomb et le nickel



Note : carte composite construite à partir de données de qualité de l'air (Ineris), de sol (© Inra, Unité Infosol, Orléans, 2012) et d'eau de consommation (ministère chargé de la Santé - ARS - Sise-Eaux).

Source : Ineris.

DONNÉES OU MÉTHODOLOGIE

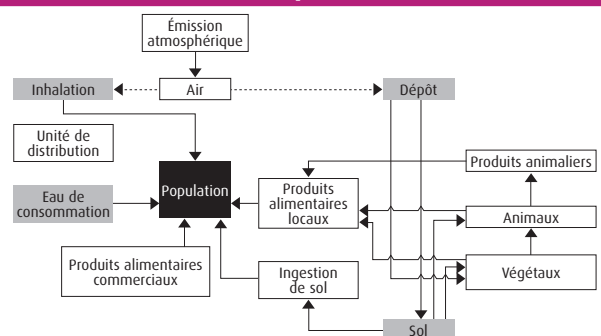
Cadre du modèle d'exposition

Un modèle est utilisé pour déterminer les doses d'exposition et les indicateurs d'exposition des populations cibles liés à l'ingestion de produits d'alimentation, d'eau de consommation et à l'inhalation de contaminants atmosphériques (Figure 3). Pour les différents ETM, les concentrations dans les compartiments environnementaux sont déterminées dans la plate-forme PLAINÉ :

- pour les dépôts et les concentrations atmosphériques, à partir de la modélisation de la dispersion des rejets atmosphériques réalisée avec le modèle Chimere mobilisant les registres d'émissions des bases de données Emep (European Monitoring and Evaluation Programme) et TNO (National and regional emission monitoring) ;
- les concentrations dans les eaux de consommation à partir de la spatialisation des données de la base Sise-Eaux gérée par les agences régionales de santé ;
- les concentrations initiales dans les sols à partir des données de concentration d'ETM dans les horizons de surface de sol issues de la collecte de la BD ETM (programme Inra-Ademe). Des scénarios d'exposition sont construits de manière à

caractériser des groupes de référent (classe d'âge, localisation, comportement alimentaire, durée d'exposition, etc.). La construction d'ISR à travers la sommation des expositions associées à la fois aux voies d'ingestion et d'inhalation permet la combinaison et la comparaison des contributions des voies d'exposition d'inhalation et d'ingestion.

Figure 3 : voies d'exposition et transferts pris en compte dans le modèle pour le calcul des cartes d'exposition aux ETM



• Croisement des expositions avec les données socio-économiques

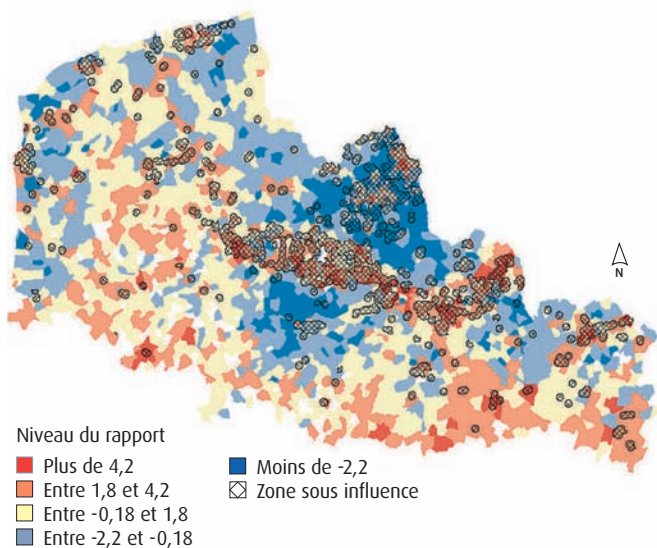
L'outil PLAINE permet de quantifier les relations spatiales entre les indicateurs environnementaux, sanitaires et d'exposition (proximité aux sources, bio-marqueurs d'exposition, indicateurs de défaveurs sociales, données de santé).

Dans le cadre d'une étude de « justice environnementale », un premier développement méthodologique a permis de croiser l'exposition des populations aux particules atmosphériques avec les indicateurs socio-économiques classiques (Townsend et Cartairs). Ces travaux ont permis de contribuer activement à ceux de l'OMS sur les indicateurs d'inégalité environnementale de santé.

En collaboration avec le laboratoire Espace, santé et territoires de l'université de Nanterre, des indicateurs « distance à la source » aux sites potentiellement dangereux de la base Basias ont été construits pour être croisés avec de nouveaux types d'indicateurs de défaveur (FDep08), plus robustes aux échelles régionales, construits initialement par l'Inserm. Ils intègrent quatre variables du recensement de l'Insee : le revenu des ménages, le taux de chômage, la part des diplômés et la part d'ouvriers dans la population active. Ces travaux ont permis de construire une méthodologie d'analyse des liens entre distribution géographique des risques environnementaux et situation socio-économique des populations exposées.

La superposition de l'indicateur du FDep08 aux zones sous influence d'un site potentiellement dangereux permet de visualiser l'ensemble des situations rencontrées : proximité/non proximité Versus favorisé/défavorisé. La comparaison des distributions des indices de défaveur des populations vivant à proximité d'un site aux autres populations permet de caractériser les associations spatiales entre ces deux variables. Par exemple,

Figure 4 : croisement des indicateurs de défaveurs sociales et environnementales en région Nord - Pas-de-Calais



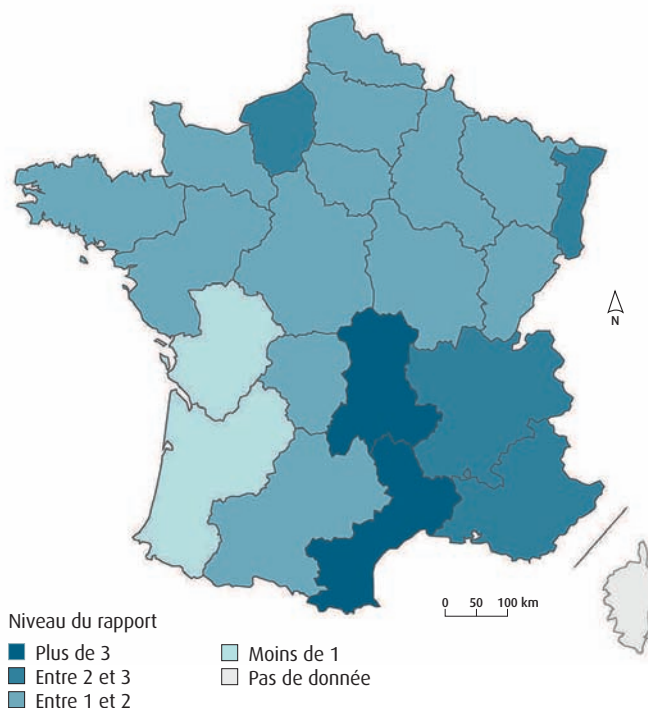
Notes de lecture :
 Distance à la source des sites potentiellement dangereux de la base Basias prise en compte : 1 km autour des sites.
 FDep08 : plus l'indicateur est élevé (rouge), plus l'indicateur socio-économique est défavorable.

Source : Ineris.

en région Nord - Pas-de-Calais, 60,1 % de la population vit à proximité d'un site à risque. Parmi elle, 17 % vit dans des zones les plus avantagées (zones où la part de la population appartenant au 5e quintile est inférieure à celle appartenant au 1er quintile) et 25 % dans les zones les plus désavantagées (Figure 4).

Au niveau régional, il apparaît que les populations défavorisées sont plus nombreuses à vivre à proximité d'une industrie polluante que les autres (Figure 5), même si cette relation n'est pas systématique aux échelles locales. Ainsi, au niveau national, le ratio de la proportion de la population vivant à proximité d'une industrie polluante incluse dans le 5e quintile (population défavorisée) et de celle incluse dans le 1er quintile (population favorisée) est égal à 1,5.

Figures 5 : croisement des indicateurs de défaveurs sociales et environnementales (niveau national)



Note : agrégation au niveau régional du rapport de la proportion entre le 5^e quintile (population défavorisée) et le 1^{er} quintile (population favorisée) de l'indicateur de défaveur vivant à moins de 1 km d'un site potentiellement dangereux. Plus l'indicateur est élevé, plus la part de population défavorisée vivant à proximité des sites potentiellement dangereux, par rapport aux populations favorisées, est élevée.

Source : Ineris.

Cette méthodologie sera déclinée sur les autres indicateurs environnementaux construits dans PLAINE mais également sur des indicateurs d'aménité environnementale.

Aucune méthodologie ne permet à ce jour d'intégrer dans les approches cartographiques les effets synergiques ou antagonistes à l'exposition de plusieurs substances (effet cocktail) ou de plusieurs facteurs de risque (pour lesquels il n'existe pas toujours de consensus scientifique sur les relations entre exposition et effets sur la santé). Toutefois, des approches plus pragmatiques peuvent être adoptées pour orienter des mesures de gestion à travers la construction d'indicateurs composites.

L'enrichissement de la connaissance dans le champ santé-environnement

Depuis le milieu du siècle dernier, le nombre et le volume de substances produites par l'Homme ont considérablement augmenté et celles-ci contaminent de manière diffuse l'ensemble de l'environnement (voir chap. « Milieux », p. 45). Ce phénomène s'observe d'autant mieux que, dans le même laps de temps, les techniques analytiques se sont considérablement développées. Les molécules sont maintenant détectées couramment à des niveaux de concentration qui se mesurent en millièmes de milliardième. D'autre part, la prévalence de pathologies chroniques (cancers hormonaux dépendants, allergies, baisse de fécondité) s'accroît, dont une partie significative pourrait avoir une origine environnementale. Selon l'OMS en 2006, « jusqu'à 24 % des maladies dans le monde sont causés par des expositions environnementales qui peuvent être évitées ». À cela, s'ajoutent des questions liées à l'apparition de nouvelles technologies (nanomatériaux et ondes électromagnétiques). La population est désormais exposée à divers agents : chimiques, biologiques, physiques – (voir chap. « Risques environnementaux chroniques », p. 230).

Dans le cadre de ses missions, l'InVS met en œuvre des méthodes, dispositifs et outils permettant d'apprécier l'impact sanitaire de certains facteurs de risques environnementaux avérés ou suspectés. Par exemple, les résultats de l'étude menée par l'InVS à partir des données de la base Fivnat confirment à l'échelle de l'ensemble de la France métropolitaine une baisse de la qualité du sperme : pour un homme de 35 ans, sur la période 1989-2005, le nombre de spermatozoïdes est passé de 73,6 millions/ml à 49,9 millions/ml en moyenne. Les hypothèses évoquées pour expliquer ce résultat comprennent en particulier l'interaction avec l'environnement et le rôle possible des perturbateurs endocriniens. D'autres facteurs comme l'augmentation de poids, le stress ou la sédentarité pourraient également jouer un rôle dans cette baisse de la qualité spermatique. Le 14 avril 2014, l'InVS a lancé une étude portant sur l'environnement, l'alimentation, l'activité physique et sur des maladies chroniques fréquentes (étude Esteban³⁴). Dans le prolongement de l'étude ENNS (voir chap. « Exposition aux risques environnementaux chroniques », p. 231), l'étude Esteban permettra de mesurer l'exposition de la population aux substances chimiques.

L'enjeu des recherches en santé-environnement est de produire des connaissances utilisables par les personnes chargées d'évaluer le risque et de prendre des mesures pour le minimiser. L'Anses mène un travail d'évaluation des risques en faisant appel à près de huit cents experts extérieurs qui s'appuient sur les connaissances disponibles. Ces connaissances se construisent dans la durée, souvent dans la controverse, et le savoir émerge souvent d'un ensemble de projets, après une période d'incertitude plus ou moins longue. Les grandes catégories d'activité de recherche portent sur :

- l'exposition de la population : mesures dans l'eau, l'air, le sol, les aliments, et compréhension des facteurs déterminant ces expositions ;
- les relations dose-réponse : modèles *in vivo* ou *in vitro*, recherche d'effets en comparant des populations exposées ou non, modélisation ;

- le développement d'outils de gestion du risque : méthodes de mesures, modèles permettant de prédire un risque ou un danger, méthodes de substitution ;
- des études d'impact des activités humaines sur les écosystèmes.

Bien que les conséquences sur la santé des populations des modifications de l'environnement, qu'elles soient d'origines naturelles ou anthropiques, accidentelles ou chroniques, puissent être importantes, quelques particularités en compliquent l'étude :

- les pathologies auxquelles contribuent les expositions environnementales sont fréquemment multifactorielles ;
- les expositions peuvent être multi-produits, multivoies et multirisques ;
- les expositions sont souvent faibles mais chroniques, et concernent souvent une large part, voire la totalité, de la population ;
- les latences entre les expositions et les effets sanitaires sont grandes ;
- les relations entre les expositions et les effets sur la santé sont faibles et difficiles à mettre en évidence mais la part attribuable à l'environnement de nombreuses pathologies est compensée par le fait que la prévalence de l'exposition est élevée, voire généralisée.

Quelques centaines de projets sont menés au sein des laboratoires, sur la thématique santé environnement. Souvent pluridisciplinaires, ils couvrent une large gamme d'agents (biologiques, chimique ou physique), de milieux (air, eau, sol, alimentation), de pathologies pouvant affecter l'Homme (maladies infectieuses, cancer, diabète, etc.). De plus en plus, il s'agit d'une recherche pluridisciplinaire qui s'appuie sur des techniques sophistiquées, telle que les « omiques » (en particulier l'étude des gènes et de leur réponse à une agression), et des consortiums de laboratoires mettant en commun des compétences variées.

• Les polluants chimiques et particuliers dans l'air

L'évaluation de l'impact de la pollution de l'air dans 9 villes françaises représentant 12 millions d'habitants a montré que 4 à 8 mois d'espérance de vie pourraient être gagnés si les niveaux moyens annuels de particules fines PM_{2,5} (particules de diamètre inférieur à 2,5 micromètres) étaient ramenés au seuil de 10 microgrammes/m³, valeur-guide préconisée par l'OMS. Depuis les années 1990, des études épidémiologiques ont établi des corrélations entre les niveaux de pollution atmosphérique et des effets sur la santé tels que maladies respiratoires et cardio-vasculaires. En 2012, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a classé les particules diesel comme cancérigènes certains pour l'Homme et, en 2013, il en a fait de même pour la pollution atmosphérique. De nombreux projets de recherche couvrent cette thématique.

Concernant l'**air extérieur** (en dehors des bâtiments) – (voir chap. « Air extérieur », p. 99), les travaux s'orientent vers des méthodes permettant de mieux caractériser la pollution qui est un mélange complexe de gaz et de particules (de quoi est-elle faite, y a-t-il une mesure de sa dangerosité ?) ou vers des activités de modélisation des concentrations de polluants (comment calculer l'exposition de la population ?).

³⁴ Étude de Santé sur l'Environnement, la Biosurveillance, l'Activité physique et la Nutrition : <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Esteban>

Concernant l'air intérieur (air à l'intérieur de bâtiments d'habitation ou d'établissements recevant du public ou à usage professionnel) – (voir chap. « Air intérieur », p. 116), outre la pollution issue de l'air extérieur s'y ajoutent d'autres sources spécifiques d'émission faisant l'objet de projets de recherche (produits de nettoyage, composés organiques volatils, perturbateurs endocriniens adsorbés sur les poussières).

Ces projets ont parfois un objectif explicite d'aide à la gestion des risques visant à une meilleure connaissance des expositions et de leur source pour optimiser la gestion du risque.

Ces travaux s'appuient sur des études épidémiologiques couplées à des mesures d'exposition. Ils visent à étudier les relations d'association entre la pollution de l'air et des effets sanitaires observés chez une population donnée, comme par exemple, l'asthme, la survenue de cancers chez l'enfant ou les conséquences que pourraient avoir l'exposition de la mère sur le fœtus.

Un autre sujet d'actualité est la question des inégalités « environnementales » devant cette pollution afin d'évaluer par exemple des cofacteurs d'influence du lieu de résidence (voir chap. « Inégalités environnementales », p. 245).

Les études épidémiologiques qui mettent en évidence des associations entre expositions et effets, doivent nécessairement être complétées par des travaux mettant directement en exergue

un effet pour, si possible, expliciter le mécanisme d'action du contaminant incriminé. Il s'agit alors d'exposer des cultures de cellules représentatives par exemple des bronches ou des poumons ou des modèles animaux à de l'air pollué et d'observer leur réaction par des techniques variées.

• Les pesticides

En juillet 2013, l'Inserm a publié un rapport d'expertise collective visant les effets des pesticides sur la santé humaine. Ce rapport, qui s'appuie sur la littérature scientifique, fait état de présomptions fortes de liens d'associations entre l'exposition à certaines substances et la survenue de certaines pathologies comme certains types de cancers et la maladie de Parkinson.

L'étude de l'alimentation totale (EAT2)³⁵ conduite par l'Anses consiste à doser diverses substances dans un vaste échantillon de nourriture. D'autres travaux sont consacrés à la modélisation de ces expositions (par exemple en fonction des activités professionnelles ou du lieu de résidence). Une autre méthode consiste

³⁵ Rubrique EAT 2 du site internet de l'Anses : <https://www.anses.fr/fr/content/etude-de-l-e2%80%99alimentation-totale-eat-2-l-e2%80%99anses-met-%C3%A0-disposition-les-donn%C3%A9es-de-son-analyse>

Tableau 1 : produits chimiques préoccupants en tant que perturbateurs endocriniens et effets démontrés sur la santé humaine et/ou sur la faune

| Produits chimiques préoccupants | Examinés au regard des effets... | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|--------------|------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|----------|------------|----------|---------|------------|
| | ... sur la santé humaine | | | | | | | | | | | ... sur la faune | | | | | | | |
| | Santé reproductive mâle | Puberté féminine précoce | Fécondité féminine | Syndrome des ovaires polykystiques | Fertilité féminine | Endométriose | Fibromes utérins | Cancer du sein | Cancer de la prostate | Cancer des testicules | Cancer de la thyroïde | Neurotoxicité développementale | Syndrome métabolique | Invertébrés | Poissons | Amphibiens | Reptiles | Oiseaux | Mammifères |
| Biphénylpolychlorés (PCB) Polychlorobenzodioxines (PCDD) Polychlorodibenzofuranes (PCDF) | X | X | X | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| Polybromodiphényléthers (PBDE) | X | X | | | | | | | X | | X | X | | | | X | | X | X |
| Composés perfluorés (PFC) | | | X | | | | | | | | X | X | | X | X | | | X | |
| Dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) Dichlorodiphényldichloroéthylène (DDE) | X | X | X | | X | X | X | X | X | X | | X | X | | X | X | X | X | X |
| Autres pesticides organochlorés | X | | X | | X | X | | X | | X | X | X | X | | X | X | X | X | X |
| Pesticides organophosphorés | | | | | X | | | | X | | X | | | | X | X | | | |
| Pesticides carbamates | | | | | X | | | | X | | X | | | X | X | | | | |
| Pesticides azolés | X | | | | | | | | | | X | | | | | | | | |
| Pesticides pyréthrinoïdes | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | |
| Herbicides triazines | | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X | |
| Autres pesticides | X | | X | | X | | | | X | | X | X | | X | X | X | | X | |
| Métaux lourds | X | X | X | | X | | | X | X | | | X | | | | | | X | X |
| Alkylphénols, Bisphenol A (BPA), parabènes | | X | | X | X | X | | X | | | X | X | X | X | X | X | X | | |
| Phtalates | X | X | | | X | X | X | | | X | | X | X | | X | X | | | |
| Oestrogènes pharmaceutiques | X | | | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | |
| Phyto-oestrogènes | | X | X | | | X | X | X | X | | X | X | | | | | | X | |
| Organoétains | | | | | | | | | | | | | X | X | X | | | | |

Source : rapport Kortenkamp de 2011.

à effectuer directement des dosages dans des prélèvements biologiques, ce qui permet d'évaluer l'imprégnation de la population par des substances issues de pesticides.

Il s'agit d'étudier les relations d'association entre les expositions de groupes de population spécifiques (notamment les travailleurs agricoles) avec l'apparition de pathologies. Suivant le but recherché et la méthode employée, les effectifs suivis varient entre des centaines et des centaines de milliers d'individus (étude Phytoneer (recherche de troubles neuro-comportementaux), travaux sur le cancer, études sur les effets d'une exposition durant la grossesse, sur la santé respiratoire, etc.).

D'autres travaux portent sur les effets des pesticides sur des modèles *in vivo* ou *in vitro* ou visent à rechercher des biomarqueurs d'exposition ou d'un effet des pesticides (projets recherchant des mécanismes qui endommagent l'ADN, les effets sur développement du fœtus ou la descendance, les effets de mélanges sur les cellules, de mécanisme conduisant à un cancer de la prostate).

• Les perturbateurs endocriniens

Dans les populations des pays développés, la prévalence de certaines pathologies chroniques, dont la survenue ne peut s'expliquer par le seul vieillissement, est en forte augmentation. C'est notamment le cas des cancers « hormono-dépendants » (sein, testicule, prostate), des perturbations affectant l'appareil reproducteur masculin, le diabète et l'obésité. Cette augmentation soulève la question des effets potentiels de perturbateurs endocriniens, qui font l'objet de recherches intensives (Tableau 1). De nombreux travaux portent sur des modèles animaux ou des cultures de cellules exposées à ces molécules. Ces recherches peuvent également avoir pour but de déterminer l'exposition à une substance donnée de groupes de populations (saines ou atteintes de la pathologie étudiée) et leurs effets :

- effets sur la reproduction (baisse de la qualité du sperme, malformations de l'appareil génital) ;
- cancer « hormono-dépendants » : prostate, sein, testicule. Ces projets étudient le lien entre ces cancers et des expositions à des substances soupçonnées d'être des perturbateurs endocriniens (études cas-témoins) ;
- maladies métaboliques (diabète, obésité) : ces molécules pourraient affecter le métabolisme (après une exposition fœtale ou à d'autres stades de la vie) et être à l'origine d'obésité ou de diabète. Cette question est abordée à travers des études *in vivo* et *in vitro* mais aussi à travers l'analyse de l'imprégnation de la population ;

Des troubles liés au développement du système nerveux sont également traités (modification du comportement des animaux mâles, retard du développement). Ces recherches spécifiques sont accompagnées de travaux plus génériques sur les effets de ces substances, par exemple le fait qu'elles pourraient « programmer » le fœtus de telle sorte qu'une maladie chronique apparaîtrait des décennies plus tard, avoir des effets trans-générationnels « marquant » le génome de la descendance (on parle de modifications épigénétiques). D'autres portent sur des recherches d'effets plus spécifiques d'une molécule donnée (comme la chlordécone), ou d'un mélange de substances chimiques, ce qui correspond à la situation réelle d'exposition de la population, des études sur les mécanismes d'action.

Une partie de ces substances chimiques se retrouve dans l'environnement. Divers projets visent à mieux comprendre leur

dissémination ou leurs effets sur les écosystèmes notamment en étudiant les effets de diverses molécules sur des espèces aquatiques. Parmi les effets avérés des troubles de la reproduction observés sur diverses espèces animales, voire des anomalies telles que féminisation des poissons mâles (par exemple présence d'ovocytes dans les testicules), l'amincissement des coquilles des œufs de certains oiseaux.

• Les nanoparticules

Les nanomatériaux font l'objet de nombreux usages : noir de carbone (pneus), carbone (matériaux sportifs, hardware), dioxyde de titane (peintures, crème solaire), nano-argent (vêtements, emballages alimentaires), nano-silice (pneus, dentifrice), etc. L'évaluation des risques potentiels de ces substances sur la santé et l'environnement est encore très incomplète (voir chap. « Exposition aux risques environnementaux chroniques », p. 233). Les travaux sur la toxicité des nanoparticules manufacturées ont crû à partir du début des années 2000. Ils portent surtout sur les espèces de particules les plus répandues comme les nanotubes de carbone, le dioxyde de titane, le noir de carbone, la silice, mais aussi sur des nanoparticules destinées à des applications médicales. Une difficulté de ce sujet est la grande variabilité des particules en fonction du procédé de fabrication voire de leur histoire, ce qui rend les travaux parfois difficilement comparables. Progressivement des projets apparaissent, qui réunissent des consortiums internationaux de laboratoires capables de déployer une vaste gamme de techniques notamment pour caractériser les nanoparticules.

Contrairement aux particules de plus grandes tailles, **les nanoparticules peuvent franchir les barrières naturelles de la peau et des autres épithéliums qui protègent l'organisme, atteindre et pénétrer dans divers organes cibles.** L'étude de cette mobilité fait l'objet de nombreux travaux, lors desquels on suit les nanoparticules (en les rendant fluorescentes ou radioactives). Dans la plupart des cas, c'est la barrière air-sang dans le poumon qui est étudiée (cas des nanoparticules inhalées) mais d'autres travaux portent sur la bouche ou l'intestin (cas des particules ingérées) ou la barrière placentaire.

Diverses études *in vivo* visent à chercher des effets de nanoparticules sur des tissus et organes tels que le poumon, l'intestin, le rein, le système immunitaire, le système nerveux, les organes reproducteurs. D'autres, *in vitro*, portent sur les mécanismes d'actions des nanoparticules sur diverses lignées cellulaires.

La métrologie des particules dans l'environnement (elles sont multiformes, très diluées et mélangées à de nombreuses particules naturelles), leur transformation, leur interaction avec les écosystèmes sont également étudiées pour évaluer leur devenir dans l'environnement.

Quelques projets visent enfin à acquérir des connaissances sur les mécanismes gouvernant l'exposition (relargage des nanomatériaux dans l'environnement en cas d'abrasion, de combustion, efficacité des protections, exposition des travailleurs). Il existe également des recherches visant à identifier des marqueurs d'exposition qui permettraient de connaître l'exposition d'une personne à partir d'une analyse biologique. Il faut également noter que divers projets traitent la question de la pollution de l'air par des nanoparticules issues de combustion (bois, charbon, carburant de moteurs diesel, etc.).

Pour en savoir plus...

Bibliographie

- Afsset, 2010. – Les nanomatériaux : évaluation des risques liés aux nanomatériaux pour la population générale et pour l'environnement (*Avis et rapport d'expertise collective*) – Maisons-Alfort : Afsset – 207 p. (<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/104000168/0000.pdf>)
- Agence Nationale de la Recherche, 2012. – Contaminants et environnements : constater, diffuser, décider – 159 p. (coll. *Les cahiers de l'ANR*, n°6, Décembre 2012). (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/consulter/contaminants-et-environnements-constater-diffuser-decider-cahier-anr-n6-decembre-2012>)
- Anses, 2014. Évaluation des risques liés aux nanomatériaux : enjeux et mise à jour des connaissances (*Avis et rapport d'expertise collective*) – 180 p. (<http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2012sa0273Ra.pdf>)
- Anses, Medde, 2012. – Les perturbateurs endocriniens en 12 projets : comprendre ou en est la recherche (PNRPE) – 51 p. (<http://www.anses.fr/fr/documents/CDLR-mg-PNRPE2012.pdf>)
- Assemblée nationale, 2014. – Rapport d'information déposé par la commission des affaires européennes de l'Assemblée nationale le 25 février 2014 sur la stratégie européenne en matières de perturbateurs endocriniens (n°1828, présenté par Jean-Louis Roumegas) – 150 p. (http://www.assemblee-nationale.fr/14/europe/rap-info/i1828.asp?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=perturbateurs-endocriniens-rapport-dinformation-de-la-commission-des-affaires-europeennes)
- Boutaud A., Gondran N., 2009. – L'empreinte écologique – Paris : Ed. La Découverte – 122 p. (coll. *Repères*, n° 527).
- Caudeville J, Bonnard R, Boudet C, et al., 2012. – « Development of a spatial stochastic multimedia exposure model to assess population exposure at a regional scale », *Science of the Total Environment*, vol.432, août 2012 – pp.297-308. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712008133>)
- Galli A., Wiedmann T., Ercinc E., et al., 2012. – « Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a « Footprint Family » of indicators : Definition and role in tracking human pressure on the planet », *Ecological Indicators*, vol.16 – pp.100-112.
- Haut Conseil de la santé publique, 2013. – Évaluation du 2^e Plan national Santé-Environnement – Paris : HCSP – 268 p. (coll. *Evaluation*). (<http://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=375>)
- Inserm, 2013. – Pesticides : effets sur la sante - Synthèse et recommandations – 1014 p. (Coll. *Expertise collective*). (<http://www.inserm.fr/actualites/rubriques/actualites-societe/pesticides-effets-sur-la-sante-une-expertise-collective-de-l-inserm>)
- Kortenkamp A., Martin O. Faust M., Evans R., McKinlay R., 2012. – State of the art assessment of endocrine disrupters (*rapport final*) – 135 p. (http://ec.europa.eu/environment/chemicals/endocrine/pdf/sota_edc_final_report.pdf)
- Laigle L., 2005. – Les inégalités écologiques de la ville : caractérisation des situations et de l'action publique (*rapport intermédiaire de recherche, vol.1, programme « Politiques territoriales de développement durable, Recherche pour le PUCA - METATM*) – Paris : CSTB – 118 p. (<http://d2rt-gizc.univ-lille1.fr/documents/Laigle.pdf>)
- Medde-CGDD-Seeidd, 2012. – Rapport de la commission des comptes et de l'économie de l'environnement : Santé et qualité de l'air extérieur – Paris : Seeidd – 98 p. (coll. *Références*). (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_CCEE_sante_et_qualite_de_l_air_23_07_2012.pdf)
- Meeddm, ministère de la santé et des sports, ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, ministère du travail, des relations sociales, de la famille, de la solidarité et de la ville, 2010. – 2^e Plan national santé environnement 2009-2013 (PNSE 2) – 72 p. (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Plan-national-sante-environnement,15994>)
- Rey G., Jouglé E., Fouillet A., Hémon D., 2009. – « Ecological association between a deprivation index and mortality in France over the period 1997-2001: variations with spatial scale, degree of urbanicity, age, gender and cause of death », *BMC Public Health*, 22 janvier 2009, vol.9, n°33. (<http://www.biomedcentral.com/1471-2458/9/33>)
- Wiedmann T. O., Schandlb H., Lenzen M. et al., 2013 – « The material footprint of nations », *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS)*, août 2013 – 6 p. + Ann.
- World Health Organization-Regional Office of Europe, 2012. – Environmental health inequalities in Europe – Copenhagen : WHO Regional Office for Europe – 190 p. (<http://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-health-inequalities-in-europe.-assessment-report>)

Sites internet utiles

- Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) : www.anses.fr
- Carbon Footprint of Nations : <http://carbonfootprintofnations.com>
- Environmental Footprint Analysis. – United States Environmental Protection Agency : www.epa.gov/sustainability/analytics/environmental-footprint.htm
- Global Footprint Network : www.footprintnetwork.org
- Programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens : www.pnrpe.fr
- Le bulletin de veille scientifique – Anses : www.anses.fr/fr/content/le-bulletin-de-veille-scientifique-de-l-anses-bvs
- Water Footprint Network : www.waterfootprint.org